目录

杭州

杭州航区客运航线夜航安全风险评价研究 ..... 周鹏翔 1
基于高斯过程回归的船舶 DMCC 发动机整机性能优化 ..... 蒋更红[1] 才正[2] 7
新能源动力船舶推广应用的可行性研究 ..... 杨小江 18
基于 FMEA 的船员在船作业工伤风险识别与评估研究 .....李彦朝[1] 蒋海龙[2] 21
世界一流强港建设背景下浙江水运发展近期重点举措建议 .....
..... 周嘉男 吴建伟 刘冲 刘万锋 28
技工院校船舶轮机专业人才培养方向探索与实践——以杭州水上巴士校企合作订单班为例 ..... 陈金苗 陈东杰 32

宁波

船员职业压力与心理健康状况关系 ..... 毛旭东 徐秋艳 安天圣 孙武 徐天奇 38
“铭浩”轮进石浦港区的可行性探讨.....周俊杰[1]马春华[2]郑浩亮[1]任明星[1] 42
中国船舶交易市场现状及发展建议 ..... 王泽波 49
重载船舶靠泊时突发主机故障的应急处置 ..... 宋 伟 潘国华 56
浅谈 EXCEL 函数在航海工作中的应用 ..... 叶高扬 黄起栋 蒋鑫荣 60
宁波舟山港 3#警戒区航行风险与航法优化建议 .....刘斌 谢哲学 陈利忠 65
关于油水分离器典型缺陷的分析与处理 ..... 戴 荣 王双龙 72
用大数据分析宁波港作拖轮打桨原因及预防措施 ..... 毛文锋 77
基于主动防御思维的引航风险防控策略研究 ... 郑浩亮 周俊杰 安成达 丁得勇 83
船舶智能柴油机的比较研究及故障案例分析 ..... 蒋译苇 刘士光 赵国宝 88
多船复杂会遇局面的安全避让策略 ..... 贾志华 曹桂荣 唐晓虎 91
防御性悲观对引航安全的影响研究 ..... 蒋卓宏 95
基于 HFACS-MA 框架识别和预防大风浪中海难事故的人为和组织因素的研究 .....
..... 黄迪 98
提高虾峙门和条帚门航道通航效率的研究 .....陈月海 王炳武 陈晓 张航 107
浅谈柴油机敲缸与气缸油的碱值选择 ..... 娄建伟 郑金波 葛主裕 111
拖轮“拖带和绑拖”作业方法和注意事项 ..... 李俊蔚 张伟君 115
基于 AQWA 的超大型集装箱船舶临界作业条件和港口拖轮配置研究 .....
..... 周胜刚 管怀君 高洁 赵雪光 120
宁波舟山港甬舟集装箱码头 3#-5#泊位船舶靠离泊操纵仿真试验分析 .....
..... 陶雪兵 李梁 段晓军 慕永光 周建勇 128
基于 AIS 数据的警戒区船舶碰撞风险评估方法研究 .....
..... 钟雨 陈茜 刘娇 冯宏祥 郑彭军 135
双碳”背景下绿色航运船舶动力碳捕集封存装置展望 ..... 崔德馨 150
探讨船舶运营管理与航海保障 ..... 史善金 159
由一起搁浅事故谈 ECDIS 使用风险及应对措施 ... 彭健 毛旭东 李亚军 徐天奇 163
论提高 49500 吨级浅吃水型散货船积载率的实践与探索 .....
..... 黄勇波 黄起栋 毛旭东 安天圣 169
基于双重差分模型的宁波舟山港交通组织一体化政策影响研究 .....
..... 俞杰 陈茜 郑彭军 175

考虑域影响的船用旋转机械故障诊断方法研究 ..... 崔德馨 184

台州

急流场中甲板船稳泊研究及桥梁施工中的应用 ..... 方念坚 200
台州红脚岩渔网运输船的现状及对策研究 ..... 孟祥龙 204
海上风电海事安全监管研究 ..... 石传波 206
5 万吨级船舶减载靠泊浙能台二电码头的风险分析及对策 .....张文彬 213
浅析无人机在海事执法调查取证中的应用 ..... 徐群 218
从海事监管角度浅析浙江海上风电建设从沿岸向深远海发展安全风险和建议 .....
..... 庄林锋 221
浅谈涉海工程疏浚与吹填中的安全管理 .....杨俊[1] 曾渊[2] 王宽[2] 227
台州市水运工程建设档案管理工作中存在的问题和对策探讨 ..... 林 盈 231
无人船的应用前景分析 ..... 潘颢杰 234
生态护岸在台州航道养护工程中的应用 ..... 王宽[1] 刘瑶[2] 郑念念[3] 赵新宇[1] 237
《安全生产法》在海事监管领域适用研究 ..... 奚圣达 240
关于如何推动港内交通艇规范化发展的研究--以台州三门港为例 ..... 卢红运 243
新形势下台州航运业高质量发展的建议 ..... 陈柯 245
关于在浙江沿海开展 VHF 分段分频通信的研究——以台州为例 .....
..... 沈亚明 何智仁 249
浅谈近代海洋文明对海洋发展战略的启示 ..... 毛著刚 251

温州

海上船舶防污染常见问题及对策 ..... 朱进岳 256
基于电子围栏技术的海上“小交管”应用研究 ..... 霍小明[1] 俞 毅[2] 260
大型 LNG 船舶进温州港的引航和操纵 ..... 陈志良 264
屡次违章船舶治理的做法和思考 ..... 董曼莱 269
甲板货船载运重大件导致驾驶台视域及桅灯布置不满足法规要求问题及对策 .....
..... 温州海事局船舶安检中心 272
内河交叉航道安全通航对策研究 ..... 吴邦湖 276
海上施工船舶配员及船员持证适应性研究 ..... 路玉波 杨一丹 房照伟 279
海事没收船舶法律依据探究 ..... 刘杨 282
浅谈减少浙江沿海商渔船碰撞事故的防范措施 .....黄友标[1] 陈定进[2] 286
内河船员任职资历审查机制优化研究 ..... 詹文文 290
温州北麂岛雷达站国产化雷达和 VTS 系统应用实践 ..... 姜保松 293
温州市海上搜救应急能力提升研究 ..... 姜继成 299

舟山

船用 C 型 LNG 燃料罐鞍座结构温度场数值仿真及分析 ..... 温小飞 贾天戈 302
基于“虚拟航海”的 VLCC 应急锚位合理性分析 .....
..... 李子强[1] 汪益兵[1] 谢广伟[2] 施传鸿[3] 309
《航海气象》知识点理解方法探析 ..... 艾万政 毛超进 张洪刚 王家宏 316
到港船舶质量控制公共服务平台（VQC）的设计与实践 .....
..... 沈培璐[1] 王本龙[1] 冯凯[1] 夏静驰[1] 王捷[2] 321
扩展卡尔曼滤波算法在智能船舶多源罗经信号融合中的应用研究 .....

..... 贾爱鹏 吴晓红 330
恶劣天气下渔船航行危险评价系统研究 ..... 毛超进 艾万政 刘琪 王家宏 335
船载液氢储罐热力学特性的数值仿真研究 .....
..... 江真珍 吴文锋 刘冲 邓炎 沈禹禄 343
基于 ORB-SLAM3 的水下机器人定位方法研究 .....颜金龙 应泽光 侯舟波 徐鹏 351
不同进水温度对水润滑轴承水膜特性的影响 .....
..... 王帅帅[1]朱发新[1]滕宪斌[2]董良雄[2] 360
基于 CFD 的纵倾对船舶保向性研究 ....朱鹏飞 艾万政 张洪刚 王家宏 毛超进 366
基于小波包分解的船舶功率平抑控制策略 .....
..... 王杰[1] 滕宪斌[2]朱发新[1]常高雷[1] 王帅帅[1] 朱鑫波[1] 375
受限水域 DTC 船航行阻力特性研究 ..... 毛超进 艾万政 忽园园 朱鹏飞 384
并联伸缩杆式矢量推进器水动力分析 .... 李诏贤[1] 高军凯[1] 董良雄[2] 朱发新[1] 392
Y 型航道交汇口分离区特征数值模拟 .....毛超进[1] 艾万政[1] 宋宇秋[1] 王家宏[1] 402
基于变异蚁群算法的无人水下航行器路径规划 .....
..... 李行行[1] 朱发新[1] 董良雄[2] 滕宪斌[2] 410
基于 CFD 的船舶桥区航行偏航变化分析 ..... 朱鹏飞 毛超进 艾万政 王家宏 421
基于优化灰色马尔科夫动态模型的三峡过坝货运量预测 .....
..... 姚博远 艾万政 王家宏 毛超进 428

杭州航区客运航线夜航安全风险评价研究

周鹏翔

（杭州市交通运输行政执法队，浙江 杭州 310014）

摘　要：杭州航区水上客运船舶夜航活动涉及天然渠化航道、限制性航道和库区航道，每一种类型的航道和水域存在诸多的安全风险和限制条件，都影响着夜航活动的安全运行。本文在深入调研和分析夜航活动的基础上，由自然环境、航道条件、夜间交通环境、公司安全管理一级指标和 24 个二级指标组成夜航安全风险评价指标体系，并明确各个指标的权重和评价标准，完成对夜航安全风险评价模型构建。通过模型计算得到不同航线的安全风险评价结果，并对其进行排序和分类，为杭州航区客运航线夜航的安全监管提供理论支持。

关键词：客运船舶；夜航；评价指标；风险评估

0　背景

“十四五”时期是我国交通与旅游深度融合高质量发展的关键时期，也是水上旅游发展的良好契机[1]。近年来，杭州水上旅游产业调整升级步伐加快，针对水上景区打造的一系列自然观光产品、文化体验产品、休闲度假产品日渐丰富，多元化特色水上旅游产品格局初步形成，钱塘江夜游、京杭运河夜游、千岛湖豪华游、富春江水上自助餐、湘湖夜游等精品航线均成为杭州航区水上旅游新的增长点[2]。

杭州航区内河航道千差万别，既有天然渠化航道、限制性航道、库区航道，也有通航船闸在运行，航道沿线既要穿越繁华市区，也会经过美丽山区，风景变化多样，为客运航线的运营带来优越的基础条件和可能性，但各个类型的航道也具有自身的特点和风险。天然渠化航道面宽水深，季节性明显，汛期流量大、流速快，但历时较短；库区航道游客集中；强感潮河段影响通航明显；台风等恶劣天气影响频繁；船闸运行受潮汐影响明显，水运繁忙的国家主通道京杭大运河通航密度大，低等级航道桥梁净空和弯道半径小，部分航段航标配布不够规范，城市航段背景灯光影响驾驶员视线。每一种类型的航道和水域，存在诸多的安全风险和限制条件，对客运航线夜航的安全运行，主管机关的安全监管带来诸多的困难[3][4]。

正是在这样的大背景下，如何全面掌握和分析杭州航区具备夜游资格企业安全管理现状，特别是深入分析运营企业状况、客运船舶和船员履职等情况，更加全面掌握客运航线夜游项目实施过程中的关键环节和风险点，从自然环境、航道条件、夜间交通环境、公司安全管理 4 个维度就夜游航线营运安全状况开展风险评价，深度掌握客运船舶夜游活动的风险状况，有助于提升杭州辖区（杭州 7 县市）通航水域内客运航线夜游安全运营水平，有利于杭州水上交通执法部门对辖区客运航线夜航的安全监管，保障人命和财产安全。

本研究主要针对杭州航区当前开展客运航线夜航活动的内河通航水域，涉及钱塘江、富春江、新安江、千岛湖、湘湖、京杭运河和上塘河这七个航道。

1　杭州航区客运航线夜航概述

截至 2024 年 6 月，杭州航区内开展客运航线夜航活动的县市共有 7 个，分别是内河、钱江、萧山、富阳、桐庐、建德和淳安辖区，航线涵盖天然渠化航道（钱塘江、富春江，新安江，上塘河），人工河道京杭运河、库区航道（千岛湖、湘湖）等内河航道，涉及 12 家客运企业、14 条夜航航线、108 艘夜航客运船舶和 14 个客运码头。具体分析信息如下：

1.1 船舶动力类型

杭州航区客运航线夜航活动投入的船舶共有 108 艘，其中常规动力船舶 55 艘、电动船 45 艘和混合动力船 8 艘，夜游船舶中新能源动力船舶和常规动力船舶比例基本处于 1：1。

1.2 船舶客位数

杭州航区客运航线夜航活动投入的船舶共有 108 艘，平均客位数约为 83 客位/艘，最大客位数的船舶为“梦航号”，556 客位，最小客位数船舶是九姓渔村客船，10 个客位。

表 1 杭州航区夜航客运船舶动力类型分布情况

夜游船舶动力类型		数量	比例
电动船	蓄电池	34	31.48%
	锂电池	11	10.19%
混合动力船		8	7.41%
常规动力船		55	50.92%
总计		108	100%

1.3 船舶建造年份

根据船舶资料显示，在杭州航区投入到客运航线夜航活动船舶的建造年份为 2006 年至 2023 年，平均船龄为 8.9 年，船龄最大为 18 年。

1.4 使用水域

从使用水域来看，部分船舶投入使用的水域为封闭水域，如湘湖、千岛湖和上塘河夜游，共计 60 艘，占比 55.6%。其他船舶均航行在正常的航道水域内，共计 48 艘，占比 44.4%。

2 夜间通航环境分析

根据杭州航区 7 县市客运航线夜航活动的航线布置情况，课题组对所有客运航线夜航活动所涉及的夜间通航环境进行了调研和分析。本节夜间通航环境主要是对夜航活动所涉及到的桥梁、两岸设施、助导航设施等在夜间环境下的情况，主要针对夜间景观灯光、助导航设施和标志标牌等情况对夜航安全进行分析。

2.1 桥梁

根据杭州航区 7 县市客运航线夜航活动的航线涉及的桥梁共 41 座，其中京杭运河为 25 座，钱塘江 3 座，富春江 4 座，新安江 4 座，湘湖 3 座和上塘河 2 座。

表 2 杭州航区夜航活动涉及桥梁数量统计表

区域	桥梁数量	区域	桥梁数量
京杭运河	25	钱塘江	3
富春江	4	新安江	4
湘湖	3	千岛湖	0

在夜间，绝大部分桥梁均设有景观灯，一般设在桥梁板下侧，均能照亮整个桥梁下侧及侧面，桥涵标和桥柱标志处大部分未设置灯光。

2.2 两岸灯光

根据课题组实地调研可知，杭州航区内客运航线夜航活动所在航道两岸总体上存在不同程度的背景和景观灯光，尤其京杭运河、钱塘江市区段和上塘河这三个市区内航道，两岸灯光设施非常显著。在湘湖、千岛湖这两个封闭性水域中，两岸的景观灯光总体比较微弱，有利于夜间客运船舶对过往船舶和桥梁的辨识。

2.3 助导航设施

本课题研究范围内的航道和桥梁均布置有完善的助导航标志和桥梁标志，在夜间钱塘江、富春江和新安江的跨江桥梁上设置有显著的桥涵标灯（红色）和桥柱灯（绿色）。同时，部分桥梁（如杭甬铁路桥、三堡船闸闸前桥的上行侧桥涵标未正对航道中心）标志标牌设置存在错误。

2.4 VHF 通信

根据现场调研，当前杭州航区各辖区船舶所使用的甚高频无线电话（VHF）频道均不同，未完全按照浙江省船舶甚高频无线电话（VHF）使用要求，规定 VHF16、6 频道作为高等级航道内船舶专用

的无线电导航、遇险救助和安全通信频道。

2.5 船舶交通流量

杭州航区 7 县市开展客运船舶夜游活动的水域内，除湘湖、千岛湖和上塘河水域外，夜间客运船舶夜航期间与航道内正常航行的货船存在共用航道的情况，尤其是在京杭运河和钱塘江水域内，正常货船与夜航客船需要在航道水域内航行避让。

3 客运航线夜航活动风险评价

3.1 风险评价指标体系

客运航线夜航活动的安全系统一般根据系统工程理论中的人、船、环境、管理四部分组成，四者相互联系，相互制约，各个因素对客运航线夜航活动的安全起着至关重要的作用[5]。同时根据杭州航区客运航线的运行特点、通航环境和安全管理的特点，在“人-船-环-管”的基本框架下构建杭州航区客运航线夜航活动安全风险评价指标体系，主要分为自然环境、航道条件、夜间交通环境、公司安全管理这 4 个部分组成安全评价指标体系。

1）自然环境因素。自然环境因素通常包括客运航线夜航水域的水文、气象等客观存在的条件，而对船舶夜航安全影响较大的一般为能见度、风、流和潮汐这 4 个自然环境因子。

2）航道条件因素。在杭州辖区客运航线夜航活动所开展的航道条件来看，分为天然渠化航道、人工航道和库区航道，船舶在三类航道内开展夜航活动时会受航道宽度和水深深度的限制，航道的弯曲程度和交叉状况也会影响船舶在航道内的夜航安全。因此在本报告中将航道宽度、航道深度、航道弯曲度、航道交叉状况这 4 个航道条件因子构成航道条件因素。

3）夜间交通环境因素。客运航线夜航活动最大的特点就是在夜间的通航环境中开展航行活动，在夜间航道内航行的过程中会受到航道之外的周遭因素的影响，一般主要有夜间船舶交通量、夜间船舶交通复杂程度、通航孔与船宽比、桥梁净空高度与船舶水面以上高度比、涉水构建筑物辨识、背景灯光、助导航设施、水中碍航设施和交通管理状况这 9 个因素共同构成了夜间交通环境因素。

4）公司安全管理状况。针对客运航线夜航活动的实施主体，即夜航活动的营运公司来讲，主要从客运船舶技术状况、船员履职能力、航线安全评估工作、视频监控情况、夜航应急预案、夜间安全值班状况这 6 个方面的公司安全管理状况因子。

通过对上文环境要素的分析，可建立 4 层风险评估指标体系，见图 1。



图 1 客运航线安全风险评价指标体系

3.2 评价指标评价标准

根据上述客运航线夜航安全风险评价的指标，在构建安全评估模型过程中需要建立各个评价指标的评价集，将各个指标因素对客运航线夜航安全的影响程度进行分析并确定其风险评价标准[6]。

接下来对各个评价指标进行具体分析和论证，构建每个标准的风险评价标准，具体如下：

表 2 各个评价指标因素的危险度评价标准

评价因素	评价指标　　危险度	安全	较安全	一般	较危险	危险
能见度 U_{11}	能见度不良天数（天/年）	< 15	15～30	30～45	45～60	> 60
风 U_{12}	年标准风天数（天/年）	< 30	30～60	60～90	90～120	> 120
水流 U_{13}	流速（m/s）	< 1	1～2	2～3	3～4	> 4
可航水域宽度 U_{21}	宽度/船舶宽度	> 10	7～10	5～7	3～5	< 3
航道水深 U_{22}	水深/船舶吃水	> 4	2.0～4.0	1.6～2.0	1.3～1.6	< 1.3
航道弯曲半径 U_{23}	累积转舵角度（°）	< 5	5～10	10～15	15～20	> 20
航道交叉数量 U_{24}	汊河口/分支数量	0	1	2	3	4
AIS 覆盖程度 U_{25}	AIS 覆盖比率（%）	95～100	90～95	80～90	70～80	< 70
VHF 覆盖程度 U_{26}	VHF 覆盖比率（%）	95～100	90～95	80～90	70～80	< 70
夜间船舶交通复杂程度 U_{31}	交通密度 实际船舶流量/交通容量	< 0.4	0.4～0.6	0.6～1.4	1.4～1.6	> 1.6
夜间船舶交通量 U_{32}	交通构成复杂度	很简单	较简单	一般	较复杂	很复杂
通航孔与船宽比 U_{33}	通航孔宽度/船宽	> 8	5～8	3～5	3～2	< 2
桥梁实时净高与船舶水面以上高度比 U_{34}	净高/水面以上高度	大于 1.4	1.3	1.2	1.1	1
涉水构建筑物辨识 U_{35}	有无桥涵标（灯）、桥柱标（灯）	完整	较完整	无灯	不全面	错误布置
背景灯光 U_{36}	两岸和灯光	无灯光	微弱	一般	较亮	亮
助导航设施 U_{37}	航标完善率（%）	95～100	90～95	80～90	70～80	< 70
水中碍航设施 U_{38}	沿线碍航物设施数量	0	1	2	3	4
夜航监管力量 U_{39}	交通管理状况	专人值班	执行较全面	执行不全面	基本不执行	未配置监管措施
船舶技术状况 U_{41}	专项检查缺陷数量	无缺陷	1-2	3-4	5-6	7-8
船员履职能力 U_{42}	专项检查缺陷数量	无缺陷	1-2	3-4	5-6	7-8
航线安全评估 U_{43}	完成夜航安全评估	检查前完成	第一阶段内完成	整治后完成	评估中	未评估
视频监控情况 U_{44}	岸上/船上安装该设备	完整	较完整	一般	不全面	未安装
夜航应急预案 U_{45}	是否制定完整的应急预案	完整	较完整	一般	不全面	未制定
夜间安全值班状况 U_{46}	是否制定完整的 突发情况报告制度	完整	较完整	一般	不全面	未制定

根据风险识别的方法，针对客运航线夜航活动安全评价指标因素归纳成为以下 24 个，指标因素设定评价因素集为：

U=（u1，u2，u3，u4，u5，u6，u7，u8，u9，u10，u11，u12，u13，u14，u15，u16，u17，u18，u19，u20，u21，u22，u23，u24）

=（能见度，风，水流，可航水域宽度，航道水深，航道弯曲半径，航道交叉数量，AIS 覆盖度，VHF 覆盖度，夜间船舶交通复杂程度，夜间船舶交通量，通航孔与船宽比，桥梁实时净高与船舶水面以上高度比，涉水构建筑物辨识，背景灯光，助导航设施，水中碍航设施，交通管理状况，客运

船舶技术状况,船员履职能力,航线安全评估工作,视频监控情况,夜航应急预案,夜间安全值班情况)。

3.3 评价指标权重

权重是一种度量值，它是衡量了每一单因素对总体评价的影响程度大小。因素权重系数直接影响到综合评价的结果，在一定程度上也代表了单因素评定等级的能力[7]。在综合评价中，为了客观、合理地评价通航环境安全管理的效果，突出主要的通航环境安全影响因素，本文利用有序二元比较法来定量化表征各指标的重要程度，即各评价指标的权重。

根据重要程度 T 值的大小，得到一个各定权因素集指标关于重要性由大到小的一致性排序，根据此排序对评价因素集 U 中的各指标进行排序后得到新的重要性排序指标集 U 和评价指标权重集 W，具体如下。

U=（u20,u19,u13，u21，u23，u4，u7，u10，u3，u18，u22,u24，u6，u14，u1，u15，u16，u9，u12，u2，u5，u8，u11，u17）

W=（w1，w2，w3，w4，w5，w6，w7，w8，w9,w10，w11，w12，w13，w14，w15，w16，w17，w18，w19，w20，w21，w22，w23，w24）=（0.12，0.08，0.06，0.06，0.06，0.05，0.05，0.048，0.045，0.042，0.04，0.04，0.036，0.036，0.035，0.03，0.03，0.024，0.024，0.02，0.02，0.02，0.018，0.012）。

3.4 评价指标安全等级

夜航安全评价指标安全等级应能起到明确安全和危险的状态、描述风险程度的作用。根据对水上交通安全和航行风险以及内河客运船舶实际航行情况的相关研究，结合我国有关学者进行的专家调查的结果，本文将客运航线夜航安全风险评价分为安全、较安全、一般、较危险、危险 5 个等级。由五个安全等级组成的安全评价集：

$$V=（v1，v2，v3，v4，v5）=（1，2，3，4，5）$$
$$=（安全、较安全、一般、较危险、危险）$$

3.5 安全风险评价过程

基于上述评价指标体系 U、各评价指标绝对权重值 W 和安全等级评价集 V，在实现模糊评价之前还需要确定各个指标的隶属函数。由于指标本身及其危险等级的模糊性，任何一个

根据杭州航区客运航线夜航安全评价的 24 个评价指标和 5 个评价等级建立了各评价指标对各评价等级的隶属函数，可根据被评价对象的各具体指标值计算出隶属度向量(单因素评价集)P_i(i=1，2，…，5)，以各指标因素的单因素评价集 Pi 为行组成该决策目标的模糊评价矩阵。P 为因素集 U 到评价集 V 上的一个模糊关系，p_{ij}表示因素 u_i 对评价等级 v_j 的隶属度。当模糊权重向量 W 与模糊评价矩阵 P 为已知时，按照模糊矩阵的乘法运算，做模糊变换来进行模糊综合评价，得到模糊综合决策评价集 M：

$$M = W \bullet P$$
$$= (W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, \cdots, \cdots, W_{24}) \bullet \begin{bmatrix} p_{01}^1 & p_{01}^2 & p_{01}^3 & p_{01}^4 & p_{01}^5 \\ p_{02}^1 & p_{02}^2 & p_{02}^3 & p_{02}^4 & p_{02}^5 \\ p_{03}^1 & p_{03}^2 & p_{03}^3 & p_{03}^4 & p_{03}^5 \\ p_{04}^1 & p_{04}^2 & p_{04}^3 & p_{04}^4 & p_{04}^5 \\ p_{05}^1 & p_{05}^2 & p_{05}^3 & p_{05}^4 & p_{05}^5 \\ p_{06}^1 & p_{06}^2 & p_{06}^3 & p_{06}^4 & p_{06}^5 \\ \vdots & \cdots & \vdots & & \\ \vdots & \cdots & \vdots & & \\ p_{24}^1 & p_{24}^2 & p_{24}^3 & p_{24}^4 & p_{24}^5 \end{bmatrix}$$
$$= (M_1, M_2, M_3, M_4, M_5)$$

式中 mj 是模糊综合评判指标，且表示评价对象对于评价危险等级 vj 的隶属度。上述计算求出模糊综合评价的结果是一个模糊向量，反映客运航线夜航安全程度在评价集 V 上的模糊分布状态。

本文采用加权平均的方法来获取最终评价的结果。在此基础上，对评价集 V_j 进行一个加权平均得出评判结果，即：

$$v = \sum_{j=1}^{5} m_j \times v_j \Big/ \sum_{j=1}^{5} m_j$$

将得到的各加权平均值对应评价集 V 中，就可描述客运航线夜航活动安全状况。

4 客运航线夜航安全风险评价

根据上述评价指标、指标权重和计算过程，可以计算得到各个航区的夜航活动安全风险评价结果已经排名，具体如下表所示。

表 3 杭州航区客运航线夜航活动安全风险评价结果

编号	所属辖区	起点	安全风险值	排序
1	钱塘江	钱塘江夜航	1.9726	1
2	富阳	富春江夜航	1.6888	6
3	桐庐	富春江夜航	1.7528	5
4	新安江小型	小型船舶夜航	1.9512	2
5	湘湖	湘湖夜航	1.6852	8
6	上塘河	上塘河夜航	1.5184	9
7	京杭运河	武林门-拱宸桥	1.8135	4
8		武林门-钱塘江	1.8666	3
9	千岛湖	中心湖区夜航	1.7916	7
10		城中湖夜航	1.7916	7
平均值			1.78323	

根据上述对杭州航区客运航线夜航活动的安全风险评估结果可知，整个杭州航区客运航线夜航活动总体的安全风险值小于 2，平均风险值为 1.78323，处于安全与较安全之间，稍偏向于较安全一侧，说明整体夜航活动安全可控，但仍有部分缺陷或风险存在。同时，根据每个航区夜航活动的具体分值进行高低排序，可知将这些航行的风险情况分为三大类：

1）钱塘江航线、新安江小型游船航线、京杭运河武林门-拱宸桥航线、京杭运河武林门-钱塘江航线；

2）千岛湖中心湖区航线、千岛湖城中湖航线、富春江桐庐航线、富春江富阳航线和湘湖航线；

3）上塘河航线。

5 结语

本文在深入调研和分析夜航活动的基础上，由自然环境、航道条件、夜间交通环境、公司安全管理一级指标和 24 个二级指标组成夜航安全风险评价指标体系，明确各个指标的权重和评价标准，完成对夜航安全风险评价模型构建。

通过模型计算得到不同航线的安全风险评价结果，整个杭州航区客运航线夜航活动总体的安全风险处于安全与较安全之间，稍偏向于较安全一侧，说明整体夜航活动安全可控，但仍有部分缺陷或风险存在。

从不同航线的风险评价结果来看，钱塘江夜航活动因其所处复杂的水上交通环境，特殊的水文气象条件，总体风险等级为杭州航区最高，需要重点关注。

本文针对杭州航区通航水域内开展的夜航活动进行安全风险评价，确定不同航线的安全风险值和排序，可作为杭州航区客运航线夜航的安全监管提供理论支持和依据，具有一定的实践指导意义。

参考文献

[1]胡云涛,施静娴,冯扬文.杭州水上交旅融合现状及建议[J].水运管理,2021,43(07):31-34.

[2]杨倩倩.杭州城市水上巴士码头站点设计及创新点研究[D].浙江大学,2019.
[3]郑咪咪,施静娴.杭州市水路客船停靠站点管理现状调查[J].交通企业管理,2022,37(06):29-31.
[4]姚辉.城市水上客运管理的政企协同机制研究[D].重庆大学,2022.
[5]朱金善,黄成,马野.航道水域的船舶夜航环境风险评价[J].安全与环境学报,2019,19(01):43-48.
[6]董日辉.基于证据理论的船舶夜航安全评价研究[D].大连海事大学,2016.
[7]李志荣,朱金善,宋健,等.基于 C-OWA 算子和证据理论的船舶夜航光环境安全评价[J].中国安全生产科学技术,2019,15(12):182-187.

作者简介：周鹏翔（1997.02），男，浙江杭州人，大学本科，主要研究方向：水上交通安全，手机号：13388605309，E-mail: zhoupengxiang@163.com

基于高斯过程回归的船舶 DMCC 发动机整机性能优化

蒋更红[1]，才正[2]

1.浙江交通职业技术学院 海运学院，杭州 311112；2. 集美大学轮机工程学院，福建 厦门 361021

摘 要：针对柴油发动机推进特性下的中高负荷工况出现的 NO_x 排放峰值现象，以及燃油价格日益上涨带来降低油耗率的迫切需求，本研究通过调节柴油/甲醇双燃料燃烧（diesel/methanol compound combustion，DMCC)发动机多种控制参数，在保证动力性前提下，实现 NO_x 排放和燃油消耗率(brake specific fuel consumption，BSFC)的同步下降。为避免大规模实验带来的成本增加，首先基于高斯过程回归建立 DMCC 发动机 NOx 的体积分数、BSFC 和指示功率预测模型；然后将所建模型与带精英策略的非支配排序遗传算法（elitist non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-Ⅱ)结合，对 NO_x 的体积分数和 BSFC 进行优化，并将 Pareto 前沿解集代入逼近理想解排序法（the technique for order preference by similarity to an ideal solution，TOPSIS）寻找最优控制参数组合；最后将最优控制参数组合标定至电子控制单元，与原机数据进行对比分析。结果表明：基于高斯过程回归建立的预测模型的拟合优度大于 0.95，均方根误差小于 1，具有良好的一致性和准确性；使用 NSGA-Ⅱ获取的最佳控制参数与原机工况相比 NO_x 的排放量下降 74.5%，仅为 3.47 g/(kW·h)，BSFC 平均下降 6.7%，仅为 203.5 g/(kW·h)。

关键词：船舶柴油机；柴油/甲醇组合燃烧；高斯过程回归； 带精英策略的非支配排序遗传算法（NSGA-Ⅱ）；逼近理想解排序法（TOPSIS）

中图分类号：TK421 文献标志码：A

0 引 言

航运业作为最大的化石燃料消费和温室气体排放产业之一，船用发动机必须严格遵守排放法规[1]。甲醇燃料作为一种可再生能源，不仅价格较低，而且具有减少 NO_x、CO_2 等污染物排放的优势，因此近年来引起了广泛的关注[2]。研究显示，提高甲醇替代率可有效减轻柴油发动机在中高负荷下的 NO_x 排放峰值问题[3-4]；此外，在提高甲醇替代率的同时再利用废气再循环（exhaust gas re-circulation，EGR）技术，有助于使柴油发动机全工况下的 NO_x 排放符合国际海事组织最新发布

的 Teir-Ⅲ排放标准[5]。然而，伴随燃油价格逐年上涨，降低油耗率的需求日益迫切，这要求在提高甲醇替代率时，需同步调节发动机的多种控制参数，以确保其各项性能进行协调优化，使其处于良好的运行状态[3]。

为避免因调节发动机多种控制参数而产生的实验成本大幅增加的问题，国内外研究者们常使用带精英策略的非支配排序遗传算法(elitist non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-Ⅱ)作为发动机控制参数寻优的有效工具。文献[6]引入 NSGA-Ⅱ来探索最优的喷油角度和燃烧室结构。文献[7]采用 NSGA-Ⅱ求解不同喷射策略下，发动机 NO_x和烟尘排放的 Pareto 最优解集。文献[8]采用 GT-Power 软件结合多目标遗传算法探索涡轮增压器的最优几何参数，旨在优化船用发动机的燃油消耗。但由于发动机内部反应往往具有参数众多、交互作用复杂、非线性相关等特征[7]，仅通过多目标遗传算法无法快速有效的确定最优解集。

一系列研究表明，将机器学习方法与多目标遗传相结合，可快速有效地获取最优控制参数[9-11]。常见的机器学习方法有 BP 神经网络、支持向量机 (support vector machine , SVM)、长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)等。文献[9]基于高斯过程回归（Gaussian process regression , GPR）对发动机喷射策略进行预测分析，分析表明相对于 BP 神经网络和 SVR，GPR 预测方法在主喷油量数据预测中有较好的预测精度。文献[10]在小数据量样本下引入 GPR 预测模型对双燃料柴油机的动力性和经济性进行有效预测。研究表明 GPR 预测方法因使用灵活、可描述不确定性、先验性等优势[11]，在柴油机性能参数预测上可以弥补样本的各种缺陷。

在以往的研究中，将 GPR 结合 NSGA-Ⅱ获取最优控制参数的多数研究只对某两种性能进行寻优，对整机性能的同步优化研究并不多见，并且在对多目标优化问题最优解的权重处理上，只依靠人工经验，缺乏对最优解的选择依据。因此，本文采用推进特性下的 75%负荷工况，选取甲醇替代率、EGR 率、喷油提前角和进气压力为控制参数，对 DMCC 发动机排气中的 NO_x的体积分数、燃油消耗率(brake specific fuel consumption, BSFC)和指示功率这 3 个性能参数进行优化分析。采用 GPR 模型对发动机性能参数进行预测，同时在 NSGA-Ⅱ选取最优解的权重处理上引入逼近理想解排序法(the technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)，计算各个解与正负理想解之间的距离，快速准确地选出最优方案。

1 DMCC 发动机实验台架搭建与 Converge 模型建立

1.1 DMCC 实验台架与实验测试系统

本实验采用 4 缸电控高压共轨中速船用发动机，具体参数见表 1。在发动机进气道增加一套甲醇供给系统，用于控制在进气道喷射甲醇燃料，其位置位于节气门后。实验采用无水甲醇和 0#柴油，其理化性质见表 2。双燃料实验台架系统主要设备为：DW440 电涡流测功机；HORIBA 排气分析仪（测量分析排气中 NO_x、CO_2等的体积分数）；AVL439 烟度计（对碳烟排放数据进行实时测量）；KISTLER 公司的燃烧分析仪（测量缸内温度、压力等参数）；FC2210 智能油耗仪（测取消耗的柴油量）。主要实验设备参数见表 3，实验台架示意图见图 1。

表 1 发动机技术参数

项目名称	技术参数
才机型	四冲程中速、废气涡轮增压
气缸直径	190 mm
行程	210 mm
燃烧室形状	直口ω型
总排量	23.82 L
压缩比ε	14:1
标定转速	1 000 r/min
标定功率	220 kW

表 2 无水甲醇和 0#柴油理化性质

燃料	甲醇	柴油
汽化潜热/ (kJ/kg)	1089	250
十六烷值	<5	38~53
着火温度/℃	470	250~450
低热值/(MJ/kg)	19.7	42.5
理论空燃比	6.5	14.6
辛烷值	109	15~25

表 3 主要实验设备参数

设备名称	测量参数	测量范围	测量精度
DW440 电涡流测功机	发动机转速	1~2000 r/min	±0.2%
	发动机转矩	0~1000 N·m	±0.2%
YRS-SFA 甲醇流量计	甲醇消耗量	0~50 kg/h	±0.5%
FC2210 智能油耗仪	柴油油耗	0~30 kg/h	±0.2%
AVL439 烟度计	不透光烟度值	0~10 FSN	$\pm 0.1\times10^{-3}$
HORIBA MEXA-1600DS 排气分析仪	NO_x 体积分数	0~5000×10-6	$\pm 10\times10^{-6}$
	CO2 体积分数	0~16000×10-6	$\pm 50\times10^{-6}$

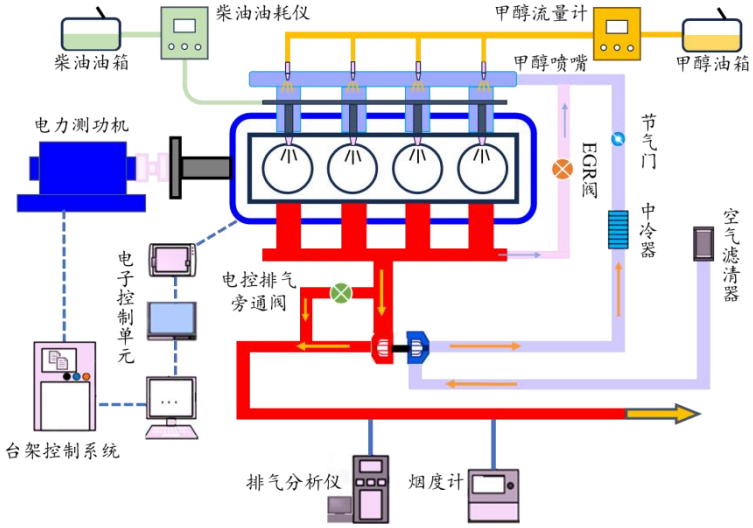


图 1 实验台架示意图

1.2 实验方案

在 75%负荷下，选取甲醇替代率、EGR 率、喷油提前角和进气压力这 4 个控制参数展开相关实验。为保证在进气歧管内形成均匀的甲醇混合气，同时减少气阀重叠时带来的可燃混合气损失，甲醇喷射时刻设定为 106°（对应的是上止点后曲轴转角(crank angle after top dead center，CA ATDC)）。柴油由气缸正上方喷油器喷入燃烧室，由电子控制单元（electronic control unit，ECU）调节柴油喷油提前角，初始喷射正时为 18.4°（对应的是上止点前曲轴转角(crank angle before top dead center，CA BTDC)）。通过电磁阀控制排气旁通阀开度，调节进入涡轮的废气量，从而控制进气压力。同时，通过调节 EGR 阀的开度控制 EGR 率大小。

实验中根据甲醇替代率等控制参数要求，在保持发动机转速与扭矩固定在 75%负荷下，同步调节柴油和甲醇的喷射量。在计算燃油消耗量 m_{dual} 时将甲醇按等热值折合为柴油，见式（1）；甲醇替代率 γ_M 为每次循环中喷入进气道的甲醇热值与总燃料热值之比，见式（2）；燃油消耗率 I_{BSFC} 按式（3）计算。

$$m_{\mathrm{dual}} = m_{\mathrm{D}} + \frac{h_{\mathrm{M}}}{h_{\mathrm{D}}} m_{\mathrm{M}} \tag{1}$$

$$\gamma_{\mathrm{M}} = \frac{m_{\mathrm{M}} h_{\mathrm{M}}}{m_{\mathrm{M}} h_{\mathrm{M}} + m_{\mathrm{D}} h_{\mathrm{D}}} \times 100\% \tag{2}$$

$$I_{\mathrm{BSFC}} = m_{\mathrm{dual}} / P_{\mathrm{e}} \tag{3}$$

式中，m_D 为柴油喷射量，kg/h；m_M 为甲醇喷射量，kg/h；h_M 为甲醇的低热值，h_M = 19.7 MJ/kg；h_D 为柴油的低热值，h_D =42.5 MJ/kg；P_e 为发动机功率，kW。

1.3 DMCC 发动机仿真模型建立

考虑到实验过程中甲醇替代率过高和进气压力增大会导致发动机爆震，以及多种控制参数调节带来的高昂实验成本，故使用仿真实验来克服这些问题[3]。首先利用 Converge 3.0 建立发动机含进排气歧管的完整几何模型，见图 2。仿真实验中采用的计算模型见表 3。双燃料燃烧过程采用 SAGE 模型模拟，它结合甲醇和正庚烷双燃料骨架动力学机理，涉及 52 种物质、182 个反应[12] 。该机理详细集成了正庚烷和甲醇反应方程，并采用直接关系图进行简化，减少了计算量。

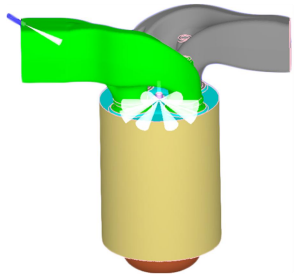


图 2 进排气歧管和燃烧室几何模型

表 4　仿真实验中的计算模型

模型	名称
湍流模型	RNG k-ε模型
喷雾蒸发模型	Frossling模型
油滴碰撞模型	NTC collision模型
油滴撞壁模型	Wall film模型
喷雾破碎模型	KH-RT模型
NOx排放模型	Extended Zeldovich模型

由于在喷油器喷嘴处涉及柴油油束与甲醇、空气混合气的复杂反应过程，为平衡燃烧反应的计算量和效率，将喷嘴处设置为二级加密。燃烧室内网格架构见图 3。

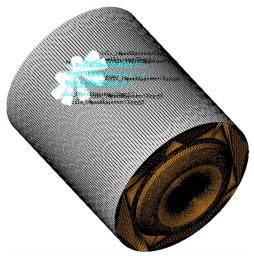
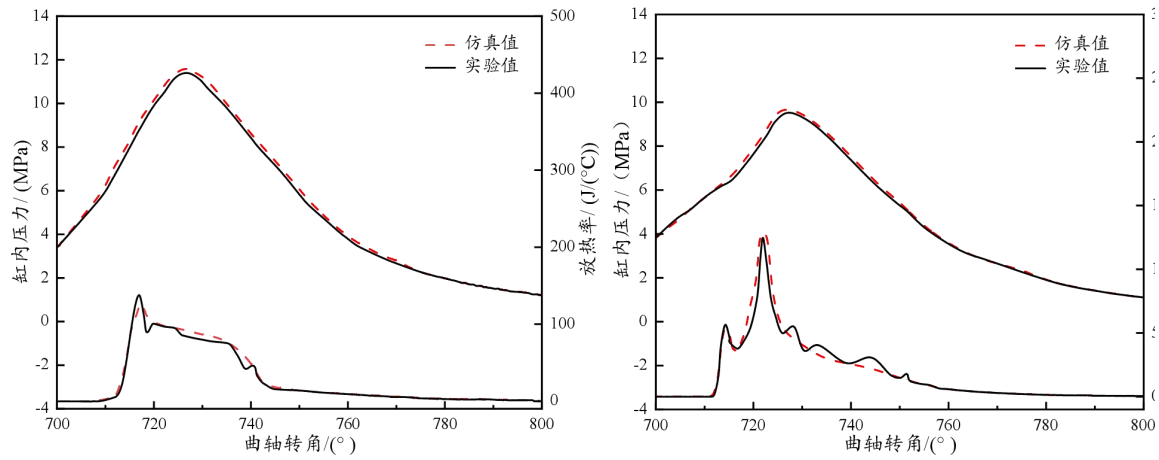


图 3 燃烧室与喷嘴网格模型

1.4 Converge 仿真验证

由于发动机的缸内平均压力和放热率是影响发动机 NO_x 排放、经济性和动力性的主要因素，因此选取缸内压力和放热率两个参数对仿真模型的准确性进行验证。在 100%负荷、纯柴油，以及 75%负荷、20%甲醇替代率两个工况下，对比缸内压力和放热率的仿真值与原机实验值，结果见图 4。

图 4 中压力曲线和放热率曲线的仿真值均略高于实验值，这是由于模型未考虑实际中存在气缸漏气以及热损失，此外仿真模型中，气缸内气体为充分均匀混合，与实际气体和混合情况存在误差。但误差在 3%以内，两条曲线变化趋势基本一致。综上，仿真模型能够满足计算要求。



（a）1000 r/min，100%负荷，纯柴油　　（b）1000 r/min，75%负荷，20%甲醇替代率

图 4 不同工况下缸内压力和放热率的仿真值与实验值对比

1.5 控制参数取值范围确定

甲醇替代率和 EGR 率增加时，一方面由于甲醇汽化潜热较高，注入缸内后初始燃烧温度下降，不利于形成高温的甲醇、柴油混合气，同时由于甲醇火焰传播速度快，高替代率下高温持续期缩短；另一方面由于 EGR 率增大，CO_2、水蒸气等惰性气体增多[5]，缸内燃烧反应受到抑制，虽能有效抑制 NO_x 生成，但导致 BSFC 升高、指示功率下降。通过增大喷油提前角，使柴油以更早的时间喷入燃烧室，滞燃期提前，有利于扩散燃烧初期形成反应活性较强的甲醇、柴油和空气混合气，改善燃烧质量；通过增加进气压力，使缸内过量空气系数增大，燃料更容易达到着火边界：最终达到同时优化发动机动力性和经济性的目的。

考虑到提高甲醇替代率和进气压力会使发动机处于爆震边界[3]，并且爆发压力可能超过发动机承受的最高压力，因此在仿真计算中需设置每个控制参数的取值范围，见表 5。

表 5 DMCC 发动机控制参数取值范围

控制参数	取值范围
甲醇替代率	0～35%
EGR率	0～15%
喷油提前角(CA)	18.4～22.4°

表 5 DMCC 发动机控制参数取值范围

控制参数	取值范围
进气压力	0.193～0.233 MPa

2 DMCC 发动机整机性能优化

DMCC 发动机整机性能优化流程图如图 5 所示：第一部分采用 GPR 构建 NO_x的体积分数、BSFC 和指示功率的预测模型；第二部分运用 NSGA-Ⅱ算法进行多目标优化，得到 Pareto 最优集；第三部分采用 TOPSIS 筛选出 Pareto 最优解。

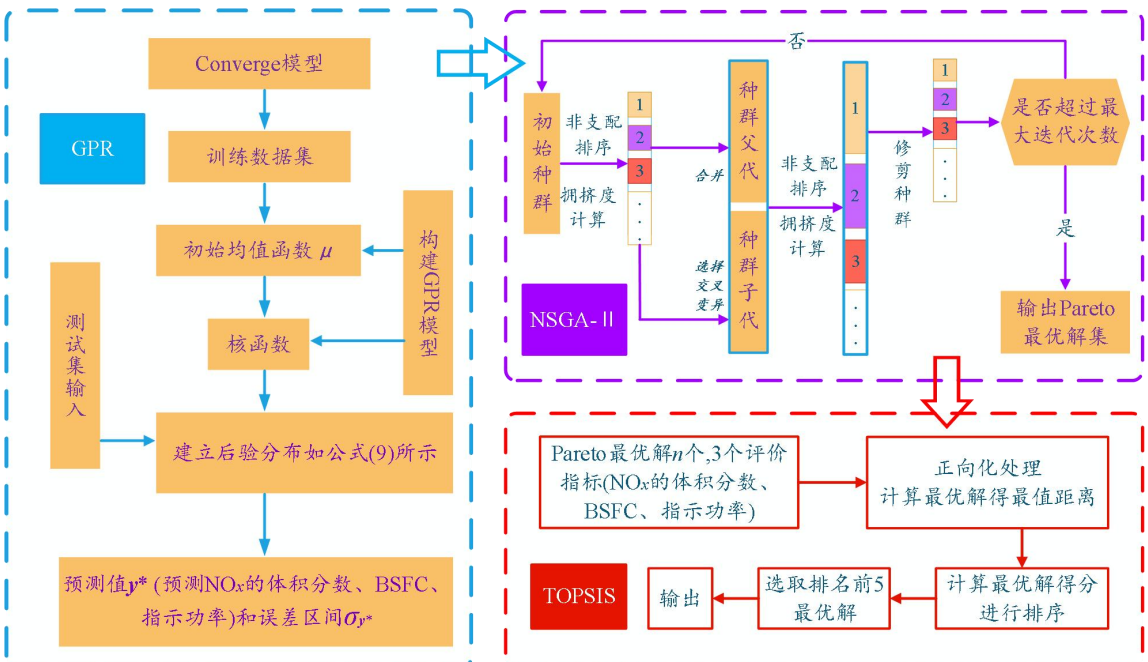


图 5 DMCC 发动机整机性能优化流程图

2.1 GPR 模型建立

在表 5 所示的控制参数取值范围内进行 80 组仿真，其中 80%的数据（64 组数据）作为训练集，用于对均值函数、核函数和超参数的训练，剩下 20%的数据（16 组数据）作为测试集，用于后续验证。GPR模型流程如图 5 所示。设由甲醇替代率、EGR率、喷油提前角和进气压力组成的训练输入向量为$\boldsymbol{x}$，由对应的NO_x的体积分数、BSFC和指示功率组成的训练输出向量为$\boldsymbol{y}$，$\boldsymbol{x}^*$为预测输入向量，$\boldsymbol{y}^*$为预测输出向量，$\boldsymbol{x}'$为已知数据点（随机生成的训练数据）。GPR模型的主要目标就是通过给定的$\boldsymbol{x}$、$\boldsymbol{y}$和核函数，训练出适用于该模型的映射函数f，从而求解出均值$\boldsymbol{y}^*$和误差区间$\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{y}^*}$。GPR模型由均值函数$\mu(\boldsymbol{x})$和协方差函数(核函数) $k(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}')$共同确定：

$$\mu(\boldsymbol{x}) = E\left(f(\boldsymbol{x})\right) \tag{4}$$

$$k(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}') = E\left(\left(f(\boldsymbol{x})-\mu(\boldsymbol{x})\right)\left(f(\boldsymbol{x}')-\mu(\boldsymbol{x}')\right)\right) \tag{5}$$

式中，E代表数学期望。同时，映射函数服从如下的高斯过程分布：

$$f(\boldsymbol{x}) \sim G\left(\mu(\boldsymbol{x}), k(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}')\right) \tag{6}$$

在预测发动机参数等实际回归问题时，还需考虑噪声对输出值的影响：

$$\boldsymbol{y} = f(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{7}$$

式中，ε为数据噪声，$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$；$\sigma^2$为噪声方差。

将均值函数 $\mu(\boldsymbol{x})$ 初始值设置为 0。协方差函数可以根据不同的需求进行选择。较为常见的协方差函数有 Matern 核函数、有理二次核函数等[10]。鉴于本实验样本较少，选取可根据数据特征自适应地调整超参数的平方指数核函数[13]，即

$$k\left(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}'\right)=\sigma_f^2\exp\left(-\frac{\|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}'\|^2}{2L^2}\right) \tag{8}$$

式中，σ_f和 L 为核函数的超参数，可通过训练数据样本获得模型的超参数。根据贝叶斯定理基于训练集样本(x, y)可以求出映射函数 f 的后验分布：

$$p\left(f\,|\,\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}\right)\propto p\left(\boldsymbol{y}\,|\,\boldsymbol{x},f\right)p\left(f\right) \tag{9}$$

测试集输出值 $\boldsymbol{y}^*$和训练集输出值 $\boldsymbol{y}$ 服从如下的联合高斯分布：

$$\begin{pmatrix}\boldsymbol{y}\\ \boldsymbol{y}^*\end{pmatrix}\sim \mathrm{N}\left(0,\begin{pmatrix}\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x})+\sigma^2\boldsymbol{I} & \cdots & \boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}^*,\boldsymbol{x})\\ \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{K}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}^*) & \cdots & \boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}^*,\boldsymbol{x}^*)\end{pmatrix}\right) \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}^*,\ \boldsymbol{x})=\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{x}^*)$为预测集的协方差矩阵；$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}^*,\ \boldsymbol{x}^*)$为预测集的方差矩阵；$\boldsymbol{I}$ 为 n 维单位矩阵。从而，可对发动机输出参数的预测值（均值）和误差区间（核函数矩阵）进行估计：

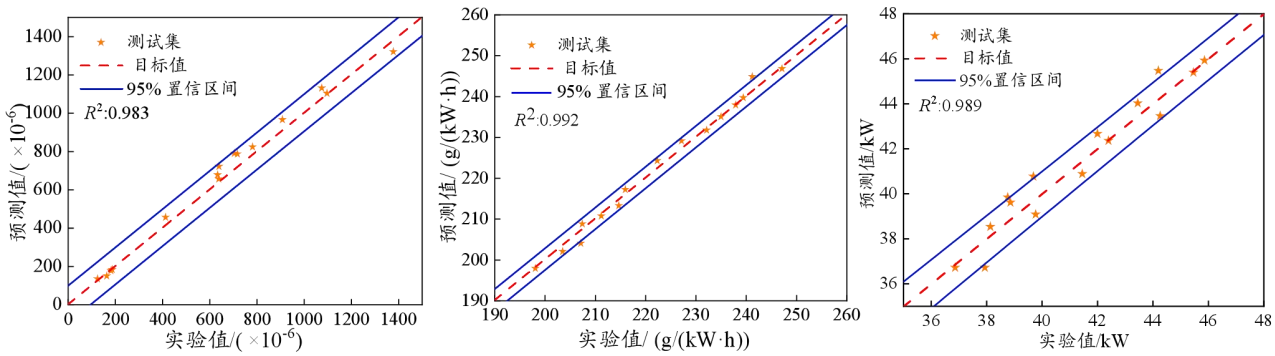
$$\boldsymbol{y}^*=\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}^*,\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{K}(\ ,\ )+\sigma^2\boldsymbol{I}\right)^{-1}\boldsymbol{y} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{y}^*}=\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}^*,\boldsymbol{x}^*)-\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}^*,\boldsymbol{x})\left(\boldsymbol{K}\left(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}^2\right)+\sigma^2\boldsymbol{I}\right)^{-1}\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}^*)^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

2.2 预测模型验证

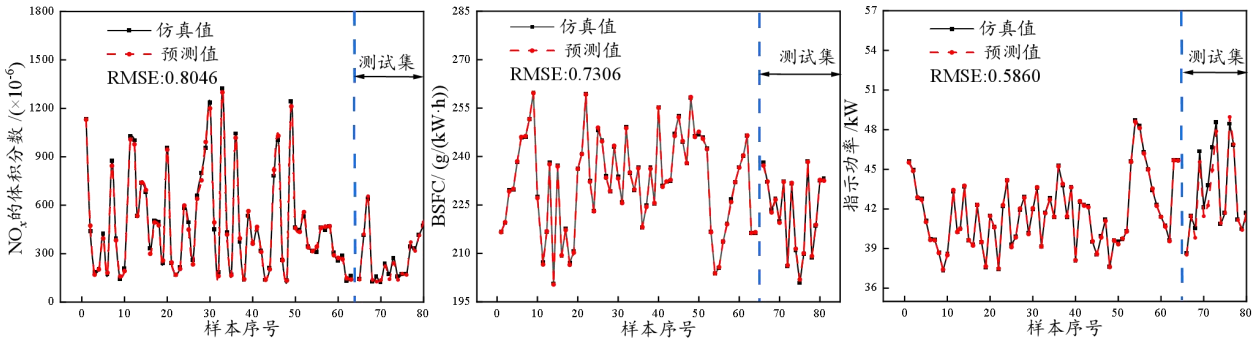
选取剩余的 20%数据集验证训练后模型的预测能力，将拟合优度 R^2 和均方根误差(root mean square error，RMSE)作为衡量预测模型一致性和准确性的指标：R^2 越接近 1，模型拟合得越好；RMSE 越接近 0，预测值与仿真值之间的误差越小。

图 6 和图 7 分别为 GPR 模型的一致性和准确性验证结果。图 6 中：回归模型的 R^2 分别为 0.983、0.992 和 0.989，均大于 0.95；预测值基本都位于 95%置信区间内，并且大多数预测数据点均集中在最优目标值 $y=x$ 附近。图 7 中，测试集的 RMSE 分别为 0.8046、0.7306 和 0.5860，均小于 1。这表明构建的 GPR 模型具有良好的一致性和准确性。这是由于 GPR 模型在贝叶斯推断框架下进行建模，通过建立目标变量的先验分布和观测数据之间的条件概率关系，能够提供对预测结果的全概率估计；其次平方指数核函数的超参数可以控制函数的光滑程度和相似性取值范围[13]，还可以根据数据的特征自适应地调整尺度，从而使得核函数能够更好地适应不同尺度的数据。



(a) NO_x 的体积分数　　(b) BSFC　　(c) 指示功率

图 6 NO_x 的体积分数、BSFC 和指示功率预测模型一致性验证



(a) NO_x 的体积分数 （b）BSFC （c）指示功率

图 7 NO_x 的体积分数、BSFC 和指示功率预测模型准确性验证

2.3 基于 NSGA-Ⅱ的多目标优化

NSGA-Ⅱ多目标遗传算法的优势在于降低了非劣排序遗传算法的复杂性，运行速度快，收敛性好，因而成为多目标优化算法性能的基准[7]。在基于 NSGA-Ⅱ进行 DMCC 发动机整机性能优化时（流程见图 5），首先依据 GPR 模型快速扩充 75%负荷下的数据集，生成 NSGA-Ⅱ的初始种群，通过非支配排序和拥挤距离计算来评估当前种群中个体的优劣，并进行排序；然后通过选择、交叉和变异操作生成新的子代种群；此后采用精英策略，将父代个体与子代个体混合，并重新进行非支配排序和拥挤距离计算；根据这些计算结果，对混合后的种群进行修剪，保留优良个体，反复进行这个过程，直到达到设定的最大迭代次数，输出 Pareto 解集。

考虑到在 75%负荷下降低 NO_x 排放随之带来的发动机性能下降问题，对于动力性参数的指示功率只需保证输出功率大于 75%即可，因此以 NO_x 的体积分数为目标 1，以 BSFC 为目标 2，进行多目标优化，同时对指示功率进行限制，建立数学模型：

$$\min f_1(X) = \min I_{NO_x}(X) \tag{13}$$

$$\min f_2(X) = \min I_{BSFC}(X) \tag{14}$$

$$P_I \leqslant 1.01 P_{0.75} \tag{15}$$

式中：X=(甲醇替代率，EGR 率，进气压力，喷油提前角)；P_I 为指示功率；$P_{0.75}$ 为 75%负荷下的功率，$P_{0.75}$=41.3kW；1.01 为安全系数。

根据流程图 5，设置初始种群规模为 100，最大迭代次数为 100，交叉概率为 0.8，变异概率为 0.2。图 9 给出了初始种群、Pareto 最优集和原机工况的比较。Pareto 解集中的每个 Pareto 最优解代表了不同目标之间的权衡，并不是唯一的最优解。然而，相较初始种群，Pareto 解集中 NO_x 的体积分数与 BSFC 之间存在明显的折中关系，降低 NO_x 的体积分数必然产生 BSFC 升高的现象。

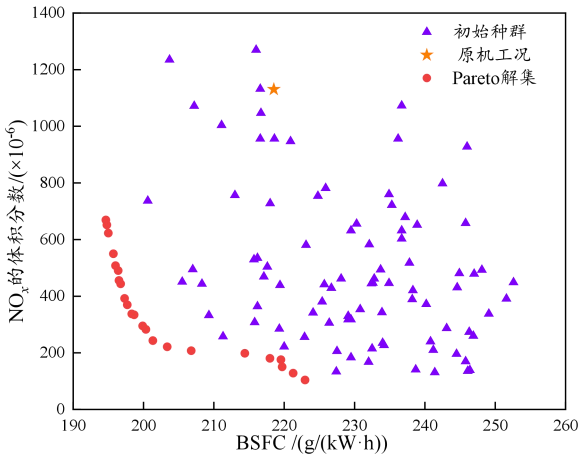


图 8 Pareto 最优解集和初始种群对比

2.4 TOPSIS 决策与对比分析

TOPSIS 作为常用的决策方法，主要根据与理想目标的接近程度对有限数量的评价对象进行排序。将 TOPSIS 与 NSGA-Ⅱ结合，可全面考虑每个目标的重要性，帮助决策者更准确地评估解决方案[14]。如图 5 所示：首先对图 8 中的 Pareto 解集进行正向化处理；随后确定 NO_x的体积分数、BSFC 和指示功率三个输出目标的正理想解 $\boldsymbol{Z}^{+}$和负理想解 $\boldsymbol{Z}^{-}$（选取指示功率最大值、NO_x的体积分数最小值和 BSFC 最小值为正理想解，相反则为负理想解，见式（16）和（17））；按照式（18）和(19)计算每个方案的输出目标值 $\boldsymbol{Z}$ 与正理想解、负理想解的距离（差值）D^{+}、D^{-}；通过式（20）计算每个方案与理想解的相对接近度 C；最终根据相对接近度对方案进行排序，并选择排名前 5 的最优方案，见表 8。

$$\boldsymbol{Z}^{+}=(I_{\mathrm{NO}_x}^{\min}, I_{\mathrm{BSFC}}^{\min}, P_{\mathrm{I}}^{\max}) \tag{16}$$

$$\boldsymbol{Z}^{-}=(I_{\mathrm{NO}_x}^{\max}, I_{\mathrm{BSFC}}^{\max}, P_{\mathrm{I}}^{\min}) \tag{17}$$

$$D^{+}=\left\|\boldsymbol{Z}^{+}-\boldsymbol{Z}\right\| \tag{18}$$

$$D^{-}=\left\|\boldsymbol{Z}^{-}-\boldsymbol{Z}\right\| \tag{19}$$

$$C=\frac{D^{-}}{D^{+}+D^{-}} \tag{20}$$

表 8 中：方案 2 评分最高，为 0.613，最接近理想目标；方案 1 和方案 4 均大于 0.6，与方案 2 接近。因此，将这 3 个方案的控制参数重新输入 GPR 模型，输出的性能参数与 75%负荷工况点进行对比，见图 9。图 9 中 3 个方案之间的 NO_x的体积分数和 BSFC 相差不大，但方案 2 相较方案 1 和方案 4，更符合本文在满足输出功率的前提下对 NO_x的体积分数和 BSFC 进行同步优化的目标，与原机相比 NO_x的体积分数下降 78.5%，BSFC 下降 7.7%。

表 8 TOPSIS 得分前 5 的方案

序号	控制参数				性能参数			
	甲醇替代率/%	EGR率/%	喷油提前角(CA)/(°)	进气压力/MPa	NO_x的体积分数/(×10-6)	BSFC/(g/(kW·h))	指示功率/kW	得分
1	9.7	11.5	20.7	0.231	282.9	200.3	43.2	0.600
2	11.2	11.4	21.5	0.226	243.3	201.3	42.8	0.613
3	13.1	12.5	20.7	0.218	207.8	206.8	41.8	0.592

4	11.1	11.8	21.0	0.221	221.4	203.3	42.2	0.610
5	11.6	11.0	21.9	0.233	295.2	199.9	43.3	0.597

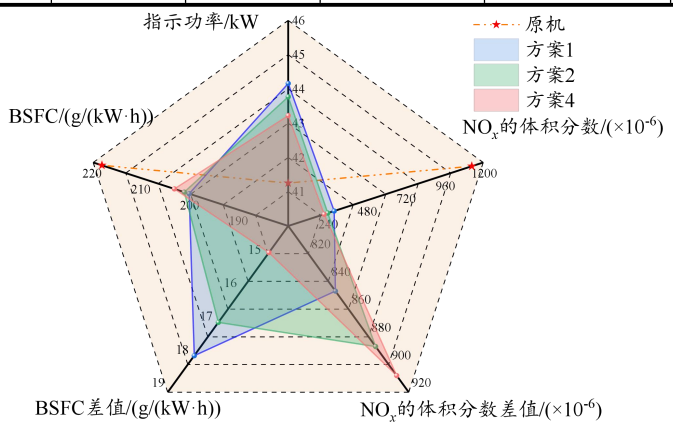


图 9 不同方案发动机性能比较

2.5 配机验证

将最优方案 2 的控制参数标定到 DMCC 发动机 ECU 和 Converge 中，结果见图 10。将最优方案的控制参数标定到发动机后得到的实验值为：NO_x的体积分数 287.8×10^{-6}，BSFC 203.5 g/(kW·h)，指示功率 42.2 kW。与原机实验值相比 NO_x的体积分数下降 74.5%，BSFC 下降 6.7%。Converge 仿真值与原机实验值的油耗率略有误差，仿真值小于原机实验值。这是由于喷油孔磨损后直径变大，雾化质量降低，导致油耗率升高。然而，GPR 模型依靠自身的不确定性估计，所得预测数据与实验数据之间具有更好的拟合性。

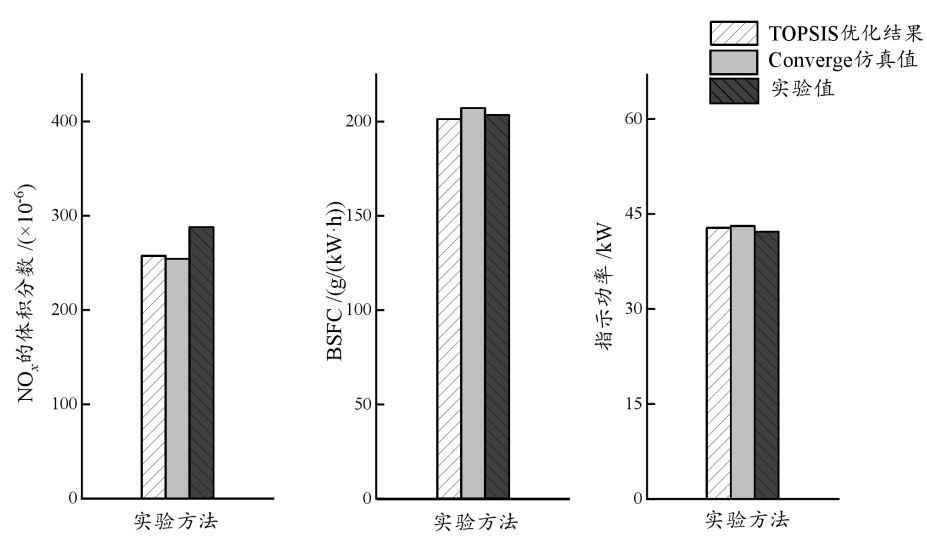


图 10 TOPSIS 优化结果、Converge 仿真值和实验值对比图

最后将实验测出的 NO_x的体积分数 287.8×10^{-6}（转速 911 r/min、75%负荷）换算成排放量，得出 NO_x排放量为 3.47 g/(kW·h)，已完全符合 IMO 规定的 Tier-Ⅱ排放限值 8.18 g/(kW·h)，与 Tier-Ⅲ的排放限值 2.08 g/(kW·h)仅相差 1.39g/(kW·h)。

3 结 论

本研究针对船舶发动机中高负荷下 NO_x排放出现峰值的现象，使用 GPR 结合 NSGA-Ⅱ的方法寻找发动机最优控制参数解集，并使用 TOPSIS 决策出最优解，现结论如下：

（1）基于 GPR 构建了用于预测船舶 DMCC 发动机 NO_x的体积分数、BSFC 和指示功率的多目标预测模型，预测模型经过验证得到 R^2值大于 0.95，均方根误差小于 1，证明预测模型准确可靠。

（2）将 GPR 与 NSGA-Ⅱ算法进行联合使用，获取在满足指示功率不小于 41.3 kW（75%负荷）的前提下，同时优化 NO_x的体积分数和 BSFC 的 Pareto 前沿解集，并且根据 TOPSIS 决策出最符合理

想目标的控制参数组合。

（3）将获得的最优控制参数进行实验验证，结果表明相较于未优化时，优化后 NO_x 的排放量下降 74.5%，仅为 3.47 g/(kW·h)，BSFC 平均下降 6.7%，仅为 203.5 g/(kW·h)。已完全符合 IMO 针对 NO_x 排放规定的 Tier-Ⅱ排放限值(8.18g/(kW·h))，与 Tier-Ⅲ排放限值仅相差 1.39 g/(kW·h)。

综上所述，采用 GPR 结合 NSGA-Ⅱ的优化方法，可以节约船舶 DMCC 发动机在综合性能优化时所耗费的大量时间和经济成本，并避免了在寻找最优控制参数组合时发动机长期运行在不良工况的情况，有效延长了发动机寿命。同时，也为使用新型燃料优化发动机性能和降低 NO_x、CO_2、Soot 等其他污染物排放提供新的研究方法。

参考文献

[1] WANG H, YAO A, YAO C, et al. Investigation to meet China II emission legislation for marine diesel engine with diesel methanol compound combustion technology[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 96: 99-108. DOI: 10. 1016/j. jes. 2020. 04. 017

[2] LIU L, WU J, LIU H, et al. Study on marine engine combustion and emissions characteristics under multi-parameter coupling of ammonia-diesel stratified injection mode[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(26): 9881-9894. DOI: 10. 1016/j. ijhydene. 2022. 12. 065

[3] 王全刚. 柴油/甲醇二元燃料燃烧边界条件研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.

[4] 张志清. 燃生物柴油船用发动机高效燃烧与低污染排放研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.

[5] 宣熔, 牛梦达, 黄朝霞, 等. EGR及进气压力对双燃料发动机燃烧和排放的影响[J]. 船舶工程, 2021, 43(10): 76-81. DOI: 10. 13788/j. cnki. cbgc. 2021. 10. 12.

[6] LIU J, WANG J, ZHAO H. Optimization of the injection parameters and combustion chamber geometries of a diesel/natural gas RCCI engine[J]. Energy, 2018, 164: 837-852. DOI: 10. 1016/j. energy. 2018. 09. 064.

[7] 许朵, 姚崇, 马骋, 等. 船用双燃料发动机综合性能预测及优化[J]. 内燃机学报, 2022, 40(5): 403-411. DOI: 10. 16236/j. cnki. nrjxb. 202205051.

[8] TANG X, WANG P, ZHANG Z, et al. Effects of high-pressure and donor-cylinder exhaust gas recirculation on fuel economy and emissions of marine diesel engines[J]. Fuel, 2022, 309: 122226. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122226.

[9] 赵建辉, 蓝中泽, 卢相东, 等. 高斯过程回归的高压共轨燃油系统多次喷射喷油量预测研究[J/OL]. 西南交通大学学报. https: //link. cnki. net/urlid/51. 1277. u. 20240614. 1643. 010.

[10] ZAREEI J, ROHANI A, ALVAREZ J R N. The effect of EGR and hydrogen addition to natural gas on performance and exhaust emissions in a diesel engine by AVL fire multi-domain simulation, GPR model, and multi-objective genetic algorithm[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(50): 21565-21581. DOI: 10. 1016/j. ijhydene. 2022. 04. 294.

[11] 姚小俊, 吴迪. 基于贝叶斯优化高斯过程回归法的再生混凝土力学性能预测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(7): 2968-2975. DOI: 10. 12404/j. issn. 1671-1815. 2023. 23. 07. 02968.

[12] LI J, ZHAO Z, KAZAKOV A, et al. A comprehensive kinetic mechanism for CO, CH_2O, and CH_3OH combustion[J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2007, 39(3): 109-136. DOI: 10. 1002/kin. 20218.

[13] YE W, WANG B, LIU Y, et al. Deep Gaussian process regression for performance improvement of POS during GPS outages[J]. IEEE Access, 2020, 8: 117483-117492. DOI: 10. 1109/ACCESS. 2020. 3004706.

[14] 周宁, 范中洲, 赵羿. 基于熵权-TOPSIS模型的大风浪条件下引航员登船水域选址[J]. 上海海

事大学学报, 2020, 41(1): 46-50. DOI: 10. 13340/j. jsmu. 2020. 01. 008.

作者简介：蒋更红（1976—），男，湖南邵阳人，副教授/院长，硕士；研究方向：船舶控制及轮机工程。E-mail: jghong@zjvtit.edu.cn.

新能源动力船舶推广应用的可行性研究

杨小江

（杭州市公路与港航管理服务中心，浙江 杭州，310014）

摘　要：中国国家工信部等五部委联合发布的《关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见》明确提出积极稳妥发展 LNG 动力船舶、加快发展电池动力船舶、推动甲醇、氢等动力技术应用。近年来，伴随 LNG、锂电池、醇燃料等新能源动力技术的逐步成熟，船舶清洁化改造已渐成为交通水运发展历程中的推广方向。采用清洁能源动力比如锂电池的船舶因其环保污染少、运营能耗小、舒适低噪音等优势，目前在我市西湖、京杭运河等相对水流平缓景区的小型载客游览船上得到了探索性的初步应用。本文通过对不同新能源优劣势的对比分析，得出新能源船舶推广应用的可行性方向。

关键词：新能源；船舶；推广；应用

1 新能源发展的政策背景

近年来，中央、省市出台了一系列鼓励发展绿色新能源船舶发展的政策文件，2022 年中国国家工信部等五部委联合发布《关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见》，明确提出积极稳妥发展 LNG 动力船舶、加快发展电池动力船舶、推动甲醇、氢等动力技术应用；《浙江省能源发展“十四五”规划的通知》（浙政办发〔2022〕29 号）要求交通运输领域加快推动新能源船舶的普及应用；杭州市政府已在《杭州市大气环境质量限期达标规划的通知》（杭政办函〔2019〕2 号）中要求积极推广使用纯电动等清洁能源或新能源船舶，在内河公务艇、游艇、水上公交等客运船舶中开展纯电动船舶应用试点。

2 杭州航区船舶现状

杭州航区现有登记船舶约 3600 艘，从动力来源看，传统动力船舶 2438 艘，电池动力船舶 404 艘，占比 11.2%（其中，铅酸电池动力船舶 370 艘，占现有检验登记内河船舶 10.3%；锂电池新能源动力船舶 34 艘，占现有检验登记内河船舶 0.9%）；混合动力船舶 8 艘（其中 LNG 混动 4 艘、锂电混动 4 艘），占现有登记船舶 0.2%；从航行区域来看，新能源船舶主要集中在封闭水域区域运营；从船型来说，小型电动客船（20 米以下）占比约 95%；从新能源的种类来看，锂电池动力船舶占杭州新能源船舶数量的 90.4%，LNG 动力船舶占比 8.6%，而氢燃料、醇燃料及氨燃料等尚未有实船案例。综上所述，目前我市新能源船舶仍处于起步阶段。

3 新能源的主要优劣势对比

当前新能源替代燃料包括 LNG、甲醇、氨、氢以及电池动力方案。总体来看，成熟程度：LNG > 甲醇/锂电/氢>液氨；减碳程度：氨/氢/锂电>甲醇>LNG；体积密度：LNG>甲醇>氨>液氢>锂电。。

3.1 LNG：最佳过渡能源

LNG（液化天然气）指预处理并加压冷却至-162℃以下的天然气。LNG 可在短期作为过渡燃料，中长期也可以作为备用燃料。

优势：一是燃料成本较低，且容易获得。LNG 作为成熟的能源种类，加注基础设施较为健全。据统计，截至 2023 年 1 月，全球有 185 个港口提供 LNG 加注服务，预计到 2025 年在此基础上会再增加 50 个港口。在 2023 年天然气价格正常化之后，LNG 加注市场现已恢复健康发展。二是具有一定的减排能力。根据 DNV 统计，相较传统内燃机，LNG 燃料可减少 24%左右的碳排放。使用 LNG 作为燃料的船舶可以避免硫化物、可吸入颗粒物的产生，氮排放可最多降至同航程燃油的 30%。

劣势：一是仍属于化石能源。LNG 燃烧过程中，仍会有温室气体排放。LNG 可能在运输和加注过程中发生散逸，主要成分甲烷本身就是一种温室气体。因此，LNG 在中长期未来的深度脱碳过程中，恐难作为最主要的船用燃料。二是制冷成本高企。由于低温液态的 LNG 需要存放在低温储存罐里，绝缘燃料罐会增加船舶的建造成本，且从 LNG 蒸发容易产生经济损失。

3.2 绿色甲醇：中长期可选方案之一

甲醇热值低于 LNG，但清洁排放前景高于 LNG。

优势：一是改造成本较低。在发动机技术上，甲醇发动机在现有部分双燃料发动机的基础上只需要进行较小幅度的改动，就可以使用甲醇作为燃料，有效节约投资成本并缩短了研发和应用周期。二是常温呈现液态。相比 LNG 需要低温液化，甲醇常温呈现液态，储运和使用较为方便。

劣势：一是并非所有甲醇都具有减碳属性。煤炭生产的甲醇为黑色甲醇，由天然气生产是灰色甲醇，使用蓝氢与碳捕获技术结合生产的是蓝色甲醇，只有生物质循环利用制甲醇和绿电制绿氢再制甲醇两种方式制取的甲醇才能称之为绿色甲醇。黑色和灰色甲醇燃烧会增加碳排放；蓝醇虽然能够减少碳排放，但达到欧盟碳排放阈值要求并获得认证尚有难度；只有绿醇是碳中性的。二是绿醇生产受限。绿色甲醇只能由生物质裂解、绿电制氢+二氧化碳捕集两种方式进行生产。我国是全球最大的甲醇生产国和消费国，其约占全球产能的一半。但从制造工艺看，目前我国甲醇以黑色、灰色甲醇为主。中国生物质资源并不丰富，受原料端紧缺、运输限制，商业化项目运作存在诸多问题；而当前储能、储氢、二氧化碳捕捉都面临成本高企的问题。未来绿色甲醇产量不足以支撑船运行业的巨大需求。三是能量密度较低。甲醇的体积能量密度比较低，与燃油比较，甲醇提供相同能量所需舱容是燃油的 2.27 倍（ LNG 所需舱容为燃油的 1.6 倍），这也意味着使用甲醇作为燃料的船舶续航力只有目前船型的一半都不到，这无疑限制了甲醇货船上的应用。四是安全性、毒性以及腐蚀性。甲醇属于低闪点易燃液体，存在燃爆性。甲醇的急性毒性可通过摄入、吸入高浓度甲醇蒸气和皮肤吸收三种途径对人体造成危害。同时，甲醇对铅、镍、铸铁等有色金属产生腐蚀，会影响到内燃机、管路和储存舱柜中这些材料的使用。五是国内配套设施不足。国内船用甲醇加注码头布局不足，甲醇燃料设备的配套能力也有待提升。

3.3 氨：未来真正的零碳燃料

液氨是将气态的氨气通过加压或冷却进入液态得到的清洁燃料。

优势：实现零碳排放。氨的分子式为 NH3，既不含碳也不含硫，作为船用燃料，能够真正实现船舶零碳排放。

劣势：一是化学性质欠佳。液氨具有较高的腐蚀性、毒性和爆炸风险，这使得发动机的研制周期较长。液氨的强挥发性、强刺激性，引发安全事故风险，进而影响海洋生态安全。二是能量密度较低。液氨燃料的能量密度低于船用柴油、LNG 及甲醇，根据 DNV 测算，相同航程液氨需要船用柴油 3.1 倍的燃料储存空间，并且加注频率也可能相应增加。三是氨燃料动力装置尚不成熟，迄今未投入商用。

3.4 电动：内河中短距离具有优势

针对短距离场景，例如游艇、渡轮、游览船等小型船只，电池供电已经成为可行的选择，正在向更远航程、更大功率的应用场景拓展。

优势：一是零碳排放。将电动化引入船舶领域，使用绿电驱动的电动船能够实现零碳排放。二是运营成本较低。根据浙商证券的理论计算，在当前技术水平下，当航程小于 1000km 时，电动船具备成本优势。在未来考虑油船成本上升、电池能量密度提升、成本下降的情况，电动船在内河航道、

中短距离的优势将会更加明显。

劣势：一是续航里程有限。与电动汽车类似，电动船舶也面临着“里程焦虑”，且其配套的充换电等基础设施亟待进一步完善。二是建造及配套成本较高。据估算，电动船的建造成本远高于柴油动力船。锂电池的寿命一般为 10 年，而一艘船的寿命通常长达 30 年，在船舶的生命周期中，电池需要多次更换，进一步增加综合成本。同时锂电池配套设施成本高。现有锂电池动力客船由客运企业自备配套充电桩，每个充电桩成本约 10 万元（原有码头固定泊位，暂无需另计场地成本）。载货船舶每个专用充电场站及码头泊位等综合投入成本高达 100 万，普通民营企业根本无力承担。

3.5 氢：真正的零碳燃料

优势：氢燃料电池将氧气与氢气的化学能转换成电能，生成物为水，具有高效、无污染、设备运行噪音低等特点。使用氢燃料作为船舶动力，可以实现零排放，不会产生二氧化碳、硫氧化物和氮氧化物等污染物，对环境更加友好。同时，氢燃料电池具有能量转换效率高、振动噪音低等优势。

劣势：氢气的储存和运输是一个挑战，需要高压、低温或特殊的储存技术，增加了船舶的复杂性和成本。此外，氢燃料电池的成本目前较高，需要进一步降低成本以提高其经济可行性。同时，加氢基础设施的建设也需要大量的投资和时间。

不同新能源技术路线比较

类型	燃料生产及应用	优势	劣势
LNG	需要可燃烧主机，配套的燃料供应系统及额外的存储空间	使用安全，技术成熟，加注设施和运输要求高，氮氧化物、硫氧化物非常低，相较于燃油低 20%	存在甲烷逃逸,依旧是化石燃料,加注设施主要集中在航线沿线港口，末来燃料成本存在不确定性，安装成本高，占用空问
甲醇	主要使用天然气来生产(灰醇),绿色甲醇生产开始增加，可用于甲醇双燃料主机	燃料使用及风险管理较 LNG 更为简单，绿色甲醇碳排放为零，氮氧化物、硫氧化物排放少，常温呈现液态	能量密度低,短期内使用成本高，有毒，易燃，全球范国内使用产能有限
液氨	将气态的氨气通过加压或冷却进入液态得到的清洁燃料	真正的零碳燃料，能够实现零碳排放	化学性质欠佳,能量密度较低
电池	电池存储电能用于船舶推进	可以实现零排放，已在内河干散货船、集装箱船、游轮、公务船等船舶上开展应用	受电池存储能力限制,不适合远距离船舶，制造成本高
氢	电池主要集中在氢燃料电池，也可用于氢燃料主机	清洁且可以大量制取，燃料电池效率更高	制氢耗能高,大规模生产成本昂贵，加注设施有限，沸点低，存储和运输成本高

4 低碳趋势下的发展前景

目前各种路径仍面临诸多问题和挑战，航运业尚未就路径选择达成最终共识。通过比较各自的优劣势，综合行业发展情况，得出以下分析结论。

短期内，LNG 适合作为减少碳排放的过渡能源。作为产业链成熟的低碳能源类型，LNG 成本相对可控，加注基础设施相对健全，且具有一定的减排能力，较为适合承担短期内降碳的任务。然而，LNG 依旧是化石能源，航运业在中长期的未来仍需更加绿色的燃料。

中长期，绿色甲醇和氨优势最大，相比之下氨的远期前景更加广阔。甲醇是当前关注度较高的燃料。作为常温液态的燃料，其与传统燃油发动机的兼容性较好，商业化步伐较快。然而，绿色甲

醇的两种主要来源中，生物质甲醇的原材料难以满足，电制甲醇的成本太高。在可预见的未来，绿色甲醇的生产量可能面临瓶颈，难以单独支撑航运行业的巨大需求。相较甲醇而言，氨是一种真正的零碳燃料，燃烧不排放二氧化碳。当前液氨的大规模应用，需要解决腐蚀性、毒性、燃烧范围较窄等问题。随着氨燃料发动机研发、氨燃料船型开发等项目的推进，氨燃料动力船有望在以后实现一定的商业化应用。在这些关键技术取得突破之后，未来氨将具有更大的潜力。

中长期内河及中小型沿海船的场景下，电动船是可选方案。当前，电池动力的船型主要应用在车客渡船、客船等功率要求不高、运输距离不长的场景之中。在电池能量密度、循环寿命、安全性等性能进一步提升的情况下，电动船有望拓展至近海中小型运输船和各式作业船。

参考文献

[1]《关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见》.中国国家工信部等五部委.2022.
[2]《浙江省能源发展“十四五”规划》.浙江省人民政府.2022.

作者简介：杨小江，杭州市公路与港航管理服务中心海事船检处副处长，高级工程师，全国注册验船师考试专家库成员，杭州市交通运输工程中评委成员，浙江省安全工程专业中评委成员，连续两届杭州市反恐怖工作先进个人，杭州第十九届亚洲运动会大赛大考每周之星。手机号 13575782189，邮箱 6751424@qq.com

基于 FMEA 的船员在船作业工伤风险识别与评估研究

李彦朝[1]，蒋海龙[2]

（1. 浙江交通职业技术学院，浙江省 杭州市 311112；2. 台州海事局，浙江省 台州市 318001）

摘　要：为满足航运企业船员作业安全管理提升需要，保障船员人身安全，针对船员在船作业期间可能面临的工伤风险，利用风险过滤、评级与管理方法（FMEA），识别船员在船各类作业的主要风险点，评估该风险点可能造成的人身伤害后果并对其进行量化，以后果严重性、风险可能性、作业参与可探测性三个量化数据进行风险综合评估，进而利用措施优先级（AP）开展船员作业风险评级验证与过滤，结果表明：船员主要高风险作业为系解缆绳、开/关舱、密闭空间作业、机舱值班巡查等，主要高风险点为带缆未正确站位、缆绳断裂、工具坠落等，主要人身伤害为物体打击、高空坠落、机械伤害、窒息、灼烫伤等；认为可从船企双方注重船员安全培训、船上开展作业清单式规范管理、应用数字化智能化手段强制管理三方面加强风险控制管理。

关键词：船员工伤；船员作业；风险识别；风险评估；FMEA；AP

船舶因航行动态变化、作业环境不一等特殊风险，在生产作业中极易发生工伤事故或险情，加之远离岸基、船上医疗资源有限、第三方救护援助难以及时抵达等多重因素，常致使受伤船员错过最佳医救时机，导致船员受伤后果加剧甚至造成生命危险或永久性伤害。因此，识别船员在船作业风险和可能导致的人身伤害后果，开展风险点量化与评级，提出风险控制管理机制，对提升船员人身安全、降低船员工伤事故具有重要实践意义。

航运企业作为船员的雇佣者、工伤事故发生后的处理者和人身伤害的赔偿方，持续聚焦船员工伤事故预防与管理。在工伤情况方面，中远海运散货运输有限公司通过统计三年内船员工伤类别和

工伤人员职务结构、年龄层次、文化程度，在重轻伤比例的基础上从不同外伤视角提出了处理措施；在具体作业方面，中交四航局第二工程有限公司从船舶修理视角分析了船舶维修安全风险，香港明华船务有限公司针对系泊作业中可能出现的安全问题进行了分析并提出了预防和应对措施；在原因分析方面，深圳远洋运输股份有限公司从物、人、环境三方面分析了船员工伤原因；在事故预防方面，中远海运船员管理有限公司提出了建立和实施预防工伤事故台卡，施行“5S”管理模式，也有企业认为要加强物的管理、提升安全培训与管理，加强基本安全教育培训、派前安全教育培训、在船安全教育培训；从事故后续处理方面，有海事法院结合《工伤认定条例》从工伤认定视角提出了要激活船员工伤认定兜底条款。

可以看出：航运企业作为船员工伤事故的直接关联者，目前多聚焦单一船员作业开展研究，注重事后工伤事故处置，事故预防也多以安全培训为主。尽管这些措施在某些程度上提升了船员作业安全管理水平，但船员所面对船舶设备、风浪海况、工作环境的复杂性等多重因素均会导致其作业风险增加，一旦发生事故造成的后果比较严重。

1 风险评价方法选择

风险评价方法主要有作业条件危险性评价法、安全检查表法、预先危险分析法、故障模式影响分析等，如采用故障树分析法构建实训船安全风险系统，基于云交换规则对评价云图进行定量评价建立航运安全云模型等，这些方法分别存在检查表编制难度大、编制有误易失真、参数取位宽、只能用于宏观评价等缺陷。

基于船员在船作业工伤事故发生率高于一般行业、医救条件又低于一般行业的现状，以及航运企业、行业主管机关对提升船员作业安全的渴望，笔者综合考虑船员在船期间涉及的不同作业类型和各类作业频次，考虑风险数据难以直接获取、各类风险因素极不确定等复杂情况，选用了风险过滤、评级与管理方法（FMEA），该方法不需要大量统计数据，可以基于专家小组评价进行风险评估，又能根据评估结果确定一定预防措施，具有定性和定量分析优势。选用 FMEA 方法的目的在于及时发现、评价潜在风险及其后果，找到能降低或避免风险发生的措施并不断完善。

一般来说，FMEA 方法包括专家组会商、风险分析及故障确定、评价表建立及结果分析、改进措施等流程。本文研究步骤分为作业风险辨识、风险点及人身损害识别、风险量化评级分析、风险控制管理四个阶段：

1）作业风险辨识：参考行业标准遴选船上典型作业场景，结合专家意见进行在船典型作业风险辨识；

2）风险点及人身损害识别：根据事故伤害性质识别典型作业风险点，并对可能产生的人身伤害进行识别；

3）风险量化评级分析：基于量化的可能性和结果的等级编制排序矩阵，进行风险过滤及评级；

4）风险控制管理：针对各风险因素的评估结果，确定风险控制方案。

2 在船作业风险辨识

风险辨识就是通过一定的识别方法来确定潜在危险，寻找事故可能发生的原因、评估事故可能导致后果，并对确定的每类危险进行等级排序以提出风险控制方案。船舶作为大型劳动场所，作业种类多、作业活动频次高，有些作业活动风险高，极易发生安全事故。

2.1 船上主要风险作业分类

鉴于船上风险的复杂、多样，对船上作业风险辨识采用客观分析与主观判断相结合方式。利用风险因素选取原则，参考《航运公司预防船员工伤事故工作指南》，借鉴英国海事与海岸警备署发布的《商船海员安全工作守则》，结合国内大型航运企业过去十年工伤事故统计，并分析领域内专家和一线企业员工意见，把船上易发生工伤事故的作业划分为甲板作业、轮机作业、通用作业三大类，共计二十余种。甲板作业、轮机作业一般由甲板部和轮机部各自完成，通用作业可由甲板部、轮机部各自执行或共同参与完成。

2.2 在船典型风险作业

经过多家航运企业实船船舶危险源辨识调研和一线船员实际操作的问卷调研，船员在船期间可参与的典型作业主要包括：

1）甲板作业：高空作业、舷外作业、开/关舱操作、系解揽作业、抛起锚作业、收放舷梯/引水梯作业等；

2）轮机作业：机舱值班巡查、锅炉水位计冲洗、燃油柜放残操作、空压机/分油机操作、燃油调驳、主辅机吊缸与零部件拆装、水泵拆装与检修、喷油器更换/检修、机械部件清洗、过滤器清洗等；

3）通用作业：吊重作业、收放救生艇作业、电气动工具操作、电焊焊接作业、明火作业、密闭空间作业等。

3 船员作业风险与伤害识别

3.1 典型作业风险点识别

根据事故伤害性质，对人身造成伤害的危险源一般可分为物体打击、高空（处）坠落、机械伤害、触电、灼烫伤、中毒和窒息、火灾与爆炸、其他伤害等。对前述三类作业分别进行主要风险点识别，结果见图 1。

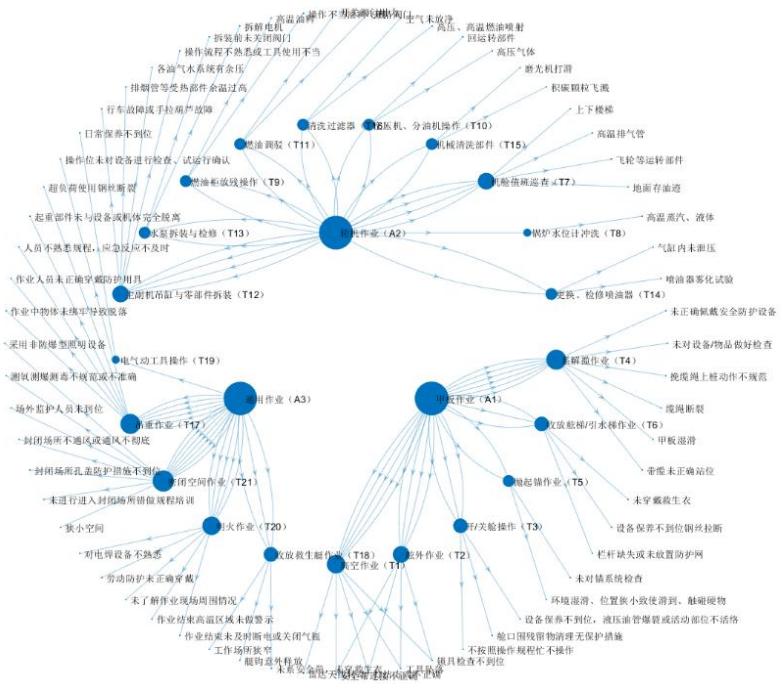


图 1 船上作业主要风险点

Fig.1 The main risk points of shipboard operations

分析可知，甲板作业（A1 类）、轮机作业（A2 类）、通用作业（A3 类）三类作业共有 21 项典型作业（T1—T21），涉及主要风险点 68 个（R1-1，R1-2，……，R21-8）。可能产生人身伤害的风险点 64 个，其中 A1 类 22 个，A2 类 20 个，A3 类 22 个。

3.2 可能的人身伤害识别

本文重点研究船员在船期间作业工伤风险，因此重点针对可能产生人身伤害的 64 个风险点进行梳理。从可能导致的结果看，产生的人身伤害主要及频次见表 1，致使人身伤害的风险点关系见图 2。

表 1 典型作业风险点可能导致的人身伤害频次分析

Tab.1 Analysis of the frequency of personal injuries from typical operational risk points

序号	可能导致的结果	出现频次	涉及风险点	涉及作业	涉及作业大类

序号	可能导致的结果	出现频次	涉及风险点	涉及作业	涉及作业大类
1	爆炸	2	R21-6、R21-4	T21	A3
2	触电	4	R13-2、R20-2、R20-5、R19-1	T13、T19、T20	A2、A3
3	高空坠落	10	R1-1、R1-2、R1-3、R2-1、R2-2、R2-3、R2-4、R3-3、R21-5、R18-2	T1、T2、T18、T21	A1、A3
4	高压冲击	4	R10-2、R12-2、R14-1、R14-2、R19-1	T10、T12、T14、T19	A2、A3
5	滑跌倒	4	R4-6、R7-3、R7-4、R18-3	T4、T7、T18	A1、A2、A3
6	机械伤害	12	R3-1、R4-2、R4-3、R6-2、R7-1、R10-1、R11-2、R12-1、R12-4、R15-1、R15-2、R3-2	T3、T4、T6、T7、T10、T11、T12、T15、	A1、A2
7	落水、淹溺	3	R6-1、R6-3、R18-1	T6、T18	A1、A3
8	物体打击	14	R1-4、R1-5、R4-1、R4-4、R4-5、R5-2、R17-1、R17-2、R17-3、R17-4、R17-5、R17-6、R21-2、R21-8	T1、T4、T5、T17、T21	A1、A3
9	窒息/中毒	3	R21-3、R21-7、R21-4	T21	A3
10	灼烫伤	9	R7-2、R8-1、R9-1、R9-2、R12-3、R16-1、R20-4、R20-1、R20-3	T7、T8、R9、R12、R16、R20	A2、A3

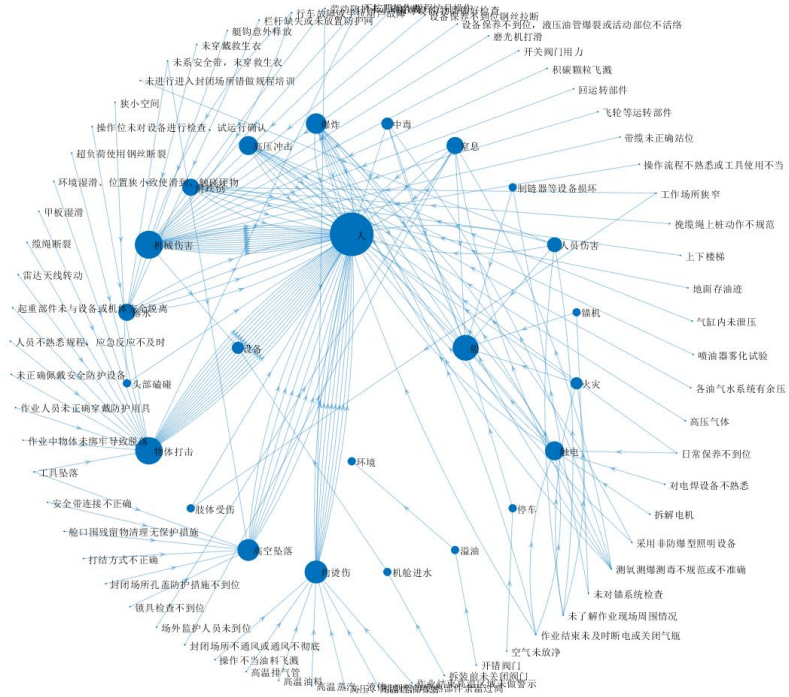


图 2 致使人身伤害的典型作业风险点

Fig.2 Typical operational risk points that result in personal injury

可以看出，船员在船期间参与的各类作业可能产生的风险频次由高到低依次为物体打击（如缆绳“死亡圈套”“致命回弹”）、机械伤害（如高速运转部件）、高空坠落（如高空作业安全绳系结不当）、灼烫伤（如高温气体）等。

从各类伤害涉及的作业得出：甲板部船员主要面临的伤害风险为高空坠落、机械伤害、落水淹溺和物体打击，轮机部船员则主要面临高压冲击、机械伤害、灼烫伤和触电。

4 船员作业风险量化过滤

4.1 风险点量化与评级

根据 FMEA 风险对应后果的严重性（Severity）、风险发生的可能性（Occurrence）、作业参与的可探测性（Detection）组合，参考国际海事组织（International Maritime Organization，IMO）海上安全委员会（Maritime Safety Committee，MSC）74 次会议将风险定义为后果的频率以及严重性的组合，利用矩阵法，以各类作业参与频次的可探测性、风险对应后果的严重度进行风险评级，形成严重度可探测度矩阵（探测区风险）并确定出 4 个风险区间及对应的风险点：极高风险点 9 个、高风险点 26 个、一般风险点 26 个、低风险点 3 个，见表 2。

表 2 风险点风险评级矩阵（探测区风险矩阵）

Tab.2 Risk point risk rating matrix （Detection area risk matrix）

后果严重度 参与可预测度	灾难性（致死）10			严重（致残）8			一般（重伤）6			轻微（轻伤）4			可忽略 2	
经常 10	R3-3	R4-3	R4-4	R7-2			R3-1						R7-3	R7-4
可能 8				R6-1 R2-2 R2-3	R5-2 R2-1	R12-3 R20-1	R15-1 R15-2	R5-1 R6-2						
偶尔 6	R2-4 R3-2 R7-1	R21-7	R21-3	R6-3 R20-2 R20-5 R20-4 R13-2	R12-2 R21-5 R18-2 R18-1 R20-3	R6-1 R19-1 R1-1 R1-2 R1-3	R5-2 R21-8 R4-5 R21-6 R17-1 R17-2	R21-4 R17-4 R1-5 R1-4 R21-2 R17-6	R4-2 R4-1 R12-1 R12-4 R17-5 R17-3	R4-6				
很少 4				R9-1 R9-2	R18-3 R14-1	R14-2 R11-2								
极少 2				R8-1	R16-1									
风险等级	极高风险			高风险			一般风险			低风险				

4.2 风险点过滤与确定

基于 FMEA 方法中的措施优先级（Action Priority，AP）相关评定方法，通过对照失效模式及影响分析表格，可以确定出相应风险点风险的评级及风险控制措施的优先级（AP）。为保证风险点分析的完整性，依据风险评级矩阵的同时结合柏拉图分析法二八定律，遴选出优先级（AP）排序前 20%的风险点。

对比得出：仅有风险点 R21-8 被评级为一般风险，其他均与风险评级矩阵相一致。除去风险点 R1-1、R1-2、R1-3、R5-1、R13-2、R20-3（均为高风险点）的 AP 排序略靠后之外，其他风险点均比较靠前，说明风险评级过滤有效。因此，本文保留风险评级“极高风险”或“高风险”且“AP 排序前 20%”内的风险点进行研究，共确定出 11 个典型作业 21 个风险点，见表 3。

表 3 船员作业 FMEA 风险评价表

Tab.3 FMEA risk assessment form of student practice on board

作业类型	典型作业	风险点编号	可预测度	发生度	严重度	AP 排序	风险评级
甲板作业(A1)	舷外作业（T2）	R2-4	6	10	10	8	极高
	开/关舱操作（T3）	R3-1	10	8	6	10	高
		R3-2	10	8	6	9	极高
		R3-3	10	8	10	1	极高
	系解揽作业（T4）	R4-3	10	8	10	1	极高
		R4-4	10	8	10	1	极高
	抛起锚作业（T5）	R5-2	6	10	6	20	高

作业类型	典型作业	风险点编号	可预测度	发生度	严重度	AP 排序	风险评级
轮机作业(A2)	收放舷梯/引水梯作业（T6）	R6-1	6	8	8	9	高
		R6-3	6	8	8	9	高
	机舱值班巡查（T7）	R7-2	10	6	8	10	极高
		R7-1	10	6	6	20	极高
	空压机、分油机操作（T10）	R10-2	8	6	8	10	高
	主副机吊缸与零部件拆装（T12）	R12-2	6	8	8	9	高
		R12-3	6	8	8	9	高
	电气动工具操作（T19）	R19-1	6	8	8	9	高
通用作业(A3)	明火作业（T20）	R20-2	6	8	8	9	高
		R20-4	6	8	8	9	高
		R20-5	6	8	8	9	高
	密闭空间作业（T21）	R21-3	6	8	10	10	极高
		R21-7	6	8	10	10	极高
		R21-5	6	8	8	9	高

4.3 风险评价结果分析

船员在船期间面临各类风险的复杂和多样，致使对应的事故模式相对较多，将风险评价表中确定的 21 个风险点分别从 S、O、D 进行排序，并结合柏拉图原则进行解释和研究发现：主要风险点出现频次从高到低依次为 R3-3（舱口围残留物清理无保护措施，3 次）、R4-3（带缆未正确站位，3 次）、R4-4（缆绳断裂，3 次）、R2-4（工具坠落，2 次）、R21-3（封闭场所不通风或通风不彻底，2 次），与风险评级矩阵中的极高风险评级基本一致（R2-4、R3-2、R3-3、R4-3、R4-4、R7-1、R7-2、R21-3、R21-7）。

分析可知：作业类型中出现频次从高到低依次为 T4（系解揽作业，6 次）、T3（开/关舱操作，5 次）、T21（密闭空间作业，3 次）、T7（机舱值班巡查，2 次）、T2（舷外作业，2 次）、T5（抛起锚作业，1 次）；可能导致的伤害结果出现频次从高到低依次为物体打击（7 次）、高空坠落（5 次）、机械伤害（3 次）、窒息（3 次）、灼烫伤（1 次）。

可以看出，船员作业风险主要集中在甲板作业中的系解揽、开关舱，轮机作业中的机舱值班巡查和通用作业中的密闭空间作业。个别风险点发生的可能性不高，但其参与频次、风险点导致的后果严重度均较高（如 R7-2，高温排气管可能导致的灼烫伤）。因此，在进行风险控制管理时需要综合权衡多重因素，确保措施的针对性和可实施。

5 船员作业风险控制管理

根据前述五类高风险作业、八种可能的人身伤害，结合船上风险因素分类（人、设备、管理、环境、应急反应），从船、企双方共筑安全意识，清单式动态化作业管理，数智赋能船上作业安全三个维度提出风险管理对策，以提升船员作业安全。

5.1 船企共培训，提升安全作业意识

人是风险控制的核心因素。船员作为船上相关风险作业的主要参与者和各类可能伤害的直接面对者，应当筑牢安全红线。

航运企业要强化职业安全意识，坚持做好岗前安全教育培训，可通过《海事案例分析》等典型

课程等培养上岗船员案例分析能力和安全工作思维，建立职业安全评判制度与考核标准，施行上船前安全专项考核制度，树立“正确站位”“遵照规程”“事前检查、事后核查”等职业思维，为其上岗做好安全储备。

同时，船舶作为船员作业的主要场所，要充分发挥风险措施针对性强的特征，结合船舶结构特征、设备类型、航区情况等，重点围绕典型作业风险点、结合船上具体设备操作方式建立明确须知或详细程序，并围绕职业安全开展内部培训，以提升其安全认知和安全操作技能。

5.2 清单式管理，促进船上规范作业

安全管理体系的应用促进了船员保护船舶和环境安全，实现了管理结构化和文件化。从提高安全生产管理水平视角开展作业安全生产标准化，基于安全管理体系开展船上各类作业“清单式”管理，能确保船员作业每一可能的风险点都得到充分关注，能提升船员工作的严谨性、降低安全风险。

“清单式”作业就是针对船上各类作业具体特征，制定个性化、详细化、系统化的作业流程规范，能防止关键环节被遗忘、减少人为失误、实现作业流程标准化，“清单式”作业可以根据企业制度、船舶类型、季节变化、货物特性等动态调整。

就船员作业而言，应着重关注和设计“开/关舱操作”“密闭空间作业”“机舱值班巡查”“系解揽作业”等。如明火作业时清单应重点关注：作业场所确认（机舱、非机舱、港内）、风险评估（防范措施、人员培训）、环境及工具检查准备（易燃易爆物清除、测爆、通风条件、作业工具检查、灭火器材及急救器材准备）、作业后检查（现场清理、可能火源灭除）。

5.3 强数智应用，降低船上作业风险

囿于船上环境限制，对参与作业船员难以进行实时、高效、全方位的智能化管理，工作环境多变（高低温、大风浪）、安全辅助设备佩戴不齐、作业人员违反安全规定行为频发等因素等均增加了船员作业风险。鉴于此，可利用船上局域网、卫星定位通讯系统等现有技术条件，创新船员作业管理方式。

可尝试开发和配置安全作业提醒系统。针对船上各类区域特征设置区域安全阈值（如油漆间内不得有明火或吸烟、不得堆放杂物、须安装防火网等），并结合作业人员定位辅助设备，提醒相关作业人员从事对应作业时应遵守的作业安全注意事项，保障作业和人身安全。

可增设人员行为识别管理系统。综合运用电子围栏、人员定位和不安全行为人工智能(Artificial InteIIigent，AI)识别相融合的技术手段，捕捉船员在船作业状态和安全防护状态（如未戴安全帽、未穿救生衣、未系安全绳、作业站位不正确等），通过对人员防护状态识别和行为动作识别，实现各类风险隐患早发现、早消除。

6 结束语

基于 FMEA 的风险评级和风险评价在一定程度上解决了船员在船作业安全风险辨识问题，具有一定的实用价值。找准船员作业风险的关键点，并针对性的提出防范措施，基于船企协同的强制管理、教育培训、数智应用等风险管理对策，使得在船作业安全风险得以有效控制，从而保证船员人身安全、提升船上作业安全。

参 考 文 献

[1] 陈森亮.船员工伤事故的施救和预防[J].珠江水运,2020(03):6-7.
[2] 梁敏波.船舶修理作业安全风险分析及控制措施研究[J].中国设备工程,2022(02):66-68.
[3] 王荣朋. 船上作业中系泊作业带来的船员安全问题及应对策略[J]. 水上安全,2024(1):4-6.
[4] 刘荣元.船员工伤原因分析及预防对策[J].航海技术,2019(06):71-74.
[5] 赵一军.船舶预防工伤事故台卡的建立和实施[J].航海技术,2020,(06):90-96.
[6] 张进. 船员工伤统计分析与事故预防[J]. 中国水运（下半月）,2010,10(4):52,54.
[7] 吴霞.船员工伤认定的特殊性及其完善路径[J].世界海运,2021,44(09):41-45+48.
[8] BLOOR M, THOMAS M, LANE T. Health risks in the global shipping industry: an overview

[J]. Health, Risk & Society, 2000, 2(3) :329-340.
[9] 邵秋捷,金永兴. 基于信息熵的“育明”轮实习安全风险度量[J]. 中国航海,2017,40(2):83-87.
[10] 胡甚平,许玲,席永涛,轩少永,郭云龙. 基于云模型的航运公司安全管理分级评价方法[J]. 中国安全科学学报,2013,(10):139-144.
[11] 李新月,葛彦斌,安学广,等. 基于FMEA和相似度的装备维修决策[J]. 机床与液压,2023,51(23):225-228.
[12] 中华人民共和国海事局.航运公司预防船员工伤事故工作指南[EB/OL].2020-09-21.
[13] 陈全. OHSMS实施过程危险源辨识与控制[M]. 北京：中国石化出版社，2010：21-23.
[14] 王健华,胡甚平,张锦朋,等. 基于MC的不同能见度下港口交通系统风险分析[J]. 上海船舶运输科学研究所学报,2013,36(4):57-61.
[15] 王小俊,张礼敬,杨鹏.机械制造企业安全生产标准化与工伤事故关系[J].中国安全科学学报,2023,33(08):45-50.
[16] 俞进. 海上作业安全管理数字化实施方案[J]. 中国安全科学学报,2023,33(12):16-22.

作者简介：李彦朝（1986－），男，甘肃西峰人，讲师/硕士，研究方向为航海教育与管理。手机号码：18806524479；E-mail: liyanzhao@zjvtit.edu.cn
蒋海龙（1987-），男，广西桂林人，工程师，主要从事海事管理。手机号码：13968686561；E-mail: chiangzongshao@163.com

世界一流强港建设背景下浙江水运发展近期重点举措建议

周嘉男 吴建伟 刘冲 刘万锋

浙江数智交院科技股份有限公司

摘　要：2023 年，浙江省出台《浙江省世界一流强港建设工程实施方案（2023-2027 年）》和《关于深化世界一流强港建设改革的若干意见》，锚定 2027 年基本建成世界一流强港。本文按照世界一流强港建设要求，结合“十四五”后半期和“十五五”前期宏观形势，支撑“航运浙江”建设，提出浙江水运近期发展思路，并从基础设施建设、打造内河航运示范省、强港改革、航运服务业、智慧绿色港航建设五个角度提出浙江水运发展近期重点举措建议，为浙江省世界一流强港和航运浙江建设提供参考。

关键词：世界一流强港；内河航运；十四五；智慧绿色港航

引言

2020 年 3 月，习近平总书记考察宁波舟山港，赋予浙江建设世界一流强港的新使命。2023 年初，浙江省出台《浙江省世界一流强港建设工程实施方案（2023-2027 年）》，提出到 2027 年，港口核心竞争力、聚合支撑力、辐射带动力显著增强，成为全球重要港航物流中心、战略资源配置中心和现代航运服务基地，以大宗商品为特色的自由贸易港（岛）建设取得成效，基本建成一流设施、一流技术、一流管理、一流服务的世界一流强港。2023 年底，浙江省出台《关于深化世界一流强港建设改革的若干意见》，提出到 2027 年港口治理体系能力和营商环境全球领先。本文按照世界一流强港

建设要求，结合“十四五”后半期和“十五五”前期宏观形势，支撑“航运浙江”建设，研究提出浙江水运发展近期重点举措建议，为浙江省世界一流强港和航运浙江建设提供参考。

1.“十四五”以来浙江省水运发展成效和基础

“十四五”以来，浙江省锚定高质量打造现代化水运体系、基本建成世界一流强港的总目标，在沿海和内河港口航运方面均取得突破。2023 年，宁波舟山港货物吞吐量达 13.24 亿吨、连续 15 年居全球首位，集装箱吞吐量达到 3530 万标箱、连续 6 年居全球第 3，宁波舟山国际航运中心指数排名由 10 进 9，并跻身全球第四大加油港，初步迈入世界一流强港行列。浙江省被列为全国首个、唯一的现代化内河航运体系示范省，全省所有地市实现通江达海，基本形成“北网南线、双十千八”骨干航道网络格局，2023 年全省内河港口吞吐量 3.9 亿吨，位居全国第 3。打造嘉兴长三角海河联运枢纽，实现 64 标箱船舶通达嘉兴港，整体货物通行能力提高 50%，单箱运输成本下降 20%，内河集装箱运力达 2 万标箱，海河联运增长势头领跑全国。形成智慧绿色航运引领示范，在全国率先出台建立健全船舶港口污染防治长效机制实施意见和省级港口岸电奖补政策；“浙闸通”实现单体船闸精准调度、多闸统一绿波调度，获全国范围内推广；梅山、甬舟集装箱码头实现 8 路作业全流程自动化，鼠浪湖散货码头实现装船和堆取自动化作业。

2.浙江省水运发展近期仍存在的显著问题

(1)沿海方面

一是甬舟两港一体化程度仍需深化，一个港口两个行政管理主体、两个海关、海事、边检等口岸部分，带来跨港域作业手续仍较为繁琐、部分国际航行船舶境内续驶存在不便等问题。二是集疏运和“四港联动”体系仍需攻坚，海铁联运通道能力明显不足，梅山港区铁路支线尚未开工，金甬双层高箱铁路仍缺乏相应技术规范和双层高箱运输标准；四港”联动云平台汇聚的数据信息主要以海运、公路为主，铁路、电子口岸等信息极为有限，全程物流“一单制”等目标仍有较大差距。三是航运服务发展上“大港小航”问题亟待破局，宁波舟山港虽然在货物、集装箱吞吐量上处于全球港口前列，但航运服务方面主要集中在港口物流、简单加工、货运业务等附加值较低的产业链下游，高能级企业主体有待加大引进培育力度。

(2)内河方面

一是航道网络存在明显卡点，如富春江船闸运营已接近饱和，二线船闸建设尚未列入日程，杭甬运河宁波段三期、乍嘉苏线航道瓶颈依旧未能解决。二是航运通道能级有待提升，高等级航道占通航航道比例偏小，内河千吨级及以上航道里程占比不足 5%。500 吨及以上内河泊位比例仅 30%，码头集约化专业化水平不高。三是港产城融合发展整体偏弱，水运服务重要产业集聚区的能力有待提升，通港达园支线建设困难，大型公用作业区尚未全覆盖，港外集装箱堆场、集卡停车场建设保障需整体加强，交旅融合发展体系相对薄弱。

3.浙江省水运近期发展形势分析与思路

(1)面临形势分析

一是需要抓紧把握当前政策利好条件和机遇，推动港口新一轮发展。2023 年 7 月印发的全国港口与航道布局规划，提出以上海港、宁波舟山港为长三角港口群龙头，并将宁波定位为国际枢纽港，明确了上海港与宁波舟山港处于同一层次。今年 6 月印发的《关于新时代加强沿海和内河港口航道规划建设的意见》，重点强调强化新时代水运战略研究和规划、推进多层级的国家港口枢纽体系建设和加快国家高等级航道规划建设。要求水运更好发挥在综合立体交通网中主通道、主枢纽作用，提升对产业链供应链安全保障能力。

二是随着长三角一体化发展等国家战略快速推进，要求水运更好发挥在区域协调发展和全方位开放中的基础性作用。随着长江经济带和长三角高质量一体化发展步伐加快，以及国家大宗资源储运和能源油气全产业链保供战略的推进，长三角区域将形成更大合力参与全球竞争，水运需求继续保持较快增长，要求浙江港口继续强化对广大内陆腹地的服务能力，进一步加快完善港口的集疏运体系、多式联运、内陆无水港建设等，推动沿海与内陆港口的紧密合作。沿海港口的全方位开放战

略将进一步提高浙江沿海港口在全球运输网络中配置资源的能力，构建区域乃至全球港口网络。

三是随着新质生产力的提出，要求水运更加注重智慧绿色和融合发展要求。从港航角度来看，未来港口岸线、土地资源有限和运输需求持续增长之间的矛盾将更加突出，随着节能减排的推进，适宜水运的大宗散货和集装箱等运输将进一步通过港口运输。随着环保要求不断提高，港口将更加注重资源环保要求，更加注重与城市协调，走绿色、低碳发展道路。同时，随着港口功能不断从单一的装卸运输向集商贸、物流、信息于一体的综合服务平台转变，港口对周边产业的聚集和带动作用越发明显，迫切需要提升发展要求，促进港产城更好的融合。

(2)发展思路

综合以上分析，为加快建成世界一流强港，打造现代化水运体系，“十四五”后半期及未来一段时期是我省港航领域发展的四个重要时期：一是港口管理的深化改革期。高效、全面的港航综合管理体系更加完善，全省港口一体化发展水平更高，营商环境与国际化水平更加接轨，政策保障支持更加有力。二是港航基础设施的能级跃升期。全货种服务能力与影响力进一步提升，高效畅通、结构优化、干支衔接、通江达海的集疏运体系基本形成，港口腹地向国内外广泛延伸。三是现代航运服务的提质增效期。立足贸易、船舶、船员的特色航运服务更加具有国际竞争力，聚焦金融、法律、智库的高端航运服务新业态基本形成。四是港航科技的创新引领期。以自动化码头集群、“四港”云平台、清洁能源应用等为代表的数字化、新基建、新设备将成为智慧绿色平安港航的鲜明标志。

4.浙江水运发展近期重点举措建议

(1)全力以赴攻坚重大项目建设

强化港口设施支撑能力，加快提升全货种、大规模的码头吞吐能力，着力打造穿山、北仑、金塘-大榭、梅山等 4 个千万级集装箱泊位群，全力推动佛渡作业区陆域先行工程、浙江 LNG 三期码头等项目开工，加快推进大宗商品储运基地工程、小洋山北作业区、状元岙二期、条帚门航道等项目建设。围绕创建内河航运示范省，加快建设 Y 型千吨级骨干航道，提高省际航道通过能力，打通省内骨干航道通航瓶颈，提高内河港口与沿岸城镇、产业发展的匹配度，全力推动金华江三级航道整治工程一期、钱塘江航道四改三工程、东宗线四改三嘉兴段等项目建设。结合嘉兴“公铁水空”联运枢纽建设，加快推动跨省航道乍嘉苏线前期。开展富春江二线船闸等项目前期谋划。

(2)创建现代化内河航运示范省

打造海河联运先行示范，重点推进航道提质扩能、海河联运枢纽建设、运输装备迭代升级、加大“公转水”“散改集”力度、培育壮大市场主体等举措，力争推出内河航道建设补助政策。打造交旅融合先行示范，重点推进旅游航道建设、水路精品航线、水上公共服务等举措，力争推出渡船提升改造奖补政策。打造智能航运先行示范，重点推进智慧航道建设、智慧港口建设、智能船舶攻关、智慧船闸建设、智慧航运物流举措，打造东宗线湖州段智慧航道，推出内河智慧航道、智慧港口、智慧船闸等建设导则。打造绿色安全先行示范，重点推进低碳设施建设、清洁能源船舶应用、船舶港口防污染、本质安全提升等举措，谋划湖州新能源船舶示范航线，力争推出交通领域碳达峰奖补政策。打造港产城融合发展先行示范，重点推进优化港口布局、临港产业发展、港城融合发展举措，依托内河港口总体规划谋划地方临港产业行动计划。

(3)攻坚突破港航领域重大改革

持续深化宁波舟山港一体化，深化港政管理一体协同，统一引航品牌、调度平台、引航资源、引航管理和集装箱船引航，推进港口经营、应急救援、锚地使用等一体化；创新口岸监管模式，推进全省集装箱内支线业务船舶信息共享复用、海上交通空港式管理、跨港域移泊船舶免办边检出入港手续等海关、海事、边检创新措施，深化港口一次申报、无感通行“一站式”服务。推进“四港”信息联动整合，推进海港电子数据交换系统、多式联运业务信息等资源整合，推动“四港联动”云平台和铁路、空港、义新欧、海外智慧物流、口岸等系统对接和数据共享，实现全量全程数据归集。加大对纳入省级规划的沿海公共航道锚地项目建设省级补助力度，制定对宁波舟山港集装箱海铁联运发展、无水港和海外物流节点布局、国际班轮航线和外贸滚装航线开拓、航运服务业集聚区建设

等支持政策。引导民间资本以独资、合资、参股等方式，参与港航建设重大工程和港产城贸联动发展、物流节点布局、航运服务业等补短板领域。

(4)加快航运服务业高质量发展

常态化开展航运服务业动态监测和信息发布。落实航运服务业专项资金，引导有条件的地区培育一批高能级集聚区，推动宁波东部新城进一步发挥产业集聚效应。宁波市重点新引进航运金融保险、海事法律等港航服务企业，力争高端涉外业务的优秀法律服务机构总数持续突破。舟山市全力推进小干海事服务产业岛建设，引进海事服务企业 100 家以上。加强与上海深度合作，引入上海优势航运服务企业在宁波、舟山设立分支机构。持续提升特色航运服务水平。持续做大船燃供应规模，力争保税船用燃料油供应量全球排名“保 4 争 3”；LNG 实现常态化加注，突破甲醇燃料试点加注。探索拓展航运保险险种和业务模式，持续提升航运保险风险保障能力与航运保费。积极推进大连商品交易所、上海期货交易所等金融机构与宁波、舟山合作。

(5)科技赋能智慧绿色港航建设

加快建设“浙港通”重大集成应用，高标准打造“港航一张图”与数据底座，全力推进“一流强港、内河航运智控、船检通、江海联运”等重点应用建设。着力将梅山北全自动化集装箱码头打造全球首家融合集装箱、散货、海铁三位一体的双五星（智慧、绿色）数智生态港，将鼠浪湖干散货自动化码头打造全国首个面向离岛管控场景的大型干散货（铁矿石）智能化码头。开工建设沿海 740TEU 纯电动集装箱船和内河 64TEU 氢燃料电池船，加快嘉兴港独山智慧码头建设，开展智慧航道系统研究，打造全国首例集“智慧港口+智慧航道+智慧绿色船舶”为一体的综合性海河联运智慧生态系统。加快推进杭申线、东宗线等智慧航道建设，新建一批低碳水上服务区。加快推进氢能集卡示范应用和油电混合拖轮项目建设。

5.结语

本文按照世界一流强港建设要求，结合“十四五”后半期和“十五五”前期宏观形势，支撑“航运浙江”建设，在梳理水运发展成效基础、分析近期仍存在的显著问题和发展形势的基础上，提出浙江水运近期发展思路，并从基础设施建设、打造内河航运示范省、强港改革、航运服务业、智慧绿色港航建设五个角度提出浙江水运发展近期重点举措建议，为浙江省世界一流强港和航运浙江建设提供参考。

参考文献

[1]刘长俭,黄川,钟鸣等. “十四五”长三角港口面临的政策机遇、需求特征和建设重点[J].水运工程,2023(7)
[2]刘万锋,吴建伟.谋划浙江港口发展战略建设世界一流综合枢纽港[J].中国港口,2021(7)
[3]刘万锋,周嘉男.交通强国建设背景下浙江内河水运发展新局面[J].中国港口,2020(9)
[4]朱永祥.推进嘉兴水运高质量发展路径的思考[J].中国水运,2023(9)
[5]李宇芊,徐鲁孺,刘冲等.世界一流强港背景下浙西南港口群组建及发展[J].中国港口,2024(6)

作者简介：周嘉男，工作单位：浙江数智交院科技股份有限公司；地址：杭州市余杭塘路 928 号；电话：19967440317；邮箱：jiananzhou@yeah.net。
吴建伟，工作单位：浙江数智交院科技股份有限公司；地址：杭州市余杭塘路 928 号。
刘冲，工作单位：浙江数智交院科技股份有限公司；地址：杭州市余杭塘路 928 号。
刘万锋，工作单位：浙江数智交院科技股份有限公司；地址：杭州市余杭塘路 928 号。

技工院校船舶轮机专业人才培养方向探索与实践——以杭州水上巴士校企合作订单班为例

陈金苗 陈东杰
（杭州汽车高级技工学校 杭州 310011）

【摘 要】内河运输是我国交通运输中十分重要的组成部分，承担着大量的货物和旅客的运输任务，在促进区域经济社会发展、服务国家战略实施、保障国家能源安全等方面发挥了重要作用。目前内河船舶轮机维修人员的培养形式单一，存在一线员工年龄断层、人才缺口等问题，船舶轮机维修维护方面的优秀专业人才需求较为迫切。本论文以我校同杭州市水上公共观光巴士有限公司开展的校企合作订单班为例，深入探索技工院校船舶轮机专业的建设思路与专业人才培养模式。

【关键词】船舶轮机；专业建设；校企合作；工学一体化

引言

随着我国经济的发展和城市化进程的加快，内河航运在区域经济发展中扮演着越来越重要的角色。2023 年，浙江省交通强省建设领导小组印发了《浙江省建设现代化内河航运体系示范省实施方案》，坚决贯彻落实习近平总书记重要指示精神，围绕省委三个“一号工程”和省政府“十项重大工程”部署，把建设现代化内河航运体系示范省作为“省之大计”[1]，船舶轮机技术作为保障船舶动力系统与设备运行的关键，其重要性不言而喻。

目前内河船舶驾驶员及轮机维修员存在一线员工年龄断层、整体素质偏低、学历教育板块缺少、成长历练不足等问题，人才缺口巨大，对船舶驾驶与轮机维修方面的优秀专业人才需求较为迫切[2][3]。然而，当前航运院校专门针对内河船员的培训教育严重缺乏，内河船员的教育和培训工作基础差、生源少，多采用短期培训和考证服务，较难达到船员素质和技能的要求，与当前的内河船员组成结构不相适应[4]。

我校同杭州市水上公共观光巴士有限公司积极开展校企合作，开设船舶轮机订单班，探索船舶驾驶与船舶轮机专业人才培养新模式，目前订单班中的同学已经开展顶岗实习。本文以订单班的顺利开展为例，从人才培养定位、专业建设思路、课程体系等方面探讨新时代要求的基于工学一体化人才培养模式的船舶轮机专业建设方案。

一、船舶轮机专业及行业发展现状

1、区域行业发展现状

根据 2022 版杭州交通年鉴及 2023 年浙江统计年鉴可知，杭州全航区营运船舶共 2486 艘，其中客运船舶共 867 艘、35306 客位，内河货运船舶 1555 艘、97.92 万载重吨。2021 年杭州市全航区完成水路运输的客运量及货运量连年增长，其中完成水路客运量 435.9 万人，比上年增长 28.6%，本港籍船舶全年完成水路货运量 7645.3 万吨，比上年增长 17.9%。同时杭州市水上旅游进入高质量发展阶段，客运量增长势头良好，比上年增幅 152.1%，占全省内河客运量的 52.2%[5][6]。

杭州水运行业快速发展,对内河船员的需求量也与日俱增,但是目前航运企业存在员工年龄断层、老龄化严重等问题[7]。以水巴公司为例，截至目前共有船员 122 人，65 艘船舶及 46 个客运码头，具有较大的船员缺口比例。如表 1 所示，水巴公司船员的老龄化情况较为严重，50 岁及以上的船员约占 60%，同时学历方面初中及以下的船员占比为 60%，随着目前船舶行业内河航道网设施设备更新与老旧运输船舶的淘汰，许多船员的技能和学习能力无法跟上现在技术快速更迭的行业现状。根据调研可知大部分航运企业的现状同水巴公司一致，亟需招纳一批高素质、高技能型的内河船员。

表 1 水巴公司船员年龄、学历分布表

人员类别	合计	年龄				学历				
		18岁-24岁	25岁-35岁	36岁-49岁	50岁及以上	初中及以下	高中	大专	本科	硕士研究生及以上
船员总人数	122	7	17	25	73	73	22	21	5	1
一类驾驶员（船长）	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
二类驾驶员（船长）	41	0	2	4	35	34	3	4	0	0
三类驾驶员（船长）	11	0	5	4	2	1	6	1	2	0
一类轮机员（轮机长）	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
二类轮机员（轮机长）	38	0	0	9	17	29	8	1	0	0
三类轮机员（轮机长）	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
普通船员	29	7	9	8	5	8	4	21	5	1

2、相关院校开设情况

浙江省内仅有浙江国际海运职业技术学院和浙江交通职业技术学院两所高职院校开设船舶相关专业，中职院校在船舶轮机领域的人才培养仍处在空白阶段，且上述两所高职院校主要培养远洋国际船员，缺乏针对内河船员培养的职业院校。我校目前开设的船舶专业，立足于内河船舶驾驶员与轮机员的培养，为区域水运行业的发展培养一支高素质的内河船员队伍。

3、专业教学发展现状

许多院校课程设置重理论轻实践、重通用轻专才，船舶轮机专业是实践性较强的专业，对动手能力要求很高。通过航运、船舶修造企业等用人单位反馈的情况了解到,多数学生无法适任对应的岗位任务，由于学校设备相对缺乏、实践课时分配少等原因，学生的实践技能和创新能力较弱，需要经过一段时间的岗位培训才能真正上岗，同时学校的教学与考核模式单一，课堂上“填鸭式”的教学方式无法调动学生的学习兴趣和主动性，而“一张卷纸定成效”的传统考核方式也促成了学生的高分低能，许多学生的专业知识和综合素质储备也无法满足企业的人才需要[8]。所以在专业建设过程中必须打造工学一体式的教学模式，以职业能力、职业素质并重为培养出发点设定人才培养方案。

二、人才培养目标定位

作为技工院校，首要的培养目标是为社会培养符合岗位实际需求的高素质技能型人才。根据船舶轮机专业实际工作岗位要求的调研，同时结合 2015 年 11 月 11 日中华人民共和国交通运输部发布的《中华人民共和国内河船舶船员适任考试和发证规则》，明确培养思想政治坚定、德技并修、全面发展，适应交通运输需要，有一定基础理论、专业技术精湛、实践能力突出、创新意识强、德智体美劳全面发展等素质，具有内河船舶动力设备维护、维修、保养、管理及船舶修造等知识和技术技能的高素质内河船舶船员。

根据内河船舶船员实习工作岗位的要求，需要具备以下六点能力：轮机工程能力、轮机维护和修理能力、船舶辅机与电气设备维护和修理能力、机舱管理能力、内河船舶作业基本能力、可持续发展能力,各模块具体能力分解见表 2。

表 2 内河船舶轮机员职业能力分解表

能力模块	能力分解
轮机工程能力	金属学原理、热处理等知识 船文化与海洋文化 制图基础与机械制图能力 船舶主推进动力装置知识 船舶辅机知识
轮机维护和修理能力	船舶机械设备操作与管理能力 船舶柴油机操作与管理能力 船舶轮机维护与修理的知识与能力
船舶辅机与电气设备维护和修理能力	电工学基础知识与运用能力 船舶电气设备操作与管理能力 操作、管理与维护船舶用电设备能力 操作、管理与维护船舶自动控制系统能力 管理与维护管理火警报警系统能力 操作与管理船舶电站能力
机舱管理能力	船舶安全运行与工况管理能力 船舶防污染、防火防爆安全管理能力 船舶油料物料备件的管理能力 船舶设备的技术管理能力 船舶检验及安全检查能力 船舶人员管理的知识、法规及组织协调能力 文件与资料管理与运用能力
内河船舶安全作业基本能力	个人安全和社会责任、船舶防火与灭火、内河水上救生与求生、船上救护、安全分析等方面的专项知识与技能
可持续发展能力	团队合作能力 持续学习与自主学习能力 人际交往能力

三、船舶轮机专业建设内容

本专业根据浙江省航运产业及现代船舶发展的需求进行建设,同时通过深度开展校企合作与产教融合，整合校企双方资源，在课程体系建设、教材编写、教学方案制订等方面实行校企协同合作，共同培养适任内河一类船舶 500KW 及以上三管轮的高素质、高技能船员。

1、课程体系建设

如图 1 所示，本专业的课程体系以人社部船舶轮机专业为依据，结合《内河船舶船员适任考试和发证规则》及“实施细则”规定，以《中华人民共和国内河船舶船员适任考试大纲》、《中华人民共和国内河船舶船员适任实际操作考试办法》、《中华人民共和国内河船舶船员适任实际操作考试大纲》 和《浙江省地方海事局辖区内河船舶船员实际操作考试办法》为标准，结合水巴公司及相关航运企业共同打造符合我校实际情况的全面有效的课程体系。

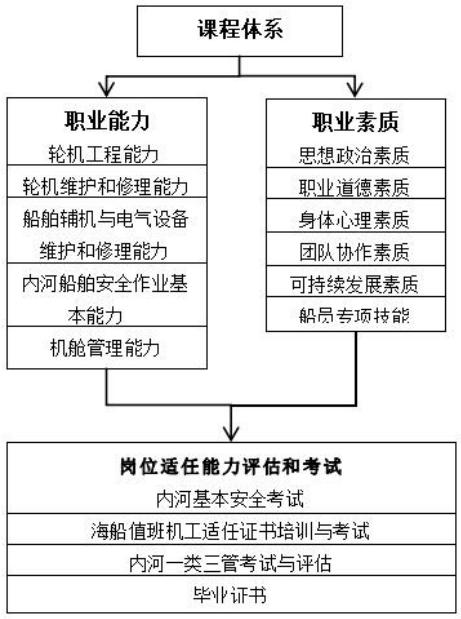


图 1 船舶轮机专业课程体系

2、教学方法改革

为避免学校教学与企业实际工作脱节，本专业将融合工程实践与理论教学，深入构建工学一体化教学模式，让学生在真实环境中学习，实现学习与工作无缝对接。

推行“双方合作，四阶渐进”的教学模式，校、企双方共同设计、制定符合海事公约及法规的课程体系，使学生通过三年校内学习和校外实践,完成从见习机工——值班机工——三管轮三段式岗位职业能力提升。第一学年，在校完成基础课程和专业课程的理论、实操学习，并完成第一次船上认识性实习，第二学年，校企双方联合培养，以实际工作任务为导向，完成专业拓展能力培养，并且完成基本安全、急救、消防等课程培训，参加内河基本安全培训，获取值班机工岗位适任证书,具备值班机工的知识和技能,能胜任值班机工岗位任职要求,并参加第二次船上生产性实习。第三学年进行船上顶岗实习，完成海船值班机工适任证书和内河一类三管培训，获取三管轮适任资格，完成学习内容。

设计工学一体化教育教学模式。工学一体化教育模式强调理论实践融合，以任务为驱动，激发学生主动学习，实现教学活动与工作过程融通，避免大量知识点的被动化教学[6]。校企双方联合开发满足课程教学需要的教学资源包，包含教材、工作页、教学案例库、教学课件、在线课程资源等，并强化教材规范化管理。以轮机维护和修理课程为例，将柴油发动机构造与维修课程进行分解成若干具体小项，如：气门间隙调整，喷油器拆装校验，单体泵拆装，缸头拆装，缸套活塞组拆装，正时机构对准安装，机油滤器，海水泵拆装等项目，以项目为导向的模块化教学,使学生自主地、系统性地了解船舶轮机日常维护和大修的基本操作。

打造小组化学习模式，培养学生自主学习能力。课前教师整合教学资源，发布工作任务，学生通过阅读工作页明确学习任务，观看案例视频，了解工作流程。课上采用以学生为主，教师为辅的教学模式，让学生以小组讨论形式自主学习、设计工作流程及工单，采取头脑风暴、张贴板形式讨论工作流程的设计合理情况，老师进行辅助并纠正。实操环节学生从看操作过程到实际操作，使学生从认知到体验，让学生从了解知识点到理解知识点，促进学生可持续发展素质。

3、师资队伍建设

坚持“校内培养，校外引进”双结合的模式，一方面加强校内现有教师操作技能培养力度和范围，鼓励教师参加各类技能型培训与竞赛，选送青年教师到企业生产一线实习,优化教师结构，提高教师专业素质。另一方面从相关航运企事业单位引进一批高技能人才来校任教，聘请企业技术能手

走进课堂，将生产一线最实用的知识和技能传授给学生，促进与企业深度交流，拓宽校企师资互融通道。着重打造“双师双能型”教师队伍，通过培养和引进，不断提高教师的学历学位等级与实船轮机维修工作经验，形成了一支结构合理、富有团队精神和创新能力的师资队伍。

4、校企合作建设

第一、持续深化校企合作。与当地航运企业优势互补，开设多种形式的校企合作订单班，根据企业的实际需求进行课程设置和技能培训，使学生能够接受到更加个性化的培养。这种针对性培养有助于发掘学生的潜力和特长，促进学生的个性化发展，满足产业升级对人才的需求，也有助于提升学校的就业质量，实现校企双方互利共赢。

第二、加强推动产教融合。探索建设校企“共建、共享、共管”的产教融合实训基地，将实践教学与技能培训有机结合，提升了学生的实践能力和职业素养，同时也为学校的科研创新和企业技术创新提供了有力支持。通过深入了解当地产业发展趋势和人才需求，调整实训基地建设方向和重点，实现与当地经济社会发展的协同发展。

四、实践探索与展望

杭州汽车高级技工学校是一所杭州市政府主办，杭州市交通运输局主管的国家重点技工学校。学校作为培养技能型人才的摇篮，位于钱塘江与京杭大运河的交汇处，内河航运资源丰富，开设船舶轮机专业不仅响应了国家大力发展职业教育、优化人才结构的战略需求，更是直接服务于长三角区域航运业的转型升级。

基于杭州市水上公共观光巴士有限公司（以下简称“水巴公司”）等同类航运企业的发展现状与困境，我校联合沃尔沃遍达中国总部（以下简称“沃尔沃遍达”）、杭州新世纪动力设备成套有限公司（以下简称“新世纪动力”）以及水巴公司，四方签订联合培养协议，以学校为平台，企业为支撑，为企业专设培养高技能人才的“订单班”，实行校企共同培养模式，实现订单式、定向式的特色化培养，满足企业用工需求，降低企业用工成本，充实企业储备人才库，构建“共生、共享、共赢”的校企命运共同体。同时学校和上海欧星机电设备有限公司等相关船舶企业积极拓展校企合作，为更多区域航运企业提供强有力的人才支撑。

5、共建实训基地

我校同沃尔沃遍达和水巴公司建立了“VOLVO PENDA 浙江省能力发展基地”和“杭州水上公共观光巴士公司人才培养基地”校内实训基地，由于沃尔沃船机在内河航运企业中应用占比较大，所以实训基地配置了多台沃尔沃船用发动机及专用工具作为教学实训设备，工作场景覆盖面广，涉及内河载货、客船以及游艇的常规型号发动机，基本满足目前内河船舶轮机实际维修工作的需求。同时我校积极推进深化校企合作，实现产教融合，同企业双方打造生产性校外实训基地，使学生在学习过程中能够切身感受一线工作环境，对船舶驾驶和船舶轮机维修有直观的认识。

6、共享资源平台

学校同沃尔沃遍达和水巴公司签署保密协议，共享教学资源与教学设备，我校两位老师前期经过沃尔沃遍达和新世纪动力企业的师资培训，考取沃尔沃 D3、D6、D7 发动机的维修资质证书。

沃尔沃遍达与新世纪动力在教学工作中提供了船用发动机作为教学设备，并且分别派遣专家提供技术上的支撑，尤其是学生在校学习过程中，技术专家在船用发动机理论知识与实操维修的教学中提供了丰富的经验与指导。

水巴公司提供了船上工作方面的专业性指导，并安排了丰富的实践机会与就业岗位，在校学习期间安排了多次船上学习，由船长和轮机长亲自示范指导学习，让学生直观感受真实的工作流程，为学生们搭建了广阔的学习平台，拓宽了专业视野与前景，实现了把以课堂传授间接知识为主的教育环境与直接获取实际经验与能力为主的生产现场环境有机结合起来，实现学校与企业的双赢，让学生们可以融合户外教学实践。

7、共商教学内容

船舶轮机订单班为水巴公司定向培养内河船员，学校联合沃尔沃遍达和水巴公司经过反复商讨，共同制定教学内容，共同商议教学模式，以学校为平台，融合双方企业的专业技术与操作规程，有针对性地培养水巴公司所需的轮机员，该模式能够持续拓展与借鉴，为不同企业定向培养专业技术人才。

8、共培专业人才

我校同水巴公司开展了第一期校企合作订单班，10 位学生已全部完成校内学习任务，目前正在顶岗实习阶段。这些学生前期经过企业和学校的笔试与面试选拔最终进入订单班学习。在校学习期间，由学校老师和沃尔沃遍达、新世纪动力的技术专家共同联合培养，理论学习与实操训练相结合，学习船用柴油发动机的基础知识与保养、维修技能，采用工学一体化的模式，学生自主翻阅资料，制定工作流程，并分组学习船用发动机各组件的维修技能，最终在校内考取了沃尔沃认证的 D3、D6、D7 船用发动机的维修资质证书。企业学习期间，在水巴公司的培训与指导下，完成了内河船员基本安全培训考证与客船特殊培训考证，目前正式进入实习阶段。

接下来我校将持续推进校企合作与产业融合，搭建校企协同育人的桥梁，联合各方企业制定人才培养方案，开展课程体系建设与专业建设，明确学校和企业作为育人双主体对学生进行联合培养。努力打造一个产教融合、工学一体、强化实践，符合地方航运行业发展的一流专业。

参考文献

[1]周健雅.我国内河航运在区域经济发展中的作用分析[J].财富时代,2023,(11):112-114.
[2]盛进路,李杰,邢繁辉.新发展格局下高素质内河船员队伍建设对策及展望[J].中国海事,2022,(11):19-22.DOI:10.16831/j.cnki.issn1673-2278.2022.11.007.
[3]叶海亮.浅析内河船员培养模式的构建[J].职业,2014,(14):173-174.
[4]杨海燕,张金军.船舶工程技术专业中高职分段培养模式研究——以江苏航运职业技术学院为例[J].船舶职业教育,2020,8(04):12-15.DOI:10.16850/j.cnki.21-1590/g4.2020.04. 004.
[5]浙江省统计局.2023 年浙江统计年鉴[M].浙江省:浙江省统计局,2024 年.
[6]杭州市交通运输局.2022 版杭州交通年鉴[M].杭州:杭州市交通运输局,2023.
[7]钟德荣.浅谈内河船员综合素质的提高[C].中国航海学会 2022 年学术年会优秀论文集——高素质内河船员队伍建设.中国航海学会 2022 年学术年会优秀论文集——高素质内河船员队伍建设:中国航海学会内河海事专业委员会,2022:64-66.
[8]朱瑞景.提高中职学校轮机工程基础教学实效性的几个措施[J].职业,2012(26):112-113.

作者简介：陈金苗，高级讲师，高级技师，汽车系主任，手机号：13958146922，邮箱：330560324@qq.com

陈东杰，教师，手机号：17826806041，邮箱：1179241109@qq.com

船员职业压力与心理健康状况关系

毛旭东,徐秋艳,安天圣,孙武,徐天奇

（宁波海运股份有限公司 浙江 宁波 315020）

摘　要：船员职业压力和心理健康状况是影响船舶安全生产的重要因素，探索船员职业压力与心理健康状况间的关系，为减少船员职业压力及改善心理健康方面提供依据。使用一般情况调查表、心理症状自评量表 SCL-90 和自编船员职业压力调查表，对某航运公司 650 名船员开展网络问卷调查，基于 SPSS 软件通过描述性统计分析、方差分析和单样本 T 检验研究职业压力强度的构成及不同岗位职业压力源和压力水平，采用皮尔逊相关性检验分析船员职业压力与心理健康状况关系。91.2%的船员有中度以上的职业压力，前 3 位的职业压力源为工资待遇、身心健康和工作负荷；职业压力水平和岗位级别存在组间差异；职业压力源与心理健康各因子呈显著正相关，职业压力源对心理健康因子有预测作用。船员的职业压力普遍存在，职业压力是影响船员心理健康状况的重要因素。

关键词：船员；职业压力；心理健康

海上运输是国际贸易中最主要的运输方式，全球贸易总量的三分之二以上是通过海运完成的，船员作为服务海上运输的重要角色，在海洋强国和“一带一路”建设战略中发挥着不可替代作用。海上交通是人、船、环境相互作用的反映，海事部门相关数据统计表明，在以往发生的海上事故中，由人为因素造成的占比高达 80%；这些人为因素往往源于船员群体过高的职业压力和不良的心理健康状况。现阶段我国船员在日常工作中存在风险高、责任重、强度大、环境艰苦、信息闭塞等职业特点，使得船员心理健康问题更为严重[1]。目前，国内外关于船员心理的研究集中在船员的心理健康状况[2-7]，有关船员职业压力的较少，未对职业压力和心理健康状况的关系进行深入挖掘。因此，通过调查分析船员职业压力和心理健康状况，研究职业压力和心理健康的关系[8-15]，为有效减少由人为因素引起的海上事故和改善船员的心理状况提供参考。

1　船员职业压力和心理健康状况调研

1.1 调研对象

2021 年 7 月 1 日~2021 年 9 月 30 日，采用问卷调查方法，对某航运公司 650 名在船船员进行实地和网络调查，共发放问卷 650 份，回收问卷 578 份，剔除无效问卷 8 份，共获得有效问卷 570 份，有效样本率为 87.7%。其中，管理级 144 人，占 25.3%，操作级 162 人，占 28.4%，支持级 264 人，占 46.3%，涵盖航运公司不同级别的船员，具有一定代表性。

1.2 调研工具

1）一般情况调查表：包括船员的性别、年龄、职称、受教育程度和工作年限等。

2）船员职业压力量表：首先，查阅国内外有关职业压力源和特点等方面的文献，通过访谈了解船员在实际工作中面临的各种困扰和应激源，询问航运业和心理学专家的意见，在此基础上，经过多次修订形成正式问卷。量表为 Likert 五点记分制，由船员对某种事件是否发生及其影响程度进行划分：1 表示“没有”；2 表示“轻度”；3 表示“中度”；4 表示“偏重”；5 表示“严重”。该量表共 28 题，按压力源因归类：由工作强度过大造成的压力（工作负荷压力源）；工作所获得的收入不能满足本人的期望造成的压力（工资待遇压力源）；工作中面临一定的风险造成的压力（工作保障压力源）；封闭压抑的工作环境和缺乏与外界的沟通对身心带来的压力（身心健康压力源）；社会和亲人朋友对海员的理解和支持不够造成的压力（理解支持压力源）；领导管理风格不适应造成的压力（领导风格压力源）；领导素质不达标造成的压力（领导素质压力源）。对量表进行信度与效度检验，各分项表的内部一致性$Cronbach\ '\alpha$系数为 0.85~0.97，各压力源与因子分的相关系数为 0.81~0.92；与总分的相关系数为0.76~0.89;1个月后选取60名船员重测,各分量表和总分表的信度为0.82~0.93，表明该表具有较高的结构效度；船员职业压力分数与船员的心理健康水平呈明显正相关，表明该表

具有较高的实证效度。以不同职业压力源的平均分作为连续数据，将职业压力强度划分为 5 种等级：0.5~1.5 为没有压力；1.5~2.5 为轻度压力；2.5~3.5 为中度压力；3.5~4.5 为重度压力；4.5~5.0 为极重压力。

3）船员心理健康量表

采用症状自评量表 SCL-90 对船员心理健康状况进行评价，该量表包括躯体化、强迫症状、人际关系敏感度、抑郁、焦虑、敌对、恐怖、偏执、精神病性等 9 个测量因子，每个因子按 1~5 分评分[16]。

4）数据分析

采用 SPSS 软件对数据船员职业压力和心理健康状况进行描述性统计分析、方差分析和单样本 T 检验。

2 研究结果

2.1 职业压力源和总体职业压力水平

船员的总体职业压力水平的平均评分为(3.31±0.89)，不同职业压力源的评分按大小排序为：工资待遇（3.56±0.94）身心健康(3.53±1.05)，社会支持(3.33±1.07)和工作保障(3.28±0.93)，工作负荷(3.43±0.98)，工资待遇(3.56±0.94)和领导素质(3.09±0.95)，领导风格(3.06±0.95)。各压力源评分之间两两比较，差异显著性检验表明，差异均有统计学意义(均 P＜0.05)。表明船员居第 1 位的职业压力源是工资待遇，第 2 位是身心健康，第 3 位是工作负荷。

2.2 不同职业压力强度构成

表 1 为船员职业压力强度的构成比，从职业压力总分的平均分来看，船员普遍承受较大的职业压力，91.2%的船员有中度及以上压力，46.3%有重度职业压力，20.2%有极重职业压力。在身心健康方面有重度职业压力的人数最多；在工资待遇、工作保障和工作负荷方面有重度职业压力的比例较高，分别为 41.4%，39.5%和 37.9%；在领导素质、领导风格和理解支持方面，1/3 左右的船员有中等程度的压力。

表 1 船员职业压力源强度构成比（%）

职业压力强度	身心健康	理解支持	工作保障	工作负荷	工资待遇	领导素质	领导风格	合计
没有压力	4.4	5.1	3.3	3.7	1.8	5.4	5.1	1.6
轻度压力	6.1	8.8	7.0	6.8	6.3	8.8	9.8	7.2
中度压力	25.1	32.1	30.0	26.7	22.1	38.4	36.7	24.7
重度压力	35.4	30.5	39.5	37.9	41.4	35.1	35.4	46.3
极重压力	28.9	23.5	20.2	24.9	28.4	12.3	13.0	20.2

2.3 不同组别间职业压力水平比较

表 2 为船员职业压力源和压力水平的岗位级别总评分组间比较，不同岗位级别协方差分析结果表明，不同岗位级别协方差分析结果表明，社会支持，工作保障，工作负荷，工资待遇，领导素质，领导风格，压力总分组间差异有统计学意义，除工资待遇外，管理级船员职业压力最高，操作级船员次之，支持级最小。进一步分析表明，管理级船员在身心健康、社会支持、工作保障、工作负荷和平均总分上职业压力显著高于支持级船员；操作级船员在身心健康、社会支持和工作负荷上职业压力明显高于支持级。操作级工资待遇压力略高于管理级，其余压力源评分均小于管理级，但差距较小。管理级职业压力评分前三位的压力源依次为：身心健康、工作负荷、工资待遇；操作级和支持级评分前三位的为：工资待遇、身心健康、工作负荷；岗位级别组间协方差表明，尽管船员岗位级别不同，但是职业压力主要来源相同，均为身心健康、工资待遇、工作负荷。

表 2 船员职业压力源和压力水平的岗位级别总评分组间比较（x±s）

岗位级	n	身心健康	社会支持	工作保障	工作负荷	工资待遇	领导素质	领导风格	平均总分

别								
管理级	144	3.89±0.88	3.67±0.95	3.60±0.82	3.79±0.86	3.75±0.82	3.39±0.82	3.37±0.81	3.62±0.76
操作级	162	3.72±1.04	3.57±1.04	3.41±0.87	3.61±0.97	3.80±0.91	3.16±0.97	3.08±0.99	3.45±0.86
支持级	264	3.21±1.05	3.01±1.06	3.03±0.94	3.11±0.95	3.31±0.96	2.89±0.96	2.88±0.96	3.05±0.90
F 值		25.59	25.44	21.02	28.72	18.37	13.99	13.09	23.59

注：$p<0.05$, $p<0.01$

2.4 船员的心理健康状况

根据 SCL-90 阳性筛查标准，以总分≥160 分，或阳性项目≥43，或因子分 ≥2 作为阳性症状检出标准，在 570 份样本中，船员的 SCL-90 阳性总检出率为 90.17%。各症状因子按检出率排序为躯体化 33.2%，强迫 45.8%，人际敏感 40.5%，抑郁 34.6%，焦虑 31.6%，敌对性 30.2%，恐怖 20.3%，偏执 32.8%，精神病性 26.6%。至少存在一项以上阳性症状因子的船员共 261 名，占 45.8%。其中，阳性检出率较高的心理问题为强迫、人际关系敏感、抑郁和偏执。SCL-90 测试的总分、阳性项目及各症状因子的均值明显高于正常人群，说明船员总体心理健康状况较差。

2.5 船员职业压力与心理健康状况相关分析

为提取有效的心理健康状况影响因素，采用皮尔逊相关分析对 7 个职业压力源及压力总分进行相关性检验，结果如表 3 所示。职业压力量表各因子分和压力总均分与症状自评量表各因子分均呈正相关，表明职业压力水平越高，船员的心理健康状况越差，相关系数在 0.45~0.62 之间，大部分为中度相关，部分为强相关。将职业压力源各因子作为自变量，SCL-90 症状自评表的测量因子作为因变量进行多元逐步回归分析。结果显示，工资待遇、工作负荷和工作保障职业压力源的心理健康状况预测力最佳，对 SCL-90 的大部分测量因子具有明显的预测作用，具有统计学意义的标准回归系数为 0.192~0.537，社会支持、身心健康、领导素质和领导风格职业压力源的心理健康状况预测力较弱，仅对 SCL-90 的 1~2 个测量因子有预测作用，具有统计学意义的标准回归系数为 0.283~0.537。

表 3 船员职业压力源各因子和压力平均总分与 SCL-90 各因子分的相关系数矩阵

项目	身心健康	社会支持	工作保障	工作负荷	工资待遇	领导素质	领导风格	压力总分
躯体化	0.549	0.521	0.505	0.508	0.503	0.512	0.496	0.562
强迫症	0.590	0.572	0.548	0.547	0.551	0.551	0.548	0.611
人际敏感	0.563	0.546	0.533	0.522	0.527	0.534	0.534	0.589
抑郁	0.604	0.599	0.551	0.543	0.566	0.564	0.550	0.621
焦虑	0.600	0.581	0.555	0.549	0.549	0.551	0.538	0.613
敌对	0.531	0.516	0.509	0.484	0.491	0.498	0.495	0.552
恐怖	0.478	0.494	0.476	0.450	0.461	0.480	0.477	0.520
偏执	0.536	0.522	0.515	0.490	0.485	0.513	0.521	0.562
精神病性	0.561	0.524	0.510	0.519	0.511	0.513	0.580	0.581

3 结论

本文通过测查船员的职业压力和心理健康状况，探讨职业压力水平和岗位级别的组间差异，研究职业压力源和 SCL-90 各测量因子的影响关系，得出如下结论：

1）船员的职业压力水平较高，91.2%为中度及以上压力；心理健康状况较差，SCL-90 阳性总检出率为 90.17%。可能原因为船员工作性质和环境存在特殊性，叠加突发公共卫生事件的影响，船员对感染和换班问题的焦虑情绪加重。

2）不同岗位级别的船员之间，职业压力得分具有统计学意义，其中，管理级职业压力总平均分最高，且管理级和操作级的职业压力源分数普遍高于支持级，可能原因为管理级的工作内容相对繁重，且在船舶航行中承担的责任和风险较大。

3）采用皮尔逊相关性分析研究船员职业压力和心理健康间的相关性，发现所有职业压力源均为心理健康因子的影响因素，且呈显著正相关，说明职业压力大的船员心理健康状况也较差。

4）通过多元逐步回归模型探究船员职业压力对心理健康状况的影响，发现所有职业压力源对心理健康有明显的正向预测作用，但预测力的大小和职业压力水平存在不一致的现象。船员职业压力源排名居 3 位的是工资待遇、身心健康和社会支持，但对心理健康状况起到较好预测作用的为工资待遇、工作负荷和工作保障，社会支持、身心健康、领导素质和领导风格仅对人际关系敏感的预测较为明显。

参 考 文 献

[1]张晓,高玉德,周元丽,马云琴,李云鹏,陈大成,曹春景,张进. 中国远洋船员总体心理健康状况的研究[J]. 中国航海,2005,(03):72-77.

[2]周元丽,张晓. 在航条件下远洋船员心理干预的研究[J]. 中国健康心理学杂志,2006,(02):157-159.

[3]范诗琪. 远洋船舶驾驶员情绪和工作负荷定量分析及人因失误关联性研究[D].武汉理工大学,2020.

[4]Iversen R T B. The mental health of seafarers[J]. International maritime health, 2012, 63(2): 78-89.

[5]李方圆,刘升友,李伟. 我国远洋船员心理健康建设探析[J]. 中国海事,2018,(05):38-40.

[6]施利承,李娜,李静,蒋璐. 中国近 20 年海员心理健康研究概况与展望[J]. 中国职业医学,2013,40(02):169-171+173.

[7]Magnavita N, Soave P M, Ricciardi W, et al. Occupational stress and mental health among anesthetists during the COVID-19 pandemic[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(21): 8245.

[8]朱春莹,王玉花,刘志宏,步苏琴. 公交车驾驶员人格、交通事故与职业压力的关系研究[J]. 齐齐哈尔医学院学报,2014,35(03):324-326.

[9]Ghaddar A, Mateo I, Sanchez P. Occupational stress and mental health among correctional officers: a cross-sectional study[J]. Journal of occupational health, 2008, 50(1): 92-98.

[10]吴炫. 幼儿教师职业压力、心理弹性与生活满意度的关系研究[D].哈尔滨师范大学,2021.

[11]Chen W Q, Wong T W, Yu T S. Influence of occupational stress on mental health among Chinese off-shore oil workers[J]. Scandinavian journal of public health, 2009, 37(7): 766-773.

[12]施跃健,王玲凤. 医生职业压力与心理健康状况关系[J]. 中国公共卫生,2007,(05):529-531.

[13]陈春霞,张理义,徐志熊,黄津芳,甘景梨,任忠文. 军人心理健康与职业压力及应对方式的相关性研究[J]. 解放军医学杂志,2008,(11):1381-1384.

[14]Travers C J, Cooper C L. Mental health, job satisfaction and occupational stress among UK teachers[M]//Managerial, Occupational and Organizational Stress Research. Routledge,

2018: 291-307.
[15]张名芳,马艳华,吴初娜,王力. 公交驾驶员心理状况影响因素分析与疾病判别模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2021,21(06):96-104.
[16]施跃健,王玲凤. 医生职业压力与心理健康状况关系[J]. 中国公共卫生,2007,23(5):529-531.

作者简介：毛旭东（1981—）男，浙江宁波人，硕士，船长，研究方向为船舶安全保障、船员心理学等。Email: MaoXD@nbmc.com.cn
通讯作者：安天圣（1995—）男，辽宁朝阳人，硕士，研究方向为船舶安全保障等。Email：ants@nbmc.com.cn

“铭浩”轮进石浦港区的可行性探讨

周俊杰[1] 马春华[2] 郑浩亮[1] 任明星[1]

（1.宁波引航站 浙江宁波 315000；2.宁波海事局 浙江宁波 315000）

摘 要:随着宁波舟山港石浦港区对外开放力度的加大，进石浦港区的船舶数量日渐增加，并有逐步大型化趋势，但由于港口条件的限制，船舶操纵难度和风险也随之增大。本文引用 2024 年 6 月 5 日“铭浩”轮下湾门北支航道首次进港引航操纵为例，通过对引航过程中的操纵难点和航道要素适应性进行分析，论证“铭浩”轮进石浦港区的安全操作方法，并结合引航实践，总结出航法、操纵要领及注意事项，为大型空载船舶（船长 170m 至 200m，单船载重吨 3.5 万 t 级至 5 万 t 级，以下称为大型船舶）进石浦港区提供相应的参考和借鉴。

关键词：航道要素；航法；操纵要领；注意事项

引言

2024 年 6 月 1 日，引航站收到宁波东和船舶修造有限公司的申请，大型船舶“铭浩”轮需从石浦港外锚地经下湾门航道进口进厂维修，然而下湾门航道仅为 5 千 t 级双向航路，通航环境复杂，航道狭窄，弯曲半径小，北支航道口内外潮流复杂多变，转向角达 70°，不利于船位和航速的控制，目前仅有大型船舶在逐步探索通过下湾门出口经验，还未有大型船舶从下湾门进口先例。

陈琦[1]在《石浦港区主航道一期工程航道尺度设计》一文中，通过操船模拟试验论证了万吨级杂货船能通过下湾门南支航道进出口；刘念[2]在《基于船舶操纵模拟试验的石浦港航道宽度研究》一文中，通过对石浦港区复杂环境进行潮流模拟，采用船舶操纵模拟试验，进而求得石浦港区复杂水域的航道宽度。然而，迄今为止国内同行尚未对大型船舶经由石浦港区下湾门北支航道进口的航行方法进行深入研究，驾引人员无相关航行经验。为此，引航站积极参与大型船舶北支航道进港安全研究，并派员到现场考察学习进口操纵方法，为“铭浩”轮的安全进口打下良好基础，实现了大型船舶进下湾门航道的新突破。

1 石浦港区航道及“铭浩”轮概况

1.1 水文气象条件

1.1.1 风

下湾门航道水域季风气候比较明显，秋冬季受冷高压影响，风向盛行偏北风；夏季受副热带高压影响，风向盛行偏南风。

1.1.2 潮汐

下湾门航道潮汐为正规半日潮，其特点为港内潮差较大，平均潮差在 3m 以上，最大潮差可达

6.08m，涨潮历时大于落潮历时。

1.1.3 潮流

潮流属不正规半日浅海流，以往复流形式为主，落潮流速大于涨潮流速，涨潮平均流速在 20～50cm/s 之间，涨、落潮流方向与等深线方向基本一致。

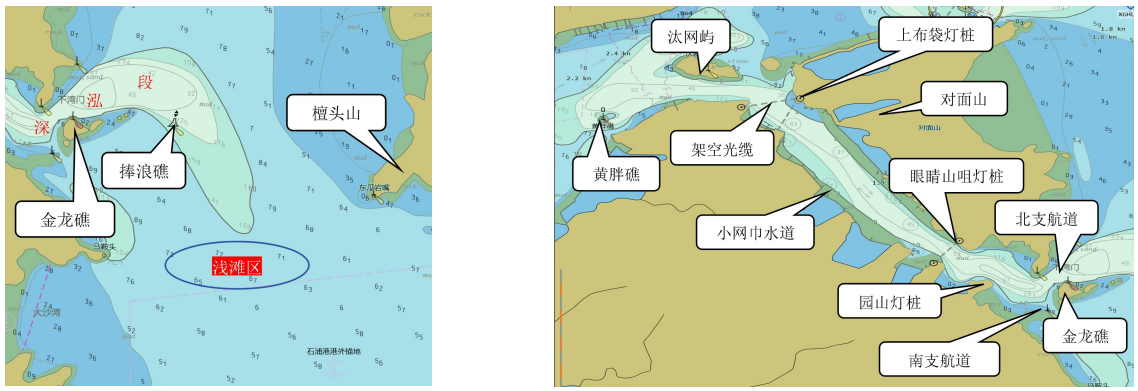
1.2 锚地概况

石浦港区港内锚地位于石浦港内，底质为泥底，水深 5～15m；石浦港港外锚地位于石浦檀头山与牛头山之间，为待泊、避风锚地，底质为泥底，水深 5～7m；石浦港引航锚地位于石浦檀头山东面，为引航、待泊锚地，底质为泥底及沙泥，水深 8～10m，东到东南风时风浪较大。

1.3 航道概况

石浦港区航道分为下湾门口外航道和下湾门航道，如图 1 所示，下湾门口外航道为港外锚地至下湾门北支航道入海口，该航段位于金龙礁与檀头山之间，航道宽广，全长约 2nm；捧浪礁北侧和东侧为北支航道深泓延伸段，北深南浅，水深 10～50m；港外锚地北边线至深泓段有大面积浅滩，水深 7～8m。

下湾门航道是万吨级船舶进出石浦港区的唯一航道，航道全长为 5nm，可分为三个航段，北段为汰网屿南侧航道，航道宽度为 150～200m，水深 30m 以上；中段为小网巾水道，汰网屿东南侧、转向点南侧有一架空光缆，航道宽度为 200～450m，水深 20m 以上；南段位于航道端口附近，被金龙礁分为南北两支，北支航道位于金龙礁与对面山之间，航道呈“哑铃”型，最窄处宽度约为 150m（10m 等深线），两侧宽广，西侧有直径约 0.2nm 的旋回水域（10m 等深线）。整个航道内有两处大角度转向段，一段位于网汰屿东南侧，另一段位于金龙礁西侧。



(1) (2)

图 1 航道示意图

1.4“铭浩”轮简介

“铭浩”轮为一艘 1990 年建造的集装箱船，船长 181.6m，船宽 31.4m，首尾吃水 0.8/7.6m，方形系数 C_b为 0.75，K'为 0.88，T'为 0.40，总载重吨 31583t，净空高度 33.67m（驾驶台主桅放倒后）。

1.5 操纵难点及风险点

1）正值夏季南风天气，“铭浩”轮吃水小，干舷高，受风面积大，在北支航道附近慢速航行时受横风影响较大，不利于控制船位；船龄超过 30 年，设备老旧，性能不稳定，随时可能出现意外风险。

2）北支航道西侧水域潮流复杂多变，流向与航道走向夹角大。落流进口时，该处的流场不仅会抑制船体向右加速偏转的趋势，而且还会导致船体向南漂移，过于靠近金龙礁。而在涨流进口时，该处的流场有利于船首右转，但会导致船体向北漂移，过于靠近右侧岸边。

3）北支航道西侧转向角度达 70°，因下湾门航道狭窄，弯曲半径小，驾引人员会产生较大的心理压力，易造成视觉误差而影响驾引人员的准确判断。

4）“铭浩”轮首尾吃水差大，盲区大，使得瞭望困难，旋回性能变差，大角度改向和避让操纵难度大。

5）“铭浩”轮需在短时间内完成北支航道转向点大角度转向，对转向前的船位、船速及转向时机的精准度要求较高，误差范围小，驾引人员难以把握，过早转向将过于靠近右岸，过晚转向将要面临旋回水域不足的局面。

2 航道要素适应性分析

2.1 航道宽度适应性分析

根据《海港总平面设计规范》（JTS165-2013），单向航道通航宽度 W 为航迹带宽度与船舶与航道底边之间富余宽度之和，计算公式为：

$$W = A + 2c \tag{1}$$

$$A = n \times \left(L \times \sin\gamma + B \right) \tag{2}$$

式（1）和式（2）中：W 为航道有效宽度，m；A 为航迹带宽度，m；B 为设计代表船型型宽，取 31.4m；c 为船舶与航道底边的富裕宽度，取 0.75B；n 为船舶漂移倍数，取 1.59；L 为船型总长，取 181.6m；γ 为风、流压偏角，取 10°。

经计算，“铭浩”轮单向航道通航宽度 W 为 145.3m，航道最窄处为 150m，能满足“铭浩”轮对航道宽度要求。

2.2 航道水深适应性分析

“铭浩”轮最大吃水为 7.6m，航道最浅处位于港外锚地，由于石浦港潮差较大，“铭浩”轮选择合适的潮高能安全通过浅滩区。

2.3 架空光缆净空高度适应性分析

汰网屿东南侧转向点附近有一架空光缆，根据“甬航通〔2022〕0303 号”公告，架空光缆弧垂最低点通航净空高度为 33.17m，设计最高通航水位为 4.42m（85 国家高程），合计高程为 37.59m。经计算，“铭浩”轮通过船尾压载和放倒主桅等措施，可满足 2m 富裕高度通航的强制性要求。

2.4 大角度转向航段适应性分析

2.4.1 水域尺度分析

船舶在狭窄水域过弯时，需要考虑船舶转向过程中的旋回圈半径[3]，如果转向过程中的旋回圈半径小于航道弯曲半径，船舶转向的运动轨迹将保持在航道内；反之，船舶转向的运动轨迹将偏离航道，导致船舶搁浅或触礁。

为简化计算，将船舶作以下假设，其一，船舶视为质点，其二，在恒定舵角下转向的运动轨迹视为圆周运动。当船舶沿航道中心线转向航行时，航道弯曲半径 R 的关系如图 2 所示，计算公式为：

$$D_1 = \frac{A'}{2} \tag{3}$$

$$D_2 = \frac{A'}{2\cos\dfrac{\theta}{2}} \tag{4}$$

$$R = \frac{A'}{2 \times (1 - \cos\dfrac{\theta}{2})} \tag{5}$$

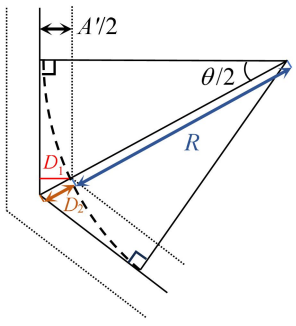


图 2 航道弯曲半径示意图

式(3)～(5)中 R 为航道弯曲半径，m；A' 为航道宽度，m； θ 为航向改变量，°。

当航道宽度一定时，航向改变量越大，航道弯曲半径越小；当航向改变量一定时，航道宽度越大，航道弯曲半径越大，经计算下湾门北支航道西侧转向点的弯曲半径为 416m。

“铭浩”轮满舵下的旋回圈半径计算公式为：

$$R' = \frac{L}{K'\delta} \tag{6}$$

式(6)中 R' 为旋回圈半径，m；L 为船长，m；K' 为 K 指数无因次化； δ 为操舵舵角，°。

经计算“铭浩”轮满舵下的旋回圈半径为 341m，即旋回圈半径小于航道弯曲半径。

由此可推断，在无风、无流的情况下，理论上“铭浩”轮在保证一定的旋回速率下能安全通过该航段。

2.4.2 恒定旋回速率的估算

如图 2 所示，当船舶沿航道中心线转向航行时，在航速一定的情况下，船舶恒定旋回速率的计算公式为：

$$\mathrm{ROT} = \frac{10800 v_s}{\pi R'} \tag{7}$$

式(7)中 ROT 为恒定旋回速率，°／min； v_s 为船速，m/s；R' 为旋回圈半径，m。

经计算，“铭浩”轮沿航道中心线通过北支航道进口时，在航速为 4kn、5kn、6kn 的情况下，恒定旋回速率分别为 16.5°／min 、20.6°／min 、24.7°／min 。从上述数据可知，当航速增加 1kn 时，恒定旋回速率将增加 4.1°／min ，因此，“铭浩”轮通过北支航道转向段的航速不宜过快。

2.4.3 最晚施舵点的估算

下湾门航道宽度受限，且有两处大角度转向航段，船舶过早、过晚转向都可能驶出航道并发生搁浅事故[4]，可通过估算新航向距离来确定最晚施舵点的位置，计算公式为：

$$Dc = L\left(T' + \frac{57.3}{K'\delta}\tan\frac{\varphi_0}{2}\right) + \frac{V_s t_1}{2} \tag{8}$$

式(8)中：Dc 为新航向距离，m；L 为船长，m；K'、T' 为 K、T 指数无因次化； δ 为舵角，°； ϕ_0 为航向变化角，°； V_s 为船速，m/s； t_1 为操舵时间，s。

通过计算，“铭浩”轮在下湾门北支航道转向点（航速为 4kn）的新航向距离为 325m，即理论最晚施舵点的位置。

3 进港引航方案

根据操纵难点、风险点和航道要素适应性分析结果，综合大型船舶出下湾门航道的经验，制定如下进口方案。

3.1 进港时机的选择

受架空光缆净空高度的影响，“铭浩”轮宜选择石浦港低潮缓流时段进港，建议低潮前半小时通

过下湾门北灯桩，低潮时通过架空光缆，并满足下列航行条件：1）进港作业需在白天进行；2）风力小于 6 级；3）流速小于 1kn；4）进港期间，海事对下湾门航道实行出口管制。

3.2 拖轮及警戒艇的配置

为应对突发状况，按照专家评估建议，进港时需两艘拖轮护航协助，两艘警戒艇于“铭浩”轮前后约 1nm 处警戒。

3.3 引航人员安排

由于“铭浩”轮的进港为石浦港区进口尺度最大的首次进港引航作业，引航站指派 4 名经验丰富的引航员共同完成，确定主引 1 名，副引 3 名。建立以主引总负责，副引全程协助，引航调度室和海事等为岸基辅助的引航团队。

3.4 航线设计

受“铭浩”轮尺度及航道条件的限制，建议以“中心线”为原则操纵船舶进口，其航线设计如图 3 所示。从 T0 到 T8 航程约 6nm，航时约 1 小时 30 分钟，航线上有多处转向点，其中 T4、T6 转向点的控制最为关键。

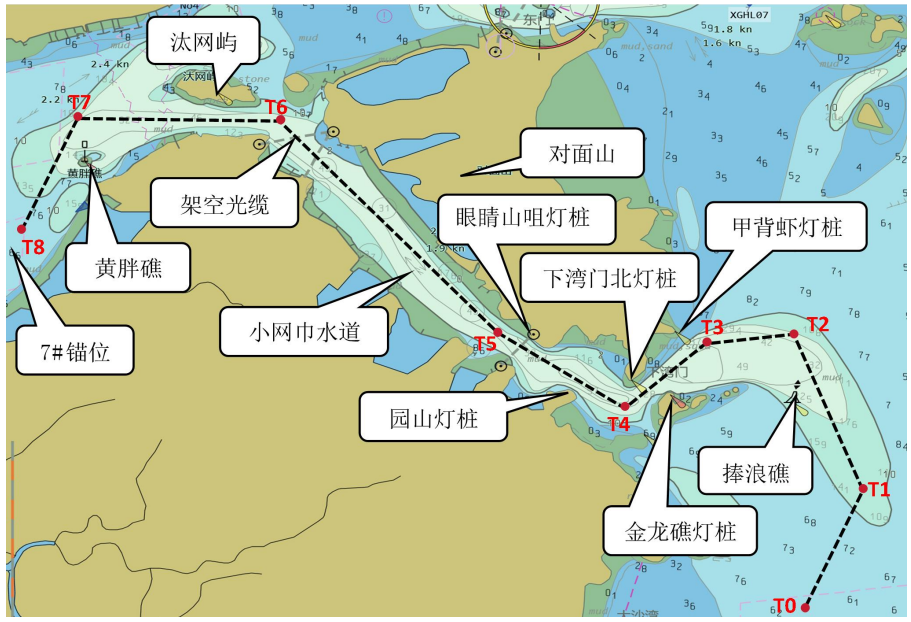


图 3 航线设计图

4“铭浩”轮进港航法

做好相关准备工作后，2024 年 6 月 5 日，“铭浩”轮计划 1400 由石浦港外锚地经下湾门北支航道引航至石浦港内锚地 7#锚位，当日东南风 4-5 级，石浦港低潮时间 1349，潮高 0.76m，经计算，1230 时潮高约为 1.15m，“铭浩”轮能安全通过港外锚地北侧的浅滩区。

引航员 1115 从石浦港渔人码头乘拖轮（东和拖 9）出发，于 1200 抵达石浦港外锚地西北角处登轮，登轮前核实船尾吃水为 7.6m，其具体航法如下：

1215 准备起锚。

1230 锚离底，船首备双锚，前进一；为避开捧浪礁南侧约 0.65nm 处的沉船，右满舵，改航向至 030°。

1240 航行至 T1 转向点，改航向至 330°，航道落流明显，船首对着铜瓦门附近，航速达到 5kn。

1249 航行至 T2 转向点，施左舵 20 向左转向至 260°，改向后风流压差角不明显，将甲背虾灯桩置于右船首。

1255 航行至 T3 转向点，改航向至 230°，船首对准北支航道中心线附近，航速约 4.2kn，航行中受南风影响，风流压差明显向右，不断向左调整航向。

1300 船中平金龙礁灯桩，航向 220°，航速 5.3kn，施右满舵向右转向，舵效较好，船舶旋回

速率最大达到 30°／min；由于受小网巾水道落流的影响，担心转向后离园山灯桩太近，当船中右正横下湾门北灯桩时，前进二加速右转。

1304 园山灯桩左正横，航向 300° 把定，航速 6kn，前进一。

1309 眼睛山灯桩右正横，改航向至 320°，船首对准汰网屿东，航速 6.6kn。

1323 经过架空光缆，目测富裕高度 3 到 4m，左舵 10 向左改向至 270°，航行约 0.85nm 至黄胖礁北。

1340 黄胖礁左正横 0.15nm。

1345 航行至内锚地 7#锚位。

航行部分轨迹如图 4 所示，船舶的实际轨迹基本符合预期，实操证明 T4、T6 转向点的操纵方法是可行的，“铭浩”轮能安全通过下湾门航道进口。



图 4 “铭浩”轮航行轨迹图

5 操纵要领及注意事项

5.1 操纵要领

1）引航员登轮前，应充分了解港区风力、风向及潮流信息，核实船舶首尾吃水；登轮后与船长交流引航方案，确认船舶工况，核实是否备妥车舵，是否启动双舵机等。

2）起锚前，令其中一艘拖轮（甬港拖 26）系于左舷船首，用于协助转向；另一艘（甬港拖 18）系与船尾巴拿马孔处，为大船制动之用（放缆长度约 30m）。

3）进港前，驾引人员应根据船舶资料估算出大角度转向航段的最晚施舵点位置。通过实践证明，下湾门北支航道 T4 转向点最佳施舵点位置为船中平金龙礁灯桩；汰网屿东南 T6 转向点最佳施舵点位置为船中过架空光缆位置。

4）进港时，驾引人员应时刻关注船速变化，大型船舶应以“低速”为原则通过下湾门航道，按计划准时抵达两大角度转向点及架空光缆位置，建议大角度转向航段航速宜控制为 4-4.5kn，其余航段不宜超过 6kn，航速过快时可通过船尾拖轮制动来控制航速，航行时尽量避免停车淌航。

5）根据《海港总平面设计规范》（JTS165-2013）中“两个反向连续转弯段之间的直线段长度不宜小于 5 倍设计船长”的要求以及为保证下湾门北支航道开视角度尽可能大的原则，进北支航道前，尽可能将船位控制在甲背虾灯桩东侧 30m 等深线的南侧附近，以便有足够的时间和空间调整船位；北支航道转向点前的船位可适当靠左，汰网屿东南侧转向点前的船位可适当靠右，其余航段船位尽可能保持在航道中心线附近。

6)下湾门北灯桩转向前，驾引人员应根据公式(7)估算出船舶恒定旋回速率的大小，转向时密切

关注旋回角速度的变化，若偏小，可通过短暂加车以增加舵效的方法加速右转，必要时使用拖轮协助。

7)大型船舶在甲背虾灯桩东侧航行时应密切注意右舷横流的影响,必要时将船位控制在北侧 30m 等深线上；甲背虾灯桩至下湾门北灯桩之间受顺流影响，航速可能会增加；下湾门北灯桩转向时，右舷船首的落流会抑制船舶向右转向。

5.2 注意事项

1）檀头山南侧航道有大面积浅滩，最浅处的海图水深仅 5.5m，石浦港潮差较大，低潮时段潮高较低，而大型船舶进港的最大吃水通常大于 7m。因此，建议大型船舶先空载候潮通过檀头山南侧航道浅滩段，在金龙礁南侧合适的水域抛锚，再压载等待进港。

2）大量小船及渔船从檀头山与对面山之间南下北上，驾引人员应加强瞭望，主动避让，必要时可申请海事、渔政协助。

3）大型船舶在进港时均为压载，船舶吃水差大、盲区大。在进行大角度转向时，前方岛屿已进入盲区，对驾引人员视觉冲击力较大，易产生心理压力。因此，航行前应充分熟悉航道情况和船舶操纵性能，在转向前估算新航向距离，转向时早用舵并用大舵角，保持转向的连贯性，视情况加大或减小舵角。

5）驾引人员需充分利用电子海图、导航仪、雷达和岸基物标确认船位，时刻关注岸船舶壁效应的影响。同时，建议在北支航道轴线西延长线的南田岛上设置一组进口导标，以方便进口定位。

6）石浦港为传统渔港，港区内常有客渡、商船、渔船航行及作业，为保障大型船舶进港期间安全，海事部门对下湾门航道实行单向进口管制，但航道上仍时有渔船违章乱捕、占用航道和乱张网等行为，导致下湾门航道内交通复杂，驾引人员需加强瞭望，时刻关注交通状况，注意小网巾水道两侧码头离泊小船横越船头的现象。同时，由于岛屿遮蔽的影响，驾引人员可派警戒艇提前到达转向点处通报遮蔽区交通流情况，充分利用 AIS 信息，避免在转向点处交会，转向前要适时鸣汽笛一长声，并用甚高频发布船舶动态。

6 结束语

大型船舶进石浦港区的引航操纵难度大、风险高，驾引人员事前需制定科学严谨的操纵方案，事中按计划精心组织实施，选择合适的时机，正确配置和使用拖轮，事后对操纵中碰到的问题和困难加以分析和总结，为以后石浦港区进口船舶操纵积累宝贵的经验。引航实践证明，通过科学的论证和精心的组织，在合适的风流条件和安全的保障措施下，大型船舶进下湾门航道是安全可行的。

本次进港引航工作的顺利完成，不仅开启了石浦港区进口引航作业、刷新了石浦港区进港船舶尺度记录，而且对加快石浦港区的快速发展，树立石浦港区的新形象，打造石浦港区口岸品牌，推动象山融入宁波港口经济圈，提高浙江参与“一带一路”和长江经济带建设，具有十分重大意义。

参 考 文 献

[1] 陈琦,潘金霞.石浦港区主航道一期工程航道尺度设计[J].水运工程,2015(12):113-117.DOI:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2015.12.023.

[2] 刘念.基于船舶操纵模拟试验的石浦港航道宽度研究[D].大连海事大学,2017.

[3] 房希旺,胡建国,杲庆林.船舶操纵[M].大连:大连海事大学出版社,2019.9

[4] 洪碧光.船舶操纵原理与技术[M].大连:大连海事大学出版社,2007.5

作者简介

1.周俊杰，高级引航员，15867292933，（E-mail）chyo322@163.com;

2.马春华，象山海事处执法大队长，远洋船长，13777129885，（E-mail）342343551@qq.com.

中国船舶交易市场现状及发展建议

王泽波

浙江拍船网航运交易股份有限公司 浙江 舟山 316000

摘 要：受国际地缘政治等多重因素冲击，全球经济不确定性增加，船舶交易市场也同样受到了巨大影响，面对线下工作开展受阻等问题，传统的船舶交易模式正在逐步转型，“VR”看船、船舶“云”交接、船舶在线竞拍、“双币种”拍卖等线上船舶勘验、船舶交易模式正在兴起。步入 2024 年后，全球经济复苏疲弱，国内外航运市场行情分化，二手船交易热度下滑。但随着各国“绿色减碳”政策推行，新能源船舶订单暴增，各大船厂船台爆满，后续航运市场走势看法不一。

关键词：二手船交易；船舶在线竞拍；地缘政治；航运市场

0 引言

受地缘政治紧张局势加剧、货币紧缩持续、全球需求疲弱等因素影响，多个国家经济增速出现萎缩，曾经欧洲经济的“火车头”德国经济出现负增长。2023 年美、德、日经济增速分别为 2.5%、-0.3%、1.9%，中国以 5.2%的增速在全球主要经济体中保持领先。在美联储迅猛的加息背景下，2023 年美国的经济超出预期，高于 2022 年的 1.9%，并领先于其他发达经济体。个人消费支出、非住宅类固定资产投资以及政府支出上涨成为拉动经济增长的主要原因。但是受高通胀率、美联储加息以及财政政策收紧等影响，美国经济走向仍存在很大不确定性。中国增长 5.2%的背后是消费的加快恢复。数据显示，最终消费支出对中国经济增长的贡献率达到 82.5%，比 2022 年提高 43.1 个百分点。按照可比价格计算，中国经济增量超 6 万亿元，相当于一个中等国家一年经济总量。国家统计局表示，我国 2023 年对世界经济增长贡献率超过 30%，是世界经济增长的最大引擎。

2024 年 1-6 月全球粗钢产量 9.546 亿吨，同比基本持平。铁矿石价格方面，由于全球经济预期向好，加上资本炒作和铁矿石供应集中等因素影响，国际铁矿石价格屡创新高，进一步推涨干散货市场运价，近期国际铁矿石价格回调，但实际需求仍在，市场运价持稳。船价方面，国内外船型船价两极分化，当前国际航线船型船价普遍较高，而国内沿海航线船型船价低迷。中国船舶交易价格指数 SSPI 显示，二手船交易市场船价有较大幅度回暖，截至 2024 年 7 月 19 日，SSPI 综合指数收于 912.72 点，同比涨幅 3.40%，其中 SSPI 干散货船综合指数 831.32 点，同比持平，油船市场受俄乌冲突以及巴以冲突的影响，能源危机情绪蔓延，油船运力相对吃紧，船价高位波动，SSPI 油船综合指数 1014.13，同比上涨 9.49%。

1 中国船舶交易市场现状

1.1 传统二手船交易市场总体情况

目前国内传统船舶买卖交易模式主要分为三种：一是通过政府设立或者备案的船舶交易服务机构进行船舶交易；二是通过完全商业性质的船舶交易经纪人进行船舶交易；三是交易双方直接对接完成交易。参照交通运输部《船舶交易管理规定》，绝大多数的中国籍船舶的交易行为都应该进入交通运输主管部门批准和备案的船舶交易服务机构内进行，截至目前，由交通运输部批准的交易机构共三批、17 家单位。

2023 年，二手船交易量没有太大的波动，年初行情低位，年末小幅冲高后又恢复正常，全年行情较为稳定。2023 年全年，二手干散货船和油轮共成交 1256 笔交易，同比下降近 10%。其中，干散货船有 632 艘易手，Handysize 和 Supramax 推动了二手船市场，分别成交 149 笔和 142 笔，Capesize 和 Newcastlemax 交易量上涨，分别成交 98 笔和 19 笔，同比翻番，Ultramax 的交易量为 70 艘，同比增长近 10%。

2024 年前 5 个月，二手干散货船市场需求总体走高，2024 年干散货船交易活跃，创下 2021 年

以来的第二大交易量，大于 2 万载重吨的散货船累计产生 362 笔交易记录，同比增加了 87 笔。Ultramax 和 Supramax 型船累计交易 130 笔，Handysize 船型交易 93 笔，Capesize 达成 67 笔交易。

1.2 船舶拍卖市场总体情况

在国际市场需求下降、国际贸易发展受阻导致贸易下行压力加大的背景下，全球贸易呈现增速放缓趋势。全球产业链供应链受贸易保护主义影响，叠加逆全球化等影响，各国对外贸易遭受严峻考验。2023 年中国船舶拍卖市场拍卖船舶数量和成交数量均有 10%以上增长，但成交金额却不理想，同比降幅达 16.8%。2023 年拍卖单船体量明显小于 2022 年，且受经济大环境影响，司法拍卖数量增加，司法拍卖船舶多为单船体量较小的船舶。据拍船网不完全统计，截至 2023 年 12 月 31 日，全国通过公开拍卖船舶有 1211 艘次，成交 461 艘次，同比分别增长 12.2%和增长 13.0%，成交率 38.1%，同比变化不大，总起拍价约为 106.6 亿元，总成交价约为 42.7 亿元，同比分别减少 8.3%和 16.4%。

2024 年上半年，国内沿海运输市场行情羸弱，运价持续低迷，大量船舶外流进入国际市场，国内买船热情较低。据不完全统计，截至 2024 年 6 月 30 日，全国通过公开拍卖船舶有 268 艘次，成交 104 艘次，同比跌幅分别为 47.9%和 49.5%，成交率 38.8%，成交率同比持平，总起拍价约为 29.2 亿元，总成交价约为 11.9 亿元，同比分别减少 39.0%和 53.6%。

2 中国船舶交易市场分析

2.1 传统二手船交易市场分析

2.1.1 国内二手船交易低位徘徊

2023 年，经济复苏力度放缓，上半年，沿海运输市场总体低迷，没有明显起色，秦皇岛至广州航线 5-6 万 DWT 运价长时间维持在 50 元/吨左右，市场购船情绪降温，国内船舶交易市场冷清，直至 2023 年年底，年末补库需求爆发，运价迎来一波上涨，但涨幅也未能持续太久，“福之达 6”2009 年造 13738DWT 散货船以 1300 万元成交，“普惠 2”2006 年造 12882DWT 散货船以 895 万元成交，与上年同期的类似船型相比，成交价跌幅约 10%。

到了 2024 年，国内干散货市场依旧延续“旺季不旺”的走势，总体市场运价没有明显提振，导致船舶交易市场热情进一步下滑，大量内外贸兼营船舶外流。房地产、基建等投资项目大幅回落，对沿海运输市场行情影响巨大，国内船东信心降至谷底。“美济轮”2008 年造 13582DWT 散货船以 968.8 万元成交，“福运 929”2009 年造 15087DWT 散货船以 1325.6 万元成交，与上年同期的类似船型相比，成交价继续下跌。

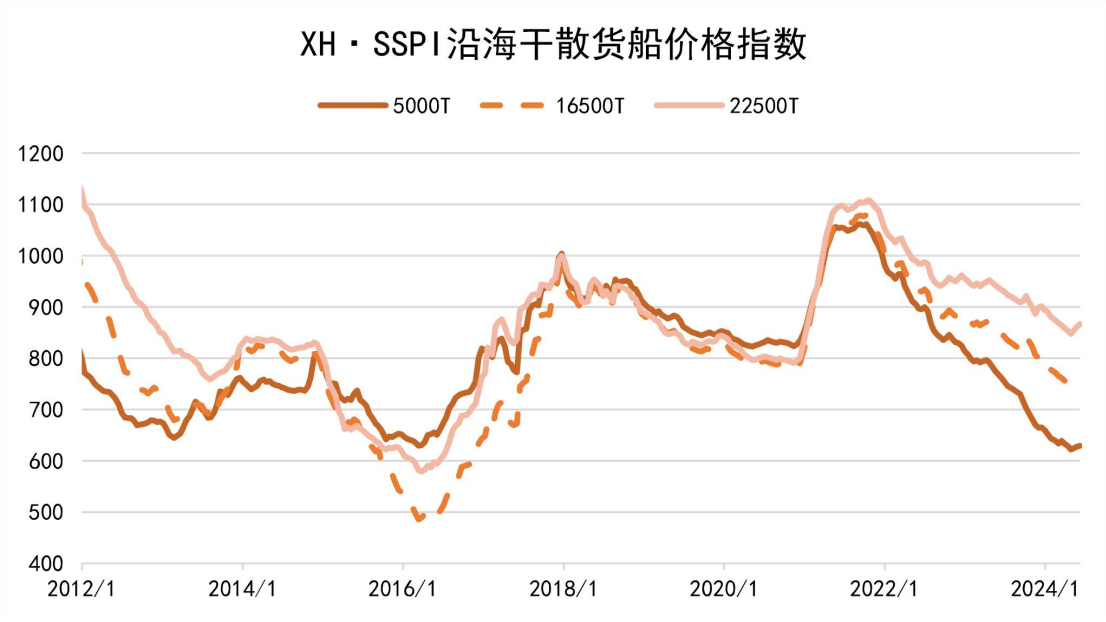


图 1 XH·SSPI 沿海干散货船价格指数走势图

2.1.2 国际二手干散货船交易先涨后稳

2023 以来，国际干散货运输市场总体行情虽不及 2021 年，但行情稳步提升，进入下半年后行情回升速度进一步提振。波罗的海交易所数据显示，2023 年 12 月 1 日，海岬型船 TCE 租金高达 51727 美元/日，而年初仅为 4433 美元/日，增幅高达 1067%，2023 年 12 月 4 日，BDI 收于 3346 点，较年初上涨 376%。

一方面，海外各国经济逐步复苏，全球对于铁矿石、煤炭、钢材等需求大幅增加，另一方面，地缘冲突不断，市场不确定性增强，特别是“红海危机”发生后，海运吨里程增加，对船舶运力需求拉升。国际干散货市场的高运价水平也提振了船东的信心，二手船交易市场逐步升温。根据拍船网船舶评估咨询机构数据显示，2024 年 6 月一艘 5 年船龄的 Ultramax 估价 2600 万美元，而 2023 初时该船型估价仅为 2300 万美元；海岬型船价差更为显著，2024 年 6 月一艘 10 年船龄的海岬型散货船估价 3350 万美元，而 2023 初时该船型估价仅为 2350 万美元。

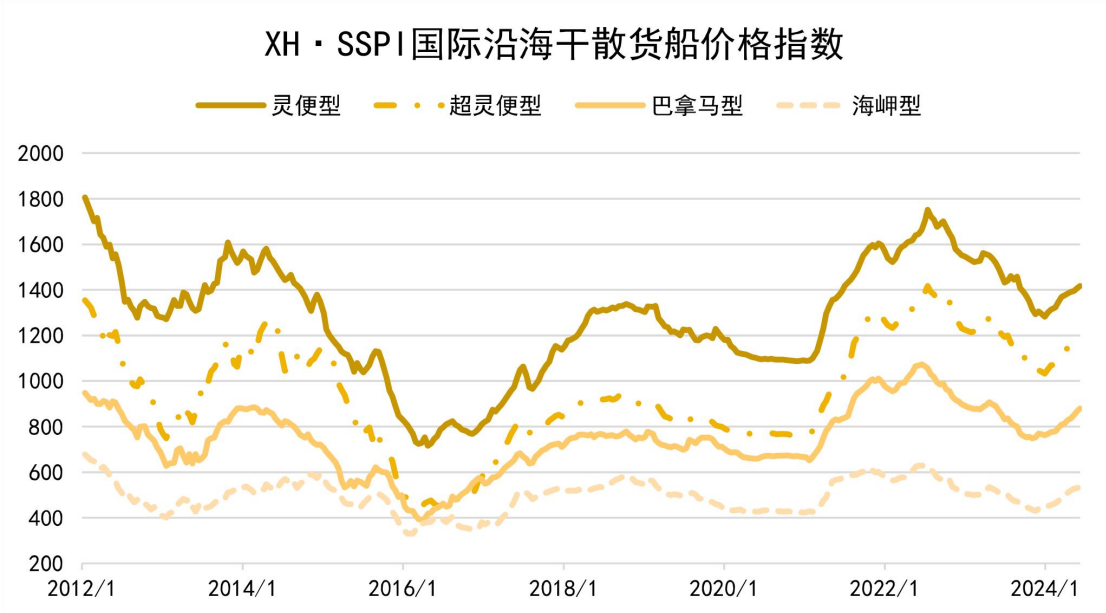


图 2 XH·SSPI 国际沿海干散货船价格指数

2.2 船舶拍卖市场分析

2.2.1 船舶拍卖市场成交量大幅下降

国内贫瘠的市场行情也让船舶在线拍卖市场热度出现了下滑，2024 年上半年不管是船舶拍卖艘次还是拍卖金额，均减少了半数以上。分船型来看，干散货船作为主力交易的船型，拍卖成交量同比减少 62%，成交金额同比减少 60%，成交率也仅为 40.9%；工程类船需求相对持稳，在拍卖金额大幅增长的同时，成交金额却依旧大幅下跌，说明当前虽然需求较旺，但受大环境影响成交价萎缩明显；客滚类船舶、渔业用船拍卖数量相对较少，也延续量价齐跌的走势；集装箱及多用途船舶方面，受国际集运市场提振，成交价总体持稳，在累计成交额方面，集装箱船同比下滑较少，仅同比下滑 5.7%

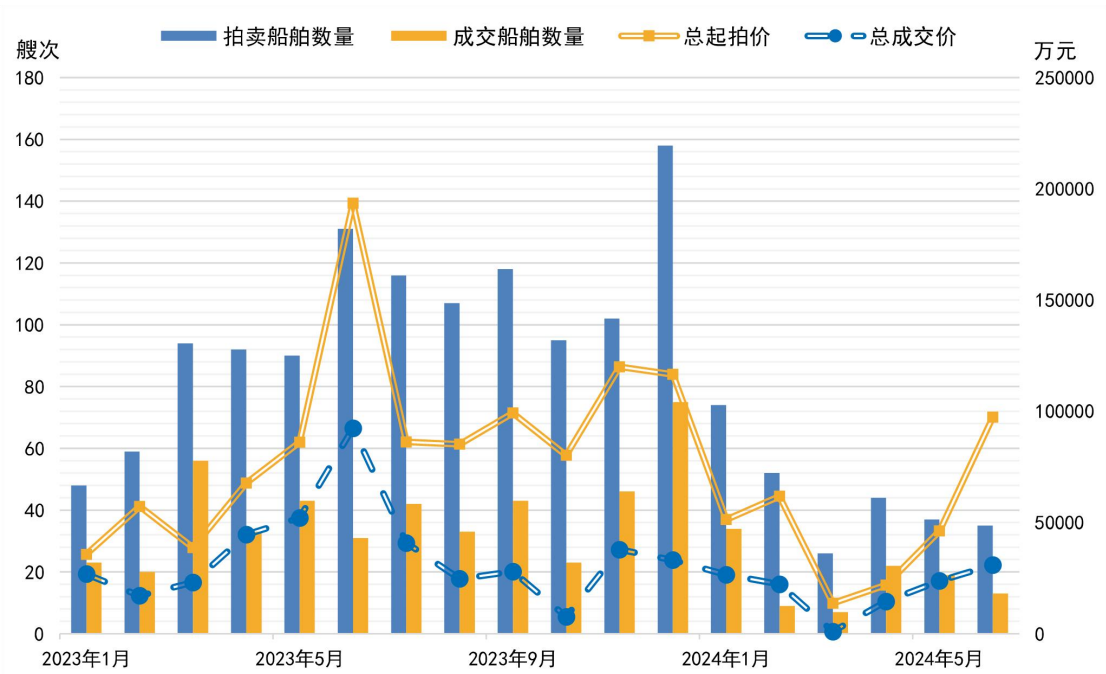
表 1：2024 年 1-6 月中国船舶拍卖艘次情况

船舶类型	2024 年 1-6 月		2023 年 1-6 月		同比	
	拍卖艘次	成交艘次	拍卖艘次	成交艘次	拍卖	成交
干散货类船舶	66	27	184	71	-64.13%	-61.97%
液货类船舶	20	7	31	13	-35.48%	-46.15%
集装箱及多用途船舶	26	6	37	16	-29.73%	-62.50%
工程类船舶	42	11	26	11	61.54%	0.00%
客滚类船舶	39	6	84	24	-53.57%	-75.00%

渔业用船	39	21	106	52	-63.21%	-59.62%
其他*	36	26	46	19	-21.74%	36.84%
合计	268	104	514	206	-47.86%	-49.51%
*其他包含：三无船舶、重大非法改建船舶、废钢船、航运相关资产等。						
数据来源：拍船网						

船舶类型	2024 年 1-6 月		2023 年 1-6 月		同比	
	起拍价 万元	成交价 万元	起拍价 万元	成交价 万元	起拍价	成交价
干散货类船舶	103773.7	70908.4	294070.0	176008.2	-64.71%	-59.71%
液货类船舶	51457.3	21964.3	41470.6	27938.8	24.08%	-21.38%
集装箱及多用途船舶	17884.8	8378.6	19605.5	8886.9	-8.78%	-5.72%
工程类船舶	100270.1	10785.8	27017.6	19493.9	271.13%	-44.67%
客滚类船舶	3538.0	391.3	55388.9	4303.7	-93.61%	-90.91%
渔业用船	8370.2	3792.7	30649.1	17744.1	-72.69%	-78.63%
其他*	6913.4	2601.7	10681.8	1606.3	-35.28%	61.97%
合计	292207.4	118822.9	478883.4	255981.8	-38.98%	-53.58%
*其他包含：三无船舶、重大非法改建船舶、废钢船、航运相关资产等。						
数据来源：拍船网						

表 2：2024 年 1-6 月中国船舶拍卖金额情况



数据来源：拍船网

图 3 2023-2024 年 6 月公开拍卖船舶情况逐月走势图

2.2.2 干散货类船舶拍卖热度降温

2024 年，国内工业、制造业继续发力，但房地产、基建全面降温，工业产品出口量猛增，但由于煤炭、铁矿石等大宗物资需求下降，运输市场行情快速下滑，国内运价持续成本线附近徘徊。由于国际行情相对较好，大量船舶出口经营外贸航线。

干散货船舶拍卖市场行情持续降温，受低迷的运输市场行情影响，前期船东买船热情下滑。虽然运价持续低位，但船价高位影响，船舶交易市场情绪逐步转向观望。2024 年 4 月拍卖的“DAYANG ORIENT”（56830DWT,2011 年中国造）以 1266 万美元成交，5 月拍卖的“SEACON 8”（56785.16DWT，2012 年中国造）以 1413 万美元成交，6 月拍卖的“BBG QINZHOU”（81608DWT，2019 年中国造）以 3006 万美元成交。

2024 年上半年，中国船舶拍卖市场干散货类船舶拍卖 66 艘次，成交 27 艘次，同比分别减少 64.13%和 61.97%；起拍价累计 10.4 亿元，成交额累计 7.1 亿元，同比分别减少 64.71%和 59.71%；成交率 40.6%，同比增长 2.6 个百分点。

表 3：2024 年 1-6 月干散货类船舶拍卖情况

干散货类船舶	2024 年 1-6 月				同比			
DWT	拍卖艘次	成交艘次	起拍价 万元	成交价 万元	拍卖	成交	起拍价	成交价
1000 及以下	0	0	0.0	0.0	-	-	-	-
1001-5000	10	3	2857.0	710.7	-58.33%	-57.14%	-64.26%	-71.11%
5001-10000	8	1	4986.2	2150.0	-52.94%	-88.89%	-38.70%	-68.50%
10001-40000	16	11	30601.4	22076.4	23.08%	120.00%	23.93%	206.57%
40001-60000	4	2	28918.6	19288.8	0.00%	100.00%	24.98%	82.77%
60001-80000	1	0	1700.0	0.0	-87.50%	-100.00%	-97.15%	-100.00%
80000 以上	1	1	20498.4	21943.8	-80.00%	-66.67%	-77.60%	-64.82%
数据来源：拍船网								

2.2.3 液货类船舶拍卖市场总体持稳

2024 年上半年各国经济持续复苏，原油消耗量逐步增长，但伴随着对地缘政治的忧虑，国际油价波动，贸易商操作较为谨慎。对比之前的囤油热潮，今年油运市场主要以刚需为主，市场运价变化不大，呈现小幅上涨的态势。船东多以观望和实际需求为主，部分液货类船型拍卖成交量有所增长。

总体来看，液货类船舶拍卖艘次和成交额同比也呈下降趋势，但中小型油船出口市场较好，成交提升较多，这类船舶船价相对不高，对整体拍卖量的拉动有限。2024 年 2 月拍卖成交的“长航发现”成交价 14280 万元，溢价率 10.7%；5 月拍卖成交的“山港油运 8” 成交价 3731 万元，价格持稳。

2024 年上半年，中国船舶拍卖市场液货类船舶拍卖 20 艘次，成交 7 艘次，同比分别下降 35.48%和 46.15%；起拍价累计 5.15 亿元，成交价累计 2.20 亿元，同比分别上涨 24.08%和下降 21.38%；成交率 35.0%，同比减少 6.9 个百分点。

表 4：2024 年 1-6 月液货类船舶拍卖情况

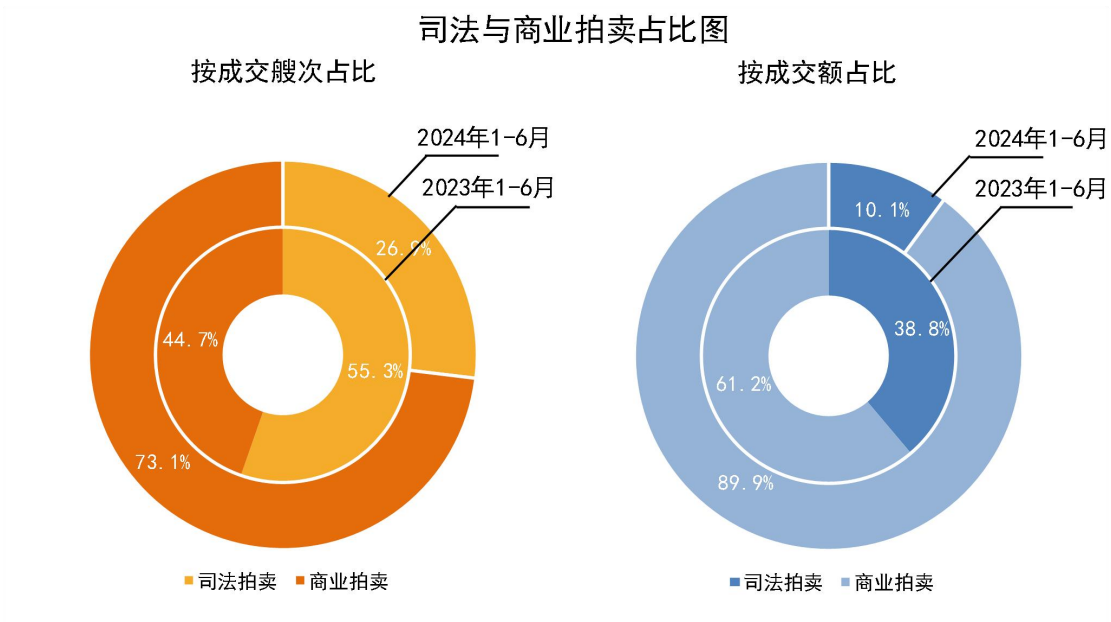
液货类船舶	2024 年 1-6 月				同比			
DWT	拍卖艘次	成交艘次	起拍价万元	成交价万元	拍卖	成交	起拍价	成交价
500 及以下	0	0	0.0	0.0	-	-	-	-
501-1000	3	2	553.0	361.0	200.00%	100.00%	1683.87%	802.50%
1001-3000	3	1	3539.1	372.0	-25.00%	-50.00%	44.94%	-75.90%
3001-5000	5	1	17559.8	3731.0	25.00%	-50.00%	237.49%	237.04%
5001-9999	0	0	0.0	0.0	-	-	-	-
10000 及以上	1	1	12900.0	14280.0	-66.67%	0.00%	-39.54%	-23.61%
数据来源：拍船网								

3 船舶交易市场存在问题及建议

3.1 司法拍卖量逐年下滑

从 2020 年疫情防控开始，部分线下工作开展受阻，多家专业拍卖平台崛起，司法拍卖自在 2020 年来拍卖量逐步下滑，2024 年 1-6 月格外冷清。2023 年司法拍卖总体拍卖船舶数量与 2022 年基本持平，但 2024 年上半年司法拍卖量急剧下滑，成交额大幅缩水，主要原因是宁波海事法院、厦门海事法院等原本有较多沿海大型船舶拍卖的法院今年拍卖艘次有限，同时，受经济环境影响，成交价不及 2023 年同期，导致成交额骤减。分船型来看，2024 年沿海万吨以上船舶拍卖仅 4 艘次，成交 2 艘次，而 2023 年同类船舶拍卖为 6 艘次，成交 4 艘次。除广州和天津海事法院成交额有小幅上涨以外，其他海事法院成交额均有所下降。

解决对策：专业的船舶处置团队能够加快船舶处置效率，为船东谋求利益最大化。在船舶拍卖市场行情遇冷的情况下，船舶商业拍卖出现逆市上扬。数据显示，2021 年 1-6 月司法拍卖船舶司法拍卖船舶 87 艘次，成交 28 艘次，同比分别减少 69.1%和 75.4%，成交率约 32.2%，成交金额约 1.21 亿元人民币，同比减少 87.9%。商业拍卖 181 艘次，拍卖成交 76 艘，成交率约 42%，成交金额 10.68 亿元人民币，拍卖船舶数量和成交船舶数量分别下降 22%和 17.4%，成交金额同比下降约 31.8%。



数据来源：拍船网

图 4 2024 年 1-6 月司法与商业拍卖占比图

3.2 多重因素导致看船、交接困难

2020 年开始的新冠疫情对司法拍卖和商业拍卖均造成了巨大冲击，传统船舶勘验、船东看船、船舶交接在疫情期间都存在各种问题。后续国际地缘政治冲突不断，俄乌冲突、巴以冲突陆续爆发，船舶交易前的勘验、看船以及船舶交易中的船舶交接、船员换班均存在较大阻碍。

解决对策：通过线上线下融合的方式，配合专业的船舶交易业务团队，利用视频看船、“双币种”竞拍、VR 全景看船、船舶“云”交接等创新业务模式，帮助船东解决当下看船难、交接难等痛点。

4 船舶交易趋势分析

面对 IMO 严格的减排目标，航运业未来替代燃料不确定，2023-2024 年期间新船订单量大幅增长，手持订单量急剧攀升。克拉克森数据显示，2024 年上半年新船订单 1127 艘，合计 7115 万载重吨，艘数和载重吨分别同比下跌 17.62%和上升 14.65%。截至 2024 年 6 月，全球船厂手持订单 4925 艘，共计 13335 万 CGT，手持订单数量环比下降 1.48%，修正总吨环比下降 1.01%。

2024 年，全球海运市场继续复苏，运价走势波动，新船订单创新高，手持订单保障度达到 3-4 年，不少船舶交付日期已排至 2028 年。虽然对下阶段航运市场行情仍然存疑，但面对当前市场的热度，不少船舶急于高价买船，当前二手船市场国内两极分化，国际船东已将目光转向部分短期内即将交付的新造船市场，而国内船东正在寻求转型发展来渡过国内这段低迷时期。

综合来看，航运市场行情短期内正处于平稳发展的阶段，2020 年受全球新冠疫情冲击，出现了大幅的波动，但海运市场运输刚需仍存，2021 年至今，国际海运市场在地缘政治、疫情的压力下持续复苏，船舶交易热情延续，船价快速上涨，当前已达高位。国内海运市场方面，2024 年 7 月国家发展改革委、财政部印发《关于加力支持大规模设备更新和消费品以旧换新的若干措施》（发改环资〔2024〕1104 号），将推动新一轮大规模设备更新和消费品以旧换新，加快高能耗高排放老旧船舶报废更新，推动新能源清洁能源船舶发展。支持内河客船 10 年以上、货船 15 年以上以及沿海客船 15 年以上、货船 20 年以上船龄的老旧船舶报废更新。政策陆续推出后市场反响强烈，结合当时比较低迷的沿海运输市场，大量老旧运输船舶提前报废拆解。从市场层面看，虽然二手船交易市场未必会因此活跃，但考虑到当前低迷的沿海运价，《措施》公布后将会出现大量的船舶拆解需求，也将再次激活大大小小的拆船厂，且随着老旧运力淘汰，沿海市场运力减少，有望提振沿海市场运价。另外，船舶在线拍卖等线上服务为船舶交易提供了可靠的平台，凭借出色的线下线上融合的专业配套服务，快速处置船舶相关资产，实现资产价值最大化。

参考文献

[1] 樊月娇. 碳强度指标影响二手船交易[J]. 中国航务周刊, 2023(19): 29-31.
[2] 王朝. 二手船市趋势向好 新船涨幅继续收窄[N]. 中国水运报, 2021-12-15(006).
[3] 李琴. 航运脱碳这盘棋，中国如何抢“先手”？[N]. 中国船舶报, 2023-03-17(005).
[4] 孙丽朝. 旺季下跌 航运价格上涨三个月后首次回落[N]. 中国经营报, 2024-07-22(A03).
[5] 于文豪. 干散货航运企业应对市场周期性风险的思考[J]. 中国储运, 2024(07): 206-207.
[6] 周兵. 2023 年国际干散货航运市场回顾及 2024 年展望[J]. 世界海运, 2024, 47(04): 1-9.
[7] 韩乐. 关注地缘因素对航运需求的影响[N]. 期货日报, 2024-02-29(006).
[8] 陈洪桃. 2023 年集装箱航运市场分析及 2024 年展望[J]. 中国港口, 2024(01): 23-26.
[9] 徐凯. 提升我国船舶交易数据服务能力探究[J]. 航海, 2023(06): 3-7.
[10] 邝展婷. 绿色动力领衔未来新造船市场[N]. 中国船舶报, 2024-05-31(006).

作者简介

王泽波，浙江拍船网航运交易股份有限公司，网媒数研部，数研市场分析师。联系地址：浙江省舟山市新城翁山路 555 号大宗商品交易中心 6 楼,手机号:18768056566,联系邮箱:wangzb@shipbid.net

重载船舶靠泊时突发主机故障的应急处置

宋 伟，潘国华

（宁波引航站，浙江 宁波，315000）

摘 要：船舶靠泊过程中主机突发故障是非常危险的，如果处置不当极有可能引发安全事故，会对港口正常运营带来重大影响。重载散货船“J 轮”在靠泊时遭遇主机故障，危机之中引航员分析比对了四种应急处置方案，在征得交管中心和引航调度的同意后引航员选择了顺势靠上，既保证了船舶安全，又保障了港口生产，实现了共赢。

关键词：重载船舶；主机故障；应急处置；无动力靠泊

近年来，船舶在港内航行或靠离泊过程中主机突发故障的情况时有发生，这给船舶和港口安全都带来重大威胁。船舶在靠泊过程中突发主机故障尤为危险，如果处置不当，极易发生重大事故，严重危及船舶和港口设施安全。重载船舶由于惯性大，突发主机故障时面临的风险和处置难度尤其巨大。在船舶突发主机故障时，引航员的应急处置正确与否对事态发展至关重要。

某日，引航员引领“J 轮”靠泊宁波舟山港中宅码头，停车淌航一段时间后，准备再次启动主机时突发故障，主机一直没有启动。引航员立即报告交管中心和引航调度，征求对下一步操作的指示，交管中心要求引航员谨慎处置，确保安全；引航调度领导在了解现场情况后给出了指导和建议。引航员利用拖轮淌航到码头对开横距 4 链时稳住了船速、船首向。随后，引航员与交管中心进行了充分沟通，征得交管中心的同意，在拖轮配合下，把无动力的“J 轮”安全靠上码头。

1 “J 轮”的引航计划

1.1 “J 轮”的基本概况

“J 轮”建造于 2013 年，船舶整体保养较好。船长 234.98m，船宽 38m，总吨 50625，净吨 31470，载重吨 95710，最大吃水 14.51m，排水量 110062。主机功率 17607hp，微速进 32 转，5.2 节。

1.2 “J 轮”靠泊时外部环境特点

中宅码头船舶左舷靠泊的时间窗口为镇海高潮前 2 小时至镇海高潮时，最佳靠泊时间点为镇海高潮前 1 小时。[1]此时，中宅码头外螺头水道主航道正是涨流时间，且涨流较急；而码头附近由于受周围地形影响形成回流（落流），这两种相反方向的水流之间会形成潮流切变线，如图 1 所示。

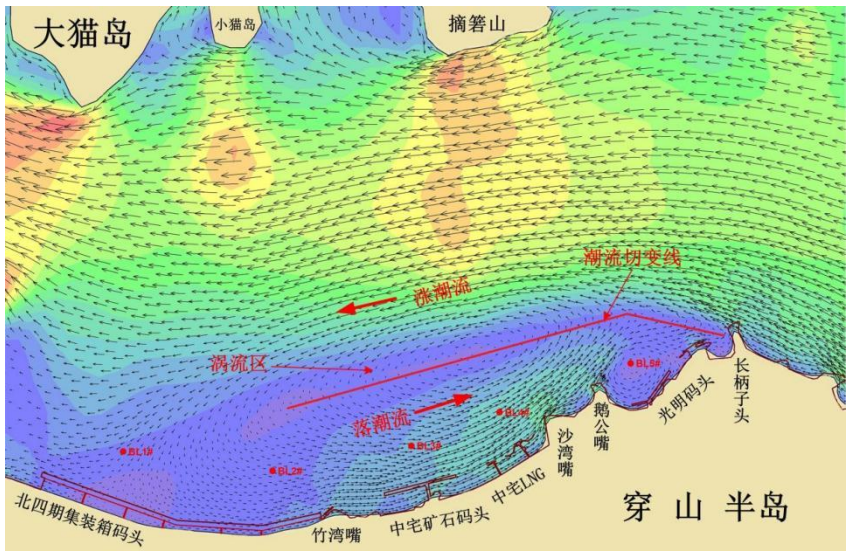


图 1：螺头水道某时刻潮流切变线示意

船舶在接近码头过程中的速度相对会比较快，有以下原因：一是主航道是涨流，重载船顺流减速困难；二是码头在航道的左侧，靠码头必须穿越定线制进入沿岸通航带，在穿越出口航道时经常会遭遇大量出口船，为减少穿越时间需保持一定的航速穿越；三是靠泊时间窗口较小，过了窗口期，码头边落流强大，拢泊困难；四是当船舶遭遇潮流切变线时，受切变线两侧相反方向潮流的影响，船首会出现大幅度左转，必须右满舵加车甚至需加到 FULL AHEAD 才能抑制。

1.3 “J 轮”的引航计划

“J 轮”计划 0815 靠泊中宅 1#泊位，当天是农历十二，镇海高潮时 0917，潮高 262cm，低潮时 1513，潮高 86cm，潮差 176cm；风力南到东南风 4 级，阵风 5-6 级。靠泊时间为镇海高潮前 1 小时左右，正是左舷靠初落的最佳窗口时间。根据规定，“J 轮”需要三条拖轮助泊。

2 “J 轮”靠中宅码头主机故障经过

0610 引航员在虾峙门 L1 报告线准时登轮，查看引航卡和船舶资料，跟船长交流船舶操纵性能及相关设备情况，确认一切设备完好，向船长介绍引航计划。0730 过长柄子头，微速进，速度 8 节，联系助泊拖轮带缆。由于出口船较多，“J 轮”一直航行在进口航道南边沿，等所有出口船会遇清爽，开始大幅度左转。如图 2，0737 大概在光明码头对开，进入沿岸通航带，距泊位 1.8 海里，速度 7.5 节，航向 240，停车淌航。0740 三条拖轮 Z7（4800hp）、Z12（4000hp）、Z15（4800hp）到位，Z7 带右船头，Z15 带右船尾（带好缆绳即向后松缆跟着），Z12 机动，暂时跟在右舷驾驶台后。

0745 浙江 LNG 码头对开，横距 8 链，余速 6.5 节，左满舵，航向不变。引航员下令微速进准备拉进船头，减小入泊横距，但是 1 分钟后，主机还是没出来，让船长查找原因，尽快修复，并让船头备双锚做好应急抛锚准备。同时令船尾 Z15 向后拖，以衰减船速。考虑到：此处水深 80 米以上，且船舶余速依然过快；当前位置处于小型船舶的习惯航线；浙江 LNG 码头正靠泊着一艘大型 LNG 船舶，主机失控的“J 轮”犹如脱缰的野马，有冲向 LNG 船舶的风险，因此，当时情况并不适合立即应急抛锚。



图 2：“J 轮”主机故障处置过程轨迹

0748 船首遇到切变线，船舶开始左转并逐渐加速，令船尾 Z15 加到快车拖，同时令 Z12 在右船尾快车顶。因为单拖船在舷侧顶推前进中的船舶时，拖船位于船尾比位于船首转船效应大，且船速越高，两者的差别越大。[2]令船首 Z7 贴着船体向后快车拖。两条拖轮快车向后拖，再加上船首大幅度的偏转，“J 轮”船速下降很快。0752 中宅 2#泊位对开，距码头 6 链，余速 3 节多，船首对着中宅 2#泊位，但船首还在继续左转。船舶余速已得到有效控制，遂令 Z7 适当前移、Z15 收缆到右船尾顶推，以尽快调整船舶与码头之间的角度。Z15 到位后快车顶推，船首左转趋势开始得到抑制，并逐渐转为右转，船速继续下降到向前大概 1 节，令船首拖轮停拖，转为正横顶，以控制船首向。0802

横距 4 链，在 50 米等深线北边，船首向与码头夹角已经很小，ROT 基本为零，有向前 0.5 节的速度，横移速度 0.3 节，引航员用拖轮控制好船位和船首向。此时船舶主机故障依然没有修复，但船舶主机故障带来的风险已经得到了初步控制。“J 轮”主机故障处置轨迹如图 2 所示。

3 “J 轮”的应急处置

3.1 应急处置方案

在“J 轮”主机故障处置过程中引航员紧急设想了四种应急处置方案：

3.1.1 方案一：立即拖离

因为修复主机的时间不可预知，立即拖离，远离码头似乎是最保险的方法。但是中宅码头在螺头水道南边，附近并没有适合长时间抛锚的锚地，距离最近可供抛锚的北仑锚地和马峙锚地距离都有 8～9 海里以上，对于一条排水量超过 11 万吨的重载无动力船，这个距离实属遥远。且此时螺头水道进出口船舶数量众多，船舶密度较大，交通流复杂，螺头水道又是急流水道，在这种情况下实施重载船舶拖带的安全风险比较大。立即拖离并非最佳方案。

3.1.2 方案二：就地抛锚

此处水深在 50～60 米之间，跟北仑 3#锚位差不多，且此时船舶速度已经得到了有效控制，跟码头还有相对足够的安全距离，短时间抛锚不存在太大的风险。抛锚后主机如果很快得到修复，就可以继续靠泊；但是如果主机长时间得不到修复，必将错过靠泊时间窗口，而且此处距码头只有 4 链左右，距浙江 LNG 码头也比较近，急落流时有很大风险。抛锚后如果主机长时间修复不好，最终还是要拖到锚地。如此来看就地抛锚亦非上策。

3.1.3 方案三：等待支援

此外，就地抛锚后还可选择等待更资深引航员上船支援，主持后续应急抢险，但这个时间至少需要一个半小时以上，如此“J 轮”还是将错失靠泊窗口，同样面临上述困难和风险。

3.1.4 方案四：顺势靠上

此时距码头只有 4 链，有三条拖轮助泊（周边无其它空闲拖轮，最近拖轮驰援需 1 小时左右），可以用第三条拖轮带在正船尾提供动力，另外两条拖轮在右舷艏艉正横顶推即可；而且当时靠泊位置的后面比较清爽，距中宅 2#泊位东端靠泊船有将近 200 米的距离；再者当天并非大潮汛，此时码头边落流还不是很急。综合分析，“J 轮”在当时情况下进行靠泊，安全是可以得到有效保障的。

综合比对四种应急处置方案，方案四相比正常操作虽有较大的难度和风险，但是风险总体可控。与其它三种方案相比，靠泊操纵的时间较短，且不与其它交通流关联，风险相对更低，而且还可为港口和船方争取时间，减少损失，一举多得。权衡利弊，当值引航员更倾向于顺势靠上。一番思虑后，当值引航员立即向引航调度汇报了“J 轮”船舶主机故障的处置情况及下一步计划，值班领导给予当值引航员技术指导和鼓励，处置计划最终也征得了交管中心的同意。

3.2 “J 轮”的无动力靠泊过程

引航员调整艏艉拖轮顶推，0810 时横距大概 3 链，目测“J 轮”驾驶台位置基本平泊位旗，令 Z15 解缆再移到正船尾带缆，为大船提供动力，Z12 到右船尾带缆，拖轮使用如图 3。此时，由于落流的作用船舶开始后退并有逐渐加快的趋势，Z15 到位后逐渐加车到快车顶推，大概相当于大船前进一时的功率。在 Z15 快车顶推作用下，0820 横距 300 米左右时，船舶退速得到抑制，并转为朝前的速度，调整 Z7、Z12 顶推于 0835 左右安全贴拢码头，随后通过 Z15 的协助对好位置。

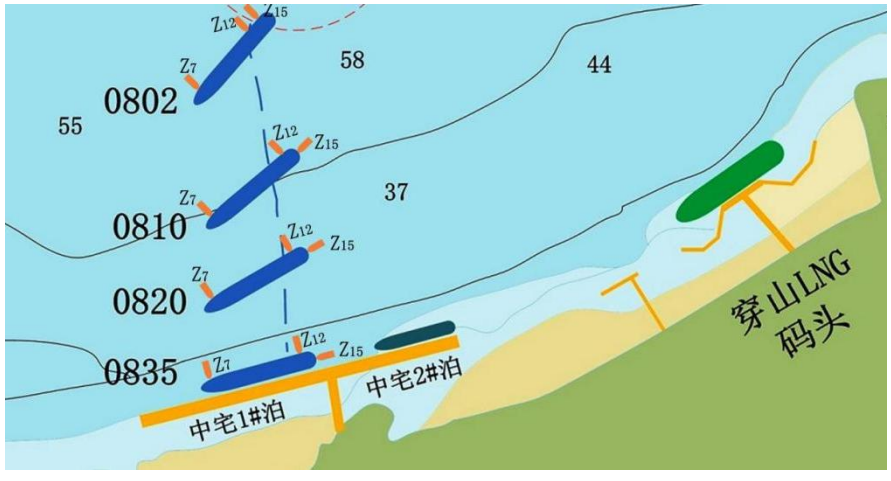


图 3：“J 轮”无动力靠泊过程

4 关于“J 轮”主机故障处置的思考

船舶在港内航行和靠离泊过程中主机突发故障并不是罕见的，但因为突发故障的突然性以及所处环境的复杂性，它要求驾引人员要立即采取切实有效的应对措施，否则可能会对船舶和港口设施安全、甚至人命安全和海洋环境安全都产生重大影响。因此，它对驾引人员的业务能力和应急处置能力要求极高。回顾“J 轮”主机故障的处置过程，总结如下：

4.1 控制合适的靠泊“三要素”

速度、位置（横距）、角度被称为靠泊的“三要素”。一次成功的靠泊，需要把这三个要素控制地恰到好处，就算出现突发情况也有采取应急措施的余地，能做到进可攻、退可守。控制合适“三要素”的靠泊过程如水到渠成，安全可靠。“J 轮”主机突发故障时，横距尚有 8 链，在顺流的情况下余速 6 节多，这就为采取应急处置措施留下了足够的时间和空间。如果当时横距过小，或者余速过快，势必给当事人造成更大的心理压力，处置难度和处置风险可能就会成倍增加。这就要求我们平时操船时要养成良好的习惯，控制各引航节点的船位和航速，做好“引航三部曲”，即引航前精心准备、引航中谨慎操作、引航后认真总结。[3]

4.2 拥有过硬心理素质

无论面对何种应急事件，驾引人员都应保持冷静，对当时船舶所处的情况做出准确的判断。[4]一个优秀的引航员须拥有过硬的心理素质，在遇到突发情况的时候才能做到“泰山崩于前”而面不改色，才能做到指挥若定，应变自如，更从容赢得船长的信任和配合。如果引航员没有过硬的心理素质，在真正遇到突发情况时就容易脑子一片空白，自乱阵脚，不知所措，根本无法应对紧迫危险，进而错失应急处置的“黄金时间”，有可能造成不可挽回的损失。但是过硬的心理素质并不是与生俱来的，它源于高超的引航技术和丰富的引航经验。打铁还需自身硬，引航员唯有不断学习，交流总结，多方积累，才能不断增强应对船舶各种突发情况的能力和信心，才能在最短的时间内判断出最紧迫的危险是什么，进而采取有效措施来保证船舶的安全或在事故不可避免的情况下尽量降低损失。[5]

4.3 充分利用好拖轮

中宅码头投产之初，要求拖轮在靠泊大船过长柄子头之前要到位，要及早带拖，为大船安全靠泊提供保障。随着引航艘次的增加，很多引航员都积累了丰富的靠泊经验，应对切变线也很有心得，对带拖轮地点也没有像以前要求那么严苛，拖轮也经常不主动过去带缆。这就给顺流减速困难且需要经过复杂流场环境的大船带来安全隐患。试想，如果“J 轮”突发故障时，拖轮还没到位，这就缺少了关键的应急外援，引航员势必手忙脚乱，难于应对，后果就难以预料。因此，重载船舶靠泊时一定要提早落实拖轮，及早带拖，切忌过于随意。另外，在遇到突发情况时一定要第一时间告诉拖轮，并明确告知其操作意图，尽可能最大程度地发挥拖轮的作用。

在处置过程中要密切注意潮流的影响。因为是顶流靠泊，利用拖轮减速时不要直接把大船拉停，要保留适当进速，以免船舶在潮流作用下过早产生退速。在船舶进速快为零时，要及时把一条拖轮放在正船尾顶推提供动力，防止船舶后缩。因为拖轮功率相比船舶主机功率要小很多，船舶一旦出现后缩，拖轮要尽快加到快车顶推，以便及时克服大船的后缩。

4.4 处置程序做到位

船舶突发故障时，引航员首先要在第一时间控制住当前所面临的最紧迫的引航风险，在此过程中应及时报告交管中心和引航调度。交管中心能够帮助引航员发布船舶失控通告，并联系协调周围船舶对失控船舶进行主动避让，并可迅速调配拖轮前往协助；引航调度可根据现场情况及时启动应急反应机制，统一调派各种资源，及时提供远程技术指导或紧急支援。此次船舶失控的成功处置，要感谢交管中心的果断专业指挥和对引航员的充分信任，感谢引航调度的及时指导。船舶突发故障时要坚决避免不报告，逞个人英雄主义，盲目操作。

5 结束语

安全是引航永远的主题，也是引航员永远的追求。引航员要有过硬的技术能力，操作时不能满打满算，要居安思危、留有余地，更要未雨绸缪、留有后招。引航员要以科学安全的引航理念为指引，做到规范操作，不断学习，不断提升引航技能和应急操纵能力。引航员要有强大的心理素质，在一些突发情况来临时，才能够临危不惧，在极有限的时间内做出正确抉择，采取合适有效的处置措施，保障引航安全。

参考文献

[1] 宁波引航.宁波舟山港中宅码头靠离泊窗口及夜间靠离泊研究（R），宁波：宁波引航站，2017年.
[2] 洪碧光.船舶操纵（M）.大连：大连海事大学出版社，2016 年.
[3] 潘国华、陈意洁、赵方斌.虾峙门水道船舶险情、事故多发原因及对策（J）.航海技术 2016 年，第 6 期：7-10 页.
[4] 房希旺、何欣、杨林家.船舶操纵（M）.大连：大连海事大学出版社，2012 年.
[5] 葛益民.引航过程中船舶失控的处置和分析（J）.中国水运，2016 年，第 11 期：50-51 页.

作者简介：

宋伟，宁波引航站高级引航员，浙江省宁波市高新区沧海路 588 号绿园大厦 25 楼，联系电话：13884462239，Email：707772503@qq.com
潘国华，宁波引航站正高级引航员，浙江省宁波市高新区沧海路 588 号绿园大厦 24 楼，联系电话：13905749812，Email:pangh@nbport.com.cn

浅谈 EXCEL 函数在航海工作中的应用

叶高扬，黄起栋，蒋鑫荣

浙江省宁波海运股份有限公司

摘　要：为了更好地发挥 EXCEL 函数在船舶管理和航海业务中的应用，进一步提高航海工作的效率。本文首先总结了当前 EXCEL 函数在船舶工作中的应用状况，其次通过运用不同的 EXCEL 函数，结合航海工作中常见的场景和需求，实现了引用和字符串联合、日期间隔计算、统计维护检查项目等功能，最后对其他常用的 EXCEL 函数进行介绍，为航海工作者提供了一定的参考。

关键词：EXCEL 函数；航海；计算

在现代航海工作中，信息技术的迅速发展为航海人员提供了更加高效、精确的工作手段。其中，Microsoft Excel 作为一种广泛应用的电子表格软件，不仅在商业领域有着重要地位，也在航海领域发挥着积极作用。船舶管理、货物跟踪、航行计划等众多方面，都需要大量的数据处理和计算，而 Excel 的强大功能使得航海人员能够更加便捷地进行各类复杂计算和数据分析。本文旨在探讨 Excel 在航海工作中的应用，从而为航海人员提供更加高效的工作方法。

1.船舶使用 EXCEL 状况

随着计算机技术在航运业务中广泛运用，许多航海人员结合 EXCEL 的计算功能创造出众多诸如水尺计量[1]、天测罗经差等计算[2]等常用计算公式，及一些如应用于西北太平洋船舶防抗台[3]等特定用途的计算公式，减少了计算所需的量和时间。受船员升职、船员流动等因素影响，使创造出的计算工具没有得到传承，因此，有必要去研究 EXCEL 最精华部分函数，掌握计算公式，搭建计算平台以提高工作效率。本文主要介绍船舶常用的 EXCEL 函数及使用场景和例子，供航海人员参考。

2.船舶 EXCEL 使用技巧

2.1 符号“$”

在 EXCEL 表格中，最大的优势之一在于公式的可复制性，从而降低了重复输入公式的工作量。尽管“$”符号并非函数，它代表对数据区域的绝对引用，可以固定单元格中的行和/或列。在与其他函数配合使用时，可以显著增强公式的可复制性。

以单元格 A1 为例进行说明：

相对引用 A1：该引用会随着单元格的变化而自动调整，使得单元格复制粘贴时会引用相应位置的数值。

混合引用$A1：这表示列 A 被固定，而行号可变，因此进行单元格复制粘贴时，会引用列 A 中相应位置的数值。

混合引用 A$1：相反地，行号 1 被固定，而列可变，所以在单元格复制粘贴时，会引用行 1 中相应位置的数值。

绝对引用$A$1：无论如何复制粘贴，都将始终引用 A1 单元格的数值。

2.2 字符串联

以大副的工作为例，船上任务都以航次为单位进行报表的填写，大副可以将一个航次所需填写的各种报表整合到一个 EXCEL 表格中，通过简单的等号赋值，实现“数据只需输入一次”的目标。然而，在实际操作中，存在一些情况，多个数值需要填入同一个单元格，直接通过等号无法满足需求。为了解决这一问题，可以运用函数将多个数值、文本、符号等合并填写到同一个单元格中。

核心公式：CONCATENATE(text1, [text2], ...)

（参数 Text1，必须要连接的第一个文本项；参数 Text2，...可选。其他文本项，最多为 255 项。项与项之间必须用逗号隔开。）

	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1					船名	XXXX					
2	C. OFFICER	XXXX			航次	2309			作者		XXXX
3	始发港				装货港				卸货港		
4	乐清					鲅鱼圈			广州		
5	港口名称	YUEQING P. PLANT			港口名称	BAYUQUAN			港口名称	GZ XINGANG	
6	锚地名称				锚地名称	鲅鱼圈			锚地名称	桂山	
7	泊位	NO. 1			泊位	NO. 63	NO. 47		泊位	NO. 1	NO. 3
8	时区	(-8)			时区	(-8)			时区	(-8)	
9	货物名称	COAL			货物名称	CORN	STEEL		货物名称	CORN	STEEL
10		煤				玉米	钢材			玉米	钢材
11	积载因数				积载因数	1. 3575			积载因数		
12	海水密度	1. 0180			海水密度	0. 9980			海水密度	1. 000	
13	抵 Df				抵 Df				抵 Df	12. 36	
14	港 Dm				港 Dm				港 Dm	12. 44	
15	吃 Da				吃 Da				吃 Da	12. 50	
16	FW				FW	285			FW		
17	抵港日期	2016/12/28			靠泊日期	2017/1/5			抵港日期	2017/1/17	

图 1

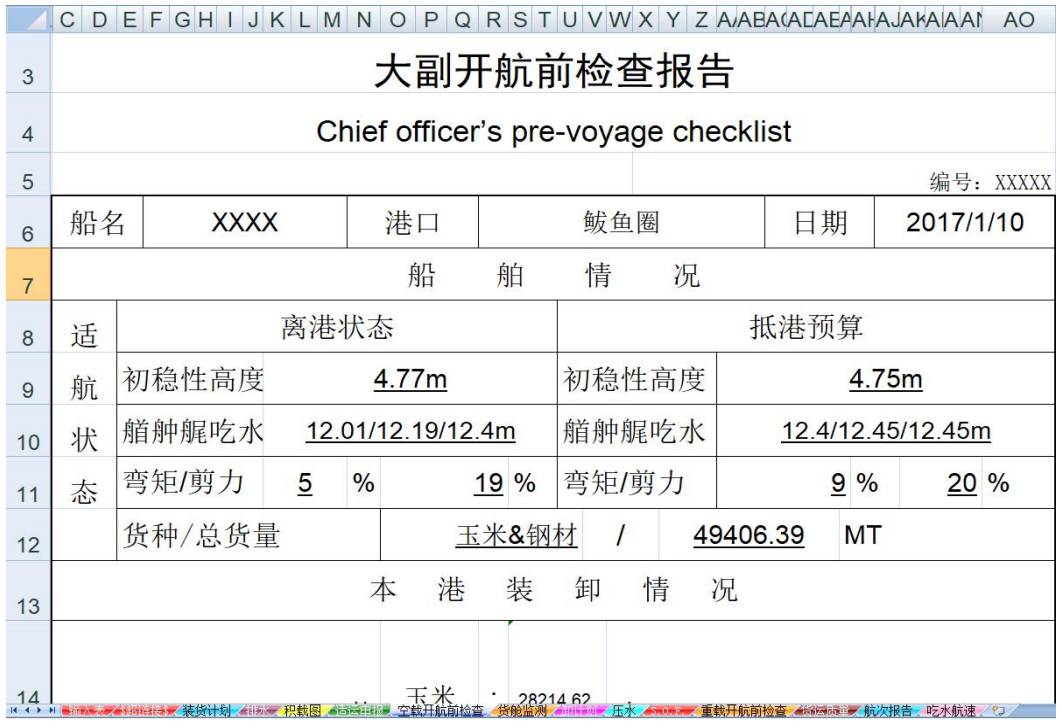


图 2

运用举例：创建一个航次信息的“输入表”，如图 1、图 2 所示。以“开航前检查”为例，需要自动填写离港艏舯艉时，对应表格内输入 CONCATENATE(输入表!J22,"/",输入表!J23,"/",输入表!J24,"m")，不但能显示“输入表”中的吃水，也能将三个吃水的数值进行分割，而且显示单位“m”。

2. 3 计算两个日期的天数间隔

船上工作涵盖了多种不同周期的任务，包括证书更新、救生消防设备的维护、药品和化学品的更新，还有磁罗经自差表等的检验周期，以及气体探测仪、救生艇等的年检日期。由于这些任务涉及的数据繁多，主管人员常常为了避免遗漏而不得不耗费、时间逐一进行检查登记。为了提高工作效率，可以引入时间计算的方法。通过计算从当前日期到相关任务的有效日期或下次检验日期之间的天数，再结合设定的特定提前提醒天数，主管人员能够更加直观地了解所管理设备的状态。

时间计算方法不仅可以让主管人员避免错过重要的任务周期，还可以让他们提前做好准备，确保所需的维护、检查或更新工作得以顺利进行。通过在 EXCEL 中运用相应的日期函数，如 DATEDIF 函数，可以轻松地计算出日期间的天数差，从而更加科学地安排和管理船上工作任务，提高工作的效率和准确性。

核心公式：**DATEDIF(start_date,end_date,unit)**

（参数：Start_date 为一个日期，它代表时间段内的第一个日期或起始日期；参数：End_date 为一个日期，它代表时间段内的最后一个日期或结束日期；参数：Unit 为所需信息的返回类型）

运用举例：IF(DATEDIF(TODAY(),A1,"d")<=X,"111","222")。即计算从今天开始到 A1 的时间天数，如果小于等于 X 天，返回数值为 111，否则返回 222。其中 TODAY()返回的数值为当天日期。

项目	有效期限	计算结果	公式
安全带有效期	2023/9/30	2个月内到期	IF(DATEDIF(TODAY(),F32,"d")<=60,"2个月内到期","正常")
安全帽有效期	2024/5/31	正常	IF(DATEDIF(TODAY(),F33,"d")<=60,"2个月内到期","正常")
货运质量报告发公司	2023/10/15	正常	IF(DATEDIF(TODAY(),F34,"d")<=7,"一周内发送","正常")

图 3

为了更加直观地检查计算结果，当然也可以使用条件格式，计算结果达到阈值后单元格自动填充颜色。

2.4 统计月度维护检查项目

以散货船甲板部每月工作为例，在未细分项目的情况下约有 500 项，包括甲板设备结构、通讯导航设备、救生消防设备的维护检查，而各种维护检查都有各自的周期，如每周、每月、每三个月、每半年、每年等。经过统计，一般大副需要花约 2 个小时才能梳理出本月需要维护检查的项目。为提高工作效率，可以引入满足给定条件的单元格的个数计算，使主管人员能够在约 2 分钟之内调出下月需要维护保养的项目。

核心公式：**COUNTIF(range，criteria)**

（参数：range 要计算其中非空单元格数目的区域；参数：criteria 以数字、表达式或文本形式定义的条件）

运用举例：将“年度维护计划”工作表对应需要保养的项目修改成对应月份，如图 4 所示。

XXXX 轮 XX 年度维护保养计划表（ 甲板 ）部

编号：SMIDR001-1 页次： 2 / 17

序号	维护项目	月度												检查负责人	养护负责人	养护周期	备 注
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
一	**大副分管项目（船体外部除锈、油漆）**																
1	水线以上船壳外板和载重线、水尺标志锈蚀损伤情况检查	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	大副	水手长	1个月	
2	艏、尾楼甲板、主甲板锈蚀损伤情况检查，局部除锈	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	大副	水手长	1个月	
2.1	艏楼甲板	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
2.2	NO.1舱周围	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
2.3	NO.2舱周围	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
2.4	NO.3舱周围	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
2.5	NO.4舱周围	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
2.6	NO.5舱周围	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
2.7	艉楼甲板	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
2.8	主甲板栏杆、护栏（链）、上下扶梯锈蚀损伤情况检查，		2			5			8			11		大副	水手长	3个月	

图 4

另起一个工作表“甲板部月度工作”，在对应表格内输入 IF(COUNTIF(年度维护计划!Y8:AJ8,甲板部月度工作!$O$58)>0,年度维护计划!C8,"")。即计算“年度维护计划”工作表 Y8 到 AJ8 对应行中，包含了“甲板月度工作”中 O58 的数量大于 0，则返回“年度维护计划”工作表中的 C8，否则为空白。

船名：	XXXX	计划月份：	3

序号	计划维修检查项目
1	水线以上船壳外板和载重线、水尺标志锈蚀损伤情况检查，局部除锈、油漆保养
公式	IF(COUNTIF(年度维护计划!Y8:AJ8,甲板部月度工作!$O$58)>0,年度维护计划!C8,"")
2	艏、尾楼甲板、舱口周围甲板、主甲板一般锈蚀，无损伤，局部除锈、油漆保养
3	
4	
5	舷墙及栏杆检查，一般锈蚀，无损伤，除锈、油漆保养
6	NO.1-5货舱的骨材（包括肋骨、强肋骨、纵骨、纵桁等）、舱壁（包括水密隔舱壁）、扶强材、斜坡板、肘板、内底板涂层情况、焊缝检查，一般锈蚀、无损伤或变形
7	NO.2/3/4货舱检查直梯检查正常，1/5顶边舱下空舱检查正常，1/2、2/3、3/4、4/5货舱上、下凳的检查正常，艏隔离空舱、驾驶台两翼下空舱检查正常

图 5

2.5 其他常用函数及介绍

（1）SUM 函数：SUM(Number1,Number2,...)，计算所有参数数值的和。

（2）SUMIF 函数：SUMIF(range，criteria，sum_range)，对表格范围中符合指定条件的值求和。其中参数 Range 为条件区域，用于条件判断的单元格区域；Criteria 是求和条件，由数字、逻辑表达式等组成的判定条件；Sum_range 为实际求和区域，需要求和的单元格、区域或引用。当省略第三个参数时，则条件区域就是实际求和区域。

（3）MATCH 函数：MATCH(lookup_value, lookup_array, match_type)，用于返回指定数值在指定数组区域中的位置。参数 lookup_value：需要在数据表（lookup_array）中查找的值。可以为数值（数字、文本或逻辑值）或对数字、文本或逻辑值的单元格引用。可以包含通配符、星号 (*) 和问号 (?)。星号可以匹配任何字符序列；问号可以匹配单个字符；lookup_array：可能包含有所要查找数值的连续的单元格区域，区域必须是某一行或某一列，即必须为一维数据，引用的查找区域是一维数组；match_type：表示查询的指定方式，用数字-1、0 或者 1 表示，match_type 省略相当于 match_type 为 1 的情况。

（4）ISERROR 函数：ISERROR(value)，用于测试函数式返回的数值是否有错，参数 value 为需要进行检查的内容。

（5）ISBLANK 函数：ISBLANK（value），用于判断指定的单元格是否为空，参数 value 为需要进行检查的内容。

（6）ISNUMBER 函数：ISNUMBER（value），用于判断引用的参数或指定单元格中的值是否为数字，参数 value 为需要进行检查的内容。

（7）VLOOKUP、HLOOKUP 函数[4]。

3. 结束语

EXCEL 的功能在于公式的巧妙套嵌，本文所述的技巧和函数仅是 EXCEL 功能的一部分。航海人员可以自主学习掌握 EXCEL 中各种函数和特性，也可以使用他人设计的 EXCEL 公式，通过不同函数的巧妙组合，打造出能够轻松应对任务的定制化办公工具，从而有效地提升工作效率。但要避免在单元格中输入过多文字，以免影响 EXCEL 的运算速度。

参考文献

[1]赵开华. 谈用电脑的 EXCEL 进行水尺计量[J]. 航海技术,2006(02):16-17.

[2]熊丹,辛世金,张夏夏,等. 用于船舶罗经校正的太阳方位角 EXCEL 计算软件编制[J]. 广东造船,2020,39(3):41-43.

[3]林智斌,金汉山. 西北太平洋船舶防台抗台中 EXCEL 的应用[J]. 天津航海,2015(02):77-78.
[4]张朝辉. EXCEL 中 VLOOKUP 函数应用解析[J]. 办公自动化,2020,25(11):58-62.

作者简介：
第一作者：叶高扬，浙江省宁波海运股份有限公司船长。浙江省宁波市江北区北岸财富中心 1 幢 601 室，电话 1895791609。
第二作者：黄起栋，浙江省宁波海运股份有限公司二副。浙江省宁波市江北区北岸财富中心 1 幢 601 室，电话 18006842665
第三作者：蒋鑫荣，浙江省宁波海运股份有限公司二副。浙江省宁波市江北区北岸财富中心 1 幢 601 室，电话 13071897270

宁波舟山港 3#警戒区航行风险与航法优化建议

刘斌， 谢哲学，陈利忠

（宁波引航站，浙江 宁波，315000）

摘 要：通过分析宁波舟山港 3#警戒区及周边水域的交通流、潮流特点、通航风险，提出 3#警戒区的船舶航行的避让优先原则、船舶航行注意事项。

关键词：3#警戒区；航行风险；潮流特点；航法优化；注意事项

宁波舟山港身为世界第一大港，货物吞吐量连续 15 年位居全球第一。随着进出港口的大型油轮、矿石船、集装箱船数量日益增长，核心港区内通航密度越来越大，船舶交会频繁，并且多条岛际客运航线穿越核心港区，通航环境复杂。同时，浓雾、寒潮大风、台风等恶劣天气影响频繁。这对船舶通航秩序管理要求特别高。本文通过总结宁波舟山港 3#警戒区的航行风险，对 3#警戒区的船舶航行的避让优先原则提出建议。

1 3#警戒区简介

3#警戒区北接第 5 分道通航制，（如图 1）西北方向为册子水道，南接第 4 分道通航制，再往东便是螺头水道。3#警戒区有多股交通流在此交汇，包括沿分道通航制、沿岸通航带正常进出口的船舶，靠泊实华、中油码头的 VLCC 船舶及穿山北口码头群的靠泊船，穿山北口码头群的离泊船以及穿越 3#警戒区进出穿山北口的船舶。3#警戒区及其附近水域因航路交汇，船舶交通流密集，船舶种类繁多，船舶会遇态势复杂，会遇频次较高，潮流影响大。



图 1　3#警戒区示意图

2 3#警戒区潮流特点

该区域呈不规则半日潮，潮流也是不规则的往复流，流向大致沿着等深线附近；按镇海潮汐推算，高潮后 1 小时左右开始落流，低潮后 1.5 左右小时开始涨流[3]，大潮汛涨落流来的早些并且流速大，落流强于涨流，落流流速达 6 节左右。警戒区附近靠近螺头角的水域流混乱，有涡流和切变区存在。受地形影响，螺头角附近水流湍急[4]，流向不规则，小型船舶受流影响航速下降很大，甚至有小船在顶流北上时对地航速接近为 0[4]，重载出口船舶由于顺流太急有压向凉帽山的风险。不管是涨流还是落流，进口螺头角的大型船舶，都是往左压，尤其是重载大型船舶容易压上分隔带。

3 3#警戒区存在的通航风险

3.1 交通流向混乱产生的风险

3#警戒区作为宁波舟山港重要的交通枢纽，交通流量大，船舶种类多，通航环境复杂，且临近螺头角（大猫岛），受岬角挑流的影响流态复杂多变，存在巨大的交通安全隐患。

航经 3#警戒区的交通流复杂，其主要交通流包括以下几种：（如图 6）

1）驶进驶出附近航门的船舶；

2）靠离泊沿岸码头进出通航分道或警戒区的船舶；

3）在 3#警戒区南北方向航行白峰到鸭蛋山的车客渡；

4）经常在该处进出通航分道或穿越警戒区的军舰；

5）3#警戒区西面大榭港区码头众多，需要减速穿越该警戒区进行靠离泊作业的船舶；

6）大榭东岸码头离泊船，从 3#警戒区穿越北上，或是并入交通流南下出口的船；

7）穿鼻岛石料临时出运码头，运输船舶数量大，由北面过来靠泊，及离泊西行出口的石料船，都汇聚到 3#警戒区进出；

8）在警戒区捕鱼的小型渔船以及过往不按定线制航行的渔船和小型船舶；

9）在该警戒区及其附近的沿岸通航带慢车低速航行及淌航的船舶。

3.2 岬角区域产生的风险

3.2.1 岬角遮蔽效应产生的风险

螺头水道在大猫岛南端突然收紧，水流增速异常湍急，导致 3#警戒区至螺头角之间流速最大可

达 5-7 节，流向多变，流急时旋涡遍布。受螺头角水域地形挑流影响，急涨潮流时期螺头角西侧沿岸对开形成局部回流，靠近进口航道右边缘[5]；急落流时期螺头角东侧小猫山对开水域形成局地回流，东侧水域落流时进口航道的流速比出口航道的流速要缓。

3.2.2 岬角效应产生湍流水域带来的风险

重载船舶涨流时段进口，受岬角地形影响，容易出现船首右偏难抑制，导致整个船身压向大猫山，或延迟转向而被迫进入分隔带甚至出口航道等危险局面。（如图 2）

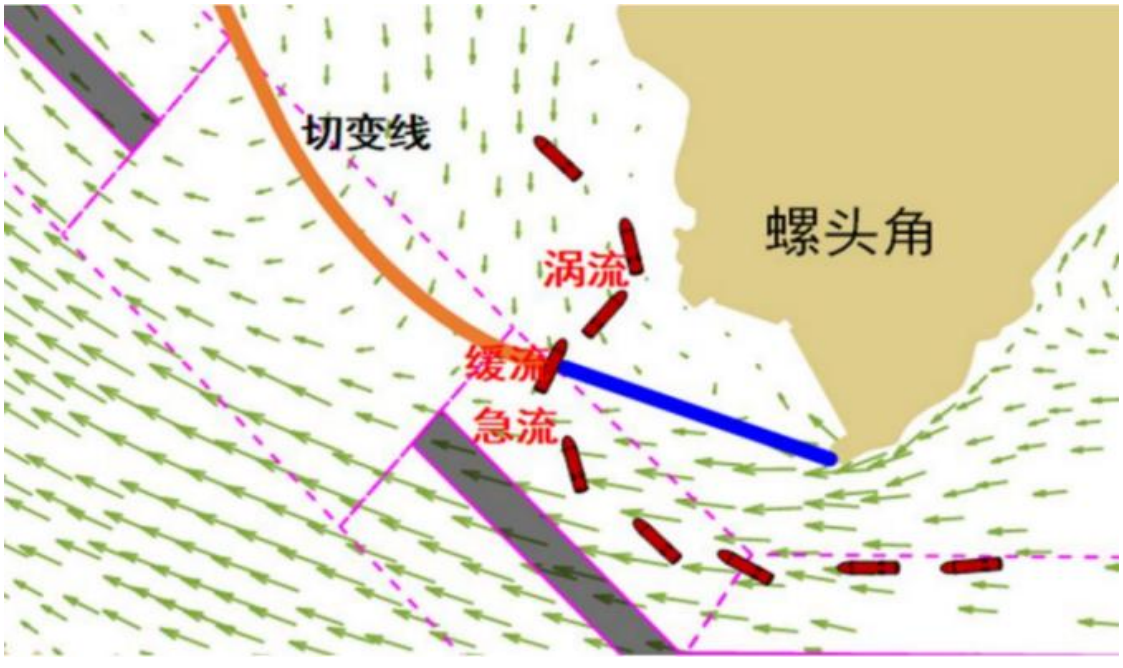


图 2 螺头角水域涨流示意图

重载船舶急落流时段进口，受岬角地形影响，由缓流区进入急流区，容易出现船首被流压住，右转困难，被迫进入分隔带甚至出口航道等危险局面。同时船速也会急剧降低，导致舵效变差，保持航向和船位的能力受到限制，一定程度上降低了大型重载船的避让他船能力，有时重载船舶在急落流时经过该区域会出现短暂失控现象。（如图 3）

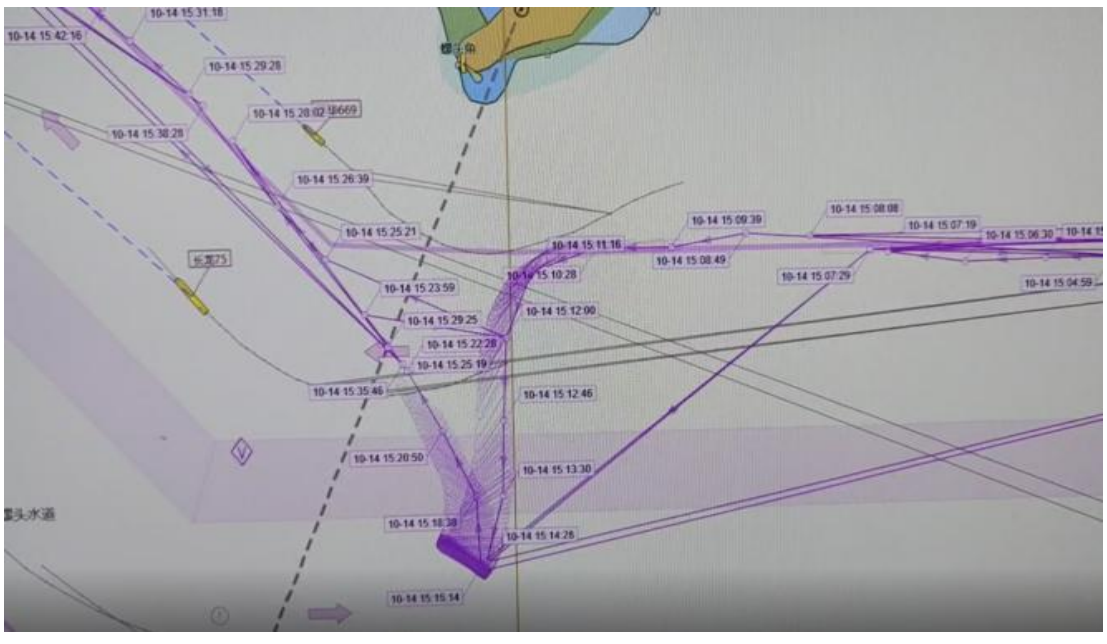


图 3 某轮受螺头角急落流的影响船舶运动轨迹示意图

3.2.3 交通流密度大产生的风险

3#警戒区交通流复杂，船舶密集，而小船乘潮进出港，更加剧此处水域交通流复杂度。船舶之间避让紧迫局面多，经常会出现多种局面并存。大型重载船舶降速非常困难如重载 VLCC，受流影响大，极易形成与小船的追越局面，减小船舶间距，导致大型重载船舶通过该水域时，存在较大避碰和操纵风险。

船舶种类繁多，尤其小型船舶航行不规范[7]。如个别小船抄近路，沿着大猫岛南下，与进出口船造成紧迫局面；渔船随时随地穿越航道，甚至逆行，或在航道警戒区内下网捕鱼；一些不应使用定线制的船舶在定线制内航行，且航速较慢，造成航道拥堵，船舶积聚，使航行风险增加[11]。

3.2.4 3#警戒区进口存在的风险

1）主要避让风险在螺头角转向后追越叠加避让 3#警戒区的穿越船，尽量避免在螺头角追越他船，如果在螺头角之前不能完成追越，应及早减速[8]，控制好与前船的距离，防止动力差的船舶急流时大幅降速，有条件跟着前船进口，保证安全。对穿越 3#警戒区时可能出现的局面做出充分的预判，大型重载船舶存在操纵风险难以大幅度避让他船时，及时协调他船进行避让和求助交管协调。

2）3#警戒区主要操纵风险来自于急涨、急落流的影响。急落流在转向点与第三分道 270° 走向存在较大交角（如图 4），同时在螺头角东面形成局部回流区，船舶要注意流压头现象致右转困难，一旦发现有左转趋势，及时加车用舵抑制，防止左偏后受流角度增大。有条件应选择在正横小猫山时贴近分隔带航行，逐渐向右转向，减少迎流角。急涨流进口候潮靠初落的重载船舶，注意航道右边缘附近的切变线，防止右转转头角速度 ROT 过大遭遇切变线后难以抑制航向，冲向大猫山，宜逐渐转向，第四分道发现右转加速趋势及时用车舵抑制。



图 4 3#警戒区进口交通流示意图

3.2.5 3#警戒区出口存在的风险

涨流出口主要避让风险包括：过 3#警戒区螺头角转向点前的追越、避让穿越 3#警戒区的各类船舶、穿越第四通航分道靠泊实华的大型进口油轮。对由北向南穿越 3#警戒区南下出口的船舶，要充分考虑到其并入出口交通流时会大幅降速的情况，要提前控制好速度和保持安全距离。尽量避免在螺头角转向期间追越，充分预判局面，协调避让，避免形成多船会遇复杂局面。对穿越第四通航分道靠泊实华的大型进口油轮，进靠轨迹基本固定，应及早协调，避免油轮穿插到第四分道通航制出口分道时交会，导致会绿灯时走进口航道逆行。

在急落流出口时，主航道流向与第三分道 270° 走向存在较大交角（如图 5），且范围大，受急

流影响流压差大，船舶转向过程受流影响容易压向凉帽山，走到航道外，应逐渐调整航向，配置流压角防止走出航道。



图 5　3#警戒区出口交通流示意图

4 3#警戒区各方向来船的避让原则

4.1 穿山北口码头群的靠泊船

穿山北口码头群的靠泊船在 3#警戒区主要与涂泥咀南下船（包括沿分道通航制、沿岸通航带正常出口的船舶）和穿山北口码头群的离泊船交会，其避让原则如下：

与涂泥咀南下船存在碰撞危险的情况下，穿山北口码头群的靠泊船需要左转穿越定线制，进入沿岸通航带，属于驶离定线制的船舶，而涂泥咀南下船属于继续使用定线制的船舶，穿山北口码头群的靠泊船应主动避让涂泥咀南下船，承担主动联系涂泥咀南下船的义务，避让时避免抢越南下船的船头。

4.2　靠泊实华、中油码头的 VLCC

靠泊实华、中油码头的 VLCC 在 3#警戒区主要是与涂泥咀南下船（包括沿分道通航制、沿岸通航带正常出口的船舶）和穿山北口码头群的离泊船交会，考虑到靠泊实华、中油码头的 VLCC 属于超大型船舶，在 3#警戒区（螺头角附近水域）受潮流的影响，属于操纵性能受限的船舶，其避让原则如下：

1）靠泊实华、中油码头的 VLCC 左转穿越 3#警戒区进入沿岸通航带，由于船舶操纵性能受限及靠泊操纵的需要，根据优先保障原则，享有不应被妨碍的右舷通行的权利。

2）涂泥咀南下船应提前关注靠泊实华、中油码头 VLCC 的动态，选择合理的航速，提前联系，协调避让，避免妨碍 VLCC 的安全航行。

3）穿山北口码头群的离泊船应关注沿定线制航行的进、出口船和靠泊实华、中油码头的 VLCC 的航行动态，应主动避让靠泊实华、中油码头的 VLCC，提早联系，协调避让，选择合适的时机离泊。

4.3　涂泥咀南下船

涂泥咀南下船在 3#警戒区主要与螺头角北上船、穿越 3#警戒区进出穿山北口的船舶、穿山北口码头群的靠/离泊船包括靠泊实华、中油码头的 VLCC，其避让原则如下：

1）涂泥咀南下船和螺头角北上船各自靠右航行，注意关注穿越 3#警戒区进出穿山北口的船舶。

2）涂泥咀南下船应承担主动联系靠泊实华、中油码头的 VLCC 的义务，避免妨碍靠泊实华、中油码头的 VLCC 的安全航行。

3）穿山北口码头群的靠泊船应主动避让涂泥咀南下船，承担主动联系涂泥咀南下船的义务，避

让时避免抢越南下船的船头。

4）穿山北口码头群的离泊船应关注定线制航行的进出、口船舶的航行动态，应主动避让穿山北口码头群的靠泊船，提早联系，协调避让，选择合适的时机离泊。

5）穿越 3#警戒区进出穿山北口进入 3#警戒区前应发布船舶动态信息，并应主动避让在通航分道和 3#警戒区内航行的其他方向的船舶。

4.4 穿越 3#警戒区进出穿山北口的船舶

穿越 3#警戒区进出穿山北口的船舶避让船舶来向主要是涂泥咀南下船、螺头角北上船和穿山北口码头群的靠/离泊船包括靠泊实华、中油码头的 VLCC，其避让原则如下：

1）穿越 3#警戒区进出穿山北口的船舶进入 3#警戒区前应发布船舶动态信息，并应主动避让涂泥咀南下船、螺头角北上船和穿山北口码头群的靠泊船。

2）根据国际海上避碰规则，穿山北口码头群的离泊船应避让穿越 3#警戒区进出穿山北口的船舶。

4.5 穿山北口码头群的离泊船

穿山北口码头群的离泊船避让船舶来向主要是涂泥咀南下船、螺头角北上船、穿越 3#警戒区进出穿山北口的船舶和穿山北口码头群的靠/离泊船包括靠泊实华、中油码头的 VLCC[3]。穿山北口码头群的离泊船应主动避让沿分道通航制、沿岸通航带正常进出口的船舶以及 3#警戒区内航行的其他方向船舶。

5 避让优先级及注意事项

5.1 船舶优先级

该水域航行的所有船舶建议按照以下优先级顺序进行协调避让，遵循“早、大、宽、清”避让原则，特殊会遇局面应提前报 VTS 同意。(如图 6)

1）第一优先级：靠泊实华、中油码头的 VLCC 船舶。

2）第二优先级：沿分道通航制、沿岸通航带正常进出口的船舶。

3）第三优先级：除靠泊实华、中油码头的 VLCC 船舶外，穿山北口码头群的其他靠泊船[9]。

4）第四优先级：穿越 3#警戒区进出穿山北口的船舶。

5）第五优先级：穿山北口码头群的离泊船。

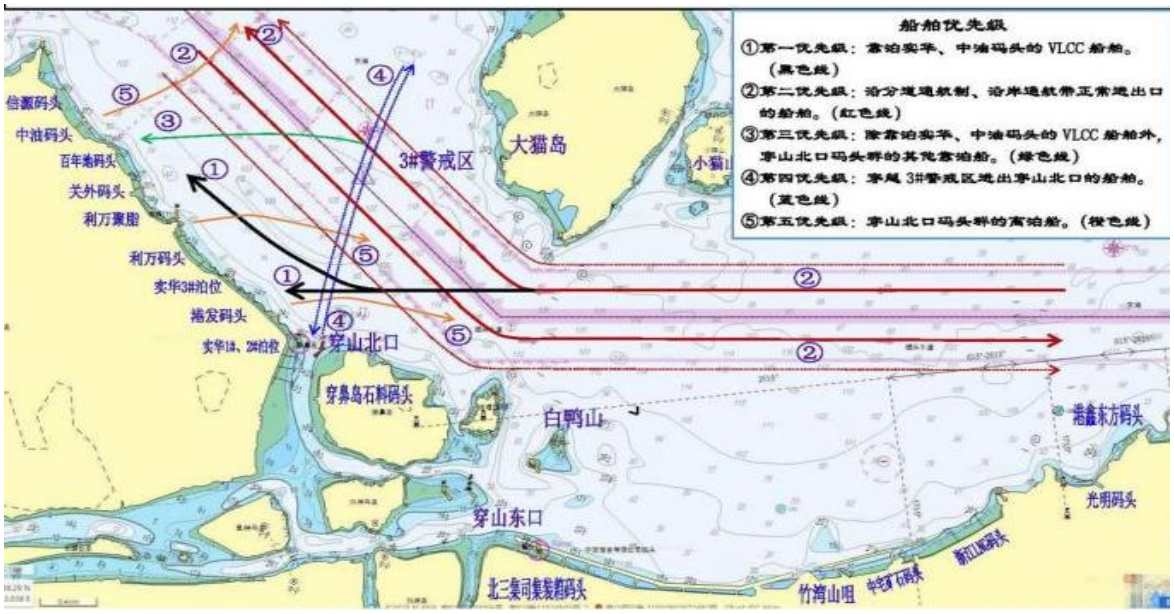


图 6 3#警戒区不同方向来船的船舶优先级示意图

5.2 注意事项

1）所有船舶应避免船等泊位。抵靠船应根据实际需要在驶离上一港、起锚或进入相应航门前与

码头确认靠泊计划；码头单位避免“船等泊位”现象发生，应在船舶进入核心港区后持续跟踪船舶动态，遇计划临时变更时，第一时间报宁波 VTS。

2）特别划定大猫岛西侧水域为“船舶航行缓冲区”，需由北向南穿越定线制水域或 3#警戒区的船舶可在此水域控速[10]，等待空档时机实施安全穿越。

3）船舶应使用良好船艺，尽量避免在螺头角岬角水域并行和追越，出于安全考虑实施追越，须征得被追越船同意并向 VTS 报告。超大型船舶（指载重吨大于 25 万吨，或实际吃水大于 19 米的船舶）之间应加强联系，避免在螺头角岬角水域交汇。超大型重载油矿船（指载重吨大于 25 万吨，或实际吃水大于 19 米的船舶）在大潮汛急落时段应谨慎通过螺头角岬角水域，落实拖轮护航等安全措施。

4）所有船舶应主动联系过往客渡船，未经客船同意，严禁抢越客渡船船艏[1]。

6 结束语

通过总结宁波舟山港 3#警戒区的航行风险和梳理 3#警戒区的船舶航行的避让优先原则，对规范船舶的航行秩序，提高船舶航行安全和引航安全保障能力至关重要，从而更好地服务于港口的建设和发展。

参 考 文 献

[17] 黎法明.论《中华人民共和国内河避碰规则》修订[J].航海技术,2016,(03):72-73.
[18] 袁忠德.试论吴淞口外大型船舶顺流进口靠泊前的掉头操纵[J].珠江水运,2012,(12):25-27.
[19] 陈利忠.重载VLCC进靠大榭实华码头的操作[J].中国水运,2011,(03):36-37.
[20] 周俊杰.浅谈螺头水道的航行风险及对策[J].中国水运(下半月),2017,17(09):41-42.
[21] 徐辉银,朱思平,凌贵阳.外高桥港区大型船舶顺流掉头操纵及注意事项[J].中国水运,2020,(02):83-85.
[22] 许岩松.航道中避碰规则的适用及碰撞责任的认定[J].世界海运,2021,44(07):1-6.
[23] 龚永阳.“三无”船舶的危害及安全管理建议[J].中国水运,2011,(03):26-27.
[24] 赵方斌.宁波舟山港螺头水道追越态势简析[J].中国水运(下半月),2019,19(06):20-21.
[25] 李飞镝.穿山北港区大型集装箱船靠泊调头方法[J].世界海运,2021,44(05):5-8+13.
[26] 朱华平,姜海燕,胡长春,等.长江口船舶定线制通航分道优化研究[J].中国海事,2022,(11):23-26.
[27] 吴坚群.浅析上海港船舶编队航行时的风险控制[J].珠江水运,2014,(03):74-77.

作者简介：
刘斌：宁波大港引航有限公司（宁波引航站）；通信地址：宁波市鄞州区通途路1185号绿园大厦25楼引航二科；电话：13429253367；E-mail: nbpilot157@163.com
谢哲学：宁波大港引航有限公司（宁波引航站）；宁波市鄞州区通途路1185号绿园大厦24楼安技委办公室；
电话：13780083053；E-mail:xiezx@nbport.com.cn
陈利忠：宁波大港引航有限公司（宁波引航站）；宁波市鄞州区通途路1185号绿园大厦25楼引航二科；
电话：13780081933，E-mail:1790560901@qq.com

关于油水分离器典型缺陷的分析与处理

戴 荣，王双龙

（宁波远洋运输股份有限公司，浙江 宁波，315000）

摘 要：水分离器作为船舶的重点防污设备之一，正确处置船舶机舱舱底水对减轻海洋污染起着非常重要的作用，但由于船员对防污染方面的意识比较薄弱，操作嫌麻烦直接绕过油水分离器或取消各种限制进行排放机舱污水，油水分离器在船上成为摆设，同时部分船员不懂得操作原理和要求，导致油水分离器得不到有效的维护、保养和操作测试，时间一长油水分离器出现腔体发锈、15mg/L 监测仪脏污，无法正常对分离后的水进行检测、监测仪报警后电磁阀或气控阀无法动作，或动作后出口阀无法完全进行关闭等问题，以致在真正使用时可能出现排出的污水不合格，同时海事在对船舶油水分离器进行检查时也容易发现船员操作缺陷或者设备缺陷而被滞留，给船舶和公司带来了负面的影响。本文主要论述了船员的防污意识和对油水分离器的保养检查操作问题，以问题为导向，针对存在的问题进行深入探讨分析，指出良好的做法，希望广大船员能借此提升防污意识，正确保养检查和操作，确保船舶防污染。

关键词：油水分离器；15mg/L 报警装置（以下简称 15ppm 报警装置）；船员操作；MARPOL73/78；PSC 检查

引言

MARPOL73/78《防污公约》2017 综合文本附则 1[1]及《船舶与海上设施法定检验规则》（2020）[2]第五篇都对滤油设备作出了相关规定，根据 MARPOL73/78《防污公约》2017 综合文本附则 1 第 3 章 B 部分第 14 条关于滤油设备的要求说明，任何总吨位在 400 及以上但小于 10000 的船舶，应装有符合主管机关批准，并且应确保通过该系统排放入海的含油混合物不超过 15mg/L。任何总吨位在 10000 及以上的船舶，还应在滤油设备系统中安装报警装置，当排放油性混合物超过 15mg/L 标准时发出报警，并自动停止油性混合物排放的装置。同时在《船舶与海上设施法定检验规则》（2020）第五篇 2.2.5 也同样对滤油设备作出了明确要求。在 2007 年 3 月 1 日或以后安装上船的滤油设备，要符合 MEPC.107(49)[3]号决议批准的并经 MEPC.285（70）决议修订的《船舶机器处所防污染设备的导则和技术条件》，在 2007 年 3 月 1 日以前安装上船的滤油设备，参阅由国际海事组织以 A.393(X)号决议通过的《关于油水分离设备和油分计国际性能和试验技术条件的建议案》或由国际海事组织海上环境保护委员会以 MEPC.60(33)号决议批准的《船舶机器处所防污染设备的导则和技术标准》。MEPC.107（49）决议主要有两个点，就是 1、当流出物含油量超过 15mg/L 时用于自动关停油性混合物任何舷外排放的装置；2、应在关停装置舷外出口后面及附近装有再循环设备，使包括 15ppm 报警装置和自动关停装置在内的 15mg/L 舱底水分离系统能在舷外排放停止的情况下进行试验。

1 油水分离器设备的典型缺陷

船舶机舱油水分离器主要由油水分离装置、自动排油装置、油份浓度监测装置、报警和排放自动停止装置以及再循环装置等设备组成，油水分离装置的主要形式有重力-聚结组合式、重力-吸附组合式以及真空式三种，由于真空式油水分离装置利用油水分离器腔体真空度来吸取舱底水，改变了正压式输送泵对舱底水搅动而使得舱底水中油和水混合，降低油水分离效果，消除输送泵对其分离性能的不良影响，所以船舶采用这种分离方式比较多。以下就针对这种设备在检查、测试及运行过程中易出现的典型缺陷问题进行说明；

1）15ppm 报警装置在使用清水时检测数据都在 5-15 之间，不能正常监测水的含油数据，由于这个监测装置并没有配备自动清洗装置，如果不经常人工冲洗 15mg/L 监测孔，导致脏污沉积在检测孔中，无法正常监测取样水（见图 1）



图 1　经过冲刷后的清水检测仪表

2）电磁阀或气控阀不能正常动作或动作失效，在 15ppm 报警装置在报警后，无法使电磁阀或气控阀进行动作，导致不合格水继续排向大海；

3）排油电磁阀不能有效动作，失去自动排油功能；

4）油水分离器腔体脏污，由于船员使用油水分离器排放机舱舱底水后，未对腔体进行清水循环，并将清水注满腔体，导致分离效果变差；

5）15mg/L 监测仪报警后，未能在 20s 内有效关闭出口阀停止向外排水。

2　私自改装油水分离器设备和管路导致的缺陷

1）非法安装旁通管路，如出口加装软管等，从回流到舱底的管路与排向舷外的管路进行连接，导致未经处理过的污油水或不合格的污油水直接排入大海（见图 2）；

2）无断流报警装置的 15ppm 报警装置在取样水管上设置截止阀，在使用油水分离器时，将取样水管上的阀门关闭，15ppm 报警装置无法获得样水而失去报警功能，使得不合格水排向大海；

3）15ppm 报警装置样水出口回舱底的管子被人为堵死，15ppm 报警装置无法获得样水而失去报警功能，使得不合格水排向大海（见图 3）；



图 2 私自安装直排软管



图 3 监测仪样水出口端被堵死

4）泵的排放量大于油水分离器处理量的 1.1 倍 （见图 4 和图 5）。

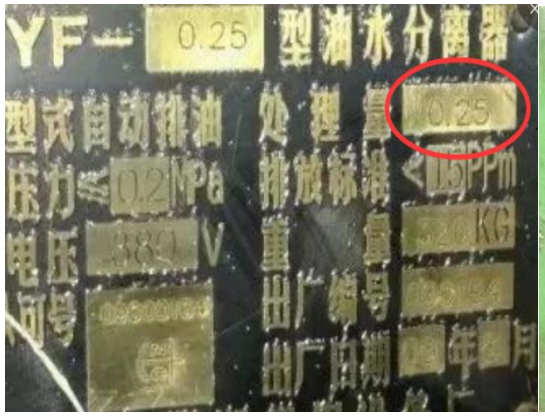


图 4（油水分离器的处理量 0.25m3/h）



图 5（泵的排放量 0.5m3/h）

3 船员操作误区导致的缺陷

1）船员在使用油水分离器前未将清水注满，导致使用时腔体真空度过大，泵自动停止，无法正常使用油水分离器（见图 6）；

2）船员在操作油水分离器时，只仅仅对 15ppm 报警装置进行测试，未对循环试验三通阀出水断流情况进行观察（电磁阀和气控阀的是否能有效动作），可能会出现排外管路的阀门无法有效关闭，而涉嫌偷排，这个情况很常见，从 15ppm 报警装置保存的操作记录中可以看出，从报警开始时间到恢复正常的时间只有 2-5 秒，不可能观察到三通阀出水口断流情况（见图 7）；

3）长期未对清水报警、断流报警、超标报警等报警进行测试，导致部分报警失效；

4）在试验油水分离器时，排向舱底的试验阀开度过大，导致管路上的压力不够，取样水不能正常流入监测孔，无法正常取样并试验报警功能（见图 8 和图 9）；

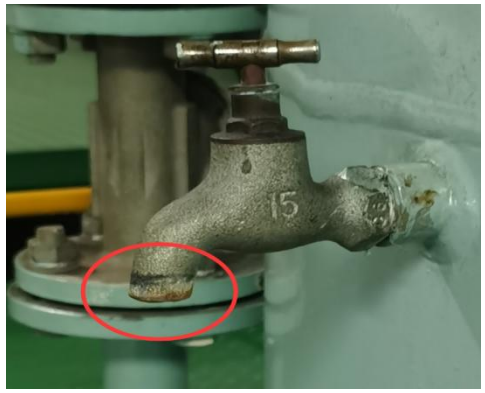


图 6（打开上部水位考克无水流出）



图 7（超标报警后排外水依然没有断流）



图 8（三通阀开度过大）



图 9（监测孔无取样水流出）

4 FSC/PSC 检查过程中的典型案例

案例 1：2023 年 7 月某港口海事处检查人员在对船舶实施安全检查过程中，要求船员对油水分离器进行操作，船员按照操作说明对油水分离器进行了操作，打开气阀的时候，气阀接头有渗漏，由于处理及时，检查人员并未对其开具缺陷，但在 15ppm 报警装置报警后，排舷外的试验阀并没有停止出水，导致该船被滞留，理由是在排放超标后依然向外排放不合格舱底水。后经船员对阀门进行拆解，发现阀门中的阀面不平并有腐蚀现象导致关闭不严而出现报警后依然向舷外排放不合格的舱底水。

关键原因：1）船员在试验油水分离器时只是针对 15ppm 报警装置的报警功能进行测试，并未仔细观察排舷外阀门的断流情况；

2） 船员日常维护保养过程中缺乏对电磁阀、排油阀、排水阀等阀门的有效检查和保养；

3） 轮机长未认真督促，公司岸基检查人员也缺乏有效检查。

案例 2:2023 年 11 月某港口海事处检查人员在船舶实施安全检查过程中，发现油水分离器的 15ppm 报警装置取样水管中安装了一个截止阀，然后要求船员对油水分离器进行操作，操作过程中，海事检查人员关闭了取样水管中的截止阀，15ppm 报警装置所监测的数据未发生变化，认为监测仪无法正常取得样水而失去对排出水含油量的监测，导致不合格的舱底水排向舷外，被海事开出 17 项缺陷，船舶立即拆除了截止阀，对取样管进行。此典型的案例说明了存在船员对油水分离器的测试、检查和保养以及违规改装等问题，由于本船油水分离器 15ppm 报警装置并没有设置断流报警，船员想利用这个环节在取样水管中装设截止阀来排放不合格的含油混合污水，另外从一定程度上说公司岸基管理人员对于防污染方面不够重视和缺乏监控检查。

关键原因：1）船员防污染意识差，利用 15ppm 报警装置没有安装断流报警装置这个功能，在取样管中设置截止阀，违规偷排机舱污水；

2）公司岸基检查人员对此种设备的工作原理不熟悉，导致在检查过程中未能发现截止阀的违规安设。

案例 3:2024 年 1 月某港海事处检查人员在对船舶实施现场督查时，查阅维护保养实施记录时，发现该船在 2023 年 11 月更换了油水分离器 15ppm 报警装置内存卡，原来的内存卡已经丢失，然后海事检查人员核查油类记录簿，发现内存卡更换的情况未进行记录，检查人员认为更换内存卡以前的排放情况无法得知，存在涉嫌超标排放，然后开具了 03 项缺陷，进行立案调查。

关键原因：1）主管船员防污意识薄弱，以为存储卡满了就没有用了，并不清楚内存卡是记录油水分离器排放数据的关键设备，也没有及时将内存卡的内容进行打印，完整保存油水分离器运行排放所有的情况记录。

2）轮机长缺乏对轮机员工作的监控，特别是防污染方面，油类记录簿记录要求也不够熟悉，对于更换后的内存卡也没有作出重点说明，也未进行有效的保管；

3）公司岸基人员在收到船上内存卡申请报告后，也未督促船上认真做好记录和保管，上船检查时也未进行核查。

5 预防措施

1）轮机长要组织轮机员加强学习船舶防污染方面的知识，要完全熟悉船舶油污水的工作原理及排放规定要求，并油类记录簿做好相应的排放或回收记录；

2）保证设备的完好性，禁止私自改装，同时滤油设备故障的修理情况要记录到油类记录簿中；

3）日常测试时，要对 15ppm 报警装置的门禁报警、清水报警、超标报警、断流报警、压差报警等报警进行测试，同时在测试超标报警时，要观察三通阀出水口的断流情况，确认阀门关闭的有效性；

4）在效用试验油水分离器装置，三通阀不要全开至舱底，半开，保证管路中有一定的水压，确保取样水管有水流过 15ppm 报警装置监测孔；

5）手动操作排油阀的动作是否正常，确保排油阀能正常开启和关闭；

6）在测试完成后，要冲刷 15ppm 报警装置监测孔，确保监测孔干净；

7）在效用试验完成后，要将分离筒注满清水；

8）岸基管理人员在检查船舶时，要认真检查船员的操作过程，并核查打印记录；

6 测试操作关键点

在测试时，船员在测试 15ppm 报警装置时，由于油水分离器腔体随着装置运行压力就会降低，船员通常的做法就是将舱底水阀打开，然后抽吸舱底水进行循环，但由于舱底水比较脏，容易使得油水分离器腔体弄脏，时间长了容易沾附在腔体表面上，不容易清洗，也会污染 15ppm 报警装置，在以后的测试中经常会出现检测数据超标，所以在测试时，先将腔体注满清水，不要打开舱底水阀门，而是直接运行测试，当压力下降时，如果没有接淡水压力水柜供应水，就打开腔体上的放水考克，来提升腔体的压力，确保测试的正常进行。

7 结束语

近年来，随着海上运输量逐年增加，船队的发展导致船舶数量的大幅增加，船舶对海洋的污染威胁日趋严重。船舶油水分离器作为船舶主要的防污染设备之一，在减轻船舶对海洋污染中发挥着重要的作用，所以油水分离器及相关设备的工作状态是 FSC/PSC 检查官在船舶安全检查中的必查项目，目的就是防止污染物对海洋环境造成危害。

相关建议：

1）**提升意识**：避免海洋环境受到污染，公司岸基人员要认真宣贯防污染方面的政策，督促各级人员不断提升思想意识，熟悉并严格按照法规规定要求正确处理船舶污染物；

2）**明确职责**：船员和公司岸基管理人员都要明确各自的防污染职责和要求；

3）**维护保养**：船上要正确制定油水分离器使用规程和日常保养计划，并作为体系文件的一部分，各级人员都要认真学习，熟悉操作规程，并严格按照文件规定要求进行维护和操作，及时准确进行记录；

4）**岸基支持**：不断加强公司管理及岸基支持，保证物料备件的及时供应；

5）**指导监控**：加强对船员防污设备操作的指导和监控，不断提升船员的操作能力，确保船舶污染物得到正确有效处理。

参考文献

[1] 国际海事组织. MARPOL73/78《防污公约》2017 综合文［S］.北京：人民交通出版社 2020.

[2] 中华人民共和国海事局.《船舶与海上设施法定检验规则》（2020）[S].北京：人民交通出版社 2020.

[3] IMO. resolution MEPC.60(33) adopted on 30 October 1992 by which the Marine Environment Protection Committee adopted, at its thirty-third session, the revised Guidelines and Specifications for Pollution Prevention Equipment for Machinery Space Bilges of Ships and invited Governments to adopt and apply them to the maximum possible extent which they found reasonable and practicable and to report to the Organization the results of such application:MEPC.107(49) [S].London:IMO 2003.

作者简介：戴荣，1974 年 11 月 1 日出生，浙江奉化人。工程师，专业领域：船舶安全管理。通信地址：宁波宁东路 269 号 38 楼（315000），电话：15824227955

电子邮箱：dair@nbosco.com

用大数据分析宁波港作拖轮打桨原因及预防措施

毛文锋

宁波油港轮驳有限公司，浙江 宁波 315000

摘　要：当拖轮螺旋桨缠住缆绳、渔网、围油栏、轮胎、铁块等物体时而发生打桨，有时这些物体会卡在螺旋桨与导流罩之间，使螺旋桨无法转动而熄火，也可能将螺旋桨桨叶弯曲或者产生缺口而增加船体震动、舵桨排温升高，如一些较细的缆绳或渔网缠在桨轴上，将很可能破坏舵桨油封，使海水浸入舵桨液压油里，造成液压油全部报废等，拖轮一旦发生打桨事件，可能会发生失控、搁浅或碰撞等安全风险。本文通过大数据提炼、挖掘和分析本世纪以来74起宁波港作拖轮打桨事件原因，针对这些原因提出相应的预防措施，降低拖轮打桨概率，提升安全系数，对保障宁波港口安全生产和拖轮安全作业具有十分重要的意义。

关键词：打桨；瞭望；大数据；统计

港作拖轮作为港口运行和安全生产的重要保障力量，通过提供强大的拉力或推力协助大船安全靠、离码头；当他船遭遇设备故障、失去动力、碰撞或火灾、人员落水、恶劣海况等危险时提供拖带或救援服务，帮助遇险船舶脱离险境。港作拖轮主要航行和作业在近岸或浅水区海域为主，以及其独特的 Z 型动力系统；宁波港域为半日潮，潮流较急，一些渔网、缆绳、围油栏、轮胎等漂浮物容易随流漂移到港区水域；另外人为操作不当因素也是拖轮打桨非常重要的原因。因此港作拖轮发生打桨既有不可控因素，也有人为主观因素。宁波本港区域主要由镇海港区、北仑港区、大榭港区、穿山港区、梅山港区及虾峙门航道海域组成，港域宽阔，海岸线绵长，北临广阔的杭州湾海域，港区周边主要由舟山群岛围绕的半包围结构，海岸线作为水深较优，是独天得厚天然深水良港，如图 1 红色区域内。但港区前沿潮流相对较急，杭州湾海域及舟山群岛周边海域存在较多渔船和渔网，港区周边危险品码头及船厂密集，镇海港区、大榭港区、梅山港区等航道存在众多浅水区域，一些缆绳、围油栏、渔网等容易在这些区域漂浮，拖轮航行在这些区域时易发生打桨的可能。

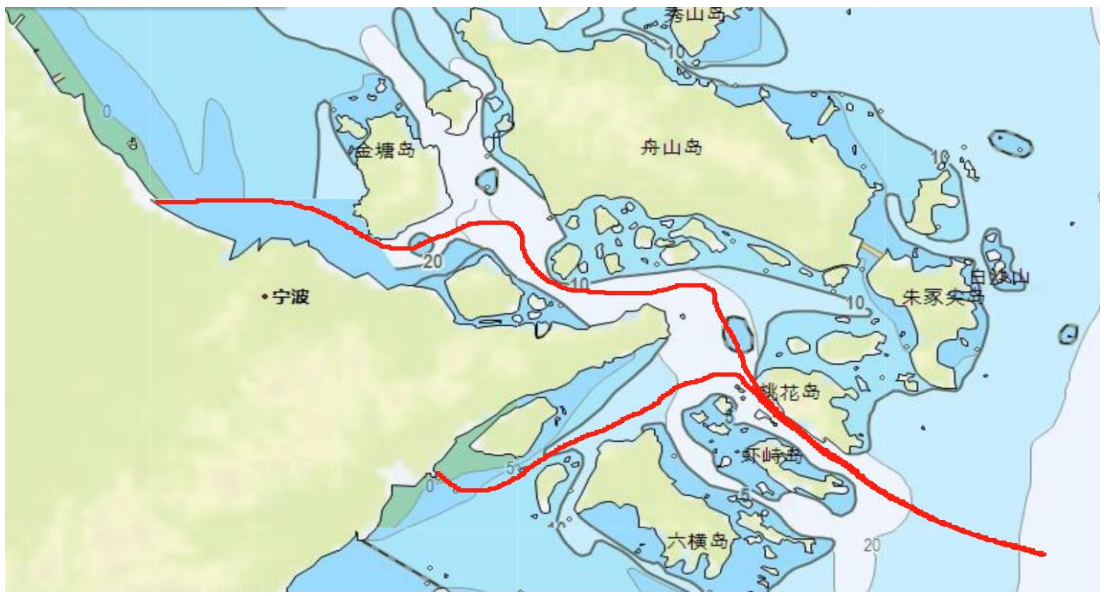


图 1 宁波港域

一般大船吃水较深，船身较长，螺旋桨浸入水中也很深，航行区域以深水区域为主，当螺旋桨

转动时，进水流主要是船尾附近的水流为主，且航行中船头方向有漂浮物时，船艏可以有效挡开漂浮物向外侧漂流，不易发生打桨事件。而拖轮与绝大多数大船的结构有所不同，拖轮是双螺旋桨“Z”系统，且船身短，当螺旋桨旋转时，进水流从拖轮船体两侧、船底中间及中下水流吸入螺旋桨导流罩中，近水流形状形成了以螺旋桨为中心，向外扩展的的虹吸流（如图 2 红色箭头的水流），这就导致了拖轮在航行和作业中遇到周边有漂浮物时容易将其吸入导流罩中发生打桨事件。

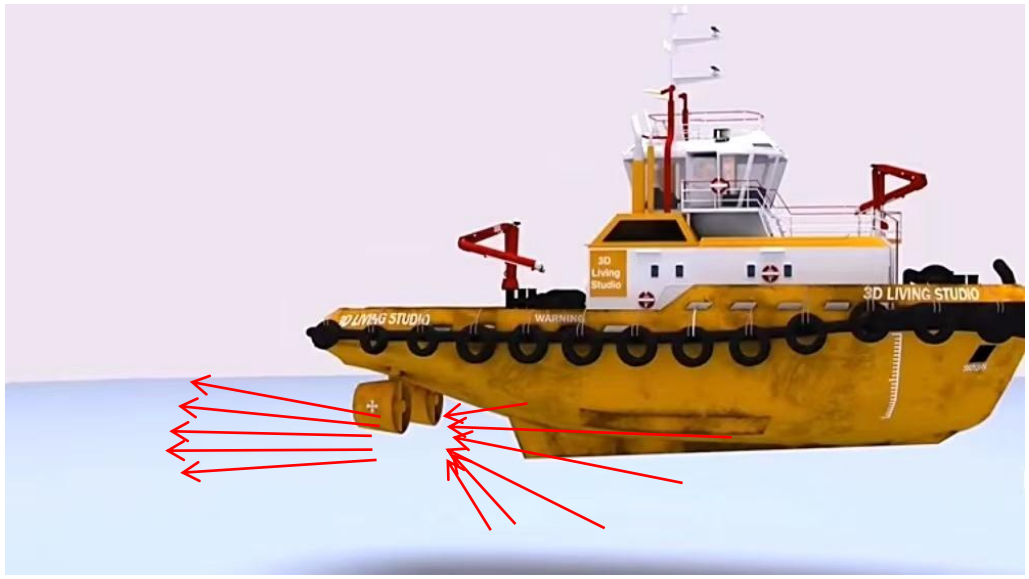


图 2　螺旋桨虹吸水流

除了上述两项原因外，人为因素导致的拖轮打桨也是非常重要的原因，主要表现在瞭望不到位或疏忽、操作失误、技术欠佳、责任心不强等，这些主观原因导致的打桨，概率非常大，虽然一些半沉半浮的漂浮物或夜间航行很难被发现，但通过大数据挖掘发现，很多打桨事件是可以避免的，只要主观上重视，预防措施得当可以大大降低打桨概率。

一、宁波港作拖轮打桨年份大数据统计分析

通过对 2000 年开始每年打桨事件进行统计，如图 3，2003 年打桨最多，达到了 9 次，2006 年其次，达到了 7 次，2009 年开始基本维持在 1-4 次打桨概率。通过翻阅每次打桨事件报告，可以发现从 2009 年左右开始，公司对打桨事件开始重视，出台了一些预防措施，每次有责任的打桨事件都有分析会，同时按“四不放过”的原则，对相关责任人进行了处罚，说明对打桨的重视以后，相应的打桨事件概率也会降低，起到了一定遏制作用。

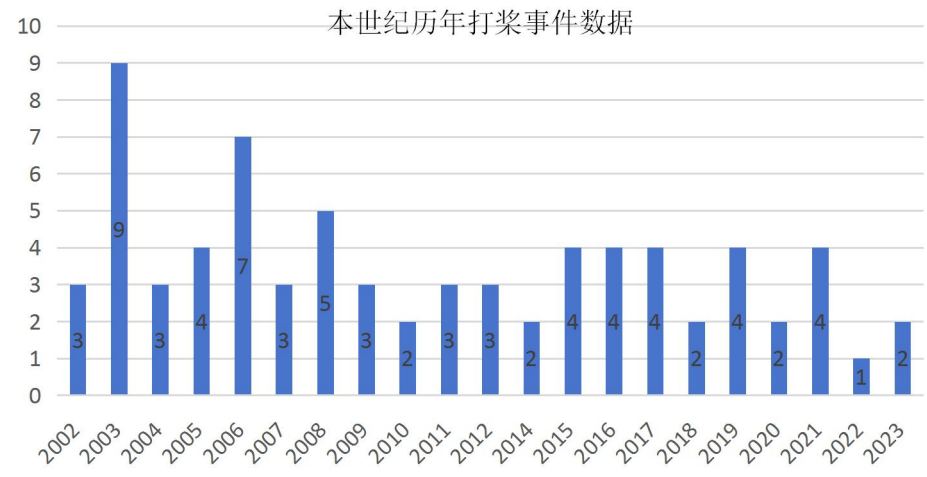


图 3 年打桨数量

二、宁波港作拖轮打桨月份大数据统计分析

通过对每年月份打桨事件进行统计发现，如图 4，1-3 月份宁波港区冬季西北季风影响比较盛行，可能对海上漂浮物漂移影响起到一定的作用，这几个月拖轮打桨主要以缆绳和渔网为主；4-6 月份宁波港区雾季开始，拖轮航行时瞭望上有一定的影响，同时在清明节前后，海上渔网较多，特别是捕象山港马鲛鱼的季节，又细又长的漂网较多，作为拖轮航行时很难被发现，这时如果公司提前进行预警，拖轮驾驶员加强瞭望和灵活避规航行，绕过扑鱼区，将会大大降低打桨概率；7-8 月份台风季节和强对流天气频发，台风和强对流天气可能会将一些岸上的缆绳、围油栏、钢丝绳等吹到海里，将一些本存在浅水区域的打桨物如轮胎、缆绳掀翻起来，大大增加了打桨的概率。

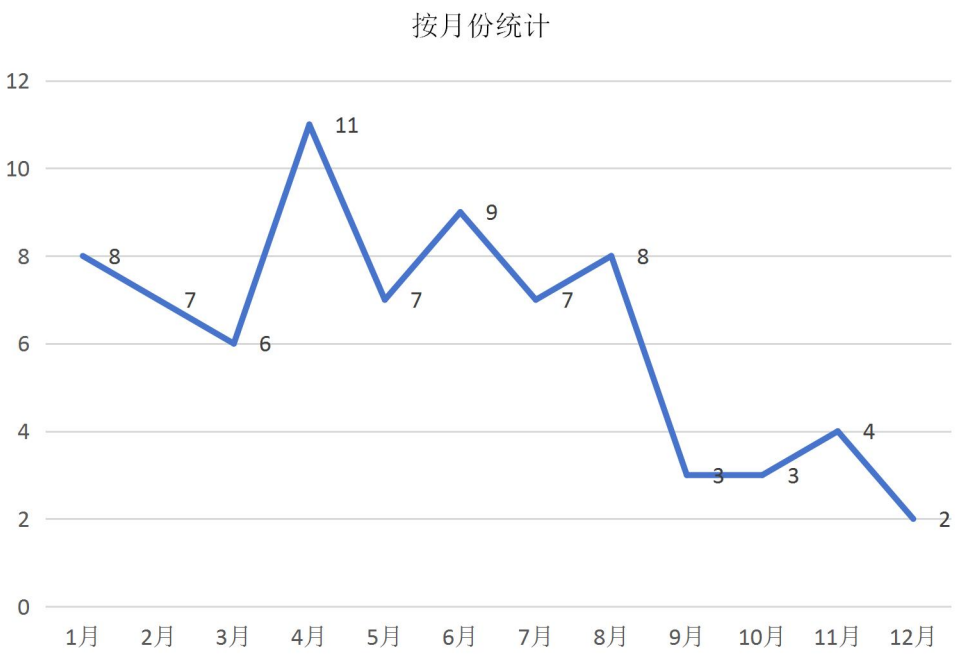


图 4　按月份统计数量

三、宁波港作拖轮打桨时间段大数据统计分析

通过对每日 24 小时内打桨事件进行统计发现，如图 5，这些时间段值得引起高度重视，后半夜 0-1 点有 7 次打桨，这个时间段一般人都进入睡眠状态，人容易疲倦犯困，注意力不集中，且进入下半夜视线不佳，当航行到一些海上漂浮物时容易被打桨，因此这各时间段要高度警觉，切忌粗心大意；14-15 点达到 7 次，通常这个时间段是拖轮驾驶员下午容易乏困的时候，再加上阳光照射比较强烈等因素，主观上安全意识下降、瞭望上疏忽导致打桨的概率增加，也要引起高度警觉；7-8 点达 6 次，这个时间段作业时，拖轮驾驶员刚睡醒，人的意识度还没有进入状态，存在瞭望疏忽如离泊时没有向后方或者外弦瞭望，公司的相关规定步骤如试舵操作疏忽等不到位因素引起的；10-12 点达 6 次，可能是因为中午时分到来，拖轮驾驶员吃饭时间到了，经常可能拖轮在操作时由经验丰富的水手长代替一下或者驾驶员边吃饭边助泊的现象，注意力不集中，瞭望上存在疏忽，易发生打桨的可能。通过大数据分析发现，在白天时段：5-18 点，视线相对较好的情况下，打桨居然达到了 47 次，占 71.2%（按总 66 次算），夜间时段：18-5 点视线不佳的情况下反而只有 19 次，只占 28.8%。从中可以看出，拖轮发生打桨事件的主观原因比较大，比如拖轮驾驶员瞭望上疏忽、操作上失误、技能不足等，必须高度重视，同时也说明如果拖轮措施得当，主观上重视，很多打桨也是可以避免的。

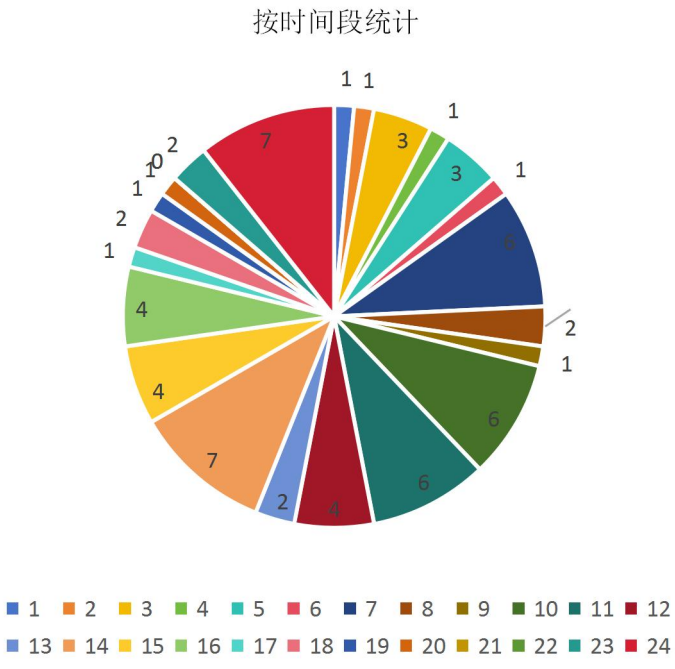


图 5 按时间段统计数量

四、宁波港作拖轮打桨主要原因大数据统计分析

通过对本世纪所有拖轮打桨事件的原因进行深入分析，如图 6，很多某个打桨事件原因可以找到几项原因，既有瞭望不到位，也有操作技能不佳，还有天气原因等，但很多拖轮打桨都是人为因素造成的，特别是瞭望（全方面、全时段、全过程）不到位，如拖轮助泊时有他船缆绳漂到船尾附近未发现而发生打桨；其次是主观安全意识不强，如航行时与其他人聊天、看手机或者做与瞭望无关的事等，未严格认真履行全方位瞭望职责；另外安全技能欠缺、与大船配合不默契、天气原因等都能导致拖轮发生打桨事件，面对这些原因，拖轮驾驶员都需认真反思和总结，加强安全意识，提高作业技能，才能有效降低打桨概率。

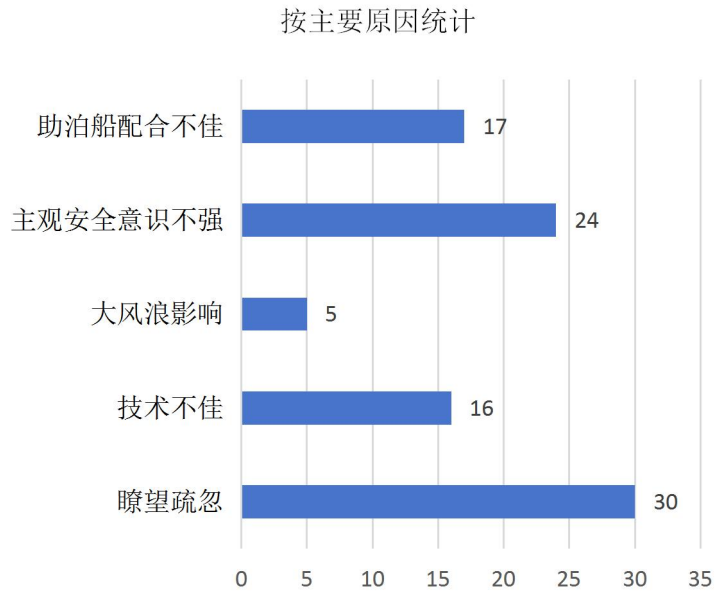


图 6 打桨原因统计

五、宁波港作拖轮打桨按发生地大数据统计分析

通过对本世纪所有拖轮打桨发生地进行统计，如图 7，镇海港区作业是重点（狭水道、水深浅，作业难度大，船舶密集大），到达了 13 次，要引起足够谨慎，甬江作业区航道水深北深南浅，拖轮航行和作业时受限，易打到浅水区的水下杂物，漂浮物也容易在甬江里面集中，潮汐变化比较明显，特别是低潮位时一些易打桨物容易在航道中间集中等，导致拖轮航行和作业时容易发生打桨事件；北仑工作码头水流不畅通，一旦有缆绳、轮胎及渔网漂入，容易在工作码头前沿集聚，在拖轮频繁进出港池时，特别是低潮位时容易发生打桨事件，因此拖轮在靠离泊工作码头时尽量单车离泊、离泊前试舵、加强瞭望；北仑、穿山、象山港区作业和航行要谨慎，这些区域漂浮物和渔网较多，拖轮驾驶员须加强瞭望，尽可能航行在深水航道上，远离岸线；周边船厂也是打桨的高发区，一些船厂附近水下环境比较差，常有废弃轮胎、缆绳、钢丝缆存在，助泊时一定要熟悉环境，开启测试仪，尽量不要横移，跟船厂指挥者加强沟通是较好的选择；象山港是渔船非常多的海域，常年有渔网漂在海面上，特别是 4-5 月份捕马鲛鱼季节，海面上几乎无航道可以航行，因此航行在象山港海域时，尽量航行在分道通航线上，尽量选择白天航行，航行时必须高度重视海面情况，加强瞭望，加强瞭望人员等。

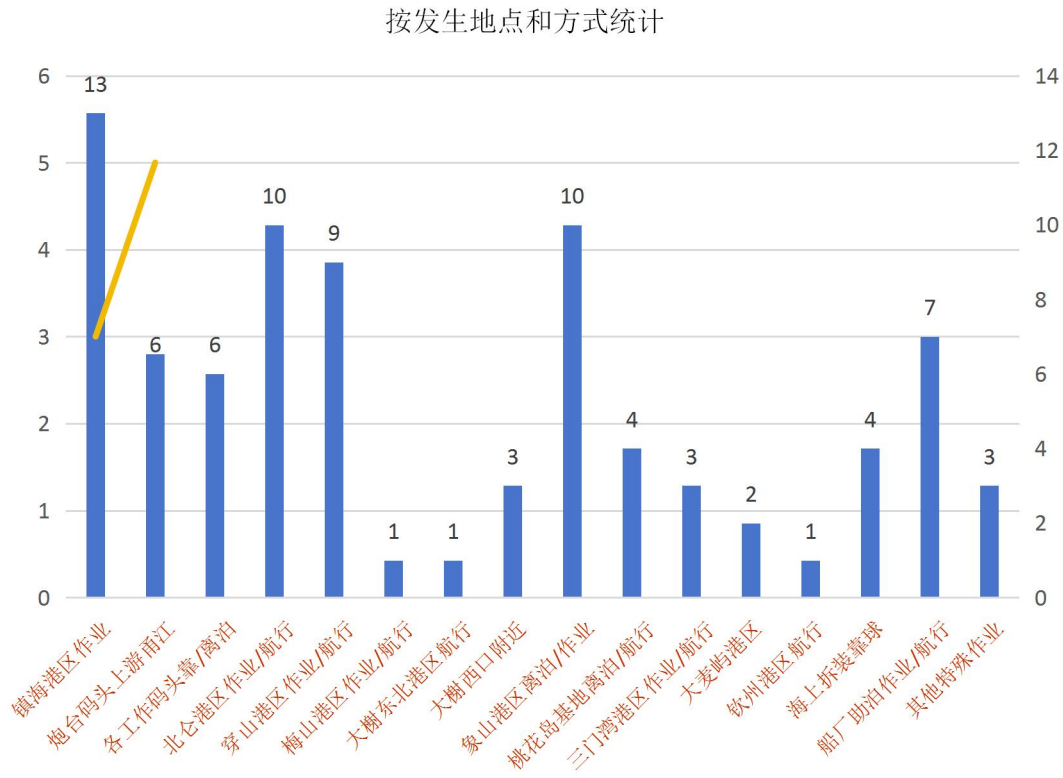


图 7　打桨发生地统计

六、宁波港作拖轮打桨按按打桨物体大数据统计分析

拖轮哪些物体容易打桨，通过各类打桨事件统计，从图 8 表中可以看出，海面下不明物体发生打桨的概率最多，达到了 25 次，虽然具有不可抗力因素，但对于渔网、漂浮缆绳，在视线良好的情况下完全可以加强瞭望，及时避让来防止打桨；同时为保护生态环境和防止发生打桨事件，所有船舶上的缆绳都要固定好，特别是大风浪天气，更不能随意将缆绳入海；一些海上的渔网要做好 AIS 标记和闪光灯，渔船捕鱼时一定要固定好渔网，以免渔网漂走，特别是恶劣海况前要收起渔网；拖轮在助泊时打到拖轮自己的拖缆或大轮缆绳完全是瞭望疏忽和操作不当造成的，因此助泊时要时刻关注双方的缆绳动态，加强相互间的联系和沟通；另外一些船上的废弃轮胎不要入海，轮胎入海可能会半沉半浮状态，即不易被发现又容易被打桨；拖轮在拖带靠球时不要随意动车，容易打到钢缆，

要跟过驳队加强沟通和瞭望。

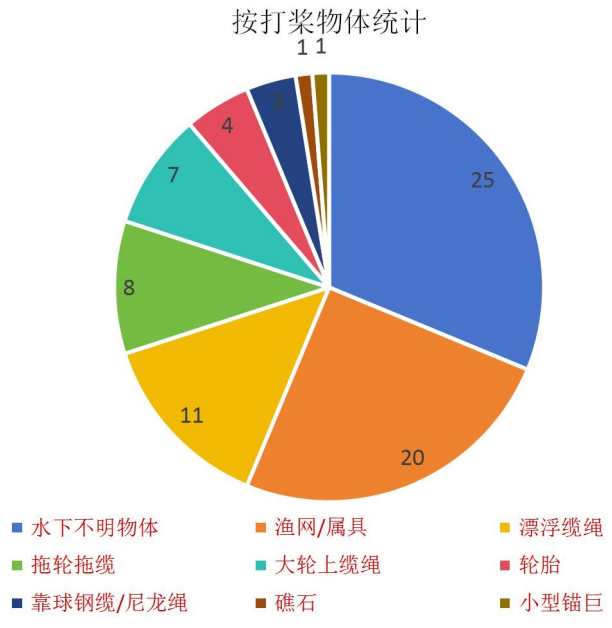


图 8　打桨物体类型

用大数据统计的要素还有很多，如发生打桨时拖轮驾驶员的职务和经验、当时的潮汐情况和天气情况、航行或作业时的能见度等，因历年打桨事件记载不详细，不能全方位挖掘打桨因素，但通过以上六点的大数据统计分析，从中也可以找到拖轮打桨的一些原因和规律，作为港作拖轮打桨的责任主体：拖轮驾驶员，一定要对各类打桨事件引以为戒，认真吸取打桨事件的教训，转变观念，树立船舶打桨“可防可控”、“应防应控”的理念。从以上大数据统计和结合历年打桨事件，可得出以下几点预防措施：

1.防打桨关键在瞭望，瞭望必须全方位全过程全时段，一旦发现漂浮物立即采取有效的避让行动。

2.拖轮驾驶员主观上必须加强安全意识和责任心，不要做与航行和作业无关的其他事项，要时刻注意周边环境的变化。

3.拖轮驾驶员要提高安全技能和应急处置能力，积累操作经验，防止发生断缆险情等。

4.拖轮驾驶员熟悉各港区航道情况和特点，航行和靠泊时严格按良好的船艺和公司的规章制度，尽量避开浅水区域等。

5.要关注气象、潮汐、排水、开渔节等变化，公司要及时发布不利的天气预警，拖轮要及时做好预防，对特殊情况如大潮汛低潮时、清明节期间等要及时进行关注和采取有效措施。

6.养成良好的防打桨习惯，不在浅水区横移，助泊起拖后退时先向后瞭望是否安全等。

7.对特殊季节、特殊时段、特殊地段等要特别谨慎，加强瞭望，做好相应的预防措施等。

参考文献

1.宁波油港轮驳有限公司历年打桨事件存档

2.《1972 年国际避碰规则》

作者简介：

毛文锋，宁波油港轮驳有限公司指导船长。通讯地址：宁波镇海沿江东路 173 号，电话：13586839041 邮箱：9645892@qq.com

基于主动防御思维的引航风险防控策略研究

郑浩亮，周俊杰，安成达，丁得勇

(1.宁波大港引航有限公司 浙江宁波 315000)

摘　要： 在充满各种风险的船舶引航领域，本文引入主动防御思维（Active Protection Systems（APS)），对于引航风险防控有重要指导意义。结合引航实践经验，提出了该安全理念。旨在通过预先识别和应对潜在风险，降低船舶在港口水域形成紧迫局面的概率，从而提升引航作业的安全性，促进港航事业安全高质量发展。

关键词： 船舶引航；主动防御思维；风险防控

前言

随着中国经济的蓬勃发展和航运业的迅猛增长，各个重要的国际贸易港口，进出其核心港区的船舶数量持续攀升。如宁波引航站在 2023 年成功引领的中外船舶数量创下了超过 3 万艘次的历史新高。在船舶大型化和专业化的发展趋势加剧，以及港区环境复杂和交通流密集等多重因素的共同作用下，船舶引航的操作难度和风险系数大幅提高。近年来世界多个港口连续发生了多起大型集装箱船碰撞港口设施的严重事故，如 2007 年 11 月 7 日“中远釜山”轮碰撞旧金山奥克兰海湾大桥事故；2020 年 4 月 6 日“米兰桥”碰撞釜山港码头事故；2024 年 3 月 16 日“YM WITNESS”轮碰撞土耳其艾维亚普港码头事故。上述船舶碰撞事故中都有驾引人员操作失误的人为因素，事故也给港口安全带来了前所未有的挑战。

在此背景下，人为因素作为影响安全的关键因素之一，其重要性不容忽视。为消除船舶引航作业中的安全隐患风险，有必要将其从风险形成的负面因素转化为风险化解的积极因素。通过探索和实施基于主动防御思维的引航风险防控策略，建立完善的早期风险识别、评估、管控机制，对于保障港口乃至整个航运业的可持续发展具有重要意义。

1 概念

基于主动防御思维的引航风险防控策略借鉴自军事领域里的主动防御理念，要求引航员在规划和执行引航任务的每个阶段都采取积极的风险管理措施。如图 1 所示，这种方法的核心就在于强调引航员的主观能动性，减少在引航过程中因人为因素导致的事故。即在制定引航计划时，对各个节点中可能遇到的各种风险进行预判和准备，预先制定应对策略；在引航过程中，根据实时收集的信息，对船舶所面临的风险进行早期精确分析、预判和做出决策，及早地采取相对应措施规避风险[1]。不仅主动避免自身产生的风险，还应避免被卷入因其他船舶的行为而产生的相关风险。

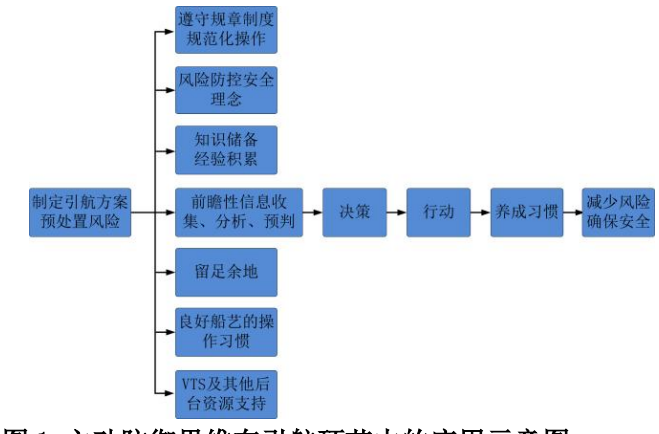


图 1 主动防御思维在引航环节中的应用示意图

基于主动防御思维的引航风险防控策略是引航安全管理的重要组成部分，它体现了预防为主、

积极应对的管理理念。要求引航员不仅具备高超的专业技能和丰富的航海经验，还要具备高度的责任心、敏锐的风险识别能力和果断的决策能力，在整个引航过程中掌握船舶安全的主动性，确保船舶在复杂多变的港区环境中安全、顺利地进出港口。

2 对船舶驾引人员的要求

引航员与船长作为基于主动防御思维下的引航风险防控策略的主要实施者，在风险防控时须秉持积极主动的态度，具备一定的前瞻性和预见性，在面对潜在风险时能迅速做出反应，并且能基于丰富的知识储备和实践经验，发展形成出一套主动防御式的思维模式和行为习惯。

2.1 须具备强烈的风险防控意识

在思想上对航海的风险有深刻的认识和重视，始终保持对自身职责和风险的敬畏之心。

2.2 充足的信息储备

船长有其丰富的航海经验、熟悉本船船况和船员的优势。而引航员有其专业知识和熟悉港口环境，对可能遇到的风险有深入的研究、分析和规律总结，有充足的预防措施：

2.2.1 熟知潮汐对当地的水文、气象等条件有深入的了解和准确的掌握，充分了解港内潮流的规律和特点。

2.2.2 熟知港区各个码头、航道，特别是重点区域（如警戒区，狭水道、岬角区等）的特点及潜在风险点。

2.2.3 对港内各类船舶的资料有充足的收集、归纳和总结，熟悉其操纵特性。

2.3 出色的沟通能力

具备出色的跨文化、多种语言的沟通能力，获取信任和配合，引航员和船长、驾驶台资源、VTS、助泊拖轮、码头等各方达成优势互补，在引航过程中能得到各方资源的有力支持。

2.4 对引航过程中船舶的风险有深度的理论研究和丰富的实践处理经验，有充足的技能储备。

2.5 良好的心理素质

在面对复杂和紧张的引航环境时，需要具备过硬的心理素质、压力管理和情绪控制能力，保持冷静和专注，做出合理判断和决策。

2.6 具备敏感的态势感知能力

在引航期间保持高度的警觉和集中的注意力，能够及时感知到周围环境中的变化，有对风险进行精准预判和果断处置的能力。

2.7 始终保持高度戒备

对被引船舶可能出现的突发状况保持高度的戒备。不仅熟悉各种应急处置程序，还具备在紧急情况下迅速、有效地应对的心理准备和技术能力。

2.8 保持谦逊的态度，归零的心态。有保持不断学习，在技术上追求精益求精，力争做到尽善尽美的精神追求。

3 在引航中操作中的应用

基于主动防御思维的引航风险防控策略贯穿于整个引航过程，不仅仅是引航作业规范化操作内容的拓展和延伸，更是一种全新的安全管理理念和方法，通过主动提前采取措施来降低或消除潜在的风险因素。

3.1 引航员登轮前

3.1.1 引航员根据被引船舶的信息、水文气象条件等信息，制定初步的引航计划方案，规划航线上的节点和标注风险提醒。

3.1.2 引航员关注本船动态及登轮点附近通航状况，与被引船之间保持有效沟通。

3.1.3 船方根据靠泊计划预防制定航线，标注危险物标和区域。在到达登轮点前保持好船位，与各方保持有效沟通。

3.2 引航员登轮后

3.2.1 交流船舶信息。

查看引航卡上的船舶信息，与船长做充分交流，完善引航信息交流本，确定最优引航操作方案。

3.2.2 良好的安全理念和引航操作习惯

（1）节点意识

根据《区域引航方案》里的规范化操作要求，规划引航过程的各个节点，对每个节点潜在的风险进行深入分析，制定出有效的应对方案计划。在引航过程中根据节点的相关注意事项，采取相应的风险防范措施。

（2）船舶领域理念

始终保持对船舶位置的精准控制，确保船舶处于有充足安全余量的空间范围内。

（3）保持安全航速

根据本船操纵特性，能见度和交通流情况采用最适应本船的安全航速，在通过狭窄、繁忙的区域时，通过提前控速的方式，使本船在有足够的操作余地，占据有利的地位下主动采取适当有效的行动，避免与他船形成紧迫局面。

（4）保持敏锐的态势感知能力，对潜在风险进行早期预警，根据避让优先等级，提前快速识别最具危险的物标。

在面对港内交通环境的复杂局面时，保持高度敏感和戒备，及时关注本船及周围环境的变化。综合运用目视观察、雷达标绘、智能导航设备、VTS 提醒等多种了望手段来识别潜在的风险，标绘出最具危险的物标并加以系统跟踪观察，以采取最有效的避让措施。驾驶台人员配合引航员协助了望，做好相关事项的提醒。

（5）养成符合良好船艺的规范化操作习惯，如：

①在平时引航过程中，对于船舶设备的使用“戒急用缓”，避免设备负荷过大而引发故障。

②惜令如金，特别是在船舶靠离码头的过程中，预判要准确，口令精准简练，应避免频繁用车舵。

③对口令和船舶设备状态核查确认，如核查车舵令、转速和舵角指示表等。

（6） 对特殊情况保持高度的戒备

面对船舶突发机电状况，如全船跳电、主机故障、舵机卡死等，保持临危不乱的冷静和镇定，熟知相应的应急应变处置程序。

3.3 离轮前

在引航任务的最后交接阶段，引航员与船长进行沟通和安全提醒，将船舶的指挥权顺利交接给船长，船长确认后完成整个引航过程的安全闭环。引航员在离轮后，对船舶的状态进行必要的跟踪，确保引航的完结。

3.3.1 做好离泊船的交接工作：

确保离泊出口船舶处于适当的位置和态势，联系好其他进出口相关船舶，核查出口航线信息及做好其他航行信息的提醒。

3.3.2 做好靠泊船的交接工作：

告知船方本码头稳泊注意事项的提醒。

3.3.3 做好港内抛锚船的交接工作：

向船方告知港内抛锚的注意事项，港口管理部门、拖轮监护的联系方式以及走锚的应急应对措施。

4 案例分析

案例一：2007 年 11 月 7 日 0830 时，“中远釜山”轮在引航员的引领下，在浓雾中离开加州的奥克兰第 56 号泊位，穿越连接奥克兰和旧金山水域的海湾大桥时，因引航员的失误而使船舶偏离航道，最终导致船体与海湾大桥的桥塔护墩发生碰撞，如图 2 所示，造成重大经济损失和大面积海域受到污染的严重后果。

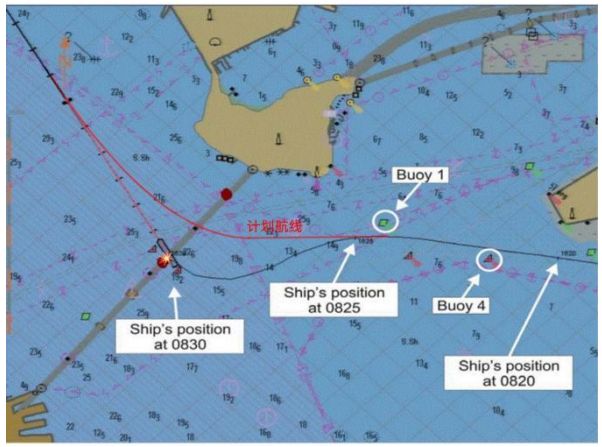


图 2 “中远釜山”轮轨迹示意图

事故原因分析：引航员缺乏足够的风险防控意识，未能感知到船舶在雾中高风险环境下所面临的诸多风险，与船长的沟通交流也不够充分，同时未能正确使用雷达和电子海图等导航设备，最终导致了事故的发生。

案例二：2020 年 4 月 6 日，“米兰桥”轮在靠泊釜山新港集装箱码头的过程中，由于操纵不当，船舶速度过快，导致船舶碰撞码头，造成码头多个吊机、船舶损伤的严重事故。

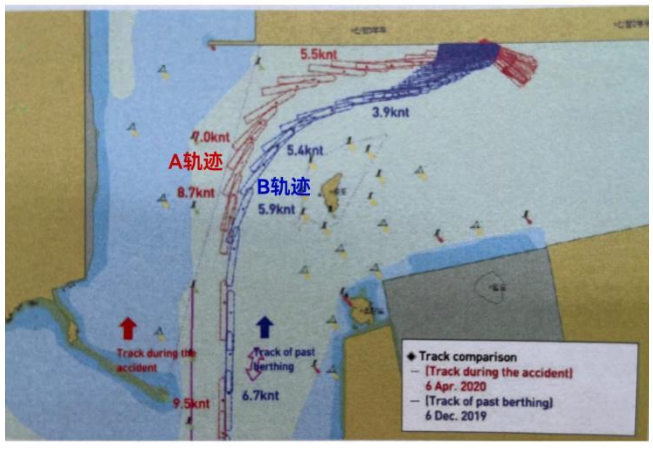


图 3“米兰桥”轮轨迹示意图

事故原因分析：引航员过于自信，没有考虑到船舶空载吃水过小导致转向性能降低，与船长也没有事先沟通引航方案，未采用如图 3 中所示的更为稳妥的 B 轨迹方案，结果转向前速度过快，在多种因素的综合作用下导致事故的发生。

案例三：2024 年 2 月 23 日，农历一月十三，引航员引领“MUNICH MAERSK 慕尼黑马士基”计划 1100 靠泊宁波穿山港区泊远东码头 7 号泊位。

水文气象:镇海高潮时 1105 347cm 低潮时 1725 79cm 当日正值冷空气南下，西北风,风向 330 度，风速 13 米/秒。

船舶资料：船长 399m,船宽 58.6 米，吃水 13.6 米，排水量 201753 吨，船侧受风面积 14251m²。

引航员在接到引航任务时，就根据泊位特点、船型、风流条件等信息做了引航预案，通过对风流压的计算，充分分析了强吹拢风与落流的叠加效应对超大型集装箱船靠泊的巨大影响，故在原靠泊计划中 4 条拖轮的基础上又多申请了一条助泊拖轮。登轮后与船长做了充分沟通，最终确定了最为稳妥的靠泊方案和应急预案。通过采用抽屉式靠泊法，如图 4 所示，即在泊位对开 8cable 处，船首向与码头的走向平行，以外侧 4 条拖轮的拖拉和内侧一条拖轮顶推的方式控制本船以逐级递减的靠拢速度平稳入泊。图 5 所示的就是该轮在大风浪天气条件下安全靠泊的船舶轨迹图。

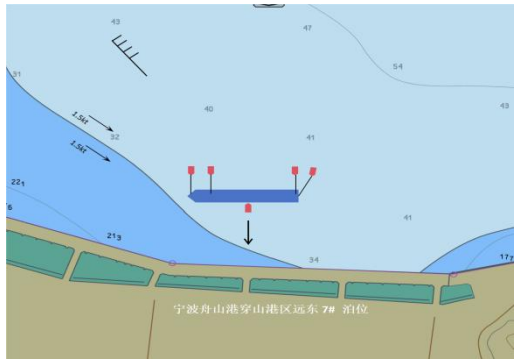


图 4 抽屉式靠泊法



图 5 船舶入泊轨迹图

在上述案例一和案例二中两起事故中，虽有诸多客观因素，但最根本的原因是引航员及船长的人为疏忽——面对潜在风险，缺乏主动防御思维，未能及早地采取有效的风险防范措施规避风险，所采取的紧急措施都为时过晚。在案例三中，因引航员针对引航作业的风险提前进行评估、分析，并积极采取了诸多应对风险的防范措施，确保了船舶平稳靠泊。

“凡事预则立”，在通航条件复杂的港区内，存在诸多复杂多变的不确定因素，唯有高度重视驾引人员基于主动防御思维下的引航风险防控策略的培养和提升，加强相互的信息共享，有效利用各方资源，提前充分评估和判断船舶所将面临的状况，及早地达成规避风险的最佳决策及采取行动，才能保障船舶、人员和港口的安全。

5 效果评估

5.1 主动防御思维调强驾引人员的事前风险评估与预防，降低引航风险的产生。通过建立全面的风险评估体系，对船舶引航作业过程中的各个节点提前进行综合分析，主动识别和预防潜在风险点，从而减少引航过程中可能发生的危险，降低事故发生的概率。

5.2 培养良好的工作习惯：该思维强调前瞻性思维和持续的风险管理，这有助于培养驾引人员良好的工作习惯以及复杂环境下的操船技巧、应急处理能力和心理建设，针对不同等级的风险，制定详细的应急预案和处置流程，确保发生紧急情况能够迅速响应和有效应对。

5.3 风险防控策略的应用能有效降低因人为疏忽造成的风险，并能发挥人为的积极因素，快速识别，及早采取应对措施消除风险，从而能够提供更加安全、高效的引航服务，提升引航服务的专业水平和质量，为港口安全生产提供坚实的技术支撑。

6 总结与展望

基于主动防御思维的引航安全防控策略动防御的主要内容是预防风险的产生，其核心思想是强化驾引人员的前瞻性思维和主观能动性，留足安全余量，掌握船舶安全的主动权，确保船舶始终处于安全可控的状态。

优秀的引航员和船长能深刻理解这是规范化操作理念的深化，其真正意义是通过有效整合人、船、环境三者关系，将主动防御思维的引航安全防控理念内化为对风险的直觉性反应和行为习惯，及早主动地采取有效措施，化解船舶在引航过程中的各种风险。

未来船公司和引航机构可基于这一理念，融合大数据、人工智能等先进技术，开发智能化引航辅助系统和远程监控与指挥系统。岸基管理人员能够实时掌握船舶动态，对港区交通流进行实时监控，为驾引人员提供全面、准确的后台信息支持，实现船舶定位、避碰预警、航线优化等功能，提高引航作业的精准度和安全性。进行远程指导和干预。在紧急情况下，系统能够迅速启动应急预案，协调各方资源，实现快速响应和高效处置。

在制度建设上，从安全管理体系、人员培训、科技应用、法规制度等多个方面入手，将风险防控策略转化为安全体系文件，全面提升驾引人员风险防控能力。通过采取以上措施有助于改善港口的海上交通安全环境，保障全球物流链的顺畅与稳定。

参考文献

[1]朱建炎. 防御性驾驶技术在长江引航中的实践与应用[J].航海技术,2014，4：20-22

作者简介：郑浩亮（1979- ），男，宁波大港引航有限公司高级引航员 联系电话 13780081816；
通讯地址：宁波市高新区沧海路 588 号绿园大厦 25F， E-mail:7046365@qq.com。

船舶智能柴油机的比较研究及故障案例分析

蒋译苇，刘士光，赵国宝

宁波海运股份有限公司，浙江 宁波 315020

摘 要：文章对目前市场上常见的船舶智能柴油机进行比较研究，分析其技术特点、性能指标以及适用范围，以期为船舶主机选择和运营管理提供参考。介绍船舶智能柴油机的定义和发展历程，概述其在航运业中的重要性和应用前景。选取几个具有代表性的船舶智能柴油机产品，对比分析其技术参数、性能特点、经济性和环保性能。通过对比研究以及经典故障案例，总结出各类智能柴油机的优缺点及适用场景。

关键词：柴油机；智能；比较研究；案例分析

0 引言

全球经济和国际贸易的不断发展使船舶运输占据超过 90%的全球贸易份额，但同时面临能源紧缺挑战。船舶航运业为解决问题积极寻求新的解决方案，如核能、太阳能、潮汐能和风能等新能源的研究与开发。虽然核能和风能已在船舶上部分应用，但普及还需时间，目前内燃机仍是商船的主要动力装置。为提高经济性、机动性，满足国际排放标准及维护管理，船舶航运业持续创新。关键措施包括开发新型燃料和改进柴油机技术，如液化天然气和酒精燃料成为重要研究方向。同时，采用新型燃烧技术、绝热材料和废热回收设备等是关键技术途径。船舶主推进动力装置需要具备快速启动、灵活换向、可调变速和可靠制动等能力，计算机科学技术的进步为优化柴油机机动性提供支持。欧洲国家限制船舶燃料油硫含量，IMO 提出新排放限制，创新改进柴油机以适应不同排放要求成为必然趋势。在线监控系统实时监测参数并自动调节工况，是有效降低排放的关键手段。为提高可靠性和安全性，船舶航运业简化机械传动结构，应用电子技术进行在线监控和优化柴油机结构，设置可靠有效的保护系统。

1 智能柴油机的结构特点

世界船用低速机有 MAN、WinGD 和三菱 UE 三大品牌。文章介绍 MAN 和 WinGD 两个品牌的柴油机，选取市场上保有量最多的 2 种型号，WinGD6X52-TierⅡ和 MANB&W6G50ME-C9.5。

WinGD6X52-TierⅡ机型和 MANB&W6G50ME-C9.5 机型都采用了不同的高压燃油供应系统。

在 WinGD6X52-TierⅡ机型中，燃油供应由曲轴带动的复合凸轮驱动柱塞式油泵，将燃油输送至高压燃油集管（共轨），保持 100MPa 的燃油压力。同时，通过曲轴驱动的另一台油泵提供 20MPa 的伺服滑油压力。控制系统通过电磁阀控制伺服滑油的进出，以驱动活塞快速上下运动，从而带动高压油泵柱塞产生 75～120MPa 的高压燃油，通过喷油嘴进行雾化喷射。

在 MANB&W6G50ME-C9.5 机型中，高压燃油供应通过液压驱动高压油泵实现。轴带轴向液压泵给油轨输入滑油，并经主滑油滤器后分为两路。一路用于润滑和活塞冷却，另一路经细滤器后进入柴油机自带的增压泵（双头活塞泵）增压。增压后的滑油达到 20MPa 左右，高压排至各缸高压油泵的大储存器。控制系统同样通过电磁阀控制液压驱动的高压油泵，使其产生 75～120MPa 的高压燃油，再通过油嘴进行喷射雾化。

两种机型的喷油控制都是通过控制系统发出信号给电磁阀来实现，但 WinGD6X52-TierⅡ机型控制的是伺服滑油，而 MANB&W6G50ME-C9.5 机型控制的是动力油，用于驱动高压油泵。

作为一种先进的燃料供给方式，共轨系统给船用柴油机带来了许多优点。首先，该发动机具有

可灵活调整的喷油压力，可以根据不同的工作状态来决定最优的喷油压力，进而对发动机的综合性能进行优化，达到节能降耗、节能降耗的目的。本项目提出了一种基于电控共轨式燃料系统，利用电磁阀的高速响应特性，实现对燃料喷射时刻、喷射速度的精确调控，进而实现对燃料喷射过程的精确调控，进而减少尾气 NO_x 含量，提升燃料经济性。在此基础上，提出了一种新的节能控制方法。与传统的机械喷油系统相比，该系统可以降低氮氧化物的排放。为了降低机械喷油系统的 NO_x 排放，必须减小喷油提前角，但这将造成长时间的燃烧和严重的后燃，从而影响发动机的经济性。而共轨系统通过增加燃油喷射速率，并适当减小燃油喷射提前角，从而缩短全燃烧时间，并减少 NO_x 的产生。利用电磁阀对燃油喷射进行控制，实现了对共轨系统的精确控制。在高压油管道中，没有气泡，没有残留压力，喷油量变化很小，燃烧压力、排烟温度等参数比较平衡，同时降低了机械负载和热负载，降低了柴油机的机械作用力、扭矩和振动，从而提高了柴油机的可靠性。该系统还具有对各项参数进行集中监测的功能。采用电子喷油技术的低速大排量柴油机，其控制系统适用于当前的机舱监控，利用报警系统、传感器、计算机等技术，使柴油机工作在最佳状态。当出现故障时，系统会发出警报，并给出维护方案。在大功率、低速的柴油机上使用共轨装置，使其结构简单，活动零件少，可靠性高。采用共轨方式，可以减少发动机的重量、体积、减少生产、维护费用、延长检修时间，减少维护费用，延长使用寿命。

2 故障案例及分析

某新造船舶主机型号：DMD-WinGD6X52 电喷主机，配有 3 台燃油增压泵，每缸 3 只喷射阀，采用 UNIC-flex9520 电子控制系统，在运行 1000h 起锚靠泊时，遥控启动首次出现二次重复启动（一次启动失败），在后续的几个航次里主机启动困难越发频繁，驾控、集控，甚至机旁操纵都启动困难，在机旁用燃油指令模式才能启动成功（重启动），这样不仅耗气量大大增加，也为船舶安全航行带来隐患，于是便开始进行故障排查工作。

造成以上故障的原因有：①主机电控系统故障（软件）；②启动空气系统故障，达不到发火转速；③主机燃烧室部件故障，压缩压力低；④燃油系统故障。

先从主机电控系统故障（软件）排除开始，因船舶还处于 1a 质保期内，船方要求工程师上船查看主机电控系统，工程师认为可能是主机软件问题，对船上 UNIC 系统进行全面检查均正常，并对各缸 CCM-20（气缸控制单元）控制电源由原来的 24V 调高至 27V，问题并没有解决，遂把控制电源电压调回到 24V。

继续查找故障原因，研究主机启动空气系统。启动空气系统原因造成主机达不到发火转速可能是因为主启动阀打开时间不够，或单缸气缸启动阀打不开、关闭不严引起。轮机人员利用抛锚时间，全面检查空气系统，主机备车，手动停止鼓风机，打开示功考克。手动打开主启动阀（由于电喷主机气缸启动阀是由电磁阀控制，只要没有启动指令气缸启动阀应是关闭的），各缸示功考克均未有气体冲出，说明各缸的启动阀关闭良好。随后盘车至各缸发火角度冲车，主机都能转动且能达到发火转速。至此可以排除启动空气系统故障。

继续查看主机燃烧室部件工况，轮机人员通过扫气口检查活塞、活塞环和缸套状况，未发现拉缸及断环现象，也没有明显窜气痕迹。开启滑油泵以及伺服油泵在 LDU（本地显示单元）的排气阀菜单中，手动开启关闭排气阀，从排气阀行程传感器反馈的数据看排气阀均能正常启闭，航行时检查压缩压力正常，因此燃烧室部件故障原因也排除。

问题始终未解决，决定逐帧查看主机启动过程中各项工况参数。多次试车后最终发现在主机刚启动时，在 DCM（柴油机数据采集显示器）的气缸压力数据界面观察到 2#、6#缸发火压力明显低于压缩压力（压缩压力是指柴油机在不燃烧的情况下，仅由活塞压缩空气产生的气缸内最大压力），如图 1 所示。



图 1　气缸压力动态监测

由此基本判定该故障的主要原因是燃油系统产生的。单缸爆发压力低，对于电喷主机来说可能是流量限制阀、喷射阀造成。

因正常航行时排温、爆压均正常，可以排除流量限制阀故障。轮机人员对 2#、6#缸喷射阀（共 6 只）进行拆解，在试验台进行喷油试验时发现泵压压力达到 600bar 时喷射阀还是无法喷油（说明书要求喷油压力 350～450bar）。把 6 只喷射阀解体发现先导阀的阀芯都存在重油粘连现象，导致喷射阀无法正常喷油，对该阀清洗活络装复后泵压试验 400bar 左右喷油。装妥后试车启动恢复正常，至此启动困难现象消除。

在后面的运行中主机其他缸喷射阀也先后出现喷射阀先导阀粘连问题。对于运行 1000h 新造主机来说，喷射阀出现先导阀阀芯粘连问题是不应该的（说明书要求喷射阀喷油试验 4000h，更换备件 8000h）。轮机人员根据使用情况研究判断导致先导阀阀芯粘连的主要原因是启动初期重油油温过低，最终引起主机在启动时困难，而在航行中各参数正常，是因为正常运行后，重油油温恢复到 120℃左右。为了防止因重油温度偏低导致先导阀粘连，采取以下措施。

（1）在停车状态下，缸套冷却水温度应保持在 80℃以上，以保持喷射阀控制元件的温度。

（2）高压油管、共轨油管采用电加热保持温度，在锚泊时电加热应保持在 110℃左右（天冷时可以点锅炉用蒸汽伴行管加热）以便喷射阀入口有较高的重油温度。

（3）该型号喷射阀是由 4～5bar 主润滑油来润滑和冷却的，40～50℃的润滑油温度会增加喷射阀控制元件中重油凝固。在锚泊靠泊期间，可以关闭喷射阀润滑油管路上的截止阀。该船在故障发生以后锚泊时关闭冷却润滑油，先导阀粘连问题得到明显改善。

（4）在运行期间，燃油的黏度必须保持在规定的范围内，如本船加装 180 燃料油，黏度应控制在 13～17cst。但无论哪种情况重油温度都不允许超过 150℃，因为超温会损害材料的机械性能。

3　结论

这两种柴油机应该都有相应的功率和效率规格。功率通常用来衡量发动机输出的动力大小，而效率指的是发动机在特定负荷下的燃料消耗情况。这些柴油机通常符合国际航运机构（IMO）的排放标准。现代的智能船舶柴油机设计注重可靠性和减少维护工作量，以提高发动机的可用性和可靠性。这些柴油机通常用于大型商船，如集装箱船和油轮，因为它们的设计目标是在长途航行和高负荷条件下运行。

在船舶行业中，智能柴油机的发展已经取得重大进展，成为推动船舶性能和可持续发展的关键技术之一。通过引入先进的数字技术和自动化系统，智能柴油机可以实时监测和控制柴油机的运行状态和性能，提高燃烧效率和能源利用率，降低燃油消耗和排放物排放。船舶智能柴油机的比较研究对船舶行业的技术进步和发展具有重要意义。通过比较不同制造商的智能柴油机的性能和功能，可以

为船主和船舶设计师提供选型和优化方案，以满足不同船舶的需求和应用场景。然而，船舶智能柴油机的比较研究也面临一些挑战和限制。首先，不同制造商的智能柴油机可能采用不同的技术和系统架构，导致比较结果的不一致性。其次，智能柴油机的性能和效果受到船舶操作和维护的影响，需要考虑到实际运行环境和条件的差异。此外，智能柴油机的发展仍处于不断演进和改进的阶段，可能存在一定的技术局限性和成本挑战。然而，在面对这些挑战和限制的同时，船舶智能柴油机的比较研究依然具有重要的意义。只有通过深入的研究和比较分析，才能更好地了解和评估智能柴油机的性能和效果，为船舶行业的可持续发展提供科学的依据和指导。

参考文献

[1]滕宪斌.船用智能柴油机的发展现状[J].天津航海，2009（1）：21-23，53.
[2]李斌.船舶智能柴油机主要技术的比较研究[D].大连：大连海事大学，2013.

作者简介

蒋译苇 船舶三管轮/船舶初级，手机号：13566778679 邮箱：837427160@qq.com。
刘士光 船舶大管轮/船舶中级，手机号：15990557838 邮箱：764652911@qq.com。
赵国宝 技术保障部副主任/高级轮机长，手机号：13685853605 邮箱：zhaogb@nbmc.com.cn。

多船复杂会遇局面的安全避让策略

贾志华，曹桂荣，唐晓虎

（宁波引航站，浙江 宁波，315000）

摘　要：多船会遇局面是港内航行经常遇到的情形，出现多船会遇时，如何确保船舶航行安全是每一个驾引人员值得思考的重要问题。保持正规瞭望和必要警惕，抓住主要矛盾，多换位思考加善于沟通，发挥良好船艺等是在遇到多船复杂会遇局面的安全避让策略。

关键词：多船会遇；复杂局面；船舶安全；避让

宁波舟山港是世界第一吞吐量大港，港内通行船舶数量多，船舶密度大。宁波舟山港又属于典型的岛礁区，航门众多，船舶航线交叉频繁。核心港区内分布着多个警戒区，这些警戒区都是多方向船舶交通流的密集汇聚之地，这就造成在警戒区及其附近经常会遇到复杂的船舶会遇局面，也因此很容易就形成碰撞危险。此外受岛礁、浅点等外界环境条件的影响，避让操作空间经常受限，在这种情况下，如果处置不当，就极容易形成紧迫局面、乃至紧迫危险，甚至发生碰撞。在出现复杂船舶会遇局面的情况下，如何正确处置，考验的不只是驾引人员的技术能力，更考验了驾引人员的安全素养。

1. 多船会遇局面的定义

船舶会遇态势分为两船会遇局面和多船会遇局面，两船会遇局面就是《规则》所规定的船舶会遇态势，包括互见和能见度不良时两种情况，而多船会遇局面只适用于《规则》第二条责任条款，并没有具体规定。结合《规则》相关条款和目前研究多船会遇局面可界定如下：在一定水域内，当三条及以上船舶相互接近时，若本船同时与各目标船均形成两船会遇，或者本船仅与其中一条目标船形成两船会遇，但因其他目标船的存在，本船所必须采取的避碰行动受到限制，则称本船处于多船会遇局面。

2. 多船会遇局面时的责任划分

《规则》对船舶会遇局面的划分、避让责任和义务的确定是以两船相遇为前提，当多船会遇并

存在碰撞危险时，《规则》没有做出具体规定。但是在航海实践中，多船会遇局面是客观存在的，尤其是在港口水域内，多船会遇的情况是经常出现的。

当多船会遇局面出现并存在碰撞危险时，如何适用《规则》条款，一直存在不同的看法。一种观点认为：多船会遇属于特殊情况，适用于《规则》第二条“责任”条款，处在多船会遇局面中的各船应“按海员通常做法或当时特殊情况的要求”采取相应的避让行动。但是《规则》第二条并没有明确各船的避让责任和义务，进而无法具体指导各船应采取怎样的避让行动，各船在采取避让行动时还需进一步做出判断。还有一种观点认为：当多船会遇并存在碰撞危险时，应将整个局面化整为零，分别在两船之间适用《规则》相应的条款，确定各自的避让关系。这种做法最大的优点是每一船舶都明确本船相对于周围每一船舶的避让关系及避让行动。但其缺点是一船在判断与周围他船的避让关系及避让行动时，可能存在不可调和的矛盾，比如在某些局面下，相关船舶既为让路船，又为直航船，这将让相关船舶无所适从。

目前比较普遍且容易被人们接受的观点是：(1)互见中多船会遇并存在碰撞危险时，对于每一船舶而言，首先应分析本船与其周围每一船舶的避让关系，如果这些避让关系之间不存在矛盾，则该船与他船之间的避让关系成立，可以按照两船适用《规则》相应的条款；(2)如果这些避让关系之间存在矛盾，则应将整个局面当作一种特殊情况，适用《规则》第二条“责任”条款；(3)能见度不良不在互见中的多船会遇局面，每一船舶均应遵守《规则》第十九条，各船负有同等的避让责任和义务。

3. 多船会遇局面船舶避让实例

某日，引航员 1700 梅山引领一条 335 米长的“B 轮”条帚门出口，当日镇海低潮时 2046，离泊时 SW 流已较为明显。在快到 6#警戒区时，引航员主动减速避让双屿门进出相关船舶及渡轮。过 6#警戒区后，为了与沿通航分道行驶渡轮拉开安全距离，保持 9 节左右速度航行。“B 轮”中远船厂对开时，引航员在雷达上发现条帚门里沿出口航道附近有一船舶 AIS 标志显示，由于六横岛东北角的遮挡，在视觉上尚不能看到该船。引航员立即通过电子海图、船讯网等确认，经核实这是一条船位在条帚门出口航道边缘，船首向朝北的 366 米长的集装箱船“G 轮”，速度只有 2 节多，动态不明；同时引航员还发现条帚门有一条进口船，300 米长的“R 轮”，已过了六横煤电码头，速度 10 节左右。“B 轮”“G 轮”“R 轮”三船会遇过程如图 1 所示：



图 1：“B 轮”“G 轮”“R 轮”三船会遇示意

1756：“B 轮”中远船厂对开，前进二，速度 9 节，引航员发现动态不明的“G 轮”立即减车到前进一；“G 轮”此时正处于六横岛和西白莲之间条帚门出口航道边缘，船首向大概 350，速度 2.5 节，引航员 16 频道联系得知“G 轮”刚从西白莲鑫亚船厂出来，准备到佛渡 8#锚位抛锚；“R 轮”

条帚门进口刚过六横煤电码头，速度 10.2 节，计划 7#警戒区左转去靠梅山。

当时困境：“B 轮”快到 7#警戒区，临近转向，“G 轮”却在“B 轮”的出口航道边缘。“G 轮”的过慢船速及左侧空间有限，再加上急落流，这些都不利于“B 轮”提早转向与“G 轮”过红灯，因为可能被压向-10 米等深线；“B 轮”即使加速过“G 轮”船头，右转及与“R 轮”的会遇也是问题。“R 轮”同样快要左转，强抢到“G 轮”船头转向绝非上策；即使提早转向过“G 轮”船尾，也面临与“B 轮”的会遇问题。“G 轮”刚从船厂出来，不能过多加车，再者其距锚位也不远，本身也不愿过多加车。

破解之策：当时的局面，需要三方共同配合，才能更快更好地摆脱不利局面，确保船舶会遇安全。“B 轮”引航员主动继续减车，直至停车，尽量等待，以便给会遇留下较大空间；“G 轮”尽量加车，先远离条帚门北口；“R 轮”先减车，待位置合适时，再加车提早转向过“G 轮”船尾，转到佛渡水道西行航道。

1759：已提前减至微速进，“B 轮”7.9 节，此时停车；“G 轮”加速到 3.2 节，前进距离不大；“R 轮”减到 9 节。

1805：“B 轮”速度衰减到 4 节；“G 轮”到“B 轮”船首 1 点方向，加速到 4.7 节；在此期间“R 轮”加车，并对着“G 轮”船尾转向，1805“G 轮”与“R 轮”驶过让清。

1810：在“R 轮”平“B 轮”船头时，距离大概 1 海里，引航员令“B 轮”微速进，并操右舵,1810 时“B 轮”与“R 轮”驶过让清。

“B 轮”“G 轮”“R 轮”三船会遇雷达图见图 2。

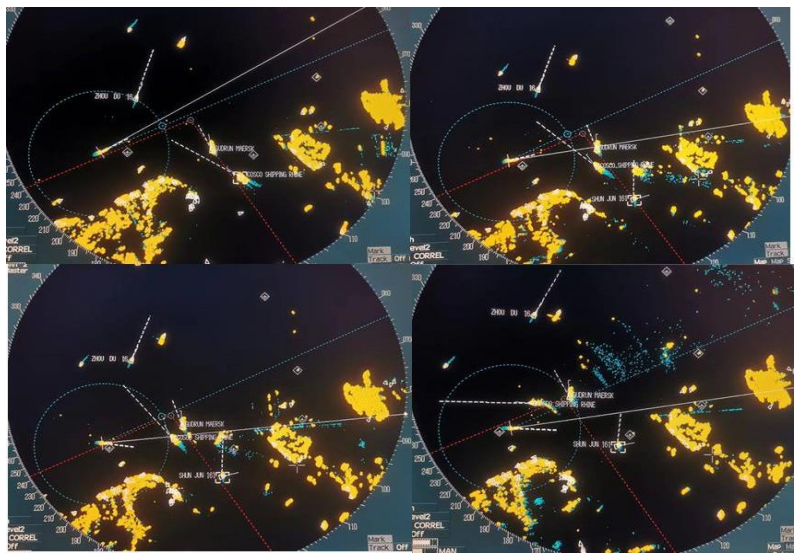


图 2：“B 轮”“G 轮”“R 轮”三船会遇雷达图

4. 多船复杂会遇局面的安全避让策略

多船会遇局面对于每天在港内航行的引航员来讲属于常规科目，经常都会遇到，我们要做到的就是平安顺利地化解每一次局面。对此，个人认为在应对多船复杂会遇局面时要做到并不局限于以下策略：

4.1 正规瞭望，争取主动

每一船任何时候都应使用适合当时环境和情况的一切有效手段保持正规的瞭望，驾引人员应充分有效发挥雷达、AIS、电子海图等助航仪器设备的作用，认真守听 VHF，在有岛礁遮蔽水域，也可通过询问交管中心或其他船来确认是否有相关船舶，及早判明碰撞危险。这样即可以争取主动，尽早采取预防措施，尽量避免复杂会遇局面的形成，即可达到“上医治未病”之目的。

4.2 保持警惕，慎重操作

海上航行，每天都会遇到不同的局面，简单的、复杂的、意想不到的，各种局面是层出不穷。大多时候多数船舶都能规矩航行，但也经常会遇到一些随心所欲、不按套路出牌的“选手”。因此，在航行时务必保持高度警惕，在发现存在异常情况时，要慎重操作。对局面没有充分了解之前，绝对不可继续盲目高速行驶，航速要适合当时的环境和情况。这种情况下，减速利于有更充分的时间判明危险，也可为后续避让留有更大的空间，即以退为进，以时间换空间。对于引航员，一定要转变观念，不要认为过早减速避让是技术不成熟的表现，持有此种观念才是心理不成熟的表现。随着船舶大型化，港区通航局面日趋复杂，车让将成为航行的常态，对此，我们必须保持清醒的认识。

4.3 抓住矛盾，化繁为简

有时，复杂局面已经形成或无可避免，我们也要坦然面对，积极应对。对于复杂局面，不要战战兢兢，要从战略上藐视，战术上重视，抓住主要矛盾，化繁为简是一个很好的策略。因此，在面对或即将面对复杂局面时，我们要先沉下心来，认真分析局面，找出主要矛盾，把复杂局面拆分，进而采取最合适的避让应对措施。这样，复杂局面不断简化，危险就会迎刃而解。

4.4 换位思考，互相理解

在航行时，经常听到高频上说“你减一车，我很快过去”，“你向左/右转一些，让我一下”……等等。航行时，都希望别的船主动让自己；轮到自己时，总怕麻烦。驾引人员这种“严于律人，宽于待己”心理是不可取的。复杂局面要求他船采取行动时，要考虑到他船的实际情况和难处，不能只顾自己，认为自己船大，别人就要避让，一味奢求别人大幅度行动，自己只是略微表示。在遇到复杂局面时一定要换位思考，互相理解，在有余地的情况下，积极采取行动，良好的通航环境需要大家共同经营。

4.5 摆正姿态，善于沟通

宁波舟山港是国内大型船舶进出数量最多的港口之一，港内船舶通航密度大，各类船舶大小相差悬殊，船舶操纵性能差异很大。引航员大多时候引领的都是大型船舶，在遇到多船复杂会遇局面的时候，因船舶操纵性能及避让空间受限，很多时候需要他船配合。在这种情况下，引航员就要摆正姿态，善于沟通。沟通是一门艺术，良好的沟通可以达到事半功倍的效果。大家都是海上安全共同体一员，好的沟通有利于促成安全一致的避让协议的达成。平时大家都要积善缘，对于别人主动配合事后说句感谢，对于自身有富余量时也主动作为，这样也很利于和谐通航秩序的建立。

4.6 以身作则，良好船艺

引航员是港口“活地图”，是船舶操纵专家，是“风险控制大师”，是“船长的船长”。引航员在航行时更应以身作则，做好自己，规规矩矩，运用良好的操船技艺，在航行时尽量避免与他船形成紧迫局面。此外，引航员更要严格遵守港口相关通航规定，走准航道，引航员对港口良好通航秩序的建立要起到示范作用，注意运用良好船艺，不走“霸王船”。在遇到多船复杂会遇局面时，引航员也应更多地发挥技术优势，主动作为，化解风险。

5. 结束语

船舶海上航行安全无小事，驾引人员每时每刻都应坚持正确的安全理念，抱有高度的责任感，掌握正确的船舶避让策略，积极作为，通力协作，谨慎操纵，真正用实际行动做到让航行更安全，让海洋更清洁。

作者简介：贾志华，宁波大港引航有限公司，13967810521，Emai：sida1984@163.com

防御性悲观对引航安全的影响研究

蒋卓宏

（宁波引航站，浙江 宁波，315000）

摘　要：本研究旨在探讨防御性悲观作为一种认知策略，如何影响引航安全，并考察引航态度在其中的中介和调节作用。通过对引航员的调查分析，本研究揭示了防御性悲观对引航安全的积极作用，并为引航员的选拔和心理健康干预提供了新的视角。

关键词：防御性悲观；引航安全；引航员；引航态度

1 引言

1.1 研究背景

引航安全作为航海领域的一项核心议题，始终占据着航海安全管理和研究的中心位置。随着全球贸易和海上运输的日益频繁，引航员的角色变得尤为重要，他们的工作直接关系到船舶的安全航行和海洋环境的保护。然而，尽管技术不断进步，人为因素导致的事故依然屡见不鲜，成为威胁引航安全的主要隐患之一。 据国际海事组织（IMO）的统计数据显示，大约有 75%至 90%的海上事故与人为因素有关。这些因素包括引航员的判断错误、操作失误、沟通不畅以及决策不当等。因此，深入研究引航员的心理和行为特征，对于提高引航安全水平具有重要意义。

在众多心理策略中，防御性悲观作为一种特别的认知策略，引起了研究者们的兴趣。防御性悲观是一种个体在面对潜在威胁或挑战时，通过设定较低的期望值并考虑可能的最坏情况来做准备的心理倾向。这种策略虽然表面上看似消极，但实际上却能够帮助个体减少焦虑、提高警觉性，并在一些情况下提升任务表现。尽管防御性悲观在心理学领域已有广泛的研究，并且其在学业成就、运动表现和社交场合中的应用也得到了一定程度的探讨，但在引航安全领域的研究还相对较少。引航任务的特殊性要求引航员必须具备高度的责任感、出色的技术能力和冷静的应急处理能力。因此，探讨防御性悲观是否能够作为一种有效的心理策略，帮助引航员在面对复杂多变的海上环境时保持警觉、减少失误，对于提升引航安全具有重要的理论和实践价值。

1.2 研究目的

本研究的核心目的在于深入探讨防御性悲观这一心理策略如何影响引航员在实际工作中的引航安全。引航安全不仅关系到引航员个人的职业生涯，更直接影响到海上运输业的稳定发展以及港口生产保障。因此，理解并优化引航员的心理状态，对于提升引航安全水平具有至关重要的意义。

在探讨防御性悲观与引航安全之间的关系时，引航态度反映了引航员对于引航任务、团队协作等方面的看法和期望，这些态度可能影响他们在工作中的行为和决策。

通过分析引航态度在防御性悲观与引航安全之间的中介和调节作用，本研究旨在揭示这些心理和组织因素如何共同作用于引航安全。这不仅有助于我们更全面地理解防御性悲观对引航安全的影响机制，而且可以为引航机构提供改善引航态度和安全文化的策略建议，从而更有效地提升整体引航安全水平。

此外，本研究的结果也将为引航员的选拔和培训提供新的视角，特别是在心理特质评估和心理健康干预方面。通过识别和培养具有积极防御性悲观倾向的引航员，以及通过改善引航态度，可以为提升引航安全开辟新的途径。因此，本研究不仅具有理论价值，也具有重要的实践意义。

2 研究方法

2.1 研究对象

在本研究中，为了全面收集数据并准确评估防御性悲观对引航安全的影响，通过设计防御性悲观问卷、引航态度问卷和引航安全量表，并发放给引航机构引航员填写。本研究共收集了 126 名引航员的数据，其中有效问卷为 104 份。

首先，防御性悲观问卷是用来评估引航员在面对引航任务时所采用的心理策略。问卷的设计基于防御性悲观的两个核心维度：悲观预期和反思性。通过这种方式，可以量化引航员在面对潜在挑战时的防御性悲观水平，以及他们如何通过设定较低的期望和反思可能的负面结果来准备自己。

其次，引航态度问卷旨在评估引航员对于引航任务、团队合作、责任分配等方面的看法和态度。通过这个问卷，可以了解引航员在执行任务时的心理状态和行为倾向，以及他们如何看待自己的角色和责任。

最后，安全效能量表是用来衡量引航员在工作中的安全表现。通过这个量表，可以直接评估引航员的安全效能，以及他们的安全行为如何影响引航的总体安全水平。

通过这些工具的综合应用，可以从多个角度深入了解防御性悲观、引航态度和安全效能之间的关系。

2.2 研究程序

在本项研究里，通过运用统计技术来处理及分析所搜集的数据，目的是为了精确地评价防御性悲观对引航员安全表现的作用。

首先利用描述性统计方法来概述数据的基础属性，包括计算各变量的平均数、标准偏差、出现频次和比例等统计量。描述性统计能够对数据集进行初步的把握，发现数据中的异常情况或分布的不规律性，为进一步的分析打下基础。

在本研究中，首先通过构建一个方程模型来评估防御性悲观对引航安全的影响，并检验了引航态度在这一关系中的中介作用。通过应用适当的统计技术，得到了以下拟合指数：卡方值$\left(x^2\right)$为144.723，自由度$\left(df\right)$为 37，卡方与自由度的比值$\left(x^2/df\right)$为 3.911。此外，计算了多个拟合优度指标，包括 Goodness of Fit Index (GFI)为 0.943，Adjusted Goodness of Fit Index (AGFI)为 0.892，Comparative Fit Index (CFI)为 0.930，Tucker-Lewis Index (TLI)为 0.901，Incremental Fit Index (IFI)为 0.930，Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA)为 0.083，以及 Standardized Root Mean Square Residual (SRMR)为 0.065。这些结果提供了对模型整体拟合度的初步评估。（表 1）

表 1 路径分析

路径		标准化系数	S.E.	C.R.	P
防御性悲观	引航态度	0.588	0.037	12.255	<0.001
防御性悲观	安全效能	0.058	0.027	1.182	0
引航态度	安全效能	0.843	0.042	13.093	<0.001

研究结果显示，防御性悲观对引航态度产生了正面效应，而引航态度又能够预测引航员的安全表现，并在此过程中起到了中介的角色。这表明，那些防御性悲观水平较高的引航员在面对引航任务时，往往会产生更高程度的消极预期，这种预期引发的焦虑感促使他们变得更加小心谨慎，并将这种焦虑转化为动力，更全面地考虑到可能遇到的突发状况，并习惯性地为之做好准备。因此，这些引航员在引航态度方面表现得更为重视，能够更有效地进行团队协作和沟通，更清晰地识别压力和错误，理解权力和规则以及自己的领导责任，最终带来更佳的安全成果。

通过分析引航员的个人特征（如年龄、资历和职位）对安全表现的影响进行了差异性分析，结果如表 2。

根据研究数据显示，在引航员的安全表现上，30 岁以下和 31 至 40 岁年龄层的引航员得分较高，而 41 至 50 岁年龄层的引航员得分相对较低。这与普遍的认知不相符，即随着年龄的增长和经验的累积，安全表现应该得到提升。然而，进一步的分析揭示了安全表现的不同维度：安全服从和安全参与。安全服从涉及引航员按照既定的安全规范和标准操作程序执行任务，这直接关联到他们的日常工作任务。而安全参与则涵盖了引航员在安全文化建设中的主动行为，如参与安全讨论、协助同事处理安全问题和提出改进建议等，这些行为虽然不直接关联核心业务，但对于维护和促进组织的安全文化至关重要。研究结果表明，遵守与引航核心业务直接相关的安全规章并不受年龄和经验的影响。但在安全参与方面，年长和经验丰富的引航员表现出较低的积极性。特别是在 40 至 50 岁的引航员中，可能因为长期面对繁重和复杂的任务而产生职业倦怠，导致他们在积极参与安全活动方面的意愿不如年轻引航员强烈。

表 2 不同年龄的单因素方差分析

变量/维度	小于 30 岁 n=245	31-40 岁 n=55	41-50 岁 n=88	F	显著性
防御性悲观	63.133±9.483	58.347±9.028	61.026±8.672	4.468	0.013
行为	30.978±3.898	31.011±3.756	29.771±3.877	3.335	0.031
服从	17.711±2.357	17.783±2.113	17.245±2.343	2.378	0.094
参与	13.266±1.771	13.188±1.821	12.647±1.863	3.922	0.021
态度	122.002±8.819	122.086±8.098	120.542±9.701	0.941	0.395

同样通过数据显示，防御性悲观与引航安全之间存在显著的正相关关系。这一结果表明，那些倾向于采用防御性悲观策略的引航员，在执行引航任务时表现出更高的安全效能。具体来说，这些引航员通过设定较低的期望值和深入反思可能的负面结果，能够在心理上为各种潜在风险和挑战做好准备。这种心理准备使他们在实际工作中更加谨慎和警觉，从而减少了由于疏忽或错误决策导致的安全事故。

此外，研究还发现，防御性悲观不仅直接影响引航安全，而且通过引航态度的中介作用，对安全效能产生了间接影响。具体来说，防御性悲观的引航员往往持有更加积极正面的引航态度，他们更加重视团队合作、沟通协调以及风险识别等非技术性技能，使得他们在日常工作中更加遵守安全规程，积极参与安全培训和活动，从而提高了整体的引航安全。

3 结论

本研究通过实证分析揭示了防御性悲观对引航安全的积极影响，为引航安全管理提供了新的视角和策略。未来的研究可以进一步探讨防御性悲观在不同文化背景和工作环境中的作用，以及如何通过心理训练和组织干预来优化引航员的心理策略，从而持续提高引航安全水平。

这一发现对于引航行业的安全管理具有重要的实践意义。首先，它提示我们在选拔和培训引航员时，应考虑到他们的心理策略和认知风格。具有防御性悲观倾向的引航员可能更适应于高风险和高压力的引航工作，因此，在人才选拔过程中，我们应该重视这一特质的评估和培养。其次，研究结果强调了引航态度在提升引航安全中的关键作用。引航机构应致力于营造积极的安全文化，鼓励引航员采取主动的安全行为，提高他们对安全管理的参与度和责任感。

4 不足与展望

尽管本研究提供了有关防御性悲观对引航安全影响的重要见解，但仍存在一些局限性。首先，研究采用的是横断面调查设计，这限制了我们对因果关系做出更准确判断的能力。未来的研究可以通过纵向研究设计来跟踪引航员的心理策略和安全表现的变化，以更深入地理解防御性悲观如何随时间和工作经验的积累而影响引航安全。

其次，本研究的样本主要来宁波引航站的引航员，可能无法完全代表更大范围内的引航员。不同地区和文化背景下的引航员可能有着不同的心理特征和工作环境，因此，未来的研究需要在更广

泛的地理和文化范围内进行，以增强研究结果的普遍性和适用性。

基于上述局限性，未来的研究可以通过纵向研究、跨文化研究、多因素分析、干预研究和技术应用方面进行深入探索，从而可以更全面地理解影响引航安全的因素，并为引航机构提供更有效的安全管理策略和培训方法。这不仅有助于提升引航员的个人安全表现，也有助于提高整个行业的安全水平。

参考文献

[1] 佟贺.谈防御性引航[J].世界海运, 2017, 40(3).
[2] 朱建炎.防御性驾驶技术在长江引航中的实践与应用[J].航海技术, 2014(4):3.
[3] 席永涛,李大鹏,张清霄,等.引航安全文化对引航员安全行为的影响——认知和态度的作用[J].中国航海, 2023, 46(2)：25-32.
[4] 席永涛,刘人珲,张清霄,等.安全氛围对引航员安全行为的影响：安全意识的中介作用[J].中国安全科学学报, 2020, 30(9).
[5] 鲁长成.风险评估在船舶引航安全管理中的应用[J].中国航务周刊, 2023(39):41-43.
[6] Cantor, N., & Norem, J. K.. Defensive pessimism: A harmless strategy for coping with stress[J]. Journal of Personality and Social Psychology, 1983, 45(5), 1120-1126.
[7] Norem, J. K. Defensive pessimism: Harnessing anxiety to motivate[J]. American Psychologist, 2001, 56(8), 741-746.
[8] Taubman-Ben-Ari, O., & Mikulincer, M. The positive and negative effects of positive thinking on stress reactions: The moderating role of threat intensity[J]. European Journal of Social Psychology, 2012, 42(2), 232-240.
[9] Clarke, J. A. The limitations of safety culture[J]. Safety Science, 2006, 44(6), 579-588.
[10] Neal, A., & Griffin, M. A. A study of the lagged relationships among safety climate, safety motivation, and safety performance[J]. Journal of Applied Psychology, 2013, 98(1), 117-130.

作者简介：蒋卓宏，一级引航员，电话：15888104231，(E-mail)：nbpilot130@163.com

基于 HFACS-MA 框架识别和预防大风浪中海难事故的人为和组织因素的研究

黄迪

（宁波海运股份有限公司，浙江 宁波 315020）

摘　要：本文旨在通过 HFACS-MA 框架深入分析大风浪中海难事故的人为和组织因素，并提出相应的预防措施。研究首先介绍了 HFACS-MA 框架及其相关理论模型，包括瑞士奶酪模型、SHEL 模型和 HFACS 框架。接着，本文以“埃尔法罗”号沉船事故为案例，运用 HFACS-MA 框架对其进行了系统分析，识别了事故中的人为和组织因素。研究结果表明，船长的不当决策、船员的操作失误以及公司管理层的监督不充分是导致事故发生的主要原因。基于分析结果，本文提出了针对船员、组织和外部因素的建议，以减少大风浪中人为和组织因素导致的海难事故发生率。本文补充了现有研究的不足，也为海运企业和主管机关等单位提供了可行的风险管理和事故预防参考。

关键词：HFACS-MA 框架；大风浪；海难事故；人为因素；组织因素

1 引言

多年以来，随着技术水平的持续提高，由人为因素引发的各种海事事故越来越突出，根据国际相关组织和机构的调查研究表明，其中 80%以上的海上事故与人为因素有关[1]。尽管人为因素在船舶碰撞、搁浅等海事事故中已经得到了较为广泛的研究，一定程度上减少了这些事故的发生[2]。然而，在大风浪等极端环境下的海难事故研究却仍显不足，而这些事故往往会造成船毁人亡的重大悲剧。

国际海事组织（IMO）通过 20 世纪 80 年代几次重大事故的发生，特别是在 1987 年 3 月 Herald of Free Enterprise 客滚轮海难后，意识到人为错误往往是海事事故的主要成因，为了消除和减少人为因素对海上安全的负面影响，IMO 于 1999 年通过了 A.884(2.1)《海事中人为因素调查指南》，该指南采用“瑞士奶酪”和 SHEL 模型，向海事调查员提供了海事中人为因素调查的方法和程序的操作性建议,以避免在调查中将事故简单地归咎于技术因素的偏见[3][4]。然而，IMO《海事中人为因素调查指南》的一个缺陷是它没有一个特定的人员与组织因素框架来说明各种偶发因素之间的类别和因果关系。为此，Shih-Tzung Chen 等基于 HFACS 提出了 HFACS-MA（Human Factors Analysis and Classification System for Maritime Accidents)框架，该框架综合了 Reason 的 Swiss Cheese 模型、Hawkins 的 SHEL 模型及 IMO 的指导原则，旨在为海难事故调查提供一个专门的人为与组织因素框架，用于收集相关信息或证据，以确定并建立它们之间的作用关系[5]。

2 海事人为因素分析与分类（HFACS-MA）框架及其相关理论模型

2.1 瑞士奶酪模型

“瑞士奶酪”模型（“Swiss Cheese”Model），也被称为 Reason 模型，由英国曼彻斯特大学的詹姆斯·里森（James Reason）于 20 世纪 90 年代在其著作《Human Error》中提出[6]。该模型由四个防御层面构成，每个防御层面都是阻挡事故发生的屏障。在现实工作中，这些起屏障作用的防御层面上均会存在一个或多个防御漏洞或缺失，犹如瑞士奶酪片中的一个个孔洞。当危险源作用于系统时，系统中的奶酪片便会形成防御体，以阻挡危险源的前进，然而，当代表危险的光束从那些恰好排列成一条直线的孔洞中穿出时，事故就会随之发生。这些存在孔洞的奶酪片分别代表了系统中的不安全行为、不安全行为先兆、不安全监督和组织影响[7]，如图 1 所示。

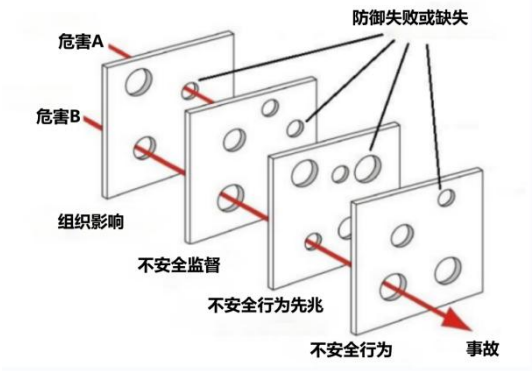


图 1 “瑞士奶酪”模型

2.2 SHEL 模型

SHEL 模型最早由 Edwards 教授于 1972 年提出，后经荷兰皇家航空公司的 Frank H.Hawkins 机长的修改，从而使其更加完善[8]。SHEL 模型通过分析人和系统中的其他几个因素相互影响，可以更全面地理解事故原因。

SHEL 模型将事故原因分为四个因素：软件 S（Software）、硬件 H（Hardware）、环境 E（Environment）和人 L（Liveware），如图 2 所示。

图 2 SHEL 模型

2.3 HFACS 框架

HFACS（Human Factors Analysis and Classification System）框架是 Douglas A. Wiegmann 和 Scott A. Shappell 两位学者通过收集和分析了大量航空事故中的关键因素后，在 James Reason 的“瑞士奶酪”模型基础上进行构建的，该框架对“瑞士奶酪”上的孔洞进行了定义，旨在将人为失误的理论研究与实践应用有效地结合起来。

HFACS 框架的开发和应用，为航空事故调查提供了一种更为科学和系统的方法。它不仅帮助调查人员识别直接的事故原因，还揭示了背后更深层次的组织和监督问题。通过 HFACS 的应用，航空业能够更有效地设计安全程序、培训计划和政策，以减少人为失误并提高整体的飞行安全。多年以来,HFACS 框架不仅在航空安全领域一直扮演着重要角色,也在其他行业中得到了广泛借鉴和应用[9]。

2.4 HFACS-MA 框架及其各部分有机组成关系

本文采用的 HFACS-MA 框架，是在 HFACS 框架的基础上做了一些适当的修改后建立起来的，包括将 IMO 指南的内容纳入 HFACS 的第一层（即不安全行为）和第二层（即不安全行为先兆），以及在管理层（不安全的监督和组织影响）之外增加了一个额外的层次（即外部因素）。在不安全行为先兆层次中，它遵循 SHEL 模型作为核心，以区分因果因素的类型。此外，在第五（即顶部）层次中，还考虑并分类了超出管理范围的外部因素[5]。HFACS-MA 框架如图 3 所示。

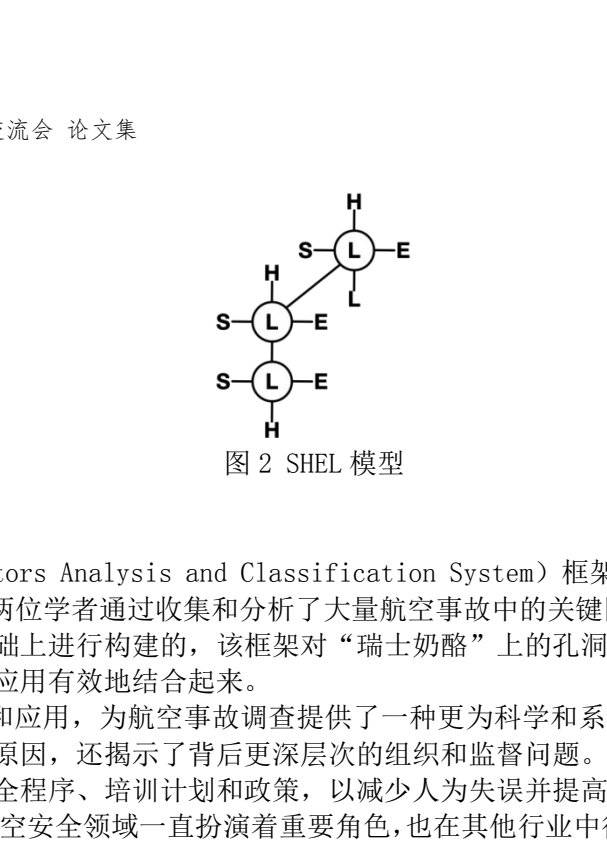


图 3 HFACS-MA 框架

2.4.1 不安全行为

不安全行为可以分为以下几种类型：

1）基于技能的失误：这些错误涉及失误和疏忽。失误是不注意而导致的无意行为，而疏忽则是不记得而导致的无意行为。

2）基于规则的错误：这些错误涉及将环境迹象与已知问题解决规则的情境部分不适当匹配。

3）基于知识的错误：当个体耗尽适用的解决问题程序时，就会发生这些错误，此时他们被迫“在线”工作，使用缓慢、连续、费力且资源有限的有意识处理。

4）常规性违规：其因果因素通常是习惯性的，经常被主管机构容忍。它们每天都会发生，因为人们习惯性地修改或严格遵循工作程序，通常是因为工作实践设计不当或定义不清。

5）偶然性违规：其因果因素通常是工作实践的一次性违规，例如故意忽视安全规定来完成任务。尽管如此，意图并非恶意行为，只是为了完成工作。

2.4.2 不安全行为先兆

不安全行为先兆包括以下几点：

1）操作者状况（SHEL 模型中的 Liveware）：指的是可能对个人执行工作产生不利影响的状态，包括心理和生理状态以及实践者的心理/身体限制，比如船长在应急工作中的状态。

2）软件（SHEL 模型中的 S-Software）：系统的非物理部分，包括电子海图、技术服务以及日益增多的计算机程序等。

3）硬件（SHEL 模型中的 H-Hardware）：工作场所的物理部分。它包括雷达、风速仪等。

4）物理环境（SHEL 模型中的 E-Environment）：自然环境因素，可能影响个人行为，导致人为错误或不安全情况。

5）技术环境（SHEL 模型中的 E-Environment）：强调人工环境构造的因素，例如航线设计的合理性、台风预报的精确度等。

6）外围人员（SHEL 模型中的 L-Liveware）：系统的人与人之间的互动，包括管理、监督、船员互动和沟通等因素。

2.4.3 不安全的监督

不安全监督可以分为以下几种类型：

1）监督不充分：监督未能识别危险、认识和控制风险、提供指导、培训和/或监督等因素，导致人为错误或不安全情况。

2）计划不恰当的操作：监督未能充分评估某项操作相关的危险，允许不必要的风险。

3）未能纠正已知问题：监督未能纠正文件、流程或程序中的已知缺陷，或未能纠正个人的不适当或不安全行为，从而造成不安全情况。

4）监督违规：监督故意忽视指示、指导、规则或操作说明，同时管理组织资产，造成不安全情况。

2.4.4 组织因素

组织因素可以分为以下几种类型：

1）资源管理：包括关于组织资产（如人员、资金、设备和设施）的分配和维护的企业层面决策领域。

2）组织氛围：组织内部的工作氛围，包括文化、政策和结构。

3）组织流程：指企业决策和规则，这些决策和规则规定了组织内部日常活动的管理。这包括建立/使用标准操作程序，以及正式方法来维持对工作队伍的监督。

2.4.5 外部因素

外部因素可以分为以下几种类型：

1）法规、法规漏洞：现有规则或指导海事行业和相关当局的规范的不足之处。

2）管理疏忽：管理当局在实施现有规则或规范，或在其职责履行中的不足之处。

3）设计瑕疵：系统设计不佳，例如对系统/组件的人体工程学和可维护性考虑不足。

3 对“埃尔法罗（SS El Faro）”沉没事故的案例分析

3.1 事故概况

2015 年 10 月 1 日，美国籍商船“埃尔法罗”轮（SS El Faro），在从佛罗里达州至波多黎各的航行中直接驶入了飓风华金（Hurricane Jaoquin）的风暴中心，并在大西洋中沉没，船上 33 人全

部遇难[11]。

3.2 用 HFACS-MA 框架对该案例的分析研究

根据美国国家运输安全委员会 NTSB(National Transportation Safety Board)的调查报告显示，调查通过船载 VDR 等手段对事故进行了还原，从中可以看出本起事故是由一系列的安全隐患相叠加后酿成的重大灾难，其中有很大一部分原因都和人为和组织因素有关。我们可以用 HFACS-MA 框架对其进行深入分析，为了能从最接近事故征候的状态回放分析各层次的核心因素，我们按照“不安全行为—不安全行为先兆—不安全监督—组织因素—外部因素”这一顺序进行分析研究。

3.2.1 不安全行为分析

1）失误

船长在对飓风的判断出现了严重失误。本事件的调查报告中确认船长没有对 Inmarsat-C 站等不同来源的最新飓风预报进行正确分析，一味地盲目相信已过期的气导公司给出的飓风路径预报，从而将船舶带向飓风中心。

2）违规

船长无视驾驶台值班规则，在船舶临近飓风中心的 9 月 30 日晚上大约 20:00 离开了驾驶台。直到次日凌晨大约 4:00 才再次上驾驶台。期间值班驾驶员多次呼叫船长上驾驶台，并建议改变航向以尽可能避开飓风，但均遭拒绝。

3.2.2 不安全行为先兆分析

1）操作人员状态

船长作为船舶主要操作者，他的行为和决策在事故中扮演了关键角色。在面临飓风华金时，他虽然收到了多个飓风预报，但由于他的过度自信等消极因素，并没有及时改变航线以避开风暴。相反，他选择继续按照原定航线航行，使得船舶直接驶进飓风中心。

2）人与软件

船长使用了严重滞后的气象导航信息。船长所依赖的 BVS 提供的气象导航服务存在信息滞后的问题，与通过 Inmarsat-C 获得的国家飓风中心信息相比，存在大约 6 小时的延迟。尽管 BVS 系统会在 30 分钟后发送更新过的飓风信息，但“埃尔法罗”号没有选择接收这些更新过的文件。

调查显示，船长通常在收到天气包后约 1 小时内下载，但在沉船前一天晚上收到的 BVS 电子邮件直到 10 月 1 日早上 04:45 才被下载，间隔了近 6 小时。加上预报本身存在的 6 小时延迟，这意味着最后关头船长所依赖的飓风信息已经滞后了 12 小时。

图 4 是“埃尔法罗”在 10 月 1 日早上大约 05:00 左右的船位信息和其所收到的两个不同来源的飓风位置信息的对比图。图中蓝色虚线为 BVS 在前一天对飓风的预报轨迹，红色虚线为 Inmarsat-C 对飓风的最新预报轨迹，绿色实线为“埃尔法罗”的航行轨迹。

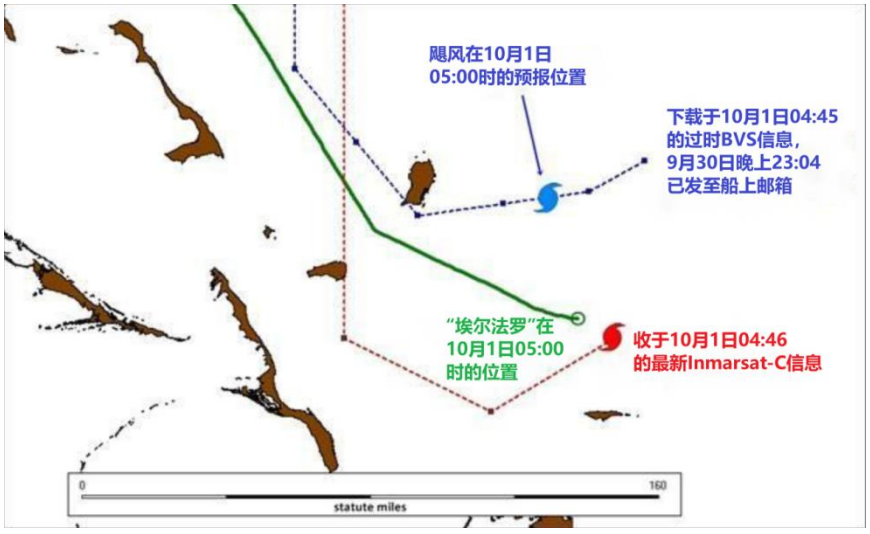


图 4 “埃尔法罗”沉没前新、旧飓风路径预报对比

3）人与硬件

船上风速仪失效。船载 VDR 对风速仪数据的记录证明了这一点，这种情况可能导致船员对实际天气条件产生误解，从而影响他们的决策和应对措施。

4）人与物理环境

2015 年 10 月 1 日事发当时，飓风华金风速达到了 110 节（超强台风级别），由于极端恶劣天气对船舶造成的剧烈摇晃和冲击，船员在这种环境下会难以进行正常操作，从而导致操作失误，同时也会导致船员感到恐慌和焦虑，影响他们的判断和决策能力。

5）人与技术环境

美国官方对华金飓风路径的预报存在很大误差。由于飓风模型的预测缺陷，美国官方对于飓风华金运动轨迹预测误差在所有预测时段都高于过去 5 年的平均值。图 5 为截至 10 月 1 日时，飓风华金的实际运动轨迹（蓝色）和美国官方 5 天内的各条预测路径（黑色）对比图。

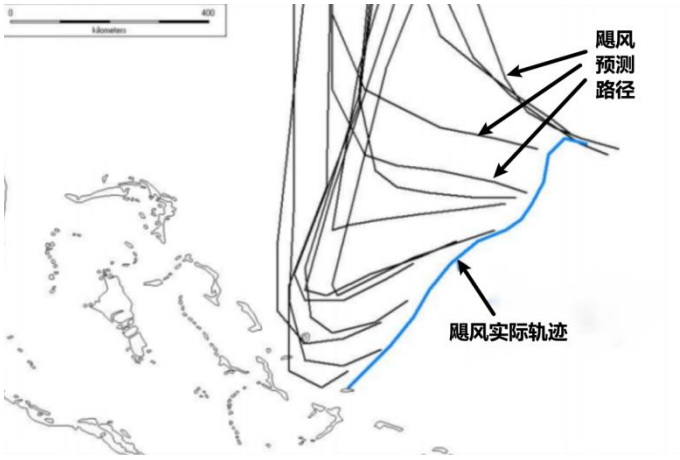


图 5 飓风华金的实际轨迹（蓝线）和预测路径（黑线）对比

6）人与人

船长无视船员的安全建议，多次否定值班驾驶员改变航线以避开飓风的建议。

3.2.3 不安全监督分析

1）监督不充分

极端天气条件下的风险识别和控制存在严重漏洞。如图 6 所示，船体存在较多通风口，但却未将船体外侧的百叶通风口等通风设施识别为大风浪天气时的风险点并加以控制，船舶航行时，这些通风口保持打开状态。



图 6 “埃尔法罗”右舷的 3 号货舱通风口

2）计划不恰当的操作

航路选择不当。船长没有根据当时的天气情况选择最安全的航线，而是选择了一条接近飓风华金的航线，而公司体系文件中没有对航行计划或恶劣天气操作做出风险评估的要求。

3）未能纠正已知问题

没有在飓风来临前纠正违规绑扎。“埃尔法罗”号的系固手册规定，车辆必须由四根专用绑扎带分别紧固于甲板 D 令上，但实际上绑扎带只是被连接于一条共用的长链条上，如图 7 所示。尽管在之前的检查中发现了车辆绑扎的违规问题，但这些问题在事故航次并没有得到纠正。



图 7 多辆汽车被绑扎到一根链条上

4）监督违规

装货过程未进行有效监督。在事故航次装货期间，公司负责货运的主管人员正在休假，码头经理作为替代者并没有与“埃尔法罗”船长讨论过天气情况，码头工人在为滚装货物进行违规绑扎后，船员也没有针对恶劣天气的影响要求对货物进行额外的绑扎或其他任何纠正措施，大副甚至没有查看过任何绑扎清单。

3.2.4 组织因素分析

1）资源管理

（1）公司岸基没有人正式负责海上船舶的监控工作。

（2）公司岸基没有人负责监控飓风信息，也未向船舶发布任何飓风警报。

（3）公司管理层的工作重点向 LNG 新船倾斜。公司海事安全总监的主要关注点（85%的时间）已转移至新造的 LNG 船舶上，对像“埃尔法罗”这样的老旧船舶投入的关注和资源明显不足。

2）组织氛围

（1）公司以准时著称。“埃尔法罗”有 90%的准时率。当船长处于这种组织氛围中时，可能会因按时完成任务而提高风险容忍度，并影响他对天气情况的全面评估。

（2）忽视应对恶劣天气影响的安全培训。“埃尔法罗”上使用气象导航 BVS 天气预报和分析程序的船员未接受过任何正式的系统培训。同时，船舶的月度安全会议也很少讨论有关防御飓风的预案。

3）组织流程

公司应急反应小组的训练计划中没有包括恶劣天气的训练项目。

3.2.5 外部因素分析

1）法律、法规漏洞

“埃尔法罗”可能并未携带破损控制图或破损控制手册。根据 SOLAS 公约，只有在 2009 年及以后建造的船舶上才需要向船长提供必要的信息。由于“埃尔法罗”最后一次改装是在 2009 年之前，因此这些要求并不适用于它。

2）管理疏忽

海岸警卫队对蒸汽船的安检力量薄弱。调查发现，实施轮机安全检查的海岸警卫队人员并不具备蒸汽船检查资格，一些检查员严重缺乏海上经验，这限制了他们根据检查准确评估船舶状况的能力。

3）设计瑕疵

主机润滑油舱设计瑕疵。主机润滑油舱设计瑕疵是导致船舶失去动力的一个重要因素。“埃尔法罗”润滑油系统的润滑油泵吸口位于油舱的右舷后部，因此船舶在向左前倾的时可能会使吸口外露，最终导致主机失去润滑油后停止运转。如图 8 所示。

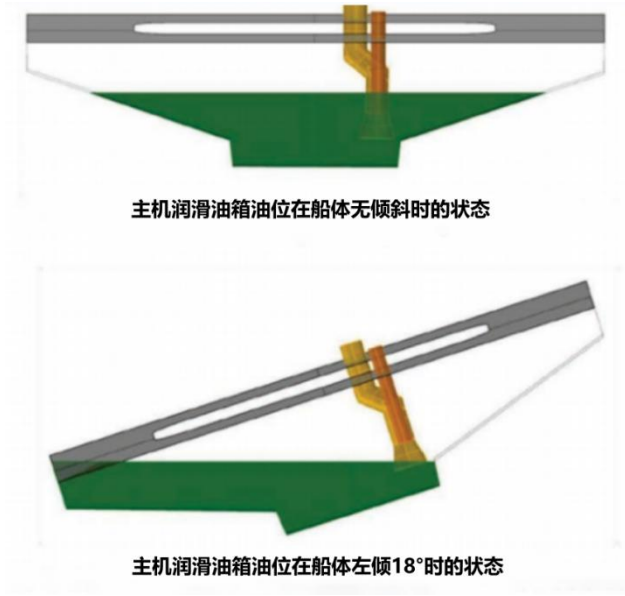


图 8 主机润滑油舱中润滑油量不足情况下的系统工况

4 防范大风浪中海难事故发生的建议

通过利用 HFACS-MA 框架对典型案例的深入分析后，可以较为清晰地得出各人为和组织因素对大风浪中海难事故的影响方式，本文综合考虑以上分析结论，提出以下建议，以便合理降低大风浪中不良人为和组织因素出现的概率，切断事故致因人为和组织因素因果关系链条，有效预防大风浪中海难事故的发生。

4.1 船员人为因素的建议

（1）提高船长的气象研判水平。船长作为船舶总指挥，在面对极端天气时，他能否做出正确的判断和决策是至关重要的，直接决定着船舶和人员的安危，因此作为船长必须加强对航海气象学的学习和研究。同时，船长在实际工作中应及时更新气象信息，以确保拥有最新的气象数据用于分析。

（2）加强驾驶台资源管理的正确运行。驾驶台团队应培养良好的团队合作意识，相互支持和协作。船长应以身作则鼓励船员之间建立开放的沟通环境，同时，船员也要有对船长的不合理行为提出合理建议的勇气，特别是船舶在大风浪等恶劣天气中航行时，船长、驾驶员、操舵水手等参与驾驶台航行的人员应充分了解自己在驾驶台团队中的职责，做好团队内部的沟通协调，分享重要信息和经验，全面识别航行中存在的风险隐患并共同应对各种挑战。

（3）增强船员的应急能力。船员应定期通过参与应急演练，提高应对突发情况和紧急事件的能力。通过模拟不同的紧急情况，如船舶失控、火灾、进水等，船员可以学习如何快速、有效地采取行动，并进一步提高团队人员之间的合作和协调能力。

（4）提高船员对关键性设备的操作能力。船员应通过参加定期的理论培训提高对船舶设备的理论知识，通过模拟训练和实际操作熟练掌握对关键性设备的操作方法和技巧，从而提高工作效率和安全性。

（5）增强船员的安全意识。船员应始终保持对安全的关注和警觉，遵守安全规程和操作指南。通过参加定期的安全培训、研讨会和案例分析，增强自己的安全意识，进而能够更好地识别和预防潜在的安全风险。

4.2 组织因素的建议

（1）提供船长气象知识培训。针对船长实施强制性的气象知识培训并定期进行知识更新，确保船长能够正确理解并应用气象信息，以做出明智的航行决策。这可以通过在线课程、面对面授课或模拟器训练来实现。

（2）及时接收并发布气象警报。公司要建立有效的信息传递机制，确保船长能够及时接收到最新的气象预报和警告。这可以通过安装先进的气象信息系统、卫星通讯设备或使用专业的气象服务来实现。

（3）建立并强化恶劣天气期间系统化的风险监控。船长应根据最新的气象预报和风险评估结果选择最安全的航线。公司要设专人负责对航行计划进行审核，确保船长在制定航行计划时充分考虑

天气、海况、船舶状况等多种因素。定期检查船舶的关键性设备设施，如通风设施、绑扎设备、机电设备、动力系统等，以识别潜在的风险点。同时，建立有效的沟通渠道，鼓励船员提出实际工作中风险识别和评估程序的意见和建议。一旦发现违规或潜在的安全问题，公司应制定明确的纠正措施程序，包括立即停止相关操作、评估风险、制定整改计划和跟踪落实情况等。

（4）制定明确的操作规程。针对极端天气条件，公司应制定详细的操作规程，包括对关键设备的操作限制和应急措施。这些规程应明确在恶劣天气下如何调整操作参数，以减少风险。船员应接受关于特殊天气下操作规程的培训，并定期进行相关演练。

（5）提供专业指导。公司应为船舶提供专业指导，特别是在特殊情况下，如恶劣天气下的气象分析、货物装载、主机操作限制等的控制。这些指导应基于最新的安全标准和操作实践，以帮助船员正确执行任务。

（6）加强对老旧船舶的资源倾斜。公司应加强对老旧船舶的关注和资源投入，这包括投入更多的维护资金、指定更为老练的监督人员等措施，确保这些船舶可以更为有效地应对恶劣天气所带来的风险。

4.3 外部因素的建议

外部因素的具体表现形式集中体现在各领域的人为和组织因素内。

（1）优化官方检查力量。主管机关应加强安检人员的专业性，确保实施安全检查的人员具备必要的资格和经验，特别是在对包括蒸汽船等在内的不太常见的船型检查时，更是如此。

（2）完善法律、法规。海事主管机关和权威组织应根据实际情况持续对相关法律、法规进行修订和完善。

（3）优化船舶设计，减少因设计瑕疵带来的风险隐患。这包括案例中提到的主机润滑油系统等设备设施的优化设计，这些优化设计要尽可能多地考虑到船舶在恶劣天气时可能会遇到的问题。

（4）建立各方有效的沟通和协作机制：主管机关和船级社应与船公司、制造商等各方建立有效的沟通和协作机制，以促进安全信息的共享和最佳实践的推广。

5 结语

本文利用 HFACS-MA 框架对大风浪中的海难事故进行了深入研究，特别关注了人为和组织因素在事故中的作用。通过对“埃尔法罗”沉船事故的案例分析，本文揭示了人为错误和组织缺陷如何相互作用并导致灾难性的后果。研究成果可以为海运企业和主管机关等单位提供可行的风险管理和事故预防参考，尽可能防止船舶在极端环境下发生严重事故，确保人员和财产安全。

参考文献

[1] 刘正江.船舶避碰过程中的人的可靠性分析[D].大连海事大学,2004.
[2] Uğurlu Ö, Yıldız S, Loughney S, et al. Modified human factor analysis and classification system for passenger vessel accidents (HFACS-PV)[J]. Ocean Engineering, 2018, 161: 47-61.
[3] IMO.(2000).Amendments to the code for the investigation of marine casualties and incidents(Resolution A.849(20)),(Resolution A.884(21)).London:the Author.
[4] 夏海波,胡甚平.海事中人为因素的调查与分析[J].交通部上海船舶运输科学研究所学报,2004(01):61-64.
[5] Chen S T, Wall A, Davies P, et al. A Human and Organisational Factors (HOFs) analysis method for marine casualties using HFACS-Maritime Accidents (HFACS-MA)[J]. Safety science, 2013, 60: 105-114.
[6] Reason J.Human error[M].Cambridge university press,1990.
[7] Reason, J., 1997. Managing the Risks of Organizational Accidents. Ashgate, England,Aldershot, ISBN 1-84014-105-0.
[8] 谢放.基于 Reason-SHEL Model 对海事事故人为因素的分析[D].大连海事大学,2007.
[9] 刘思航.基于 HFACS 的海上碰撞事故人为因素分析[D].大连海事大学,2021.
[10] Wiegmann D A,Shappell S A.A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis:The Human Factors Analysis and Classification System[J].2003.
[11] Marine Accident Report.National Transportation Safety Board.Sinking of US Cargo Vessel SS El Faro Atlantic Ocean,Northeast of Acklins and Crooked Island,Bahamas October

1,2015.490 L'Enfant Plaza SW Washington,DC 20594

作者简介：黄迪，无限航区船长，手机号：18605741116，邮箱：406862731@qq.com

提高虾峙门和条帚门航道通航效率的研究

陈月海，王炳武，陈晓，张航

（宁波引航站， 浙江 宁波，315000）

摘　要：随着宁波舟山港吞吐量的逐年增加，进出港的大型船舶数量持续增长。两个主航道虾峙门航道和条帚门航道通航压力越来越大。该文章结合了多年的实践经验，采取了回归分析法，总结出影响通航效率的因素，以及各种因素之间的关系。通过对交通密度、船舶通航速度和交通流量之间的关系分析得出提高上述两个航道通航效率的合理方法，以期能够提高整个港口的生产效率。

关键词：虾峙门；条帚门；通航效率

引言：

目前，宁波舟山港交通管理越来越规范，通行效率也比以前有了很大的提高。对于虾峙门和条帚门进出口船舶计划的制定和实施的规范化，大大提高了船舶通行的效率和安全性。同时，宁波引航站针对虾峙门航道和条帚门航道大型船舶会遇距离的研究也初见成果。宁波舟山港也正在准备实施条帚门航道的炸礁工程，以期提高该航道的使用效率。本文试图从实践角度出发，结合相关交通流的研究方法，对虾峙门航道和条帚门航道的管理和使用提出自己的意见和想法。

1. 虾峙门航道和条帚门航道交通流现状

1.1 虾峙门和条帚门航道诸要素介绍

虾峙门航道包括虾峙门口外深水航槽、0 号警戒区、第一分道通航制、第一双向航路至 1 号警戒区南端边线，如图 1 所示。

条帚门航道依次包括 5 号警戒区、第十三分道通航制、第十四分道通航制、第二双向航路、第十五分道通航制、第十六分道通航制至 7#警戒区南端边线，如图 1 所示。



图 1 总平面布置图

1.2 虾峙门航道流量统计

为了掌握虾峙门航道船舶交通流量，我们在虾峙门东口和西口选取两条门线，统计了 2022 年全年的船舶交通流数据。虾峙门东西口AIS 船舶流量统计量如表 1 所示。

表 1 虾峙门东口和西口 2022 年全年AIS船舶流量统计表

	上行	下行	总计
东口总流量	21436	19605	41041
西口总流量	27679	29958	59664

从上表可知，2022 年全年通过虾峙门东、西门线的平均流量为 50353 艘次。按照全年全时段通航计算，得知每小时有 3 艘 90 米以上的船舶通过东、西门线。由此可见，除高峰时段以外，航道平均通航密度并不大，航道通航效率还有很大的提升空间。

1.3 条帚门门航道流量统计

为了掌握条帚门航道船舶交通流量，我们在条帚门东口和西口选取两条门线，统计了 2022 年全年的船舶交通流数据。条帚门东西口门线AIS 船舶流量统计如表 2 所示。

表 2 条帚门东口和西口 2022 年全年AIS 船舶流量统计表

	上行	下行	总计
东口总流量	10353	9265	19618
西口总流量	28246	27040	55286

从上表可知，2022 年全年通过条帚门东、西门线的平均流量为 37452 艘次。按照全年全时段通航计算，得知每小时有 1.5 艘 90 米以上的船舶通过东、西门线。由此可见，除高峰时段以外，航道平均通航密度并不大，航道通航效率还有很大的提升空间。

2.目前虾峙门航道和条帚门航道交通流的现状和问题

2.1 虾峙门航道

目前虾峙门航道是大型矿船，大型油船，超大型集装箱船（船长 366 米以上）和LNG船舶的唯一航道。根据《宁波舟山港核心港区船舶交通组织实施办法》，船舶通过虾峙门、条帚门航道时应与前船保持安全距离，其中船长 200 米以上的船舶应与前船保持 1 海里以上的安全距离。超大型油轮应与前船保持 1.5 海里以上距离。但是交通流密集时编队船舶之间很难保持 1 海里以上的安全距离。

该办法还规定，航速低于 7 节的船舶原则上应避开重点疏导时段通过虾峙门航道。但是在高峰时段，偶尔有小型船舶，工程船舶等也从虾峙门进出，导致了交通流速度明显下降。此外，该办法还规定两万总吨以上的船舶应避免在下栏山前后 500 米处交会。这就导致很多船舶为遵守这一规定协调减速，从而造成交通流速度明显减慢，特别是在雾航管制解除后 1-3 小时时段或者台风来临前后疏港的交通流高峰时段。

根据统计，虾峙门航道在长时间封港后，再开港后的 1-3 个小时，每小时通行的船舶约为 12 艘次，即进口船 6 条，出口船 6 条。根据公式计算平均交通流密度 ρ =q/l（l为航道长度）如下表 3 所示。

表 3 高峰时段虾峙门交通流情况统计

进港艘次	出港艘次	航道长度	交通流速度	交通流密度	船舶间距	航道限速	交通流量
6	6	7	6.8 节	1.76	1.1 海里	12 节	12 艘

（数据来源于宁波VTS）

根据 2022 年的流量统计数据，年均每小时有 2.4 艘 150 米以上的船舶通过东、西门线。高峰时段通行的船舶绝大多数为 150 米以上的船舶（封港时段，小型船舶多数会选择其他未封航的航门进出港）。可见高峰时段通的 12 艘次远大于年均艘次(根据全年全时段通航计算，可知每小时有 3 艘 90 米以上的船舶通过东、西门线。)。

2.2 条帚门航道

条帚门航道是典型的岛礁航道，航门多、航道内码头多。目前，海事部门对小黄礁的进出口船舶实行单向通航，这样大大降低了小黄礁附近的交通流速度。

根据统计，虾峙门航道在长时间封港后，再开港后的 1-3 个小时时段，每小时可通行的船舶为 8 艘次。即进口船 4 条，出口船 4 条。该航道长度为 10 海里。根据公式计算平均交通流密度 ρ=q/l（l为航道长度）如下表 4 所示。

表 4 高峰时段条帚门交通流情况统计

进港艘次	出港艘次	航道长度	交通流速度	交通流密度	船舶间距	航道限速	交通流量
4	4	10	10 节	0.8	2.5 海里	16 节	8 艘

（数据来源于宁波VTS）

根据 2022 年的流量统计数据，平均每小时有 0.7 艘 150 米以上的船舶通过东、西门线，高峰时段通行的船舶绝大多数为 150 米以上的船舶（封港时段，小型船舶多数会选择其他未封航的航门进出港），可见高峰时段通行 8 艘次远大于年均艘次（根据全年全时段通航计算，平均每小时有 1.5 艘 90 米以上的船舶通过东、西门线）。

3. 交通流各个变量及其关系分析

1）平均交通流量 $q=\frac{Q}{T}$（Q 为通过航道的船舶艘次，t 为时间段）

2）平均交通流密度 $\rho=\frac{Q}{l}$（l 为航道长度）

3）平均交通流速度 μ

某一时刻t，某处x的交通流量、交通流密度、交通流速度分别用 $q(x,\ t)$ $\rho(x,\ t)$ $\mu(x,\ t)$ 表示，

其中 $\mu(x,\ t)$ 代表交通流的速度，非某一船舶的速度。根据交通流的计算公式：

$$q(x,\ t)=\rho(x,\ t)\ \mu(x,\ t)$$

可知：要使交通流 $q(x,\ t)$ 最大，则必须 $\rho(x,\ t)$ $\mu(x,\ t)$ 都最大。

要想取得通航密度和通航速度的最大值 ρ_m 和 μ_m，并遵循航道内的通航守恒时，只需要不断增加航道内通航密度和通航速度。但是在现实通航环境中，各类船舶的性能不尽相同，而且受操作人员的技术水平、航道限速等诸多因素影响，不可能无限制的增加通航密度和通航速度。

4. 改善交通流的模型算法

根据第 2 章虾峙门和条帚门航道原有的高峰时段交通流状况，我们进行以下假设：将虾峙门的平均交通流速度提升至条帚门航道高峰时段的通航速度 10.2 节。（上述数据的假设，一方面是从真实数据的借鉴，这些数据是从长期实践中总结出来的，同时也符合海事部门的相关规定。另一方面，我们也考虑了计算上的便利性。）

根据上述交通流量和交通流密度的计算方法 $q=\rho_m\mu$，$\rho=\frac{Q}{l}$ 假设在双向不受其他限制条件保持匀速通航时，且遵循交通守恒定律，进航道的船舶流量等于出航道的船舶流量，计算出虾峙门航道提升交通流速度后的交通流状况如下图 5 所示：

表 5 改善后虾峙门交通流情况

进港艘次	出港艘次	航道长度	交通流速度	交通流密度	船舶间距	航道限速	交通流量
9	9	7	10.2 节	1.76	1.1 海里	12 节	18 艘

同理，将条帚门航道内将船泊间距缩短至虾峙门航道高峰时段的船舶间距 1.1 海里，（注解 1）条帚门航道提升交通流密度后的交通流量如下表 6 所示：（上述数据的假设，一方面是从真实数据的借鉴，这些数据是从长期实践中总结出来的，同时也符合海事部门的相关规定。另一方面，我们也考虑了计算上的便利性。另外，针对海事部门对条帚门航道内小黄礁附近狭窄航段内禁止船舶交会的规定，计算条帚门航道内的通航密度时对船舶数量作了修正，减少了两个艘次。）

表 6 改善后条帚门交通流情况

进港艘次	出港艘次	航道长度	交通流速度	交通流密度	船舶间距	航道限速	交通流量
8	8	10	10 节	1.6	1.1 海里	16 节	16 艘

从表 5 可知，经过改善后的虾峙门航道每小时可通行的船舶艘次为 18 艘次，比原有的 12 艘次提高了 6 艘次，提高的效率可达 50%。

从表 6 可知，经过改善后的条帚门航道每小时可通行的船舶艘次为 16 艘次，比原有的 8 艘次提高了 8 艘次，提高的效率可达 100%。

5. 提高通航效率的具体建议

5.1 提高虾峙门航道高峰时段的通行速度 μ，可以通过以下具体方法来实现：

1）适当放宽下栏山航段船舶避免交会的吨位，由原来的 2 万总吨放宽至 5 万总吨；

根据《虾峙门、条帚门狭窄水域超大型船舶安全会遇距离研究报告》，虾峙门狭口段宽度 700 米，进口船一般保持 180 米,出口船距离南边线 120 米。在较好的风、流及能见度的条件下，虾峙门航道狭窄水域交会两船的船宽之和只要满足两艘船船宽之和≤123 米。这样两船之间的会遇距离还有 700-180-120-123=277 米，完全满足大型船舶的交会条件，故建议把原有的条件放宽至 5 万总吨。

2）相差半小时以内进出口的船舶，应尽量考虑让速度快的船舶排在前面，以增加交通流密度；

3）根据下栏山航段处的流压特点，在涨流时段，流压角较小，大型船舶在此交会可以不受限制；

4）整个虾峙门航道分第一双向航路和第一分道通航制两段，在第一分道通航制水域，可航水域宽度有 0.8-1.0 海里，这一段水域宽度完全可满足交会需求。在第一通航分道至零号警戒区，LNG进出口时可以与进出口船交会，这样就可以减少因LNG船进出港对交通流的不利影响。

5.2 提高条帚门航道的通行密度 ρ 和通行速度 μ，可以通过以下具体方法来实现：

1）扩大条帚门航道吨级，可以使进出梅山码头和六横岛船厂的船舶都从条帚门进口。这样不仅可以提高通航密度，也可以避免这些船舶在一号警戒区与进出口船交会。

2）条帚门航道小黄礁航段，可以根据船舶尺度进行划分，允许一万载重吨以下的小型船舶在小黄礁附近交会。

5.3 其他改进通航效率的方法

1）能见度小于 1000 米时，可以考虑实行单向通航。即条帚门航道只出口，虾峙门航道单向进口。小型船两船之间应保持 2 海里的距离，大型船则应保持在 3 海里的距离。这样虾峙门航道可以容纳三条船编队进口，而条帚门则可以容纳四条船编队出口。这样可以让交通流持续流动，有效减少再次开港后爆发式增加的交通流量和交通流密度。

2）一号警戒区到七号警戒区的第十八通航分道适当拓宽（见图 1），轴线向北抬升并且加宽至原来的两倍。如果该分道拓宽，就可以有效疏导两个航道内的船舶，使之可以更高效的进出航道，避免交通流拥堵。

3) 高峰时段，由于虾峙门和条帚门两个航道进出口船和国轮、渡轮在一号警戒区交会频繁，交通流密度特别大，很容易造成通行速度放缓。所以在该时段，建议允许七号警戒区至小洋猫东之间来往的船舶可以不经过一号警戒区，以减少一号警戒区的交通流密度，提高虾峙门航道船舶交通流速度。
4） 增加双航道的救援能力。建议在虾峙岛合适位置停泊两条五千匹以上大马力拖轮，可以方便快速的抵达虾峙门和条帚门航道。在有船舶出现机械故障，或者其他险情时，有足够的救援能力，尽快处置突发情况，让航道快速恢复通航。而且，应急救援的拖轮在有大型船舶或者重点船舶进出口时，应保持随时备车状态，以尽量缩短应急反应时间。

6.结论

从以上的分析可以看出，改善虾峙门和条帚门航道的通航效率，还有很多途径和方法。不仅可以通过炸礁，拓宽航道来实现，还可以通过更合理的利用通航分道来实现；不仅可以通过调整船舶限速来实现，还可以通过调整船舶编队来实现。如何充分利用有限的航道条件，如何提高管理水平都是值得我们研究的课题。研究出更合理的通航速度，更合理的船舶交会尺度限制，更合理的交通流密度，都可以更好的提高这两个航道的通航效率。

参考文献

[1]《宁波舟山港核心港区船舶交通管理系统安全监督管理规则》，浙江海事局，2016 年 8 月 1 日起施行
[2]《宁波舟山港核心港区深水航路船舶定线制管理规定》，浙江海事局，2016 年 8 月 1 日起施行
[3]《宁波舟山港核心港区船舶交通组织实施暂行办法》，浙江海事局，2019 年 12 月 1 日起实施。
[4]《虾峙门、条帚门狭水道超大型船舶安全会遇距离研究》，宁波大港引航有限公司，大连海事大学， 2023 年 12 月。

作者简介：
陈月海，宁波引航站高级引航员 宁波大港引航有限公司 浙江省宁波市绿园大厦 25 楼 13505741620 418163934@qq.com
王炳武，宁波引航站高级引航员 宁波大港引航有限公司 浙江省宁波市绿园大厦 25 楼 13780081892
陈晓，宁波引航站助理引航员 宁波大港引航有限公司 浙江省宁波市绿园大厦 25 楼 18892633391
张航，宁波引航站助理引航员 宁波大港引航有限公司 浙江省宁波市绿园大厦 25 楼 15867528062 3033195758@qq.com

浅谈柴油机敲缸与气缸油的碱值选择

娄建伟，郑金波，葛主裕

宁波远洋运输股份有限公司，浙江 宁波，315000

摘 要：本文从一起柴油机敲缸现象进行分析，进而对柴油机敲缸故障进行推理，得出引起柴油机敲缸与气缸油碱值的关系，提出了对柴油机气缸油碱值的选择要求，并对其选择的实用性进行验证，总结出二冲程柴油机气缸油管理心得。

关键词： 柴油机；敲缸；气缸油；碱值

引言：

在全球限硫令实施之前，船舶一般使用硫含量 1.5%--3.5%的燃油，与之相对应的匹配碱值为 70 或 100mg/kg 的气缸油，在此情况下，主机处于良好的运行状态，随着船舶全球限硫令的实施，船舶燃油硫含量从 3.5%上限下降至 0.5%的上限，部分船舶还是在使用碱值为 70～100mg/kg 气缸油，导致碱值过剩。现从一起柴油机敲缸故障现象进行分析，浅谈二冲程柴油机的气缸油选择。

一.柴油机的敲缸现象与检查

某轮主机为二冲程低速柴油机，型号：MAN B&W 6S35MC，额定转速 173rpm/m，额定功率 4440KW，主机使用 0.5%以下低硫油，使用昆仑 5070 气缸油，气缸油碱值为 70mg/kg,各缸套及部分活塞运行时间接近 60000 小时。

自 2021 年初开始，主机在定速航行时第 1、2 缸曲拐箱开始出现阵发性“咚”、“咚”沉闷异响，周期从每 20 秒一次到每 80 秒一次长短不等，异响同时在曲拐箱道门盖上有手触轻微震动感，扫气箱道门外壁声音不明显，缸套冷却水套上部外表经金属听棒能听到轻微低沉敲击声。随后作如下检查：

（1）通过单缸断油和爆压测量确认非燃烧敲缸，也曾在主机停车后对曲拐箱运动部件和固定部件进行检查但未发现异常。

（2）对主机第 1、2 缸进行了全面检查（包括主轴承螺栓预紧力检查、连杆螺栓预紧力检查、各固定螺丝收紧、十字头滑块导板接触面检查及间隙测量、链传动机构链轮导轨状况和张紧力、活塞冷却油管、轴向减震器、防爆门、通过扫气箱内部检查燃烧室等），未发现其他明显异常，运行时异响仍存在。

（3）因响声感觉来自曲拐箱，随对主机第 1、2 缸连杆轴承和第 1、2、3 道主轴承进行拆检，未发现异常，敲击声在主机运转期间继续存在，在密切关注下主机继续运行且现象未有恶化迹象。

（4）随后对主机第 1 缸进行吊缸保养：检测时发现气缸套内壁灰暗光滑、缸套最大磨损量在正常范围、缸套顶部内壁有一圈 0.5-0.6㎜ 高度磨台（见图 1）；检查燃烧室各部件，第 1 道活塞环断裂且环周围积炭严重（断环位置在扫气箱观察口对面位置，所以常规的扫气箱检查时未发现断环故障），活塞头上部侧面有部分刮擦痕迹（见图 2）；第 1 道活塞环槽磨损超标、环槽下平面磨出高度 0.4-0.6㎜ 磨台；第 2、3、4 道活塞环槽高度和深度方向均有不同程度磨损（见图 3）；第 1 缸扫气口附近有线形轻微金属磨痕。在对排气阀、气缸盖、填料函常规保养的基础上，对第 1 缸缸套内壁顶部用油石将磨台打磨成过渡弧形，同时将第 1 缸活塞头、活塞环换新装复。主机磨合后运转期间困扰已久的敲击声终于消除，运行工况正常。



图 1 缸套顶部内壁磨出磨台



图 2 第 1 道环断且周围积炭



图 3 活塞头各环槽磨损出现台阶

二.柴油机敲缸分析

随后，船公司技术部门对曲拐箱异响进行了调查，从其吊缸后发现的燃烧室部件现状，结合柴

油机运行时的异常声响，柴油机存在机械敲缸，其推理如下：曲拐箱异响和第 1 缸活塞环断裂是因为活塞环槽超标磨损和第一道活塞环槽磨台引起。主机运转时第 1 缸活塞环在已磨损环槽内上下运动、径向运动、转动及扭曲运动的叠加下，首先活塞环重叠搭口会挂到扫气口，造成搭口断裂，断口在上下运动时还会在扫气口附近缸套内壁上留下上下方向磨痕，并逐步成活塞环断裂。在柴油机的设计尺寸参数下，活塞在气缸中的相对位置是由活塞环来辅助支撑定位，正常装配情况下活塞环会稍高出槽脊表面且活塞与缸套之间存在合适的间隙，活塞装置与缸套中心线对正。随着运转时间的累积，柴油机活塞上各环槽会逐渐磨损，在活塞环和缸套正常磨损量的共同作用下，活塞和缸套之间的相对间隙会逐渐增大。同时在柴油机运转中由于滑块在越过上止点时会改变受力方向，且滑块导板之间存在一定的间隙，活塞和滑块在越过上止点时将会产生左右方向频繁摆动撞击，因此活塞头侧面会不定时擦碰到清洁环形成机械敲缸。同时敲缸的机械振动会传递到十字头和滑块撞击导板，通过机架传递形成曲拐箱异响和道门振动。与此同时，柴油机运行时噪音大，金属传递性强，相邻二缸往往很难有明显的不同，第 2 缸的曲拐箱异响和道门振动是个表象，而是第 1 缸就近传递过去的，这也给管理人员的判断带来困扰。

三. 柴油机敲缸与气缸油的碱值

从上述分析可知，曲拐箱异响是活塞机械敲缸所致，而活塞机械敲缸是由于缸套磨损并形成凸台、活塞环槽出现磨台、活塞环断裂等因素引起，这似乎找到了原因，随后，轮机技术人员查阅了该主机运行工况及历年保养记录，表明，该主机各缸套及部分活塞运行时间仅接近 60000 小时，其间已有活塞更换情况，再次检查主机各缸燃烧室情况，发现活塞顶有大量白色粉末沉淀（见图 4），缸套内壁衍磨纹荡然无存（见图 5），缸壁明亮，未见湿润，缸套磨损已接近极限，查阅说明书，在正常维护保养的情况下，仅运行近 60000 小时不应出现如此严重的磨损，该主机存在燃烧室部件异常磨损情况。

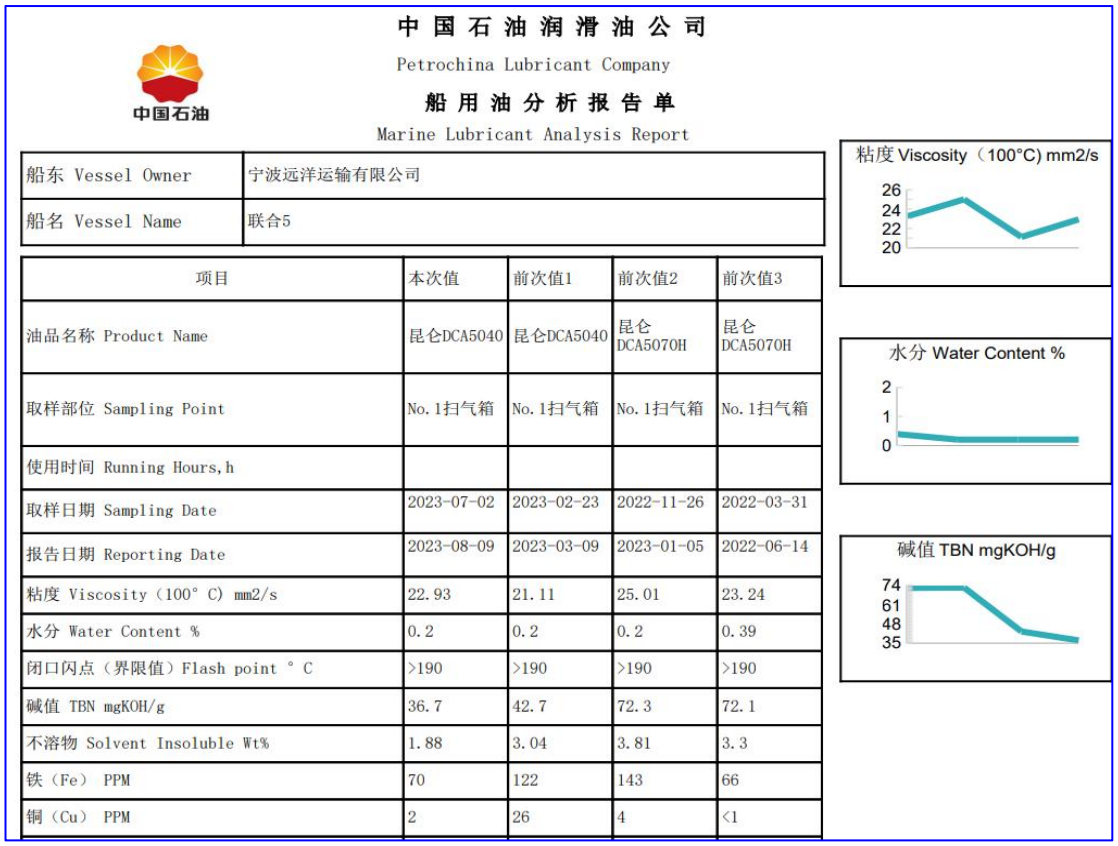


图 4 发现活塞顶有大量白色粉末沉淀



图 5 内壁衍磨纹消失

随后，轮机技术人员查阅了该轮主机燃油及气缸油使用情况，发现该轮主机自 2018 年底以前使用高硫燃油，之后使用低硫燃油，燃油硫含量明显变化，而与之配套的气缸油自新船出厂以来一直使用昆仑 5070H，为高碱气缸油。查阅扫气箱残余物化验单（如图 6），发现扫气箱剩余碱值在 72mg/kg，该碱值大大超标，活塞头白色沉淀明显（图 4）。



中 国 石 油 润 滑 油 公 司

Petrochina Lubricant Company

船 用 油 分 析 报 告 单

Marine Lubricant Analysis Report

船东 Vessel Owner	宁波远洋运输有限公司
船名 Vessel Name	联合5

项目	本次值	前次值1	前次值2	前次值3
油品名称 Product Name	昆仑DCA5040	昆仑DCA5040	昆仑 DCA5070H	昆仑 DCA5070H
取样部位 Sampling Point	No.1扫气箱	No.1扫气箱	No.1扫气箱	No.1扫气箱
使用时间 Running Hours,h				
取样日期 Sampling Date	2023-07-02	2023-02-23	2022-11-26	2022-03-31
报告日期 Reporting Date	2023-08-09	2023-03-09	2023-01-05	2022-06-14
粘度 Viscosity（100° C）mm2/s	22.93	21.11	25.01	23.24
水分 Water Content %	0.2	0.2	0.2	0.39
闭口闪点（界限值）Flash point ° C	>190	>190	>190	>190
碱值 TBN mgKOH/g	36.7	42.7	72.3	72.1
不溶物 Solvent Insoluble Wt%	1.88	3.04	3.81	3.3
铁（Fe） PPM	70	122	143	66
铜（Cu） PPM	2	26	4	<1

图 6　气缸油变化前后分析报告单

所有证据表明，该轮主机在使用低硫油期间，未很好地检查燃烧室部件的运行情况，在活塞顶出现大量白色沉淀、扫气箱残余物剩余碱值大大超标时，未对主机的气缸油碱值进行重新匹配，而是一味地使用昆仑 5070H 高碱值气缸油，导致活塞顶白色粉末不断沉淀，经柴油机厂家分析，应是气缸油中过多的添加剂 Ca+在高温高压下形成 CaCO3 与 CaSO4 白色沉淀，由于硫含量的下降，更多地形成 CaCO3，当这种疏松的结晶状粉末大量在活塞顶积聚时，随着活塞的交变加速运动，不断地喷洒在燃烧室的气缸内壁中，而后被活塞环上下刮划，其细小的颗粒不断填充到气缸内壁的衍磨纹上，导致衍磨纹贮油能力下降，进而使得活塞环与缸壁之间产生干磨擦，导致缸套异常磨损并出现凸台，与此同时，这种细小颗粒进入活塞环槽中，导致活塞环槽异常磨损，环槽出现磨台，在活塞环槽异常磨损且有磨台的情况下，活塞环开始断裂，密封变差间隙变大，特别是活塞处于上下止点时，活塞受力发生左右侧变化，出现了撞击声，当活塞处于上止点时，由于燃烧室燃烧掩盖了活塞的撞击声，当活塞处于下止点时，活塞的撞击声尤为明显，让轮机人员觉得曲拐箱出现阵发性“咚”“咚”的沉闷异响，极大地误导了轮机人员的判断。

随后，公司技术部门对该轮主机的气缸油碱值进行了调整，改用昆仑 5040，经该轮主机一年多的运行，主机各项工况参数正常，燃烧室目视检查正常，扫气箱残余物化验剩余碱值正常（见图 6），主机处于正常的运行状态。

四. 管理心得

二冲程柴油机的气缸油管理是一个非常重要和复杂的工作，气缸润滑是一个独立的全消耗系统，气缸油主要具有润滑、冷却、清洁等作用，如果使用和管理不当将会造成柴油机缸套的异常磨损甚至是拉缸、咬缸、敲缸的发生。因此日常的管理中要定期检查判断燃烧室状况，包括活塞顶部周围沉积物情况、缸套内壁及活塞环的磨损情况、注油率及注油定时的检查、扫气箱残余物化验等。综合检查结果判断气缸油的注油率是否适量、气缸油碱值是否匹配。二冲程柴油机从使用硫含量上限 3.5%的高硫燃油换成使用硫含量上限 0.5%的低硫燃油后，由于燃油硫含量的降低减轻了气缸的腐蚀

磨损，同时由于过高的气缸油碱值与燃油的不匹配将导致大量磨粒产生，从而大大加剧气缸的磨料磨损。对此轮机人员在管理中需对气缸油碱值和注油率做出相应的调整，可以采取直接由高碱值气缸油逐步换成低碱值气缸油，也可以采取分时段交叉使用高低碱值气缸油，在换用低碱值气缸油期间可以适度加大注油率。换用低碱值气缸油期间可以通过检查燃烧室尤其是活塞顶部沉积物的颜色是否由浅变深及数量是否由多变少、缸套内壁及活塞环周围润滑磨损情况是否正常、扫气箱残余物化验结果剩余碱值是否处于合适范围（建议剩余碱值 15--50mgKOH/g），如果检查结果正常，表明气缸注油率适当和气缸油碱值适配，否则须查明原因并采取相应措施做出调整。调整期间切忌注油率一次调整过大，换用气缸油时也最好是逐渐降低碱值。总之，气缸油的调整是一个耐心细致的工作，需要循序渐进持续较长一段时间，期间燃烧室状况须保持连续观察并做出动态调整，使得柴油机燃烧室始终处于良好的工作状态，保证各部件正常的工作寿命，最终稳定在一个正常的气缸润滑状态。

作者简介：
娄建伟，高级工程师，M:13605786676 （E-mail)loujw@nbosco.com
郑金波，轮机长，M:18696808808 （E-mail)731910851@qq.com
葛主裕，轮机长，M:13957475838 （E-mail)gezy@nbosco.com

拖轮“拖带和绑拖”作业方法和注意事项

李俊蔚,张伟君
宁波油港轮驳有限公司,宁波 镇海

摘 要：相对于港内靠离泊作业，拖带和绑拖作业存在很多不稳定因素，例如距离长，难度高，风险大，水域陌生，环境恶劣等；驾驶人员业务技能不熟悉，现场应变和指挥能力不足。面对各种多变的不利因素，极大增加了拖带和绑拖作业的难度系数，为了规避不利因素，首先从思想上要提高政治站位，要有高度的责任心；面对困难要敢于挑战自我；工作中不仅要胆大更需要心细，而且还要在实际操作过程中善于学习和总结，不断的提升自身业务技能水平，安全圆满的完成作业任务。

关键词：人员受伤；断缆；打桨

下面我以自己的经验交流一下“拖带和绑拖”作业的一些想法。首先我个人认为作为港作拖轮从事拖带和绑拖作业主要面对三大危险因素：**1.人员受伤；2.断缆；3.打桨。**

在整个拖带和绑拖任务中，为了规避这三个危险因素，我们可以从以下几个方面工作入手：

一、前期准备工作

1.了解作业船舶的结构特点：

作业任务下发后，首先要去了解作业船舶结构特点，例如船长、船宽，吃水，净空高度、缆桩和缆空位置等，如果有作业船舶的图片，对拖带方案制定会节省大量工作时间。如果能够去现场核实、查看一定要多用手机拍照，会对后期拖带方案制定的准确性、实用性起到关键性作用。

2.制定拖带方案和应急预案：

作业任务能否顺利，方案的制定至关重要。制定的方案不对或者不符合实际情况，将会额外增加作业人员的工作量，造成作业人员身体体能过度消耗，最终影响作业人员心理波动，出现消极等负面心理，更甚至会造成人员受伤等情况。所以制定方案要全面统筹考虑，尽量完善方案，更要充分考虑人员受伤、断缆、打桨等情况的发生。在能规避以上三大危险因素后，要注重方案的实用性。

应急预案是对作业任务的应急保障。在考虑应急方案时可以参考以下内容：1.首先要考虑人员受伤的可能，所以在作业前提前备好药品，特别是处理外伤的药品；2.考虑断缆的可能。船上至少配备一根应急缆，以便发生断缆后，可以马上投入使用；3.当断缆发生后，缆绳在船尾漂浮，如果不清楚缆绳水下位置，盲目用车极易发生打桨事故。所以断缆后，合理用车(建议停车)，立刻派人员手持对讲机到船尾附近观察缆绳位置，在确保安全前提下，尽快收回漂浮在船尾处的缆绳，同时安排人员备锚。驾驶台根据船尾人员反馈的缆绳情况，充分考虑分析以后，再决定如何用车。如果船位不佳危及自身安全，必须用车时，在保证船尾收缆人员安全前提下，建议间歇性用离漂浮缆绳相反方向一侧的车调整船位；4.应急锚地的选择。由于作业难度系数高，再加上其他特殊原因，可能无法保证作业继续完成，开航前提前选择好沿途应急抛锚地点，以备应急之需。

3.物资准备：

俗话说“兵马未动粮草先行”，齐全的物资配备关系到作业任务能否顺利的开展。1.绑拖作业需要准备的物资相对简单。船首如果有两台缆机，可以充分利用两台缆机上的缆绳分别当首缆和拖缆用，用一根高强度缆绳（直径 64×30 米）作尾缆；如果船首只有一台缆机，那要需要配备两根（直径 64×30 米）高强度缆绳，分别作为拖缆和尾缆。除了正常使用的缆绳，船上最好再配备一根缆绳以备应急之需。2.短距离倒拖作业可以利用船首一台缆机内的缆绳当主拖缆。3.相对于前两种作业，长航尾吊拖需要准备的物资不仅烦杂而且要求更高。大概需要准备：主拖缆，龙须缆（工程船由于配备缆机较多，龙须缆大多由工程船提供，无需拖轮配备），过桥缆，卸扣，吊带，旗绳，引缆，撇缆绳，锂基脂润滑油，带缆帆布手套，麻袋，木板，菱形球，船用激光灯等物资。为了不影响正常作业，建议船上配备一根主拖缆和一根龙须缆，以备断缆后马上投入使用，节省拖带的时间。

4.航次计划制定：

航次计划关乎航行安全。航次此计划制定前要备妥航次相关航海图书资料，而且要确保图书资料保持最新版本，确保本航次所需的海图都已改正至最新；航线设计要尽量应按要求合理制定航行计划，采用公共航路，尽可能避开渔船集中作业水域，减少与渔船相遇的机会。船长要严格审核航行计划，指导驾驶人员拟定航行安全注意事项及相应行动对策，最后把航线输入到电子海图上；渔区航行时谨记：加强瞭望，安全航速，有效避让，安全第一，不要冒险！宁可绕行，尽可能避免冒险进入渔船密集区域航行！特别是在浙江沿海水域，是商渔船碰撞高发区，合理安排驾驶台航行值班人员，任何时候驾驶台应保持 2 名及以上航行值班人员，根据周围渔船密集程度必要时可以增加航行值班人员；严格遵守《1972 年国际海上避碰规则》的规定；中国沿海水域夜间航行时，船长应每晚签发《夜航命令》，就夜间航行应采取的特别警戒措施提出要求，当班驾驶人员应认真阅读、确认和有效执行。

5.船舶证书和设备检查：

作业前要对船舶证书、个人证书进行仔细核实；其次要对船上通导设备，航行设备，消防设备，救生设备，缆机锚机，脱钩等关键设备进行一次全面的测试和检查，确保所有设备能够正常工作；机舱设备正常运行对航行安全尤为重要，所以机舱部人员要对机舱设备把“好脉”，绝不允许“带病”航行。

6.加油、加水等后勤保障物资：

开航前根据航行距离、天气等情况估算出本航次航行天数，完成本航次所需要的燃油、滑油、淡水等后勤物资储备。

7.举行航前会议：

举行航前会议的对作业任务能否顺利完成起到关键作用。利用航前会议面对面详细把作业方案，作业流程和作业过程中的安全注意事项介绍给班组所有人员，并解答班组成员疑虑。有一点尤其要特别注意：一定要确保水手长完全了解操作流程和安全注意事项，因为水手长是整个方案的执行者和落实者，所以水手长熟知操作流程和注意事项关乎整个作业任务能否安全顺利完成。

二、作业方法和注意事项

（一）确定作业方案。

到达现场后要第一时间与引水或着作业船的船长进行沟通和确认，确认作业方案，航行路线。同时告知本次作业过程中拖轮自身的不利因素，例如拖轮船头比较高容易造成被作业船舶栏杆损坏；视线被挡存在盲区无法有效瞭望；水深受限舵效不佳操作不灵活；以及作业过程中可能会遇到的困难或者可能发生人员受伤、断缆、打桨等情况；如果作业过程拖轮操纵困难无法保证自身或着作业船舶的安全，必要时告诉引水或着作业船舶船长，让其协助操纵，也可以请求公司岸基部门指导。

（二）确定双方联系频道和备用频道。

作业中要经常检查高频，确认值守高频通讯畅通，避免高频中断发生。用高频回答声音要响亮，语言要简洁易懂。长航拖带作业被拖船最好 2 个小时左右向拖带船报告一次现场情况，尤其是缆绳磨损程度，有无断缆的可能。

（三）确认作业方式。

由于受作业船舶的船型结构，作业距离长短，天气和海况，港口环境等因素影响，所需要的操作方式也不相同，主要有以下三种作业方式：1. 绑拖作业；2.船首吊拖作业；3.船尾吊拖作业。

下面简单介绍一下三种作业方法和注意事项：

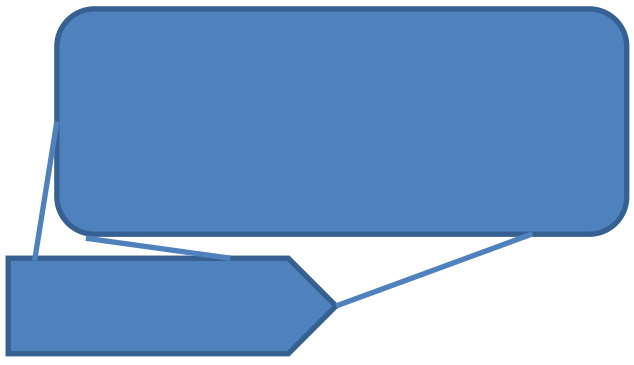
1.绑拖作业：

⑴绑拖作业主要适用于：①狭水道；②弯曲，流急，流乱的水道；③商船和渔船来往交通密集区域；④船舶受风和浪影响较小的港内。

⑵绑拖作业优点：航行操控性能好、机动性强。

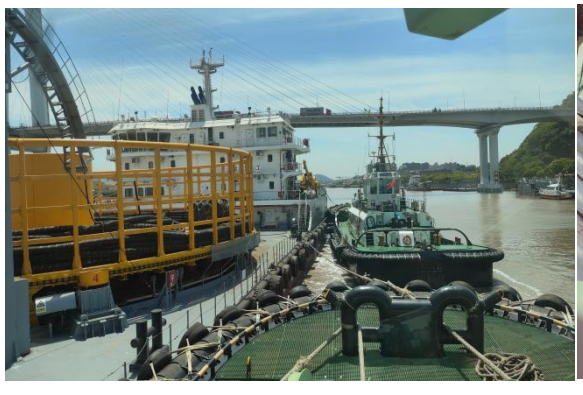
⑶绑拖作业操作方法：达到现场后观察作业船舶结构和特点，选择合适的带缆桩。首先带头缆，然后松头缆船身慢慢后退至尾缆有合适的出缆角度后（能够保证安全情况下，建议船尾尽量向后外伸，可以提高操控性），头缆得力，开始带腰缆，最后带尾缆。由于公司拖轮船尾多未配备缆机，尾缆收紧是靠人工，可以适当松一点头缆，船尾向里靠，方便水手长收尾缆。尾缆带好后里档车微速进并向外打，最后收紧头缆。航行中如果发现缆绳松弛，建议适时收紧头缆。俗话说：“无风三尺浪”，沿海绑拖受浪影响极易发生断缆，所以不建议沿海航行采用绑拖方式。

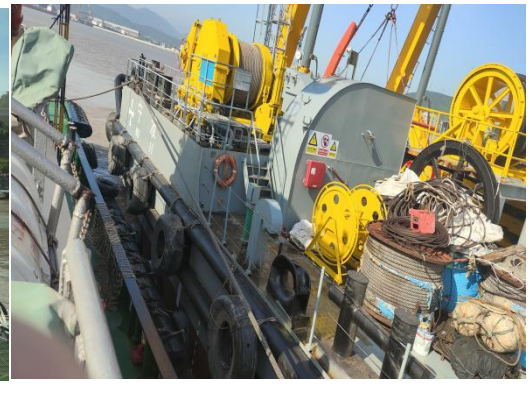
图例：



被拖船

拖轮





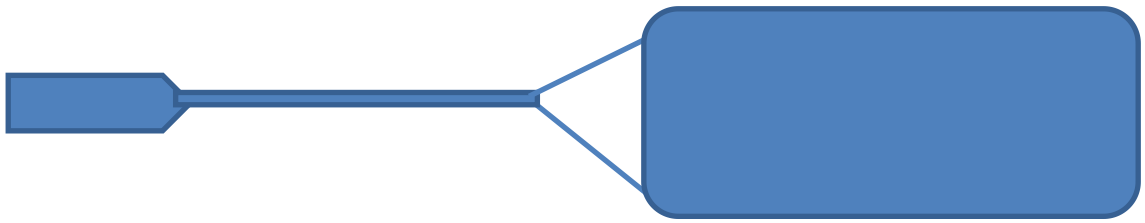
2.船首吊拖作业;

⑴船首吊拖作业主要适用于：①航行时间短（连续航行时间最好不要超过 4 小时）。②能见度良好的白天。③作业水域要相对较宽阔。

⑵船首吊拖作业优点：①带缆安全而且方便。②可以利用绞缆机自由控制缆绳长度。

⑶船首吊拖作业操作流程：被拖船最好抛锚或者微顶流，这样可以降低拖轮操作难度。拖轮船尾顶流远离锚链头对头尽量接近被拖船，然后拖轮稳定船位，现场人员通过撇缆绳，开始带缆。缆绳带妥以后，缆绳附近所有人员立即撤离附近危险区域，驾驶台操纵人员和缆机操作人员要集中精力相互配合，根据驾驶员指令松缆绳，并时刻关注缆绳得力情况，切记避免缆绳瞬间受力过大，发生断缆造成人员受伤。拖轮调整缆绳到合适长度后，稳定自身船位，被拖船方可起锚开航。

图例：





3.船尾吊拖作业

⑴船尾吊拖作业主要适用于：①航行时间长。②作业水域宽阔。③气象条件不佳水域。

⑵船尾吊拖作业优点：①相对于绑拖作业不易发生断缆。②航行可以保持较高的船速，节支降本。③视线无遮挡利于瞭望。

⑶船尾吊拖作业操作流程：船尾吊拖驾驶台视线受阻，建议安排一个拖带经验丰富的人员手持对讲机在船尾协助。被拖船抛锚，拖轮船首顶流后退并适当远离被拖船的锚链，能够保证自身安全的情况下，尽量接近被拖船带缆位置，把定船位，通过撇缆把主拖缆拉至被拖船，利用卸扣把主拖缆和龙须缆固定在一起。然后现场所有人员立即撤离，驾驶操作人员要集中精力，慢慢微速进车，船尾协助人员时刻关注缆绳情况，并用对讲机向驾驶台报告缆绳情况，驾驶台操作人员控制好船速，缆绳得力瞬间的力不要太大，避免缆绳瞬间受力过大，发生断缆造成人员受伤。

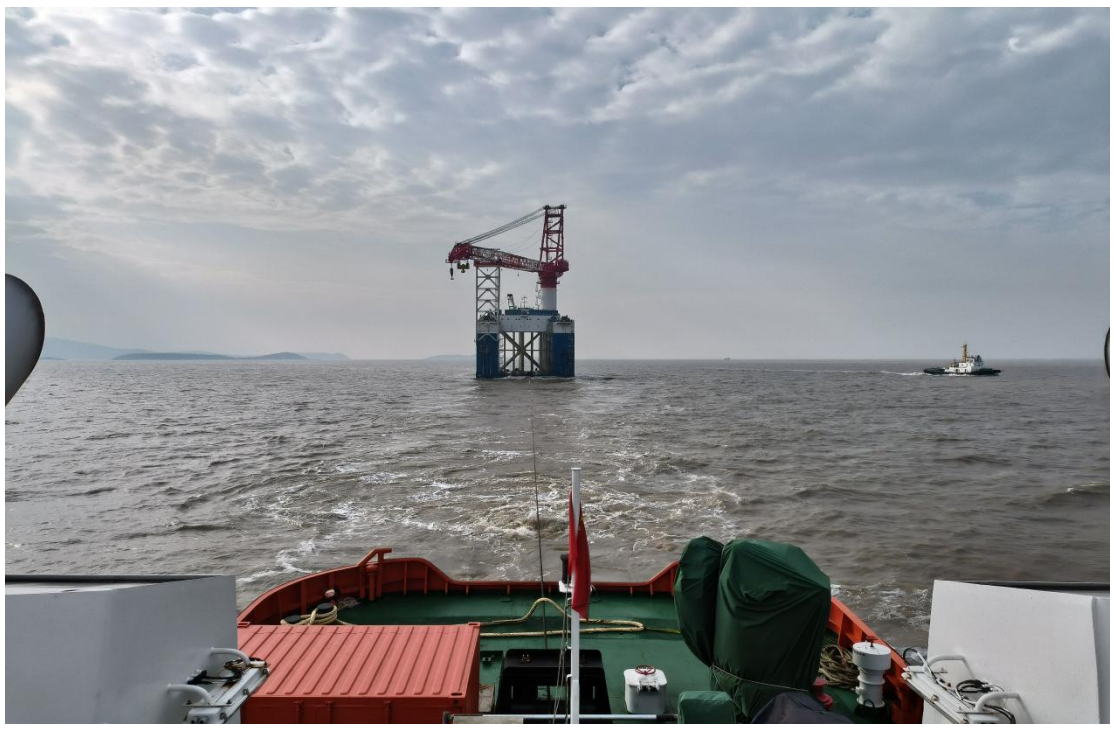
⑷船尾吊拖注意事项：①被拖船锚收妥后，起拖时应使用微进车，并尽可能反复使用停车、微进，在保持拖缆有一定悬垂量过程中使被拖船逐步加速；起速达 2 节时，可分段加速，每段增加速度量以 0.5 节为好，以便保持拖缆的悬垂量，直到达到预定的拖航速度为止。②大幅度改向必须分段进

行，避免 20 度以上改向，每次改向可以按 5 度到 15 度转过。待被拖船驶入现在航向之后，才可以采取新的改向措施。在估算调头区域或旋回水域时必须将拖船、被拖船的船长及拖缆长度一并考虑进去。③被拖船偏荡将严重影响拖航稳定性。其危害增大拖缆张力，加剧拖缆磨损和应力集中，并使拖航偏离航线。抑制偏荡的措施主要有；使被拖船尾倾；降低拖航速度；缩短拖缆长度。④在浅水中或者降低拖航速度时，为防止拖缆拖底，拖缆长度应适当缩短；在狭水道航行时，为了改善其操纵性能，拖缆的长度也应适当缩短。如果拖带过程中，拖缆远离水面，间歇性松紧，这时应降低拖航速度，以免张力过大发生断缆。⑤航行过程中经常派人检查拖缆磨损情况，必要时可以用锂基脂润滑油减少拖缆磨损。⑥拖船减速停车务必要缓慢进行，防止拖缆因张力突然下降而下垂过多兜底；缓慢减速可以防止被拖船突然冲向拖船造成碰撞。⑦被拖船抛锚时应提前降速，使船首对准风流压合力方向，待有后退速度时，被拖船抛锚，抛锚时切勿使锚链和拖缆发生交缠，如有交缠可能应先将拖缆缩短或者收起后再抛锚。

图例：



被拖船 **拖轮**



三、作业结束后总结

每次作业完毕后，组织所有相关人员开总结会议，分析本次作业优点并在以后作业中继续保持。同时对作业中不足之处进行讨论，分析，总结。争取以后作业时制定出更加安全、实用、简便的作业方案。

参考文献

1.《1972 年国际避碰规则》
2.《船舶操纵与避碰----操纵偏》
3.《防商渔船碰撞》

4.《开行前自查安全自查清单》

作者简介：李俊蔚，宁波油港轮驳有限公司甬港拖 20 船长；张伟君，宁波油港轮驳有限公司甬港拖 26 船长。通讯地址：宁波镇海沿江东路 173 号，电话：1780062957/18867614121，邮编：120071013@qq.com

基于 AQWA 的超大型集装箱船舶临界作业条件和港口拖轮配置研究

周胜刚，管怀君，高洁，赵雪光

（宁波引航站，浙江 宁波，315000）

摘要：近年来，超大型集装箱船舶在港内碰撞码头、桥吊、大桥等事故时有发生，其发展新趋势对港内限制性水域靠离泊安全带来了很大挑战。港作拖轮是协助船舶完成靠离泊作业的重要工具，目前各港口对于超大型集装箱船舶拖轮配置方案主要依赖于历史经验，缺乏理论基础的指导，相关规范滞后于行业的快速发展，需要更科学和合理的指导方案来适应超大型集装箱船舶的港口作业现代化需求。本文针对超大型集装箱船舶靠离泊过程的拖轮配置，运用经验公式计算和水动力分析软件 AQWA 进行数值模拟，研究了三类典型超大型集装箱船舶在不同风流联合作用下的拖轮配置部署方案，最终综合计算与驾引人员经验，得出了超大型集装箱船舶临界作业条件和拖轮配置的科学合理化的建议。

关键词：超大型集装箱船舶；AQWA；引航实践；临界作业条件；拖轮配置

1.引言

超大型集装箱船舶(ULCS)的崛起带来了许多变革，尤其是在港口限制性水域内的操纵难度明显增加。最近几年，超大型集装箱船在港内事故频发，在韩国釜山、土耳其港口撞倒桥吊，在美国巴尔的摩港撞塌大桥，操纵风险巨大，后果极其严重，为此，有必要进行临界作业条件和拖轮配置研究。超大型集装箱船舶在港内靠离泊作业时，拖轮成为必要的操纵工具。特别是在恶劣天气和特殊水文气象条件下，对拖轮的依赖性更加凸显。然而，近年来集装箱船舶的尺度不断增大，但相关规范未能及时跟上超大型集装箱船舶的快速发展。目前，各港口对超大型集装箱船舶配置的拖轮的马力和数量仍主要依赖于经验总结，存在着需要关注和及时调整的问题。

本文以宁波舟山港区作为研究对象，根据港区现有拖轮情况及特点，选取典型船舶和风流环境，通过经验公式计算和 AQWA 建模计算对比分析得到了超大型集装箱船舶理论的拖轮配置和进出港限制条件。最后，充分结合宁波舟山港众多资深高级引航员的操作经验，得出了科学、合理的结果。

2. 计算理论

现有《JTS 165-2013 海港总体设计规范》，分别依据船舶的水上受风面积和水下横向面积对拖轮的拖力进行了估算，从中可以得出集装箱船舶相对于船长所需拖轮总拖力与数量的参考值。但是，此参考值只是相对于船长在 100-300m 的集装箱船舶，对于船长超过 360m、载箱量 10000TEU 以上的超大型集装箱船舶，现有的规范还没有具体的规定。

宁波舟山港作为世界上最繁忙的集装箱港口之一，截止 2023 年集装箱吞吐量连续六年位居世界第三。本文依托于宁波舟山港，根据港内拖轮现状，选取典型到港超大型集装箱船舶(ULCS)与风流情况，分别采用经验公式计算与 AQWA 建模仿真计算，对现有超大型集装箱船舶的港内靠离泊拖轮配

置进行优化改进，结合实际操纵经验，得到科学合理的拖轮部署安排。

2.1 拖轮力估算

《Safety Aspects Affecting the Berthing Operations of Tankers to Oil and Gas Terminals》对拖轮配置进行了系统的介绍[1]，给出所需的总拖轮拖力计算公式如下：

$$B_p = S_f \times [(CG \times F_{wind}) + F_{cureent} + F_{wave}]$$

式中：B_p 为服务作业船舶总拖力；S_f 为因气候条件而考虑的安全系数一般取 1.2~1.5；CG 阵风系数；$F_{wind}, F_{cureent}, F_{wave}$ 分别为作业船舶所受到的风流浪力。

由于实际可用的总拖轮力 T_c（包含所有的船艏侧推器）与克服自然条件所需有效总拖力 B_p 之间的区别，所以增加一个安全系数 S_o，公式如下。本文取安全系数为 1.2：

$$S_o \geq \frac{T_c}{B_p} \geq 1.1 \sim 1.25$$

一般拖轮配置都是根据最后阶段的风、浪和流的作用力确定的，环境工况设置考虑船舶靠离泊时最不利的情况。船舶在靠离泊过程中，所受风流为横向，这时船舶所受侧向力矩最大，最易造成船舶的偏移和不稳定性。因此当计算拖轮总拖力时，只需计算作用在船舶上的横向环境荷载。表 1 为宁波舟山港内的拖轮现状，可见 4800HP 是主力拖轮。因此本文主要基于 4800HP 拖轮的应用，对拖轮经过公式换算得到拖轮的安全顶推力，见表 2。

表 1 宁波舟山港各马力拖轮数量

Horsepower	7200	6500	6060	5660	5600	5200	5000	4800	3200-4200
Quantity	1	1	2	2	5	1	4	14	27

表 2 拖轮基本参数表

	3200	4800	5600	6060	6500
Max Towing Force	35.6T	53.5T	62.4T	67.5T	72.4T
Max Thrust Force	42T	63T	73.5T	79.5T	85.3T
Actual Towing Force	29.7T	44.6T	52T	56.3T	60.3T
Actual Thrust Force	35T	52.5T	61.3T	66.3T	71.1T

2.2 经验公式计算

1.中国《港口工程荷载规范》（JTS144-1-2010），为中国强制性行业标准，自 2011 年 1 月 1 日起施行，给出了作用在船舶上的风力和水流力计算公式。关于港作拖轮配置，现行的《海港总体设计规范》(JTS 165-2013)，给出了船长在 100-300m 的集装箱船舶所需拖轮的估算结果，但是超大型集装箱船舶超过规范中的范围，目前还没有相关规范[2-3]。

(1)作用于船上的风载荷计算：

$$F_{xw} = 73.6 \times 10^{-5} \cdot A_{xw} V_x^2 \zeta_1 \zeta_2$$

$$F_{yw} = 49.0 \times 10^{-5} \cdot A_{yw} V_y^2 \zeta_1 \zeta_2$$

式中：F_{xw}, F_{yw} 分别为作用在船舶上的横向和纵向风载荷；A_{xw}, A_{yw} 分别为船体水面以上横向和纵向受风面积(m^2)；V_x, V_y 分别为设计风速的横向和纵向分量(m/s)；ζ_1 风压不均匀折减系数；ζ_2 风压高度变化修正系数。

(2)作用于船上的流载荷计算：

$$F_{xc} = C_{xc}\frac{\rho}{2}V^2A_{xc}$$

$$F_{yc} = C_{yc}\frac{\rho}{2}V^2A_{yc}$$

式中：F_{xc},F_{yc} 分别为水流对船舶作用产生的横向和纵向流载荷；C_{xc},C_{yc} 分别为水流力横向和纵向分力系数；ρ 水的密度(t/m³)，海水取 1.025；V 水流速度(m/s)；A_{xc},A_{yc} 分别为相应装载情况下的船舶水下部分垂直和平行水流方向的投影面积(m²)。

2.石油公司国际海事论坛（Oil Companies International Marine Forum，OCIMF），是由石油产品船运和港口装卸领域分享共同利益的石油公司组成的自愿性协会。20 世纪 70 年代，各国防政府及国际组织对防止海洋污染、保障海上作业安全的迫切需求，催生了 OCIMF 的成立。其编写的《Mooring Equipmeng Guidelines》（第三版）中，对于作用在船舶上的风力和水流力给出了明确的计算方法[4-5]。

(1)作用于船上的风载荷计算：

$$F_{xw} = \frac{1}{2}C_{xw}\rho_w V_w^2 A_T$$

$$F_{yw} = \frac{1}{2}C_{yw}\rho_w V_w^2 A_L$$

式中：F_{xw},F_{yw} 分别为纵向与横向风载荷；C_{xw},C_{yw} 分别为纵向和横向分力系数；ρ_w 为空气密度，取 1.24 kg/m3；A_T,A_L，分别为水线以上纵向和横向受风面积(m3)；V_w 为海面上 10 米高度处的设计风速。

(2)作用于船上的流载荷计算：

$$F_{xf} = \frac{1}{2}\rho_c V_c^2 L_{pp} T C_{xc}$$

$$F_{yf} = \frac{1}{2}\rho_c V_c^2 L_{pp} T C_{yc}$$

式中：F_{xf},F_{yf} 分别为纵向与横向流载荷；C_{xc},C_{yc} 分别为纵向和横向分力系数；ρ_c 为海水密度 1.025×103 kg/m3；L_{PP} 为垂线间长(m)；V_c 为流速(m/s)，T 为平均吃水(m)。

图 1，相同条件下计算风流载荷。可见《港口工程载荷规范》与 OCIMF 规范，前者风荷载计算结果偏大，后者流载荷计算结果偏大，本研究将两种规范下计算的结果进行对比，选择两者的中间值作为最终的船舶风流荷载计算结果。

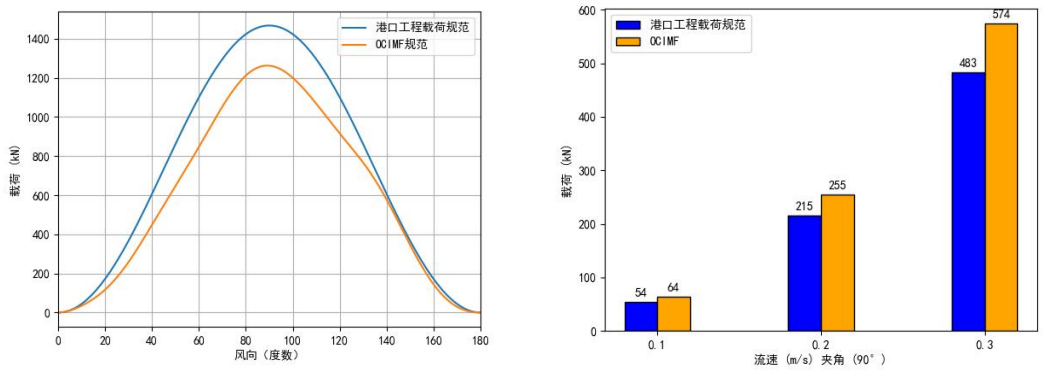


图 1 风、流载荷计算对比

2.3 AQWA 建模计算

本文利用海洋工程浮体分析软件 Workbench-AQWA，以三维势流理论为基础，选取三类典型超大型集装箱船舶，并作为建立有限元模型的母型船，从而对超大型集装箱船舶靠离泊的拖轮配置进行

有限元模拟计算。

三维势流理论频域分析方法是基于电磁理论中的频谱分析方法提出的，用于预报不规则波下船舶所受波浪载荷的理论方法。

假设流体为无黏性、无旋、不可压缩，则可引入速度势 φ(x, y, z, t)来描述流域内的运动。当海洋结构物以自由为基准时，速度满足 Laplace 方程，如式（3）：

$$\nabla^2\varphi(x,y,z,t)=0$$

Laplace 方程和描述物体运动的速度势需要进行线性化处理。假定波浪和结构物的运动都较小，而流场中的速度势由入射波速度势、绕射势和辐射势叠加而成，如式（4）：

$$\varphi(x,y,z,t)=\varphi^{I}(x,y,z,t)+\varphi^{D}(x,y,z,t)+\varphi^{R}(x,y,z,t)$$

式中：φ^{I} 为入射波速度势，表明流场中速度分布的情况；φ^{D} 为绕射势，表明结构物对流场内的速度产生的影响；φ^{R} 为辐射势，表明结构物 6 个自由度的运动及振荡对流场的影响。

3 实验分析

3.1 实验工况及模型

本文按船长对市场运营的部分超大型集装箱船舶(ULCS)进行了统计，发现 ULCS 按船长基本可以分为 335m、366m、400m 三种船型。从三种典型船型中均挑选一艘船舶进行计算分析，结合宁波舟山港环境特点，设置的风流工况如下所示，为确保 ULCS 安全靠离泊，均考虑对船舶影响较大的横向风流计算，流速固定为 0.3m/s，三种船舶的具体信息及计算工况设置见表 3、4、5。

表 3 船舶基本参数设置表

船名	船长 (m)	船宽 (m)	吃水 (m)	横向受风面积（m^2）	横向受流面积（m^2）	纵向受风面积（m^2）	纵向受流面积（m^2）
A	400	61.5	16.5	14979	5640	2927	1015
			13	17068	5200	3142	800
B	366	51.2	15.5	12922	5307	2064	794
			12.5	14666	4575	2217	640
C	335	48.4	16	11200	5200	1440	768
			12	12600	3850	1632	576

表 4 400m 船型工况基本参数设置表（满载/压载）

工况类型	风速 (m/s)	流速 (m/s)	拖轮配置	风流向	波浪高度	波浪频率	波浪类型
工况 1	10	0.3	3 艘 4800HP+1 艘 3200HP	正横	1.2m	7s	不规则波
工况 2	12	0.3	3 艘 4800HP+1 艘 3200HP	正横	1.2m	7s	不规则波
工况 3	13.8	0.3	3 艘 4800HP+1 艘 3200HP	正横	1.2m	7s	不规则波
工况 4	10	0.3	4 艘 4800HP	正横	1.2m	7s	不规则波
工况 5	12	0.3	4 艘 4800HP	正横	1.2m	7s	不规则波

工况 6	13.8	0.3	4 艘 4800HP	正横	1.2m	7s	不规则波

表 5 366/335 船型工况基本型参数设置表（满载/压载）

工况类型	风速 (m/s)	流速 (m/s)	拖轮配置	风流向	波浪高度	波浪频率	波浪类型
工况 1	10	0.3	2 艘 4800HP	正横	1.2m	7s	不规则
工况 2	12	0.3	2 艘 4800HP	正横	1.2m	7s	不规则
工况 3	13.8	0.3	2 艘 4800HP	正横	1.2m	7s	不规则
工况 4	10	0.3	2 艘 4800HP+1 艘 3200HP	正横	1.2m	7s	不规则
工况 5	12	0.3	2 艘 4800HP+1 艘 3200HP	正横	1.2m	7s	不规则
工况 6	13.8	0.3	2 艘 4800HP+1 艘 3200HP	正横	1.2m	7s	不规则
工况 7	10	0.3	3 艘 4800HP	正横	1.2m	7s	不规则
工况 8	12/13.8	0.3	3 艘 4800HP	正横	1.2m	7s	不规则
工况 9	13.8	0.3	4 艘 4800HP	正横	1.2m	7s	不规则
工况 10	15.5	0.3	4 艘 4800HP	正横	1.2m	7s	不规则

基于经验公式计算的方法。理论上港内操纵的拖轮总拖力应等于作用于船舶上的环境载荷联合作用力，按照上一节提到的两种规范计算取均值，最终与考虑了安全系数的拖轮总拖力进行对比，即可得出设置工况下拖轮配置是否足够。

3.2 实验结果与分析

基于经验公式计算，环境载荷与拖轮配置对比结果如图 2 所示。法向流速 0.3m/s 时，400m 船舶靠离泊，风速 10m/s，4 条大马力拖轮协助可以满足需要；风速 12m/s 、13.8m/s，4 条拖轮不能满足安全靠离泊需要。366m 船舶靠离泊，风速 10m/s、12m/s，需要 4 条拖轮协助；风速 13.8m/s，4 条拖轮不能满足安全靠离泊需要。335m 船舶靠离泊，风速 10m/s，需要 3 条拖轮协助；风速 13.8m/s，4 条拖轮不能满足安全靠离泊需要。

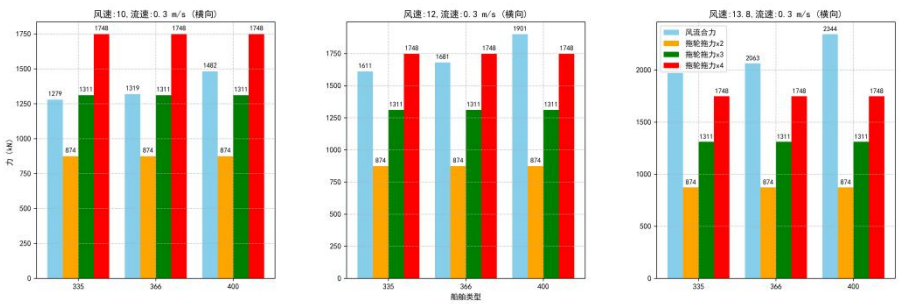


图 2 风流受力与拖轮力对比

400m 船舶靠离泊，风速 10m/s、12m/s 的情况下，4 条大马力拖轮协助可以满足需要；风速 13.8m/s 时，4 条拖轮不能满足安全靠离泊需要。366m 船舶靠离泊，风速 10m/s 时规定 3 条拖轮协助可满足安全靠离泊需要，风速 12m/s、13.8m/s 需要 4 条拖轮协助。335m 船舶靠离泊，满载状态下，风速 10m/s、12m/s 时规定 3 条拖轮协助可满足安全靠离泊需要，风速 13.8m/s 时需要 4 条拖轮协助；压载状态下，风速 10m/s 时规定 3 条拖轮协助可满足安全靠离泊需要，风速 12m/s、13.8m/s 时需要 4 条拖轮协助。

基于上述 AQWA 实验结果，针对以上三类典型船舶进行靠离泊风流边界条件的探索。在目前拖轮配置的基础上，优化拖轮力的分配，不断尝试成功与失败之间的风力情况，逐步找到较为稳定状态

下该配置所能克服的最大风流受力，见表 6。

表 6 边界情况表（正横风流）

船型（m）	拖轮配置	风速（m/s）	流速（m/s）
400	4 艘 4800HP	13.5	0.3
366	3 艘 4800HP	11.1	0.3
366	4 艘 4800HP	13.9	0.3
335	3 艘 4800HP	11.5	0.3
335	4 艘 4800HP	14.5	0.3

对比以上两种计算结果（均不考虑船舶侧推器的作用），如下表 7。可以明显看出，经验公式计算结果偏大，这是因为经验公式是主要针对船长在 300m 以下的船舶，在一系列简化条件和建设建立的，其结果不一定能准确反映超大型集装箱船舶的特殊情况和复杂操作需求。AQWA 水动力计算则考虑的更多的因素，其结果更符合实际场景需求，但 AQWA 计算是在均匀的风流场的基础上对拖轮拖力进行的协调分配。在实际过程中，引航员并不一定能够及时协调这些复杂的因素，因此在计算结果与实际操作之间可能存在差异。

表 7 拖轮配置计算结果对比（均以 4800HP 拖轮为基础）

船型	船长	风速（m/s）	宁波舟山港区规范	经验公式计算拖轮数量	AQWA 水动力计算拖轮数量
集装箱船	400	10	4-5	4	4
		12		＞4	4
		13.8		＞4	＞4
	366	10	3-4	4	3
		12		4	4
		13.8		＞4	4
	335	10	2-3	3	3
		12		4	4
		13.8		＞4	4

3.3 小结

综合以上计算结果，并对宁波舟山港区众多高级引航员的操作经验进行了统计，最终得到了较为全面、准确的结果。这种综合方法为实际操作和设计提供了有价值的参考和指导，可以更好地了解超大型集装箱船舶在靠离泊过程中的特性。表 8 为综合考虑后给出的临界作业条件。

表 8 宁波舟山港超大型集装箱船舶临界作业条件（正横风）

船型	船长（m）	风速（m/s）	能见度（m）	潮流
集装箱船	335	≤13.8	≥1000	避免风、流叠加影响，避开急涨急落时段
	366	≤13.8	≥1000	
	400	≤12	≥1000	

表 9 为建议的拖轮配置，可作为参考。驾引人员在实际引航中要根据风速、风向、流速、浪高等实际情况，科学评估靠离泊的安全性，并合理配置使用拖轮。超过 13.8m/s 的风速条件下，船舶可能会面临更大的风力影响，可能导致靠离泊操作困难。此时，船舶运营者和驾引人员必须格外小心，并采取一切必要的预防和安全措施，以确保操作的安全性。

表 9 宁波舟山港超大型集装箱船舶拖轮配置建议

船型	船长	风速≤10.8m/s	10.8m/s≤风速≤12m/s	12m/s≤风速≤13.8m/s

	（m）	靠泊	离泊	靠泊	离泊	靠泊	离泊
集装箱船	335	3	3	3-4	3-4	4	4
	366	3	3	4	4	4	4
	400	4	4	4-5	4-5	不建议	限紧急

4 引航靠离泊实例验证

4.1 MSC APOLLINE 靠泊远东 7#泊位

MSC APOLLINE 2023 年 11 月 12 日 1100 靠泊远东 7#，当天为农历九月二十九，大潮汛；镇海潮汐：高潮时 1040，潮高 354，低潮时 1644，潮高 90。偏北风 5～6 级，阵风 7 级，靠泊远东时风向接近正横，风力大多时稳定在 10~12m/s 之间，时值镇海高潮后 1 小时许，落流明显。

实际带拖轮大概在 1140~1150，于 1230 平稳靠妥码头。5 条大马力拖轮 T31（7200HP）、T28（4800HP）、XT5（5600HP）、XT8（5000HP）、XT9（5600HP）助泊。

MSC APOLLINE 基本资料：

船长 (m)	船宽 (m)	吃水 (m)	最大载箱量 (TEU)	受风面积 (㎡)	侧推功率 (KW)
400	61.5	12.8	23756	16808	3000×2

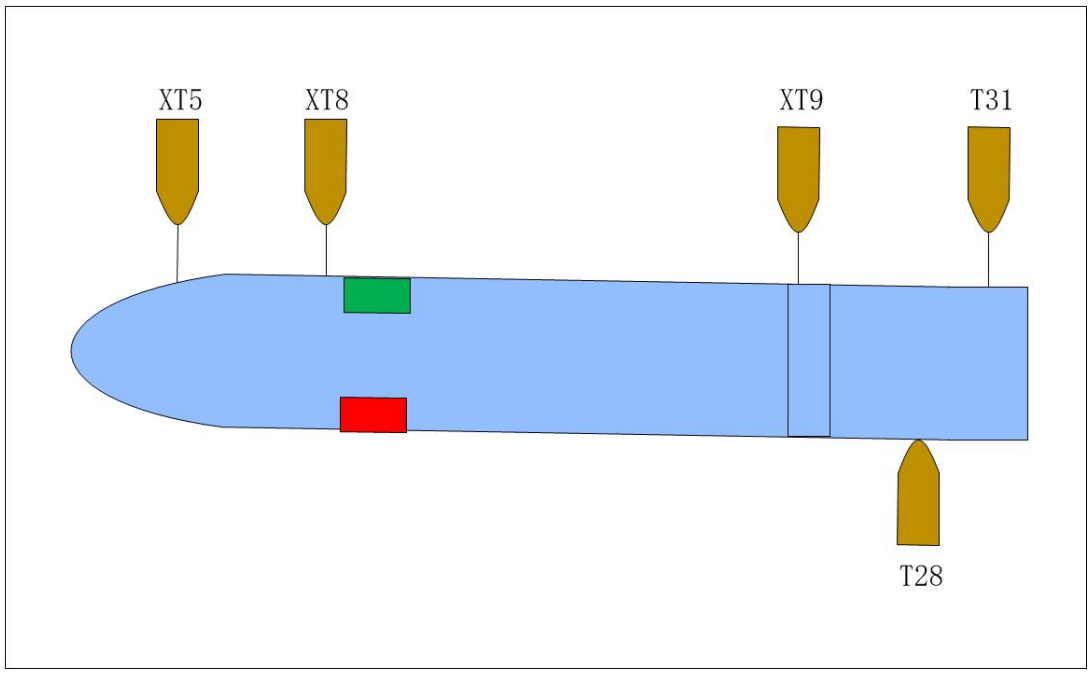


图 3　MSC APOLLINE 靠泊时拖轮助泊位置及方式

4.2　BARZAN 离泊招商码头 2#泊位

BARZAN 计划 2023 年 11 月 13 日 0645 离泊招商码头 2#泊位，0745 掉头完成离泊。

当天为农历十月初一，大潮汛；镇海潮汐：低潮时 0443，潮高 46，高潮时 1114，潮高 367。北到西北风 6 级，阵风 7-8 级，招商码头离泊时风向接近正横，风力大多时稳定在 11m/s 左右，阵风 12-13m/s；时值镇海低潮后 2 小时，码头边涨流明显，目测 0.5-1 节。

BARZAN 船舶资料：

船长 (m)	船宽 (m)	吃水 (m)	最大载箱量 (TEU)	受风面积 (㎡)	侧推功率 (KW)
400	58.6	13.6	18800	15908	3000×2

助泊拖轮：XT3（5600HP）、XT7（5000HP）、T33（5000HP）、ZL8（4800HP）、ZL20（4800HP）。BARZAN 离泊拖轮配置示意见图 4，其中 T33 在外舷尾缆解掉后带在船尾巴拿马孔。

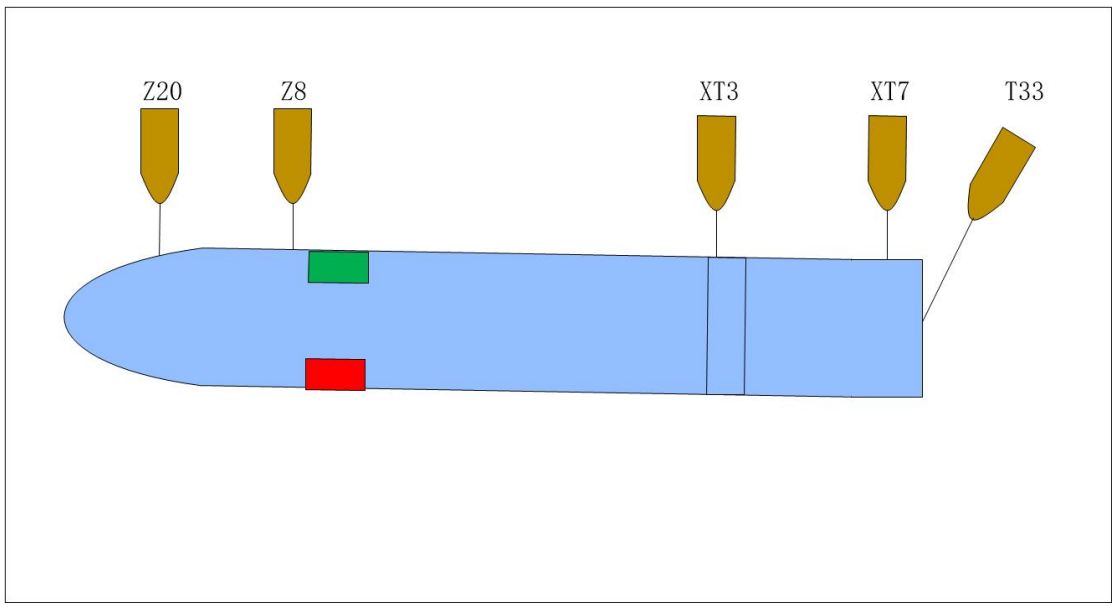


图 4　BARZAN 离泊拖轮配置示意

4.3 实例验证小结

船名	船长 （m）	船宽 （m）	吃水 （m）	风向/风速 （m/s）	拖轮数量
MSC APOLLINE	400	61.5	12.8	正横/10-12	5
BARZAN	400	58.6	13.6	正横/11	5

上述两次靠离泊均顺利完成，表明 400 米超大型集装箱船在正横风速为 11-12m/s 时，在 5 条拖轮助泊下，可以完成靠离泊作业，验证了 AQWA 的计算结论。

5. 结论及建议

5.1 随着到港集装箱船舶趋于大型化、多样化，发展新趋势对引航及靠离泊操纵作业带来新的挑战，风险明显上升。超大型集装箱船舶越来越多地依赖于拖轮的协助，靠离泊时保证合理的拖轮配备数量及拖轮马力，由拖轮协助制动与稳定航向，是保证安全的一个有力因素。

5.2 本文通过经验公式规范计算、AQWA 的计算，充分结合众多资深高级引航员操作经验，给出了宁波舟山港超大型集装箱船舶临界作业条件和拖船配置建议,填补了现有行业和设计规范的空白，对实践具有指导意义。

5.3 实际靠离泊过程中外界条件复杂，与理论计算存在差异，临界作业条件和拖轮配置需要听取现场船长和引航员的意见和建议。

参考文献

[1] PIANC(International Navigation Association)(2012). Safety Aspects Affecting the Berthing Operations of Tankers to Oil and Gas Terminals, Report of Working Group 116. Brussels: PIANC.

[2] JTS144-1-2010《港口工程荷载规范》[s].北京：人民交通出版社 2010
[3] 中华人民共和国交通运输部.海港总体设计规范(JTS 165-2013)[S].北京：人民交通出版社 2013.
[4] OCIMF.Mooring Equipment Guidelines[M].3rd ed.Oil Companies International Marine Forum(OCIMF),2008.
[5] 林德辉.OCIMF及其出版物和中英文对照本[J].船舶,2016,27(03):96-100.

作者简介：周胜刚、管怀君、高洁、赵雪光，宁波大港引航有限公司；通讯地址：宁波市鄞州区沧海路 588 号绿园大厦 25 楼；联系电话：13780083100；电子邮箱：jack142857@163.com。

宁波舟山港甬舟集装箱码头 3#-5#泊位船舶靠离泊操纵仿真试验分析

陶雪兵，李梁，段晓军，慕永光，周建勇

（宁波引航站，浙江 宁波 315000）

摘　要：宁波甬舟码头位于金塘水道强潮流区，受岬湾地形影响，潮流复杂，船舶靠离泊操纵风险和难度较大。本文首先分析泊位前沿水域的潮流特性，通过船舶操纵仿真试验，研究风流等外力影响下船舶靠离泊安全风险及操纵规律，并提出相应通航安全对策建议。试验结果表明，船舶靠离泊操纵难度受风影响较大，且潮流复杂变化对靠离泊安全影响显著。结合仿真试验，本文提出了靠离泊潮流条件、拖轮配备等安全保障建议，旨在为驾引人员提供操作安全参考和指导，以保障集装箱船舶的靠离泊安全。

关键词：船舶操纵；复杂水域靠离泊；潮流特性

宁波舟山港甬舟集装箱码头位于金塘岛西南部大浦口湾，码头地处金塘水道强潮流区，由于岬湾地形的影响，洄流明显，潮流复杂[1]。目前甬舟集装箱码头 3#-5#泊位已完成交工验收，码头对开水域属交通要道，来往船舶众多，交通流复杂，船舶靠离泊操纵风险和难度较大。在港口水域中，靠离泊码头是非常重要的船舶操纵作业，也是船舶引航员必备的能力之一[2]，有必要通过对码头前沿及附近水域的潮流和通航环境的分析研究，找出潮流规律，结合船舶操纵特性，指出船舶靠离泊操纵存在的风险并提出安全措施及相关建议。

1 码头前沿水域潮流分析

1.1 流对船舶作用力

根据《港口工程荷载规范》及《船舶操纵》作用于船舶的水流力计算公式：

$$F = C\frac{\rho}{2}V^2B'$$

式中，F 为水流对船舶横向力（KN）；C 为水流对船舶横向分力系数，横向水流漂角为 90°，C≈1，如图 1；ρ 为海水密度，1.025t/m^3；V 为水流速度，m/s；B’为船舶吃水线以下投影面积（约取船长 L×吃水 d），m^2；回旋水域底标高与航道底标高保持一致，均为-18m。

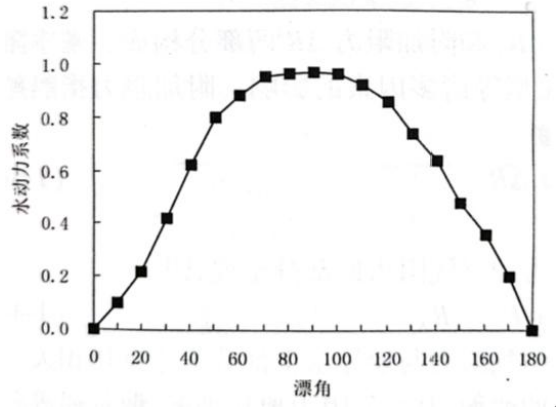


图 1 水动力系数 C 取值曲线图

1.2 2023 年潮流特征

大潮潮流特征：在主航道急涨、急落时，3#-5#泊位附近有压拢流，整体落流时间长于涨流时间，落流流速大于涨流流速。甬舟码头地理位置特殊，受大浦口山咀和外湾山咀突出的岬角地形影响，码头对开 100-500m 流态变化快且复杂，当主航道急流时，码头边出现里外流向和流速不一致的涸流、涡流现象。

小潮潮流特征：甬舟码头 3#-5#泊位潮流总体特点是不规则半日潮，一日两涨两落，在主航道急涨、急落时，码头附近有压拢流，整体落流时间长于涨流时间，落流流速大于涨流流速。甬舟码头地理位置特殊，受大浦口山咀和外湾山咀突出的岬角地形影响，码头对开 100-500m 流态变化快且复杂，当主航道出现急流时，经常出现里外流向和流速不一致的涸流、涡流现象。

1.3 泊位前沿水域潮流综合分析

各潮流测站与码头的位置关系如下图所示。

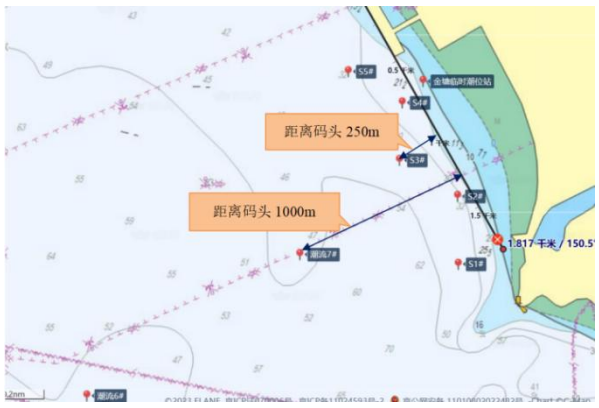


图 2 各测站与码头的位置关系

S2#、S4#站距离码头 50m，S1#、S3#、S5#测站距离码头 250m，潮流 7#测站距离码头 1000m。

1）距泊位前沿 1000m 的水域内（7#测站），潮流具有明显的往复流特征。

2）泊位前沿旋回水域内（S3#距泊位前沿 250m），表层 5m 潮流流向具有往复特征：涨潮流方向 350°左右（涨潮流 5-6 小时）；落潮流方向 152 ° -170°（落潮流 14-15 小时）；落水时段明显长于涨水时段。涨落潮流的最大流速均为 1.5 节左右。涨潮流方向集中在 350°左右，落潮流方向集中在 160°左右。

3）泊位前沿旋回水域内（S5#测站，距泊位前沿 250m），表层 5m 潮流流向具有明显的往复特征：涨潮流方向 330°-340°（涨潮流 10-12 小时）；落潮流方向 133 ° -149°（落潮流 8-10 小时），落水时段与涨水时段基本相同。涨落潮流的最大流速均为 1.5 节左右。涨潮流方向集中在 330°左右，落潮流方向集中在 140°左右。

4）在相同的日期与时间内，2#测站（5#泊位前沿）与 4#测站（3#泊位前沿）具有不同的潮流特征。4#站位涨潮时段，2#站位已呈现落潮时段，该潮流特征表明，在 5#泊位前沿水域存在着回转流。

5）甬舟码头前沿水域潮流受到山咀阻挡、岬角的挑流作用形成洄流，急落水冲向码头南端外湾山咀，一部分流入金塘水道，一部分受外湾山咀挑流作用在甬舟泊位前沿水域形成涨洄流，3~5#泊位前沿洄流示意图如下：

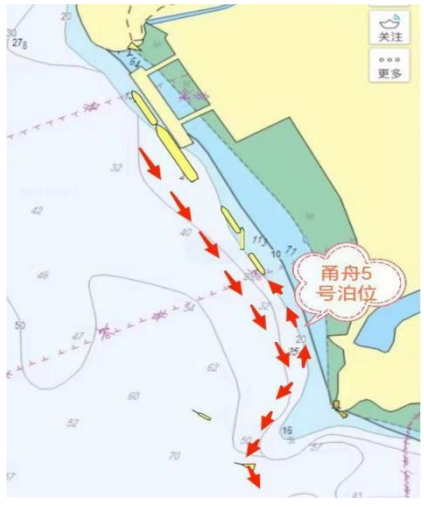


图 3 码头前沿回流示意图

2 船舶靠离泊操纵模拟试验

2.1 试验目的及设备

针对码头 3#-5#泊位设计船型靠离泊的可行性和安全性进行了模拟试验论证，并提出通航安全建议。本次模拟试验从船舶操纵角度验证靠离泊期间受风流影响程度，总结操作过程中的规律，指导今后实际船舶操纵。

模拟试验平台采用 Transas 公司研发的 NTPRO 5000 型全任务航海模拟器。通过典型设计船型进出该水域的航行和靠离泊模拟实验，研究船舶航行和靠离泊的运动轨迹及操作要点。

2.2 船舶操纵模拟设计

2.2.1 试验条件

针对风流等外力影响最不利于船舶操纵安全的情况，设计如下外界条件的试验方案：本次模拟以横风 E 风、SE 风、N 风、NW 风为主，模拟试验风力主要选择 6~7 级；模拟试验流况根据港区的流况设计，本区海流属非正规半日潮流，考虑到泊位前沿附近潮流的特殊性及复杂性，本次模拟结合实测潮流数据设置了流场，船舶根据航行位置自动调取所在位置的流速和流向，模拟流场基本能反映泊位前沿流场实际情况。

2.2.2 模拟试验船型及航速

影响船舶进出港安全的船舶因素包括设计船型、载重状态、进港航速、靠离泊方式以及拖船使用计划等。

1）本次模拟选取的试验船型主尺度如表 1 所示。

表 1 试验船型

船型	吨级	船长（m）	船宽（m）	满载吃水（m）
集装箱船	15 万吨级	367	51.2	16.0
集装箱船	10 万吨级	346	45.6	14.5

集装箱船	7 万吨级	300	40.3	14.0

2）船舶载重状态

根据营运的需求，满载及压载均进行了模拟。

3）航速的选取

航速的大小是影响船舶在航道中航行安全的重要因素之一[3]。本次模拟试验结合现有实际船舶靠离泊的航速规律，在岬角南侧航道上初始速度设为 6kn 左右。

2.3 模拟试验电子海图及模拟范围

根据码头实际靠离泊操纵经验，靠离泊船舶一般按实际可航水域进行掉头操纵，如图 4 所示。

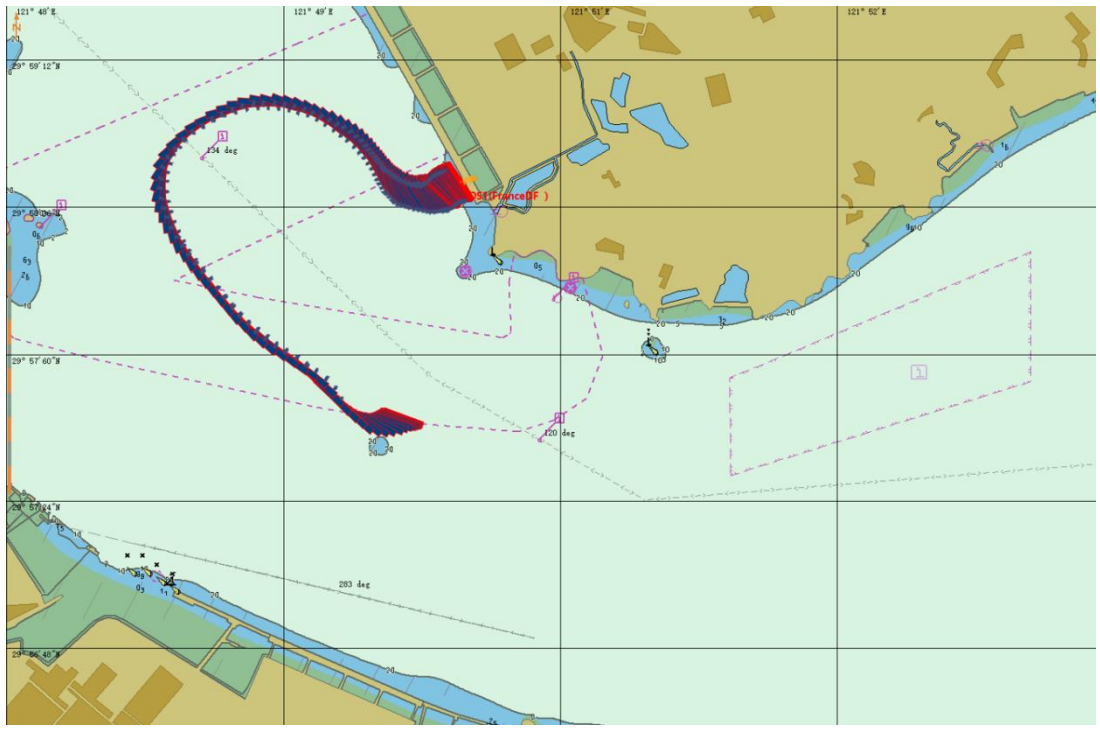


图 4 电子海图及模拟范围示意图

2.4 模拟试验分析

为了更好地验证甬舟集装箱码头 3#~5#泊位不同集装箱船型靠离泊的规律及风险程度，本文根据泊位、风向及潮流特点选择进行了 25 组试验，考虑到篇幅有限，因此选定几组典型试验进行分析。

2.4.1 10 万吨级船舶靠泊试验结果分析

当风力为 7 级时，10 万吨级集装箱船舶掉头靠泊 5#泊位时，由于集装箱船受风面积较大作用，当受到 7 级风影响，5#泊位前沿存在扰流，在风流共同作用下船舶靠泊过程中漂移较为明显，同时在泊位前沿船舶受船舶流场分布产生扭矩的影响，船舶靠泊过程中受力分布及运动趋势可能会发生瞬时变化，操纵人员需随时关注流场变化；此外，在掉头过程中，受风流影响可能漂移至邻近泊位前沿水域，且在掉头时间较长，拖轮受力较大。

在 7 级风靠泊 5 号泊位时，10 万吨级集装箱船舶 7 级风时需增大拖轮马力才能安全靠离泊。

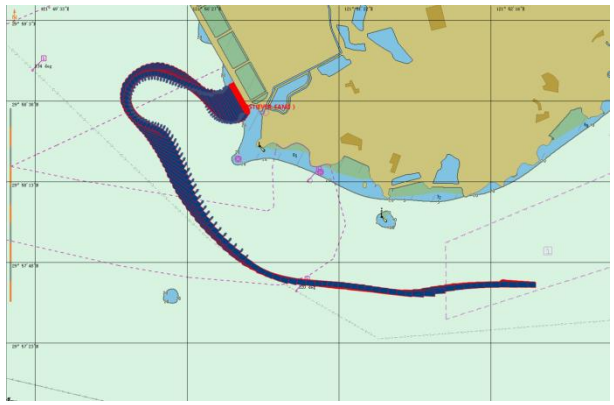


图 5 靠泊 5#泊位运动轨迹图（10 万吨级、风力 7 级，风向 290°）

当风力为 6 级时，如图 6 所示，这拖轮受力较为正常，落潮流顺靠相对于涨潮流掉头靠较为顺利，靠泊时间相对较短。需要注意的是，5#泊位前沿存在较大的扰流，流场对船舶不同位置的影响不太一样，因此，在靠泊 5#泊位过程中，特别是强拢风情况下，5#泊位前沿受到风流共同作用以及船舶受流扭矩的影响，如果拖轮马力不足，很有可能在 5#泊位前沿无法平行入泊，造成船舶触碰码头的事故。

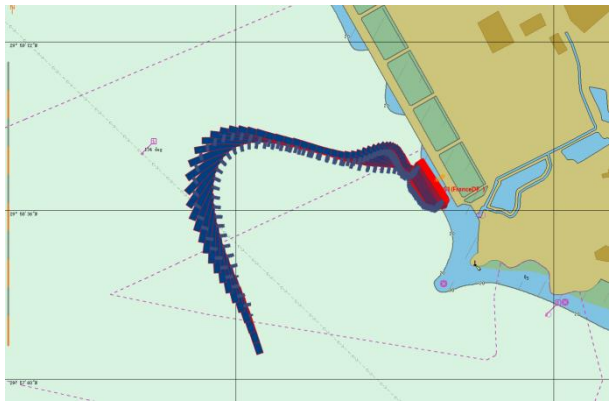


图 6 靠泊 5#泊位运动轨迹图（10 万吨级、风力 6 级，风向 060°）

根据试验结果，对于 10 万吨级集装箱船舶 6 级风情况下靠泊 3#~4#泊位时需配备 3 艘 4800HP 以上拖轮；靠泊 5#泊位困难程度增加，建议靠泊 5#泊位时额外增加 1 艘拖轮协助控制船舶。

2.4.2 15 万吨级船舶靠泊试验结果分析

当风力为 7 级时，如图 7 所示，15 万吨级集装箱船舶掉头靠泊时，由于集装箱船受风面积较大作用，当受到 7 级风影响，在风流共同作用下船舶靠泊过程中漂移较为明显，且在掉头时间较长，拖轮受力较大。

在 7 级风靠泊时，15 万吨级集装箱船舶靠离泊相对较为困难，需要拖轮马力较大，考虑泊位前沿存在扰流，特别是 5 号泊位前沿潮流复杂，建议 15 万吨级船舶靠泊时风力选择 7 级以下。

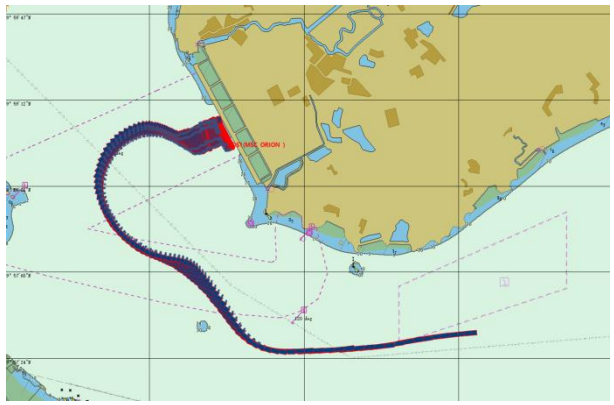


图 7 靠泊 3#泊位运动轨迹图（15 万吨级、风力 7 级，风向 290°）

当风力为 6 级时，如图 8 所示，15 万吨级集装箱船舶靠泊 4#泊位在拖轮协助下靠泊能够安全进行。

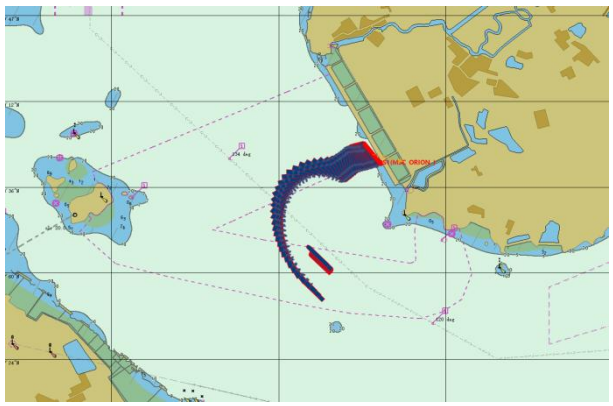


图 8 靠泊 4#泊位运动轨迹图（15 万吨级、风力 6 级，风向 220°）

但需要注意的是，在模拟靠泊 5#泊位时试验失败，如图 9 所示。主要由于 5#泊位前沿存在较大的扰流，流场对船舶不同位置的影响不太一样，因此，在靠泊 5#泊位过程中，特别是强拢风情况下，5#泊位前沿受到风流共同作用以及船舶受流扭矩的影响，如果拖轮马力不足，很有可能在 5#泊位前沿无法平行入泊，造成船舶触碰码头的事故。

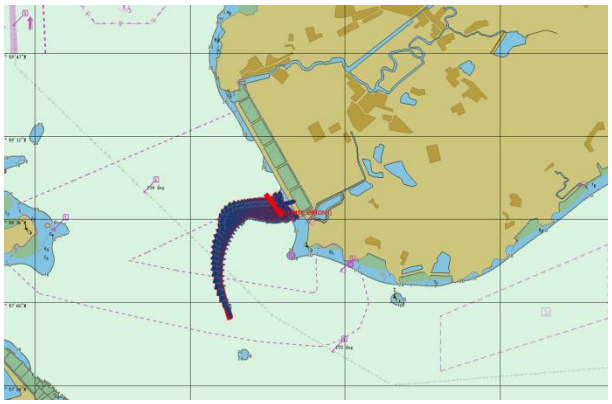


图 9 靠泊 5#泊位运动轨迹图（15 万吨级、风力 6 级，风向 220°、失败）

根据试验结果，对于 15 万吨级集装箱船舶 6 级风情况下靠泊 3#-4#泊位时需配备 4 艘 4800HP 以上拖轮；靠泊 5#泊位困难程度增加，建议靠泊 5#泊位时其中选择 7000 马力以上大拖轮协助控制船舶。

2.4.3 10 万吨级船舶离泊试验结果分析

当风力为 6 级时，如图 10 所示，集装箱船舶受风面积进较大，当受到 6 级风影响时，在风流共

同作用下船舶掉头离泊过程中存在一定程度漂移，受风流影响可能漂移至邻近泊位前沿水域，在 2 艘拖轮协助下集装箱船舶 6 级风实现安全离泊比较困难，应增加拖轮和选择利于离泊的潮流。



图 10 离泊 5#泊位运动轨迹图（10 万吨级、风力 6 级，风向 240°）

3 试验结论及建议

3.1 结论

本文经过靠离泊试验记录的分析和讨论，得出以下主要结论：

1）在设定的风流情况下，依靠拖轮的协助，设计船型能够安全靠离 3#-5#泊位，码头前沿水域能够满足船舶安全靠离泊操纵需要。

2）风对船舶靠离泊操纵的影响很大，不同风级工况条件下、相同船型模拟试验操纵难度不同，船型越大，操纵难度越大。15 万吨级集装箱船舶靠离泊操纵难度明显大于 10 万吨级船舶。拖轮吨级越大所需拖轮的功率越大，才能抑制风对船舶漂移的影响。

靠离泊操纵过程中风对船舶操纵影响是一个变化的过程，船舶在向下风向漂移的过程中存在偏转的现象，应充分利用拖轮的作用，保持船舶位置和姿态。

3）主航道及泊位前沿水域潮流特征不一致，存在较大的差别，不同潮汛、不同潮时、不同位置潮流变化（甚至是突变）是影响船舶靠离泊安全的又一重要因素，随着船舶接近泊位前沿水域，潮流方向与流速均发生变化，并且该变化不具有规律性，潮流对船舶靠离泊安全影响很大。

入泊过程中潮流的突然变化会导致预先设定的靠泊计划出现变数，影响靠泊安全，特殊时段靠泊时应增加拖轮的数量或者功率，供紧迫局面时使用。

3.2 靠离泊潮流条件

1）大潮汛期间 5#泊位避开低潮前 3-1.5 小时时段靠离泊。初一、十六为大潮日，大潮日前 2 天、后 3 天时段为大潮汛时段。

2）其他潮汛期间 5#泊位避开低潮后 0.5-2 小时时段靠离泊。

3）3#、4#泊位可全潮靠离泊。但在 5#泊位避开时段靠泊，无拖轮或者配备 1 艘拖轮助操的船舶，应尽可能增加 1 艘拖轮助操。

3.3 拖轮配备

1）集装箱船舶拖轮配备应综合考虑风力、风向，流向、流速，受风面积，船舶吃水，拖轮滑失等各种条件。根据现有拖轮配备规定及船舶靠离泊配备经验，3#-5#泊位前沿水域潮流特征，拖轮配备总功率不宜小于载重吨的 10%。

2）为保障码头靠离泊操纵助操拖轮的适应性，码头水域应常驻 2-3 艘拖轮，并且至少有 1 艘拖轮的功率为 5000HP。后期当 3#-5#泊位开始靠泊 15 万吨级集装箱船舶时，至少配备 1 艘功率为 6000HP 的拖轮常驻。

3.4 安全建议

（1）靠离泊时风力≤6 级（13.8m/s），如不可避免在 7 级风力条件靠离泊，需根据当时的风流情况增加拖轮数量或马力。

（2）码头水域潮流复杂，建议码头方建立潮流预报系统。

（3）本工程码头前沿不同距离潮流存在差异，建议码头方根据潮流分析成果，结合实际靠离泊经验制订《告船长书》。

4 结束语

甬舟码头 3#-5#前沿水域潮流条件复杂，驾引人员如果不能准确掌握码头前沿潮流特点，靠离泊期间可能导致一定风险。本文旨在为驾引人员的靠离泊操作安全提供有益的参考和指导。

未来应进一步研究潮流规律，必要时进行潮流数模研究，同时不断积累实船靠离泊经验，从小到大、循序渐进，根据潮流规律与经验积累科学调整靠离泊窗口，使之更好的服务于港口生产，亦为大型集装箱船舶靠离泊操纵安全提供保障。

参 考 文 献

[1] 陶雪兵. 甬舟集装箱码头靠离泊方法探讨 [J]. 中国水运(下半月), 2017, 17 (10): 27-28+104.

[2] 董明远. 船舶在靠离泊时的水动力因素研究 [J]. 中国设备工程, 2022, (03): 243-244.

[3] 张弘. 探讨大连 30 万吨级原油码头船舶航行及靠离泊安全模拟试验的方案 [J]. 天津职业院校联合学报, 2014, 16 (05): 64-68.

作者简介

陶雪兵，宁波引航站，浙江省宁波市高新区沧海路 588 号绿城绿源大厦 25 楼，13780081987，446999599@qq.com

李 梁，高级引航员，宁波引航站，浙江省宁波市高新区沧海路 588 号绿城绿源大厦 25 楼

段晓军，高级引航员，宁波引航站，浙江省宁波市高新区沧海路 588 号绿城绿源大厦 25 楼

慕永光，高级引航员，宁波引航站，浙江省宁波市高新区沧海路 588 号绿城绿源大厦 25 楼

周建勇，一级引航员，宁波引航站，浙江省宁波市高新区沧海路 588 号绿城绿源大厦 25 楼

基于 AIS 数据的警戒区船舶碰撞风险评估方法研究

钟雨,陈茜,刘娇,冯宏祥,郑彭军

宁波大学海运学院，浙江 宁波，315211

摘 要：针对警戒区船舶碰撞风险的准确量化问题，本文提出了一种新的基于船舶自动识别系统(Automatic Identification System,AIS)数据的碰撞风险评估方法。首先，基于警戒区 AIS 数据提取会遇船舶遇轨迹。其次，基于会遇船舶轨迹对构建概率船舶域。然后，引入基于概率船舶域的警戒区船舶碰撞风险计算方法。最后，以宁波-舟山核心港区的 2 号和 3 号警戒区 AIS 数据为例进行实例分析。结果表明，该方法能够合理量化碰撞风险，并准确划分警戒区的船舶碰撞风险程度，帮助船舶驾驶员以及相关管理部门实施有效的安全管理措施，提高警戒区的航行安全。

关键词：警戒区；概率船舶域；碰撞风险；AIS 数据

1 引言

船舶碰撞事故在海上运输中屡见不鲜，经常造成重大人员伤亡、巨大经济损失和严重的环境污染[1]。大多数船舶碰撞事故是人为因素造成的，约占事故总数的 80%[2]。在全球经济扩张的推动下，船舶数量的增加和水上交通的日益复杂，在警戒区中可能导致船舶碰撞风险的增加或不可预见的船舶碰撞事件的增加[3]。因此，研究警戒区船舶碰撞风险评估对船舶避碰决策和海上安全监管具有重要意义。

船舶碰撞风险研究一直是海上交通安全研究的热点问题[4][5]。近年来，众多学者对船舶碰撞风险的理论和实践进行了广泛的研究，主要包括碰撞事故的概率和碰撞事故的统计分析。Fujii 等[6]首先采用船舶碰撞统计方法来获取碰撞概率。Wang 等[7]以香港水域为研究案例，基于历史事故数据，采用等效后果法对船舶碰撞后果进行分类和量化，然后构建反向传播（BP，Back Propagation）神经网络估计不同后果的概率，再将碰撞概率与相应后果进行结合来预测碰撞风险。贝叶斯网络也被广泛应用于船舶碰撞风险评估研究，Qing 等人[8]基于《巴黎备忘录港口国管制新检查制度》的数据，使用贝叶斯网络和证据推理方法来评估沿海水域船舶的整体风险。然而，这些方法在碰撞风险实时监测场景中的适用性还有待提高。Wang 等[9]在参数计算过程中，考虑船舶位置预测的不确定性，采用新颖的互反计算方法，并整合了本船航线信息，提出了一种基于领域的船舶碰撞风险实时感知模型，该模型符合航行实践，形成了一种碰撞风险识别方法。Xin 等[10]设计了一种新的考虑环境干扰、机械因素和人为因素的基于概率风险的船舶冲突检测方法，该方法可以识别出具有潜在多船碰撞风险的目标船舶并量化碰撞发生的概率。Yoo 等[11]采用环境应力和碰撞风险模型对船舶碰撞风险进行评估。Ant 等[12]采用受 Cox 比例风险回归模型启发的方法，结合贝叶斯网络和最小二乘法，以全球碰撞事故历史数据和世界商船队信息为基础，评估风险因素对碰撞概率和碰撞事故发生的影响。然而，该方法侧重于计算碰撞概率，对多船碰撞的风险评估不够全面。

在研究船舶所在区域的影响因素时，通常会结合不同的数学模型来评估船舶的碰撞风险[5]。Cheng 等人[13]提出了一种模糊逻辑模型，在获得和错过适当的渡河机会时，对渡河间隙的机会和间隙的适应性进行预估，评估船舶在冲突点的碰撞风险。Liu 等[14]在考虑区域内船舶碰撞风险时，运用了博弈论和分子动力学理论。L. Du 等[15]提出了一种基于改进的非线性速度障碍（Non-linear Velocity Obstacle，NL-VO）算法的实时碰撞风险评估方法。该方法包括两个主要模块：轨迹不确定性模块假设圆形限制区域半径的增加符合 Wiener 过程；碰撞风险评估模块采用 NL-VO 算法结合动态圆形限制区域对潜在碰撞进行评估。设计了特定港口航道的若干碰撞场景，验证了采用该方法实时评估船舶碰撞风险的可行性。Liu 等[16]提出了一种基于合作博弈的任意两艘船舶和多艘船舶相遇碰撞风险评估模型。Zhen 等[17]针对复杂水域多船相遇情况下船舶区域碰撞风险难以准确量化的问题，本文提出了一种结合密度聚类和多影响因素的复杂水域船舶区域碰撞风险评估新方法。Zhang 等[18]提出并改进了一种先进的船舶碰撞风险评估方法。仿真结果表明，改进后的船舶碰撞风险评估模型对于识别开阔水域船舶碰撞风险具有更高的适用性和准确性。基于最近会遇距离(Distance to Closest Point of Approach，DCPA)和最近会遇时间(Time to Closest Point of Approach，TCPA)的方法也被广泛应用于船舶碰撞风险评估中。Prastyasari 和 Shinoda[19]在巽他海峡分道通航方案区域通过险情事故分析进行了航道船舶碰撞风险评估。Debnath 等[20]提出了一种二项模型来评估船舶碰撞危险性，通过有序概率回归模型表征风险的大小。在安全边界法中，船舶域常用于分析船舶的空间关系，确定船舶碰撞风险[21]。为了评估碰撞风险，已经开发了许多船舶域模型，如椭圆船舶域[22-23]、模糊船舶域[24]、四元数船舶域[25]、经验船舶域[26]、概率船舶域[27]等。

上述船舶碰撞风险评估的研究提高了海上交通管理的效率。虽然以往的研究从不同角度测量船舶碰撞风险，但大多数研究忽略了该区域船舶之间的相互作用[5]，尤其是是警戒区内的船舶。为了科学合理地建立船舶定线制安全风险评价模型，更好地保障复杂航行环境下警戒区的航行安全，Xue 等[28]提出了一种基于改进熵权 TOPSIS 的警戒区安全评价模型。李松等[29]引入航行交通冲突技术定

量评价警戒区的安全性。为警戒区安全分析系统的建立奠定了基础，为警戒区几何设计和交通组织的优化提供了决策依据。Z. Pietrzykowski 和 J. Magaj 等人[30]研究了分道通航制(Traffic separation scheme，TSS)中的船舶域，并分析了 TSS 内建立的与船舶交通变化有关的警戒区。此外，在特定 TSS 的警戒区内定义船舶域，并将其与沿着交通航道行驶的船舶域进行比较。Jia 等[31]提出了一种条件时间生成对抗网络（conditional temporal generative adversarial network, CTGAN）来解决船舶轨迹预测问题，并将警戒区内船舶的预测误差最小化。Lin 等[32]提出了一种基于基尼系数的船舶定线制水域碰撞风险定量评估方法。Feng 等[33]采用信息熵法结合 K-means 聚类基于 AIS 数据，定量评估船舶定线制水域的碰撞风险，为在繁忙水域定量评估船舶碰撞风险提供了一种新的方法。

本文提出了一种基于 AIS 数据进行警戒区碰撞风险评估的新方法，该方法可以同时考虑相关船舶的静态和动态数据信息，能更准确地评估区域碰撞风险。重要的是，该方法将帮助海事安全机构识别具有较高船舶碰撞风险的区域，并帮助制订针对性的安全管理措施，以提高警戒区的航行安全。

2 概率船舶域模型

在水路通行能力中，船舶域被定义为“航行中船舶周围跟随的大多数船舶驾驶员都避免进入的区域”[22]。然而，在船舶避碰研究中，船舶域通常被定义为“驾驶员希望远离其他船舶和静止物体的船舶周围的有效区域”[39]。从船舶碰撞风险的角度来看，船舶周围水域可分为危险区域和安全区域两部分[40]。在构建警戒区船舶的概率船舶域模型之前，需要明确一个关键概念：禁止边界（Forbidden Boundary）和理想边界（Desired Boundary）。禁止边界是指在危险区域内，根据警戒区内船舶之间的相对位置，应划定为禁止进入的特定区域。也就是说，其他船舶不得侵入禁止区域；如果其他船只进入该区域，碰撞风险程度最高。理想边界被定义为安全区域和危险区域之间的分界线。警戒区的禁止边界和理想边界如图 1 所示。

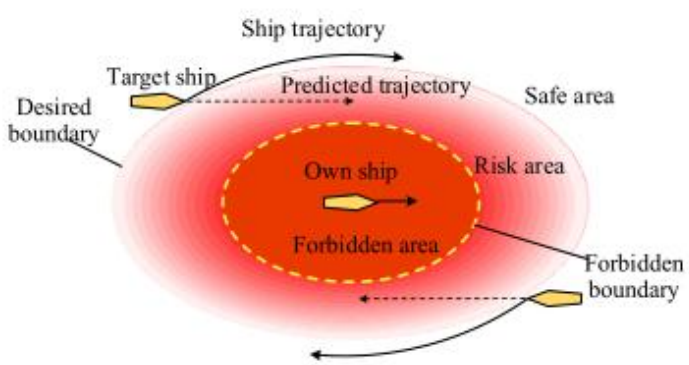


图 1　从船舶域角度研究船舶碰撞风险图

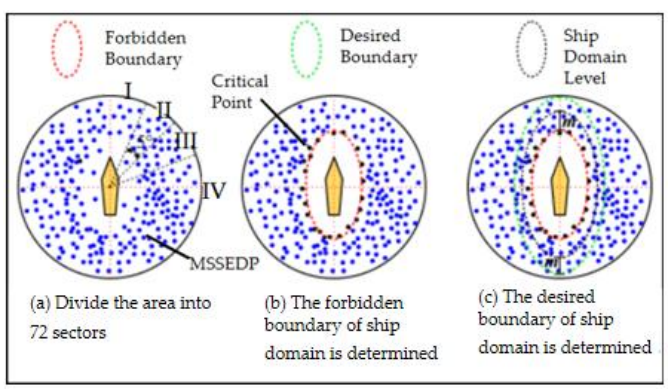


图 2　概率船舶域确定示意图

采用数理统计(95%置信区间)确定船舶域禁止边界。如图 2(a)所示，在给定时间段内航行在警戒区内的所有会遇船舶对的船舶最近会遇安全距离点（MSSEDP，Minimum Ship Safety Encounter Distance Points）数据以 5 度间隔均匀地划分为 72 扇形区域。随后，对每个扇区内的最 MSSEDP 与中心之间的距离进行排序。选取每个扇区 5%的数据点作为临界点(例如，第一个扇区有 100 个 MSSEDP，按距离排序，最靠近中心的点作为第一个点，第 5 个数据点作为临界点)[36]。最后，利用最小二乘法根据各扇形区域的临界点拟合一个椭圆[42]，作为船舶域的禁止边界，如图 2 (b)所示。

“理想边界”划定了船舶碰撞时船员通常尽量保持安全区域的范围，代表了船舶密度峰值的轮廓。首先，将最 MSSEDP 数据分割为“n”层，通过船舶周围椭圆禁止边界的半长轴和半短轴，按比例缩放，确定理想边界。然后计算各层的船舶密度，选择密度最大的层作为船舶域的理想边界，如图 2(c)所示。船舶域的理想边界可以表示为:

$$a_i = a_{i-1} + m \text{ , } i\text{=(1,2,.....,n-1,n)} \quad (1)$$

$$b_i = \frac{b_0 \times a_i}{a_0} \quad (2)$$

$$S_i = (a_i \times b_i - a_{i-1} \times b_{i-1}) \times \pi \quad (3)$$

$$D_i = \frac{N_i}{S_i} \quad (4)$$

$$a = \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_i \end{Bmatrix} If \begin{Bmatrix} D_1 = \max(D_1, D_2, ..., D_{i-1}, D_i \\ D_2 = \max(D_1, D_2, ..., D_{i-1}, D_i \\ \vdots \\ D_i = \max(D_1, D_2, ..., D_{i-1}, D_i \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$b = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_i \end{Bmatrix} If \begin{Bmatrix} D_1 = \max(D_1, D_2, ..., D_{i-1}, D_i \\ D_2 = \max(D_1, D_2, ..., D_{i-1}, D_i \\ \vdots \\ D_i = \max(D_1, D_2, ..., D_{i-1}, D_i \end{Bmatrix} \quad (6)$$

其中，a_i 为椭圆的半长轴，b_i 为椭圆的半短轴，m 为椭圆半长轴增加的长度（为固定值），a_0 为船舶领域禁止边界的半长轴，b_0 为船舶领域禁止边界的半短轴，D_i 为船舶领域第 i 级的船舶密度，N_i 为船舶领域第 i 级的船舶总数，S_i 为船舶领域第 i 级的面积，a 为船舶领域理想边界的半长轴，b 为船舶领域理想边界的半短轴。

在船舶会遇过程中，碰撞风险与船间距离成反比，船舶域内的碰撞风险由外向内逐步升级[40][43]。为评估船舶域内不同方向和位置的碰撞风险，将船舶域禁止边界与理想边界之间的区域划分为 j 个级别，其数学表达式为:

$$a = \frac{a_{de} - a_{fb}}{j} \quad (7)$$

$$a_n = a_{n-1} + a \text{ , } n\text{=(1,2,.....,}j\text{-1,}j\text{)} \quad (8)$$

$$b_n = \frac{b_f \times a_n}{a_f} \qquad (9)$$

其中，a 为椭圆半长轴的增加长度，a_{de} 为船舶领域理想边界的半长轴，a_{fb} 为船舶领域禁止边界的半长轴，b_{fb} 为船舶领域禁止边界的半短轴，j 为船舶领域的分层数，a_n 为船舶领域第 n 层椭圆的半长轴，b_n 为船舶领域第 n 层椭圆的半短轴。

根据式(4)计算船舶域各层次的船舶密度。这些密度值被归一化为 0 到 1 的范围，确保所有级别的密度总和等于 1。每一层的密度可按以下公式计算：

$$M_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}, \text{i=(1,2,3,.....,j-1,j)} \qquad (10)$$

其中，M_i 表示船舶领域第 i 层的归一化船舶密度，m_i 表示第 i 层的实际船舶密度。通过拟合船舶密度函数到各层的密度，并为每层赋予权重，可以确定船舶领域内的碰撞风险。这种方法将船舶领域复杂的内部结构转化为可量化的数值格式，为使用 AIS 数据对警戒区内船舶进行碰撞风险评估的方法提供了重要依据。

3 警戒区内船舶碰撞风险计算

船舶碰撞风险是指两艘或两艘以上船舶相遇时发生碰撞的可能性，主要考虑位置、距离、方位等参数[44]。在基于船舶域的碰撞风险计算方法中，通常考虑本船的船舶域来评估碰撞风险，而无法获得目标船的碰撞风险[45]。

为了解决这一问题，Qu 等人[46]提出了一种通过重叠本船和目标船的船舶域来评估新加坡海峡碰撞风险的方法。船舶域的重叠面积越大，船舶之间的距离越小，表明碰撞的风险越大。因此，利用船舶 AIS 数据的动态和静态信息，结合船舶概率域模型，对警戒区的碰撞风险进行评估。

在警戒区内的船舶会遇期间，船舶密度在船舶领域的不同距离和方位上有所变化。根据概率船舶域的定义，船舶域概率函数由随机变量的概率密度函数决定[27]。船舶最近会遇安全距离（MSSED，Minimum Ship Safety Encounter Distance）数据是随机变量$\&(\theta)$的样本，可以通过核密度估计来识别$\&(\theta)$的概率密度函数。扇形区 θ_i 中的 MSSED 数据按集合 MSSED={x| $\theta_i < angle(x) < \theta_i+1$, i=1,...,n} 分组，其中角(x)是 MSSED(x)的极角。$\&(\theta)$的概率密度函数计算公式如下：

$$g(x) = \frac{1}{K'}\sum_{j=1}^{k'}\phi_h(x - x_j) = \frac{1}{K'h}\sum_{j=1}^{k'}\phi_h\left(\frac{x - x_j}{h}\right) \qquad (11)$$

其中ϕ是在实数域 R 中满足 $\phi(x) \geq 0$ 和 $\int_R \phi(x)\mathrm{d}x = 1$ 的一维核函数；h 是大于 0 的参数；K' 是在 h 内待研究集合中的元素数量，本文采用高斯核函数来计算概率密度函数。

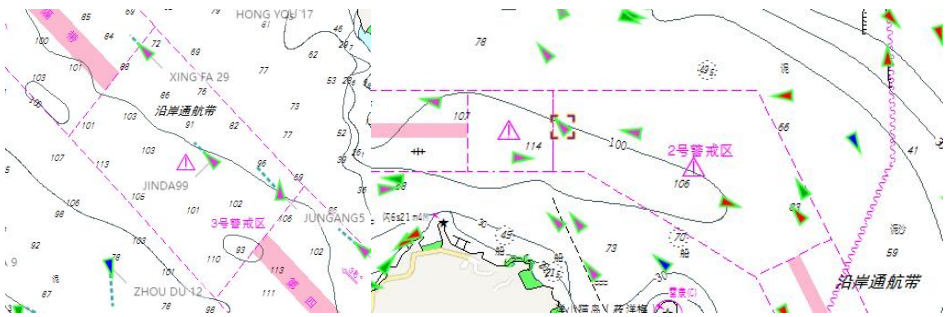
对于船舶碰撞风险评估，传统的船舶域采用阈值作为是否存在碰撞风险的判断依据。更具体地说，如果目标船在本船的船舶领域之外，则不存在碰撞风险，否则，存在碰撞风险[47]。概率船舶域不仅可以评估警戒区内船舶是否存在碰撞风险，还可以通过$\&(\theta)$的概率来计算风险值，这可以通过船舶最近会遇安全距离的概率来衡量。在位置（θ，r）处，警戒区内的的船舶碰撞风险的定义为如下公式：

$$R(\theta,r)=\begin{cases}1, & \text{if } 0<r\le r_{\min}(\theta)\\ 1-\int_0^{r-r\min} f_{\Delta(\theta)}(w)\mathrm{d}w, & \text{if } r_{\min}(\theta)<r<l(\theta)\\ 0, & \text{if } r\ge l(\theta)\end{cases} \tag{12}$$

其中 r 为他船到本船的最近会遇安全距离，$r_{min}(\theta)$为在扇形区 θ中禁止边界与本船的距离，$l(\theta)$为理想边界与本船的距离，$f_{\Delta(\theta)}$为在距离 x 处的概率密度函数&(θ)，$R(\theta,r)$为船舶碰撞风险值。

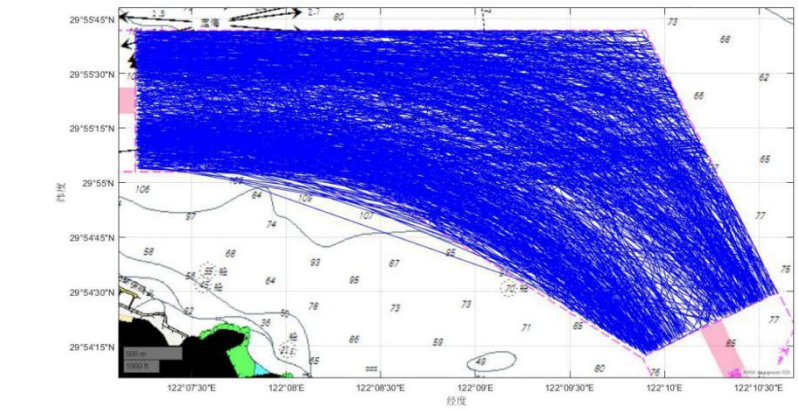
4 实证分析

本文选取宁波舟山港核心港区 2 号警戒区和 3 号警戒区为研究对象。图 3 是宁波舟山港核心港区 2 号警戒区和 3 号警戒区实际海图。本文基于宁波舟山港核心港区 2 号和 3 号警戒区历史 AIS 数据分别提取 500 对会遇船舶轨迹对。图 4 为宁波舟山港核心港区 2 号和 3 号警戒区内船舶轨迹可视化效果。

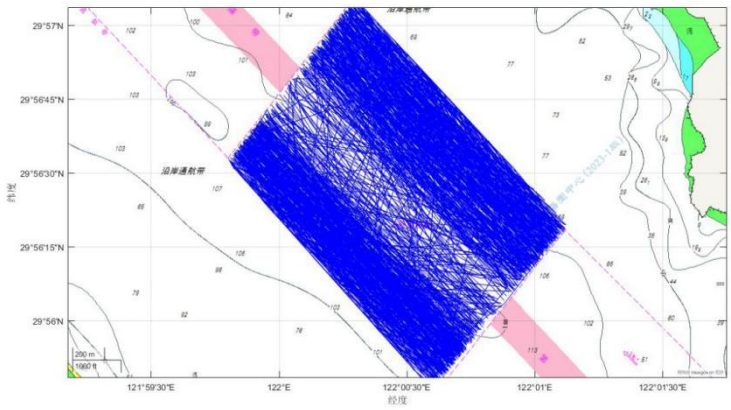


（a. 2 号警戒区） （b. 3 号警戒区）

图 3 宁波舟山港核心港区警戒区示意图



（a. 2 号警戒区）



（b. 3 号警戒区）

图 4　船舶轨迹图

假设会遇船舶对中两艘船舶：V_o 和 V_t，AIS 数据的动态信息包含实时的经度、纬度、航速和航向，对应其名称分别为 V_o（$\lambda_o, \phi_o, S_o, C_o$），$V_t$（$\lambda_t, \phi_t, S_t, C_t$）。本文基于墨卡托算法来计算距离，墨卡托距离是在船舶航行实践中通常使用的距离。墨卡托算法可以准确地计算出两艘船舶之间的距离。与欧氏距离相比，墨卡托距离不仅准确而且具有实际意义。基于 AIS 数据对会遇船舶对轨迹点间距离计算如公式（13）-（18）所示。

$$D_\lambda = \lambda_t - \lambda_o \tag{13}$$

$$D_\varphi = \varphi_t - \varphi_o \tag{14}$$

$$M_p = 7915.7 \log[\tan(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2})(\frac{1 - e\sin(\varphi)}{1 + e\sin(\varphi)})^{e/2} \tag{15}$$

$$D_{MP} = M_{P_t} - M_{P_o} \tag{16}$$

$$Bearing = \arctan(D_\lambda / D_{MP}) \tag{17}$$

$$D = D_\varphi / \cos(B) \tag{18}$$

其中，D_λ 表示经度差，D_ϕ 表示纬度差，*Mp* 表示纬度梯度率，D_{MP} 表示不同纬度间的纬度梯度率差，*Bearing* 表示目标船的方位，*D* 为会遇船舶对轨迹点间距离，单位为海里。

基于计算得到的会遇船舶对轨迹点间距离，提取轨迹点间距离最小值对应船舶 AIS 数据计算会遇船舶对间相对方位，基于 AIS 数据对会遇船舶对轨迹点间最近距离对应相对方位计算如公式（13）-（17）所示。图 5 为会遇船舶对轨迹点变化图。其中黄色的点表示会遇船舶对最近会遇点，虚线表示最近会遇距离。

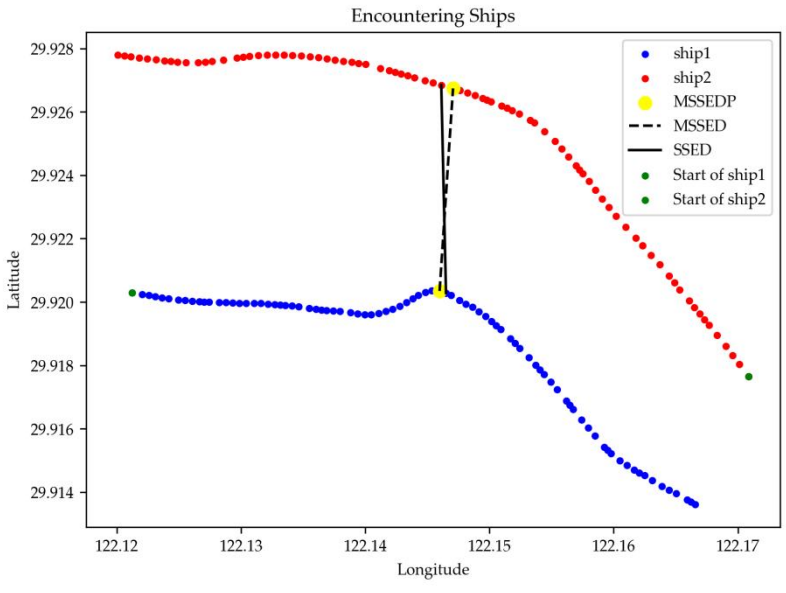
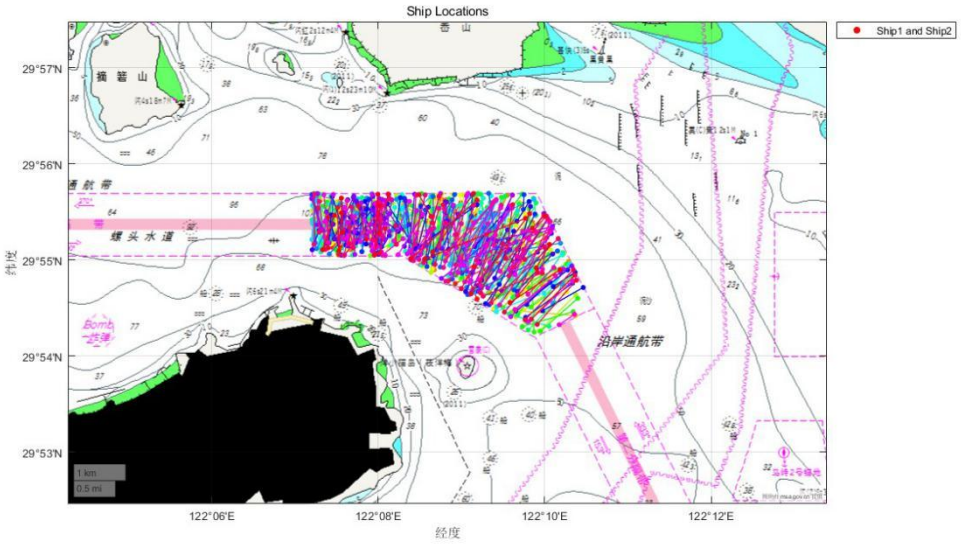
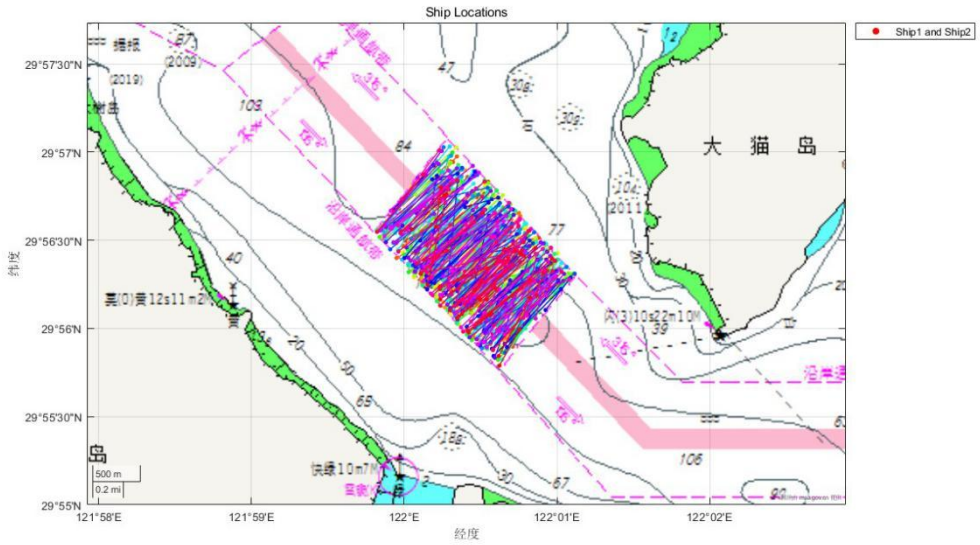


图 5　会遇船舶对轨迹点变化图

基于航海学领域距离方位法标记船位，根据计算得到最近安全会遇距离和相对方位数据，将会遇船舶位置在极坐标系下进行标定。首先，以极坐标系中心为参考点，根据会遇船舶对的航向数据标记航向，然后结合航向与相对方位标记船舶方位，最后根据计算得到的最近距离得到船舶具体位置。将本研究中宁波舟山港核心港区 2 号和 3 号警戒区历 500 对会遇船舶位置进行标定。图 7 为宁波舟山港核心港区 2 号和 3 号警戒区最近会遇点实际可视化效果图，其中会遇船舶对的 MSSEDP 用同一颜色表示并用线连接。图 8 为宁波舟山港核心港区 2 号和 3 号警戒区内船舶极坐标系下最近会遇点分布图。

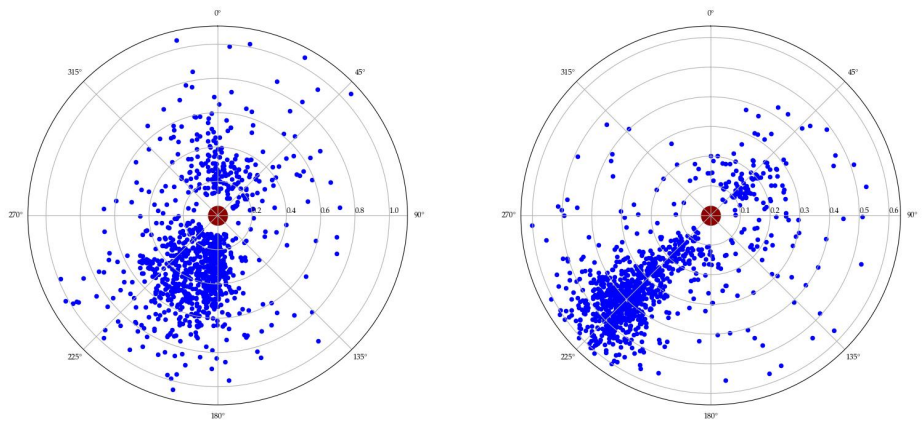


（a. 2 号警戒区）



（b. 3 号警戒区）

图 6 警戒区内船舶最近会遇点实际可视化效果图

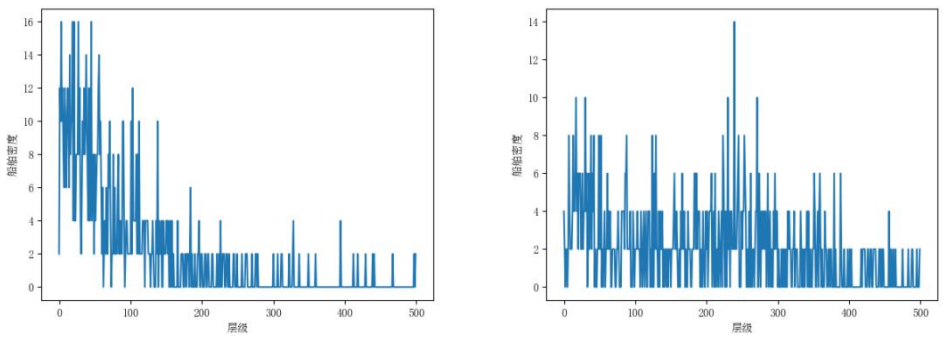


（a. 2 号警戒区） **（b. 3 号警戒区）**

图 7 警戒区内船舶极坐标系下最近会遇点分布图

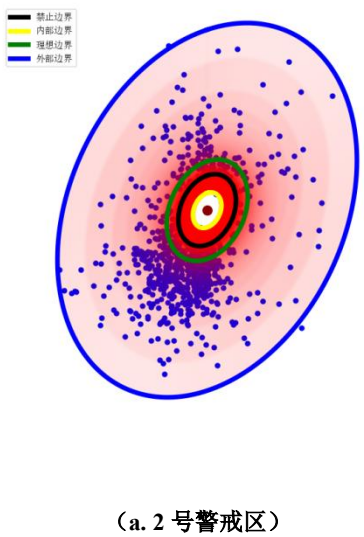
图 8 是使用本研究中提到的概率船舶领域模型构建中对宁波舟山港核心港区 2 号和 3 号警戒区内会遇船舶计算得到的理想边界的密度分布图。根据对 2 号警戒区内概率船舶领域的统计分析，该区域被分为 500 层；船舶密度的最大层级为 3、19、29、27、45、45，将椭圆曲线的 45 层定义为理想边界。根据对 3 号警戒区内概率船舶领域的统计分析，该区域被分为 500 层，船舶密度的最大层级为 239，将椭圆曲线的 239 层定义为理想边界。

图 9 是在宁波舟山港核心港区 2 号和 3 号警戒区内会遇船舶的概率船舶域模型禁止边界和理想边界分别用黑色实线和绿色实线表示，内部边界和外部边界分别用黄色实线和蓝色实线表示。

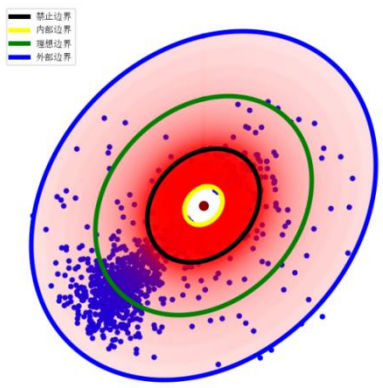


（a. 2 号警戒区） **（b. 3 号警戒区）**

图 8 警戒区内不同层级对应概率船舶域的船舶密度



（a. 2 号警戒区）



（b. 3 号警戒区）

图 9 警戒区内会遇船舶概率船舶域

宁波舟山港核心港区 2 号警戒区内船舶碰撞风险结果和可视化效果如表 1 和图 10 所示，3 号警戒区内船舶碰撞风险结果和可视化效果如表 2 和图 11 所示。

表 1 基于概率船舶域模型的 2 号警戒区内船舶碰撞风险值等级表

方位	0°			
距离（海里）	0.388	0.211	0.158	0.141
风险值	0.502	0.635	0.781	0.841
方位	45°			
距离（海里）	0.331	0.308	0.228	0.163
风险值	0.510	0.518	0.600	0.765
方位	180°			
距离（海里）	0.465	0.214	0.161	0.131
风险值	0.500	0.627	0.772	0.878
方位	225°			
距离（海里）	0.511	0.212	0.163	0.145
风险值	0.500	0.631	0.765	0.827

表 2 基于概率船舶域模型的 3 号警戒区内船舶碰撞风险值等级表

方位	45°				
距离（海里）	0.425	0.156	0.138	0.097	0.067
风险值	0.500	0.687	0.741	0.882	1
方位	225°				
距离（海里）	0.569	0.189	0.166	0.162	0.146
风险值	0.500	0.612	0.662	0.671	0.717

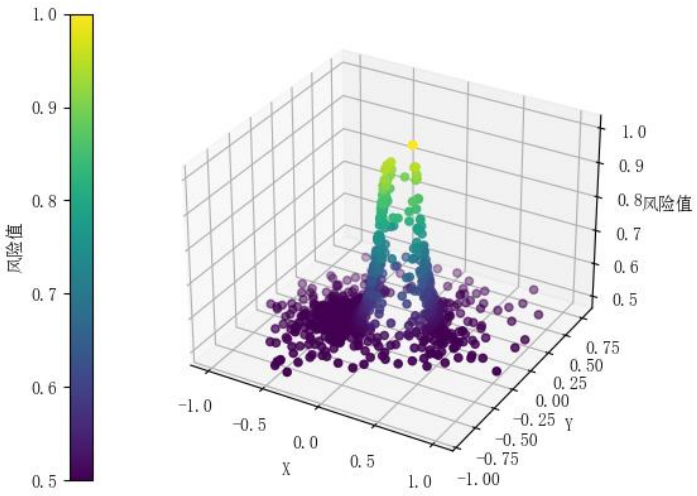


图 10　基于概率船舶域的 2 号警戒区内船舶碰撞风险可视化效果图

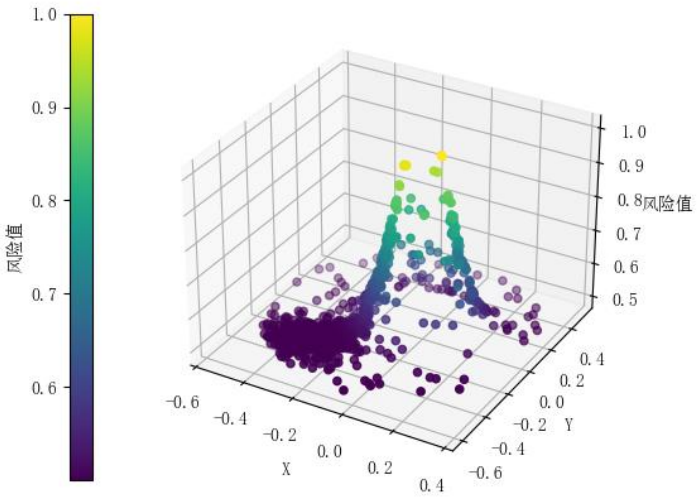


图 11　基于概率船舶域的 3 号警戒区内船舶碰撞风险可视化效果图

5　结论

本文提出了一种基于 AIS 数据有效确定警戒区概率船舶域的方法，包括 MSSED 数据计算和概率船舶域。随后，我们研究了如何使用新方法来评估警戒区的船舶碰撞风险。最后，运用该方法对宁波舟山港 2 号警戒区和 3 号警戒区进行了碰撞风险评估并计算风险值。与传统的碰撞风险评估模型相比，该方法能够兼顾碰撞的时空风险，给出一个适用的、定量的计算警戒区碰撞风险值方法。此外，该方法还克服了传统船舶碰撞风险评估方法对非线性风险变化表征不足的问题。它可以补充传统的碰撞风险评估模型，用于船舶碰撞分析，特别是对于警戒区的船舶碰撞风险评估。该模型可以帮助监管部分或船员识别具有较高碰撞风险的船舶或船舶对，并更好地评估多船会遇时警戒区的船舶碰撞风险，从而应对相对较高交通密度或复杂性航行环境带来的挑战。

参考文献

[1] Zhang, L., Meng, Q., 2020. Response to the discussion by Montewka Jaku, Gil Mateusz and Wr´obel Krzysztof on the article by Zhang & Meng entitled“probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment [ocean Eng. 186 (2019) 106130]. Ocean Eng. 209, 107471 https://doi.org/10.1016/j. oceaneng.2020.107471.

[2] Zheng, K., Jiang, Y., Zhou, S., Xue, Y., 2022. A comprehensive spatiotemporal metric for ship collision risk assessment. Ocean Eng. 265, 112446 https://doi.org/10.1016/j. oceaneng.2022.112446.

[3] Montewka, J., Manderbacka, T., Ruponen, P., Tompuri, M., Gil, M., Hirdaris, S., 2022. Accident susceptibility index for a passenger ship-a framework and case study. Reliab. Eng. Syst. Saf. 218, 108145 https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108145.

[4] Shi, Z., Zhen, R.*., Liu, J., 2022. Fuzzy logic-based modeling method for regional multi-ship collision risk assessment considering impacts of ship crossing angle and navigational environment. Ocean Eng 259, 111847.

[5] Chenyan Lin,Rong Zhen,Yanting Tong,Shenhua Yang & Shengkai Chen.(2024).Regional ship collision risk prediction: An approach based on encoder-decoder LSTM neural network model.Ocean Engineering117019-.

[6] Fujii, Y., Shiobara, R., 1971. The analysis of traffic accidents. J. Navig. 24 (4), 534–543. Gang, L., Wang, Y., Sun, Y., et al., 2016. Estimation of vessel collision risk index based on support vector machine. Adv. Mech. Eng. 8 (11), 1687814016671250.

[7] Y.-F. Wang, L.-T. Wang, J.-C. Jiang, J. Wang, Z.-L. Yang, Modelling ship collision risk based on the statistical analysis of historical data: A case study in Hong Kong waters, Ocean Eng. 197 (2020) 106869.

[8] Qing Y, Palos Â T, Kezhong L, et al.An integrated dynamic ship risk model based on Bayesian Networks and Evidential Reasoning[J].Reliability Engineering and System Safety,2021,216

[9] Wang Shaobo,Zhang Yingjun,Huo Ran & Mao Wengang.(2022).A real-time ship collision risk perception model derived from domain-based approach parameters.Ocean Engineering.

[10]Xin, X., Liu, K., Yang, Z., 2021. A probabilistic risk approach for the collision detection of multi-ships under spatiotemporal movement uncertainty. Reliab. Eng. Syst. Saf. 215, 107772.

[11]Yunja Yoo & Jin-Suk Lee.(2019).Evaluation of ship collision risk assessments using environmental stress and collision risk models.Ocean Engineering106527-106527.

[12]Antão P.,Sun S.,Teixeira A.P. & Guedes Soares C..(2023).Quantitative assessment of ship collision risk influencing factors from worldwide accident and fleet data.Reliability Engineering and System Safety.

[13]Cheng Zhiyou, Zhang Yihao, Wu Bing & Guedes Soares C..(2023).Traffic-conflict and fuzzy-logic-based collision risk assessment for constrained crossing scenarios of a ship.Ocean Engineering.

[14]Liu, Z., Wu, Z., Zheng, Z., 2019b. A novel framework for regional collision risk identification based on AIS data. Appl. Ocean Res. 89, 261–272.

[15]Du, L.,,Banda, O.A. Valdez & Kujala, P..(2019).(An intelligent method for real-time ship collision risk assessment and visualization).8th International Conference on Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, ICCGS 2019,293-300.

[16]Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China, Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China & Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China. (2019).A cooperative game approach for assessing the collision risk in multi-vessel encountering.Ocean Engineering106175-106175.

[17]Zhen Rong, Shi Ziqiang, Liu Jialun & Shao Zheping. (2022).A novel arena-based regional collision

risk assessment method of multi-ship encounter situation in complex waters.Ocean Engineering.
[18]Deng Y.,,Zhang W. & Feng X..(2020).(An Advanced Method of Collision Risk Assessment in terms of Encountering Ships).10th International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, QR2MSE 2020,1043(5).
[19]F. Prastyasari, T. Shinoda, Near Miss Detection for Encountering Ships in Sunda Strait, in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2020, 012039.
[20] A.K. Debnath, H.C. Chin, M.M. Haque, Modelling port water collision risk using traffic conflicts, J. Navig. 64 (2011) 645–655.
[21]Chen, P., Huang, Y., Mou, J., van Gelder, P.H.A.J.M., 2019. Probabilistic risk analysis for ship-ship collision: state-of-the-art. Saf. Sci. 117, 108–122. https://doi.org/10.1016/ j.ssci.2019.04.014.
[22]Fujii, Y., Tanaka, K., 1971. Traffic capacity. J. Navig. 24 (4), 543–552.https://doi.org/ 10.1017/S 0373463300022384.
[23]Coldwell, T.G., 1983. Marine traffic behaviour in restricted waters. J. Navig. 36 (3),430–444. https://doi.org/10.1017/S0373463300039783.
[24]Pietrzykowski, Z., 2008. Ship's fuzzy domain–a criterion for navigational safety in narrow fairways. J. Navig. 61 (3), 499–514. https://doi.org/10.1017/ S0373463308004682.
[25]Wang, N., 2013. A novel analytical framework for dynamic quaternion ship domains. J. Navig. 66 (2), 265–281.
[26]Hansen, M., Jensen, T., Lehn-Schiøler, T., Melchild, K., Rasmussen, F.M., Ennemark, F., 2013. Empirical ship domain based on AIS data. J. Navig. 66 (6), 931–940.
[27]Zhang, L., Meng, Q., 2019. Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment. Ocean Eng. 186, 106130 https://doi.org/10.1016/j. oceaneng.2019.106130.
[28]Zongyao Xue, Wenjun Zhang & Jianchuan Yin. (2020).2Security Evaluation Model of Precautionary Area Based on Improved Entropy Weight TOPSIS.(eds.).Navigation College, Dalian Maritime University;doi:10.26914/c.cnkihy.2020.033443.
[29]Song Li, Jianghua Zhou & Yuanqiang Zhang. (2015).Research of Vessel Traffic Safety in Ship Routeing Precautionary Areas Based on Navigational Traffic Conflict Technique.Journal of Navigation(3),589-601.
[30]Zbigniew Pietrzykowsk i& Janusz Magaj.(2017).Ship Domain as a Safety Criterion in a Precautionary Area of Traffic Separation Scheme.TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation(1),93-98.
[31]Jia Chengfeng & Ma Jie.(2023).Conditional temporal GAN for intent-aware vessel trajectory prediction in the precautionary area.Engineering Applications of Artificial Intelligence(PA).
[32]Lin Qin, Yin Bingbing, Zhang Xinyu, Grifoll Manel & Feng Hongxiang. (2023).Evaluation of ship collision risk in ships' routing waters: A Gini coefficient approach using AIS data.Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.
[33]Feng Hongxiang, Grifoll Manel, Yang Zhongzhen & Zheng Pengjun. (2022).Collision risk assessment for ships' routing waters: An information entropy approach with Automatic Identification System (AIS) data.Ocean and Coastal Management.
[34]Zhao, L., Shi, G., Yang, J., 2018. Ship trajectories pre-processing based on ais data. J. Navig. 71 (5), 1210–1230.
[35]Feng, H., Colilles, A.M., Yang, Z., 2021. Outlier processing of ais data according to distance distribution. Navigation of China 44 (4), 16–21. https://doi.org/10.3969/j. issn.1000-4653.2021.04.005.
[36]Yang Chen, Zhao Liu, Mingyang Zhang, Hongchu Yu, Xiuju Fu & Zhe Xiao. (2024). Dynamics

collision risk evaluation and early alert in busy waters: A spatial-temporal coupling approach.Ocean Engineering117315-.
[37]H¨orteborn, A., Ringsberg, J., Svanberg, M., Holm, H., 2019. A revisit of the definition of the ship domain based on AIS analysis. J. Navig. 72 (3), 777–794. https://doi.org/ 10.1017/S0373463318000978.
[38]McKinley, S., Levine, M., 1998. Cubic spline interpolation. Coll. Redwoods. 45 (1), 1049–1060.
[39]Goodwin, E.M., 1975. A statistical study of ship domains. J. Navig. 28 (3), 328–344.
[40]https://doi.org/10.1017/S0373463300041230.
[41]Zhang, L., Meng, Q., 2019. Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment. Ocean Eng. 186, 106130. https://doi.org/10.1016/j. oceaneng.2019.106130.
[42]Xin, X., Liu, K., Yang, X., Yuan, Z., Zhang, J., 2019. A simulation model for ship navigation in the “Xiazhimen” waterway based on statistical analysis of AIS data.Ocean Eng. 180, 279–289. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.052.
[43]Pietrzykowski, Z., Wielgosz, M., 2021. Effective ship domain–Impact of ship size and speed. Ocean Eng. 219, 108423. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108423.
[44]Mizythras, P., Pollalis, C., Boulougouris, E., Theotokatos, G., 2021. A novel decision support method-ology for oceangoing vessel collision avoidance. Ocean Eng. 230, 109004. https://doi.org/10. 1016/j.oceaneng.2021.109004.
[45]Rawson, A., Brito, M., 2021. A critique of the use of domain analysis for spatial collision risk assessment. Ocean Eng. 219, 108259 https://doi.org/10.1016/j. oceaneng.2020.108259.
[46]Zheng, K., Chen, Y., Jiang, Y., Qiao, S., 2020. A SVM based ship collision risk assessment algorithm. Ocean Eng. 202, 107062 https://doi.org/10.1016/j. oceaneng.2020.107062.
[47]Qu, X., Meng, Q., Suyi, L., 2011. Ship collision risk assessment for the Singapore Strait. Accid. Anal. Prev. 43 (6), 2030–2036. https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.05.022.
[48]Debnath, A.K., Chin, H.C., 2010. Navigational traffic conflict technique: a proactive approach to quantitative measurement of collision risks in port waters. J. Navig. 63, 137.

作者简介：

钟雨（2000－）， 男， 江西赣州人， 硕士研究生， 主要研究方向: 交通安全与环境，手机号：13056779893,E-mail: 2336575643@qq.com

通信作者：郑彭军（1965－）， 男， 浙江宁波人， 教授、博士生导师， 主要研究方向: 交通安全与环境。为宁波大学包玉刚领军学者，主持国家重点研发项目、欧盟地平线 2020 项目、国家自然基金、863 子课题、国家海事局、浙江重点研发项目等 16 项。在国际重要学术刊物和学术会议发表研究论文 190 余篇，大多被 SCI、EI 收录。获浙江教学成果一等奖 1 项、浙江航海科技奖一等奖 1 项，中国智能交通协会科学技术奖二等奖 1 项。E-mail: zhengpengjun@nbu.edu.cn

双碳”背景下绿色航运船舶动力碳捕集封存装置展望

崔德馨

（宁波远洋运输股份有限公司，浙江 宁波，315042）

摘　要：探讨了随着航运业对绿色低碳发展需求的增长，船载碳捕集技术可能面临的发展机遇。首先，它分析了船载碳捕集技术、船舶绿色燃料技术以及船舶能效提升技术各自的优缺点，并明确了船载碳捕集技术在航运业绿色低碳转型中的定位。其次，根据法律法规和绿色燃料技术的发展方向，探讨了船载碳捕集技术在短、中、长期航运碳减排中的阶段性发展趋势和技术前景，强调了各阶段技术发展的重点和应用前景。

关键词：船舶；碳捕集；展望

引 言

作为最为经济和节能的运输方式，国际贸易中的 90%靠船舶海运实现。随着海上贸易的不断增长，船舶动力造成的 CO_2 排放量不容小觑。据克拉克松统计，2020 年航运业 CO2 排放约 8.1 亿吨，占全球 CO2 排放总量的 2.36%。同时报告也表明，如若不立即采取适当的措施，伴随着全球海运贸易需求的增长，2050 年船舶碳排放增幅预计可以达到 50%-250%。因此为了加快减少航运业温室气体排放的战略目的，IMO 于 2018 年在英国伦敦召开的海上环境保护委员会（Marine Environment Protection Committee）第 72 届会议上通过了《IMO 船舶温室气体减排初步战略》，明确了未来海运业的绿色发展方向，如 1 所示，其中要求如下：以 2008 年为基准，到 2030 年，全球海运平均 CO2 排放量减少 40%，力争在 2050 年减少 70%；在 2020 年国际航运的温室气体排放量尽快达到峰值，并在 2050 年前将年度温室气体排放总量至少减少 50%；到本世纪末，实现航运温室气体零排放。

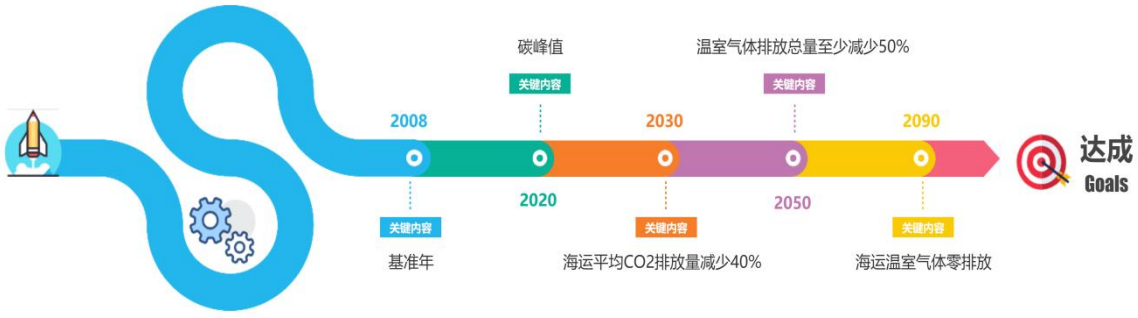


图 1 IMO 船舶温室气体减排初步战略

我国温室气体的排放已于 2009 年超越美国，成为 CO_2 排放全球的第一大国。从 2001 年到 2018 年，我国海上贸易运输量从 5.73 亿吨增长至 31.04 亿吨，约占全球贸易总量的 26.3%，由此带来船舶能源消耗以及温室气体排放量的剧烈增长。为实现经济绿色可持续性发展，我国政府近年来高度重视能源与气候变化问题。继成为巴黎协定缔约国后，在《“十三五”控制温室气体排放工作方案》和《“十三五”现代综合交通运输体系发展规划》中我国对控制温室气体排放提出明确要求。2020 年 9 月 22 日，习近平主席在出席第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布，中国二氧化碳排放将力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和，并后续宣布了到 2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降 65%以上，非化石能源占一次能源消费比重将达到 25%左右的具体目标，在不久的将来会分别针对各行业制定严格的碳减排目标[1]。

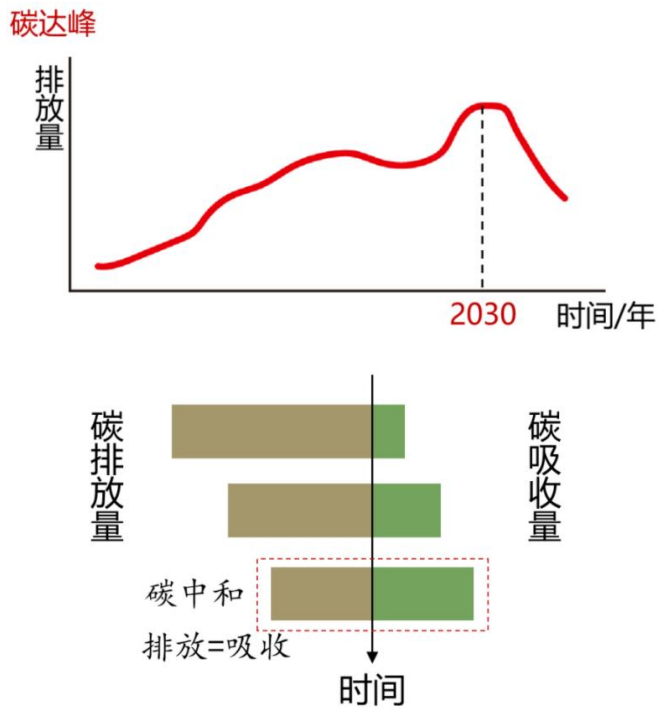


图 2 中国“碳达峰、碳中和”目标

综上，航运业是温室气体排放的重要来源之一，随着 IMO 温室气体减排战略的实施以及国内“碳中和”举措的落实，碳减排将成为今后船舶排放治理的重要方向。实现温室气体减排，传统的方法是通过航线优化、航速优化、发动机改进、新型低碳燃料应用等方式实现。当前航线优化、航速优化、发动机改进等方面的提升潜力已经非常有限，而低碳动力技术则具有实现未来碳减排目标的潜力。目前所采用的低碳动力技术主要包括 LNG 等清洁燃料动力(见图 3)，电池动力以及可再生能源动力。

LNG 动力作为技术成熟度最高的低碳燃料动力，当前已实现对主要船型的全面覆盖，从碳排放角度来看，对于集装箱船、小型油船及散货船，使用 LNG 等清洁能源作为动力并辅之以其它减排措施，能够实现 20%以上的碳减排率，但与 IMO 航运业碳减排 50%的目标相比仍相差一段距离，且其甲烷逃逸问题所带来的额外温室效应不可忽视。NH_3 燃料动力可实现零碳排放，然而，氨热值低、点火能量高，与传统柴油燃烧方式有很大区别，相应的发动机设计、控制策略、燃烧组织技术以及燃料供给等配套技术的研究及开发还需一定的探索周期，在短期内难以实现对主流新造船型的覆盖。与柴油相比，氨具有较强毒性和腐蚀性，作为船用燃料前必须解决安全运输和存储问题。此外，当前普遍的制氨技术仍需要依靠化石燃料，氨生产本身约占全球二氧化碳排放量的 1.8%，因此实现氨燃料发动机的零碳排放还依赖“绿色制氨”技术的进一步发展。与 NH_3 燃料相比，氢燃料动力技术则需要更长的探索周期，预计在 2030 年前难以实现实船应用。此外，氨、氢等低碳/零碳燃料动力技术的应用对象仅局限于新造船，难以适用于现有在航船的改造。

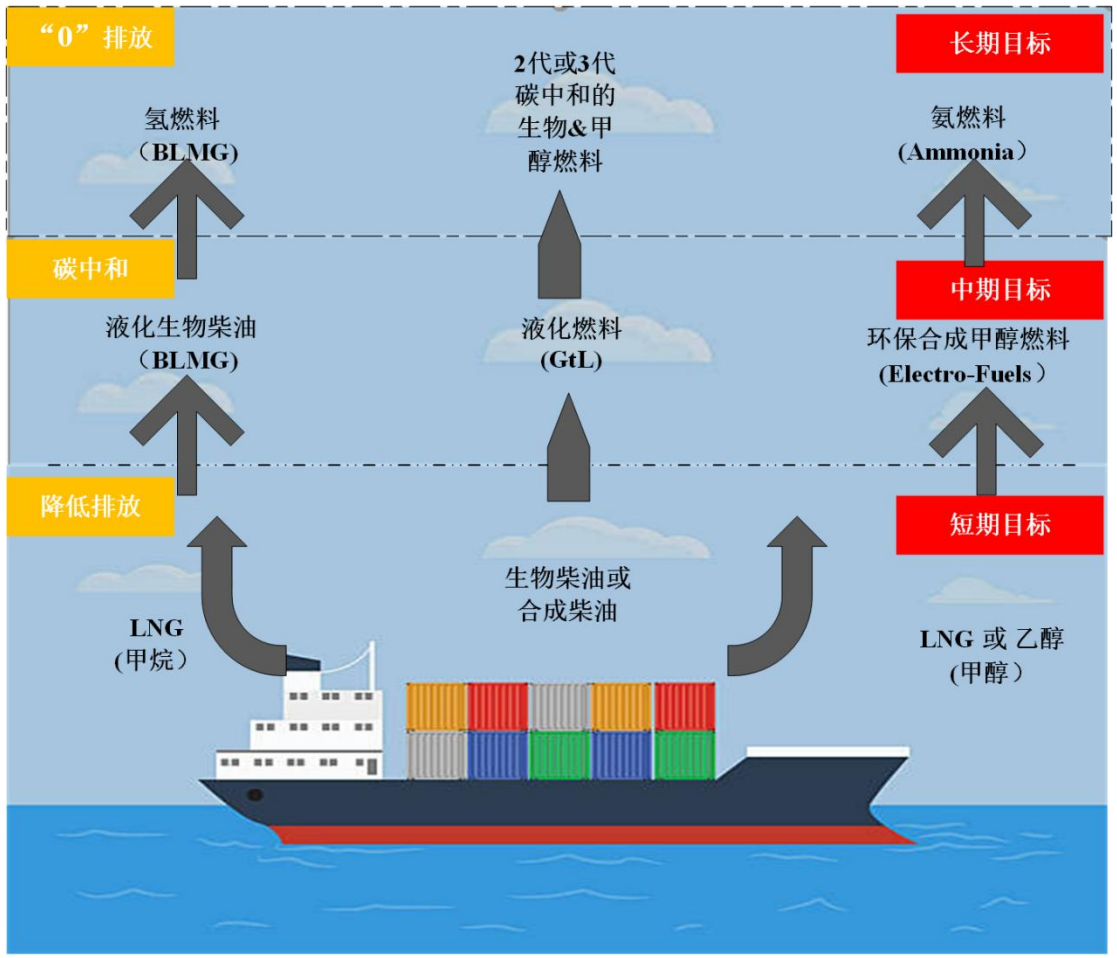


图 3 低碳/零碳燃料发展路径

在电池动力方面，目前电力驱动主要包括燃料电池和蓄电池两种动力形式。近年来燃料电池技术的不断进步，使得氨、氢燃料电池在船舶领域的推广应用奠定了一定基础，但从碳排放的角度来看，当今几乎所有商业化氨、氢燃料均源自工业生产，按照 DNVGL 的研究，在此过程中产生的二氧化碳水平实际远远高于重油开采和燃烧过程产生的二氧化碳，使用可再生电力装置电解水产生的氢气成本则较为昂贵，诸多限制性因素使得船用氨、氢燃料电池广泛应用尚不具备基础。对于蓄电池动力形式，在节能减排的政策逐步趋严的大背景下，随着港口及河岸电力设施的逐步完备，全电力推进技术在内河运输船及港口作业船等领域应用范围不断扩大，但在长距离运输船领域应用范围仍然有限，虽然柴油+电力驱动能够解决长距离运输动力供应问题，但与 IMO 航运业碳排放降低 50%的目标仍相差一段距离。

在可再生能源利用方面，国内外在太阳能及风能利用方面均已经实现实船应用，从技术应用成熟度来看，太阳能利用装置主要包括集中在太阳能电池板或薄膜太阳能电池领域，通过太阳能产生电能，用于提供辅助性电力供应；风能利用装置主要包括风帆、风筒、天帆等，用来在船舶航行时提供额外助推力，从而达到降低主机能耗的目的。总体来看，未来风能和太阳能仍将作为船舶可再生能源利用的重点方向[2]，但由于易受到天气状况影响，故只能作为辅助性节能措施，难以成为船舶动力的主燃料。

综上，未来低碳燃料的应用仍需要较长时间的摸索。因此亟需在现有能源结构下，开展 CO_2 排放的减排关键技术研究，做好相关技术储备以应对碳减排战略要求。

陆地碳回收技术现状及建议

CO2 捕集和封存技术(CCS)技术被认为是未来实现大规模 CO2 减排的重要潜在手段。不同于传统的温室气体源头减排技术，CCS 技术是在排气中将 CO2 进行捕集、分离、输送和封存，减排效率

可达到 85%以上，技术原理如图 4 所示。

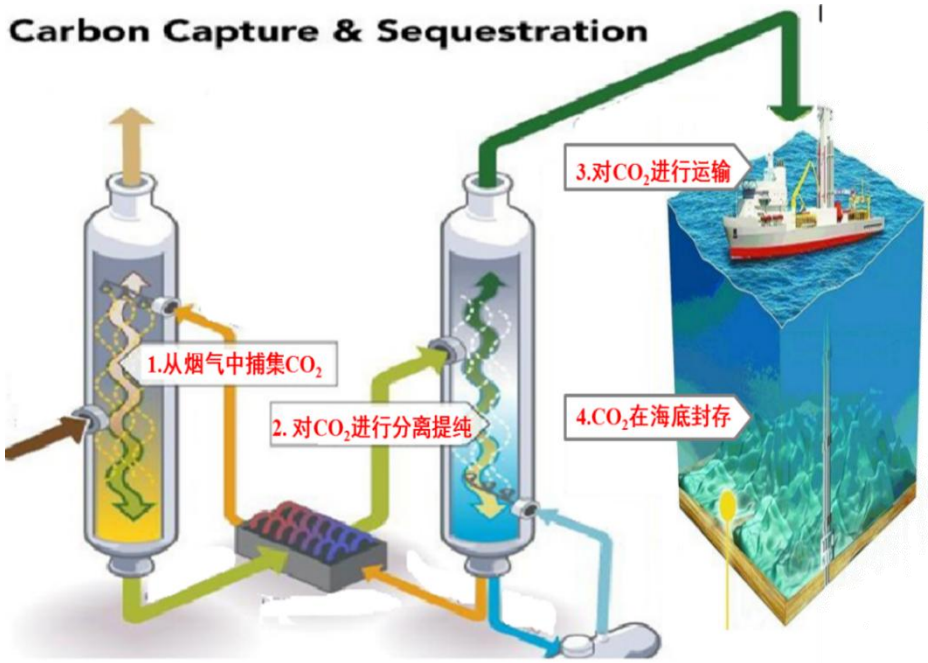


图 4 CO2 捕集封存技术原理

为此，各国正在进行 CCS 技术的研究示范及应用，并将 CCS 技术列入未来进行商业化大规模 CO2 减排的重要方向。目前，CCS 主要集中在陆用领域。美国能源部已将 CCS 技术列为未来温室气体减排的重要技术手段，其本土的 KochProcess(KPS)公司、Monsanto 公司等都较早的进行了相关技术产品的开发工作，并且部分项目已在电厂中得到了应用，取得了可观的减碳效果，截止目前美国所建 CCS 设施可捕获超过 2500 万吨/年的二氧化碳；除此之外，中国、加拿大、英国、澳大利亚等国家均在陆用领域开展了该技术的研究并已形成了一定的示范。（见图 5）

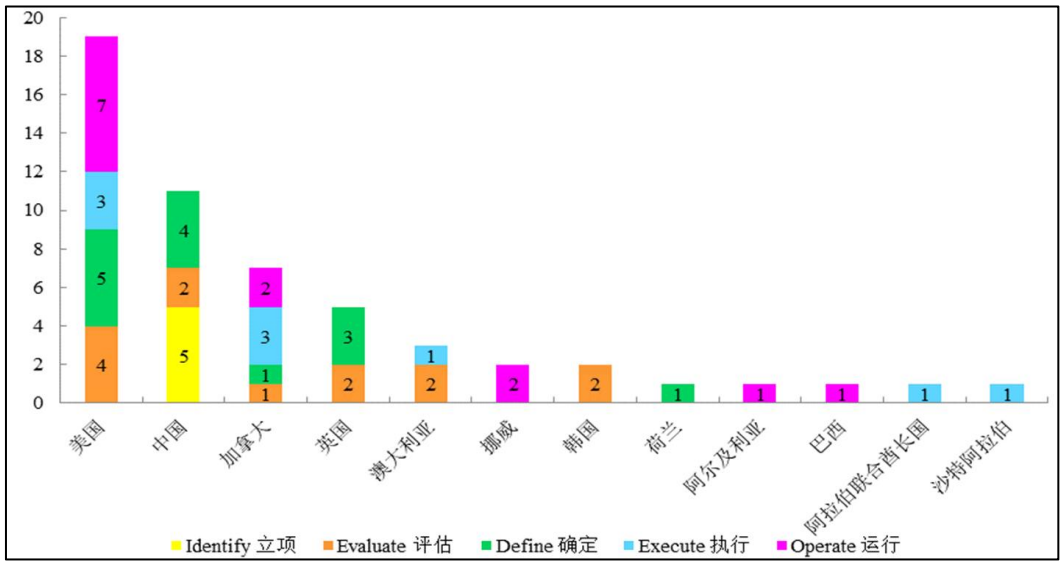


图 5 CCS 技术在陆用领域的应用情况

航运碳回收技术现状及建议

在航运业，CO_2 捕集和封存技术(CCS)之前一直被忽视，而近年来随着船舶碳减排战略的实施，在仅通过船型优化和低碳动力等前端减排技术难以在短期内满足碳减排需求的形势下，船载 CO_2 捕集封存技术的研究成为了船舶领域碳减排技术发展的重要方向，相关产品已受到包括道达尔、中远

海运等知名船东的重点关注。目前已有国外团队开展了船用 CCS 技术的研究工作，以期通过该方式以比陆用碳捕集低得多的成本为大气碳减排做出贡献，但还未形成成熟的产品。而国内尚未开展相关的研究工作。在航运业面临巨大碳排放减排压力的当前，若要保持在船舶柴油机排气治理领域的领先态势，就势必要做好温室气体排放治理的技术储备工作，以在未来市场上掌握主动权。

美国道化学和联合碳化物公司在上世纪 70 年代和 80 年代开发了胺吸收工艺，用于从烟道气中回收 CO_2，并建成了当时规模最大的 CO_2 捕集装置，捕集量可达 1000t/d，同时荷兰的 ROADCCS 项目捕集也采用该项技术。2017 年 10 月，美国最大的碳捕集项目“新佩特拉”（PetraNova）设施正式投入使用。投产后，设施每年从发电站尾气中捕集超过 140 万吨的二氧化碳。二氧化碳之后将被注入附近油田，可有效提高油田产量。日本三菱重工和关西电力联合开发了用于天然气发电厂烟道气脱碳的 KM-CDR 工艺，该工艺同时也适用于已经脱硫的燃煤电厂的烟道气处理。黎巴嫩的 IFP 公司基于 MEA 溶液吸收法开发了 HICAP+TM 工艺用于处理烟煤电厂的烟道气。粗烟道气与新鲜溶剂接触在处理气体时，将溶剂流速、再沸器负荷、溶剂降解和排放量设计到最小，成本和操作费用能够降低约 15%[3]。

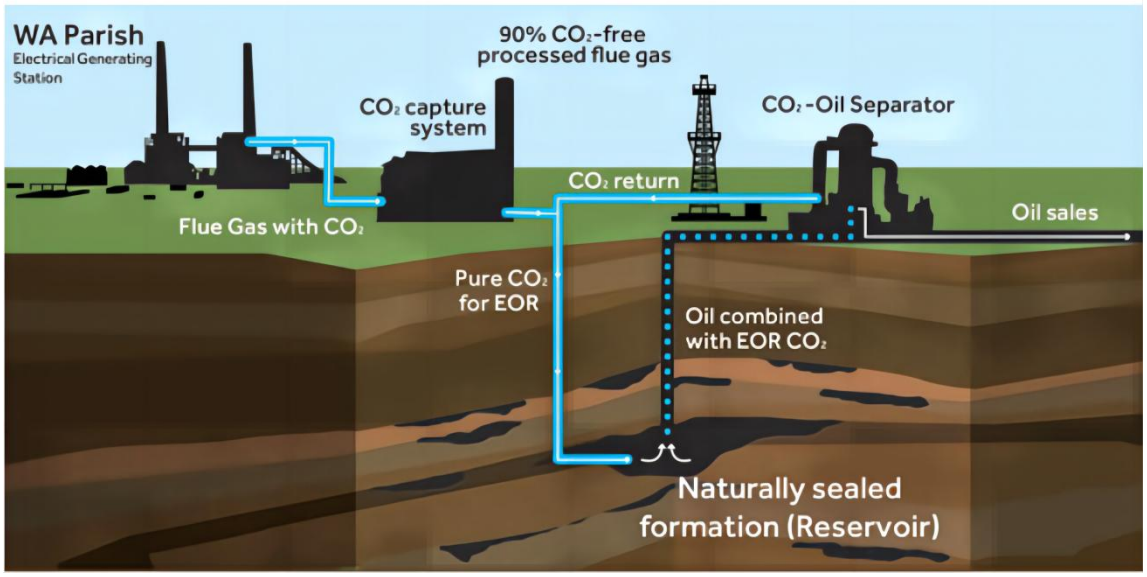


图 6 美国火电站“新佩特拉”碳捕集项目流程图

除了 MEA 溶液以外，挪威的 Sleipner 气田和阿尔及利亚的 InSalah 气田采用了 MDEA 技术进行脱碳[4]，图 7 为 SleipnerT 平台 CO_2 捕集系统流程示意图。来自 SleipnerWest 的含 4%-9% CO_2 的天然气从 2 个并联的吸收塔底部进入，由下向上流动，与塔内自上而下的 MDEA 溶液逆流接触并脱除 CO_2。吸收了 CO_2 的富 MDEA 溶液由吸收塔底流出，经透平机回收压力能后进入一级、二级闪蒸，进入汽提塔(再生塔)再生。再生后的 MDEA 溶液由汽提塔底部流出并循环使用，而解吸出的 CO2 与二级闪蒸出的 CO_2 汇合，经加压和冷却后注入海床下 800-1000m 深的 Utsira 盐水层。

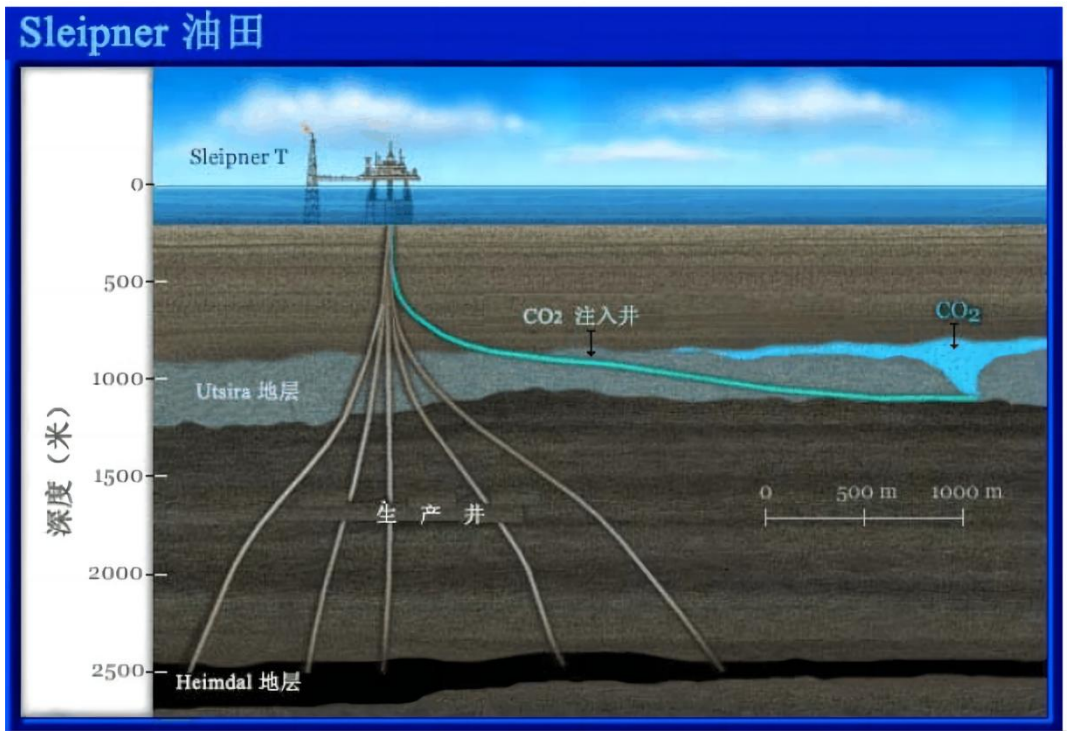


图 7 挪威 7 平台 CO2 捕集系统流程示意

以上实例均属于陆地碳捕集应用领域，而船载 CO_2 捕集技术领域还未有应用先例，但目前国外某些研究机构已开展针对船舶的 CCS 技术研究。芬兰瓦锡兰技术公司现正在挪威莫斯建设试验工厂，用来测试 CCS 技术。该公司的初步研究表明，船舶 CCS 在技术上是可行的。油气行业气候倡议组织（OGCI）与能源船运公司 StenaBulk 合作，围绕船舶碳捕集技术进行可行性研究，评估技术和经济性能，并倡议将碳捕集应用在长距离航运。日本船舶技术协会在 2019 年度国际海运 GHG 零排放项目中的零排放/超低碳排放船舶提出 20000TEU 级集装箱船概念船方案，通过装载 CO_2 船上回收系统的大型集装箱船的概念设计，探讨 2028-2030 年实现实船应用的可能性。其设计二氧化碳减排量可达 85.7%。图 8 为该概念船采用的 CO_2 回收-液化-存储装置的系统概念图，图 9、10 展示的是预计 2050 年左右实现应用的 20000TEU 级集装箱船。挪威海工龙头企业 AkerSolution 于 2020 年 8 月宣布把碳捕捉技术相关的业务剥离出来，成立专业碳捕捉公司 AkerCarbonCapture，他们将碳捕捉系统集成为集装箱模块，经灵活组合可满足不同规模的碳捕捉需求。如图 11 所示。

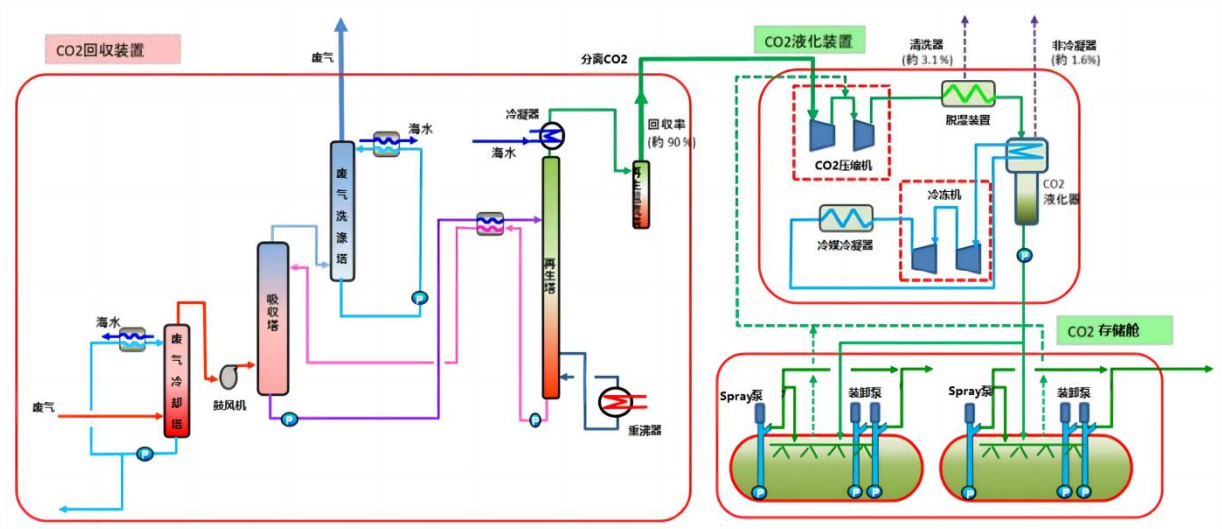


图 8 CO2 回收-液化-存储装置的系统概念图

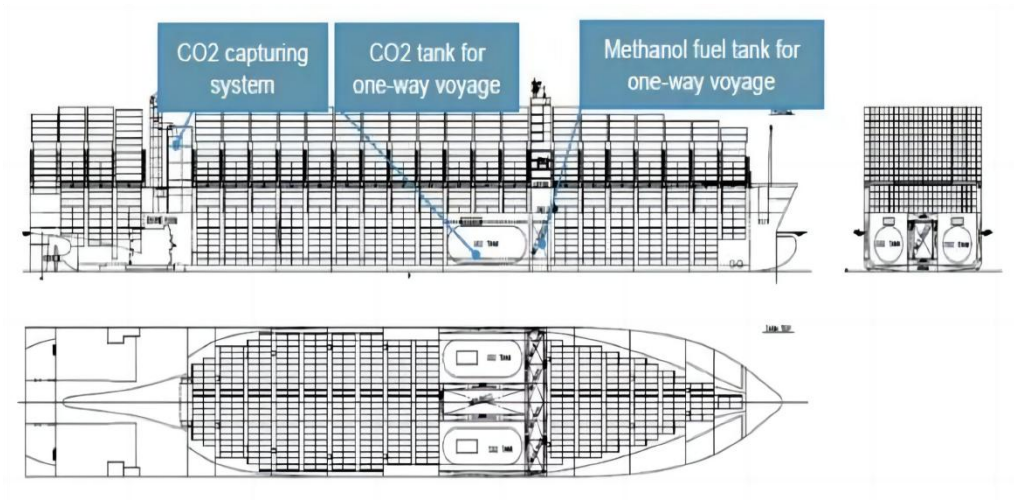


图 9 20000TEU 级集装箱船 CO2 捕集装置布置图

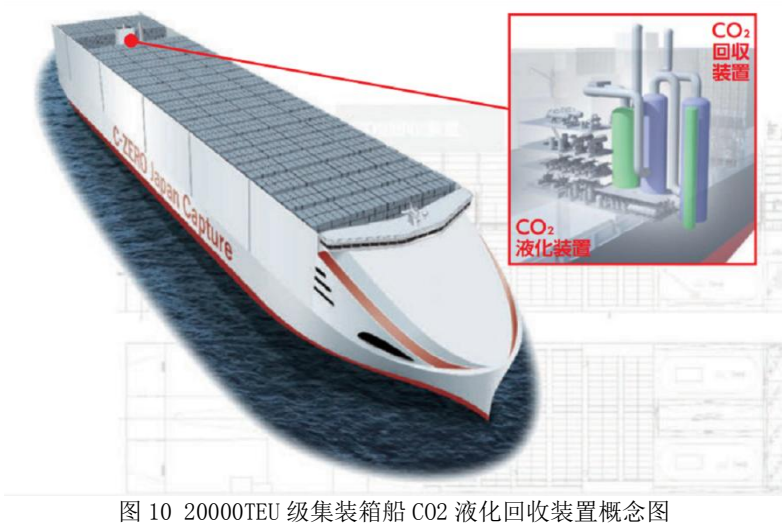


图 10 20000TEU 级集装箱船 CO2 液化回收装置概念图



图 11 AKER“集装箱式”碳捕集方案

世界领先的航运公司组成的集团包括日本邮轮集团(NYK)，PAOSovcomflot(SCF),Knutsen 美洲国家组织和阿德莫航运公司(Ardmore)造船厂，大宇造船&海洋工程有限公司(DSME)和巴西淡水河谷矿

业公司，已与丹麦海事发展中心(MDC)合作，在名为 decarbonICE 的项目中开发了船上碳捕集与封存(CCS)解决方案，该方案正在经历从概念阶段到监管审批的过渡[5]，图 12 为 MDC 提供的船上碳捕集与封存(CCS)解决方案示意图。船载脱碳的概念包括捕获和封存两部分：首先，船上废气中的二氧化碳和其他温室气体在低温过程中被捕获并变成干冰。随后，一般当船舶在正常作业时，将已经经过处理的液态化的二氧化碳及二氧化碳的其他水合物永久安全的缝在海底沉积物中。如果船上使用的是生物燃料或甲醇之类的合成燃料，则采用此方案甚至还可能实现负碳排放。

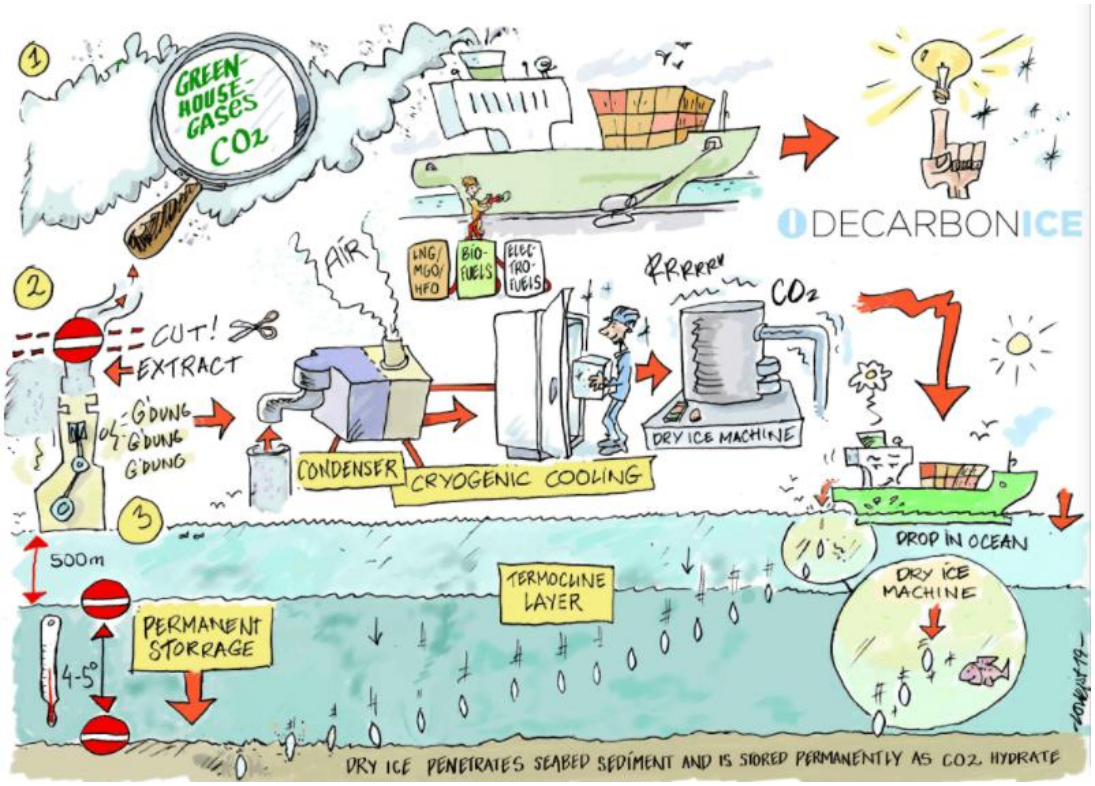


图 12 船上碳捕集与封存(CCS)解决方案示意图

综上，国外目前已有船研机构开展了针对船舶领域内的 CO2 捕集技术的研发工作，走在了该项技术的前沿，随着碳减排时间表的推进，CO_2 捕集封存技术将成为船舶领域碳减排的重要发展方向。

目前 CO_2 捕集技术主要应用于国内燃煤电厂，在船舶领域内的 CO_2 捕集技术方面的研究较少，处于起步阶段。

自从上世纪 70 年代和 80 年代开发了胺吸收工艺后，目前利用醇胺溶液作为吸收剂捕集 CO_2 是比较成熟的工艺。由于传统的单一有机胺溶液吸收 CO_2 存在各自的缺陷，当前研究的方向主要为混合胺溶剂或者相变胺溶液。

2020 年，由华能清洁燃料研究院主导的，我国自主研发的第一套 1000 吨/年相变型二氧化碳捕集工业装置，成功实现连续 72 小时稳定运行在长春热电厂。该技术能有效解决传统捕集方法的高能耗难题，经专家鉴定，主要技术指标达国际领先水平。该中试装置的成功运行，不仅对我国相变型捕集技术后续开发和工程放大具有重要参考意义，更为电厂有效应对气候变化，实现二氧化碳减排和“碳中和”愿景提供了新的技术支撑。



图 13 华能集团首套相变型 CO2 捕集装置

2021 年，国内最大规模 15 万吨/年 CO2 捕集和封存全流程示范工程（CCS 示范工程）在国家能源集团国华电力锦界电厂受电一次成功[6]。该工程被列为陕西省 2018 年重点建设项目和国家能源集团公司重大科技创新项目，同时获得国家重点研发计划“用于 CO_2 捕集的高性能吸收剂/吸附材料及技术”的支持[7]。CCS 示范工程投运后可实现二氧化碳捕集率大于 90%、二氧化碳浓度大于 99%、吸收剂再生热耗低于 2.4GJ/tCO_2，整体性能指标达到国际领先水平，该工程应用于大规模工业化生产，具有显著的环境和社会效益。



图 14 国内最大规模的 CCS 示范工程现场

相对陆用领域，船用领域的 CCS 技术发展还处于起步阶段。中国船舶集团公司第七一一所开展了船舶 CO_2 捕集技术预先研究，通过调研和考察，环装部已初步确立适用于船舶领域的 CO2 捕集技术工艺路线，并通过小样试验台架对工艺路线进行了可行性的初步验证。

结束语

综上，由于船舶碳减排法规颁布实施的较晚，目前国内外 CO_2 捕集与封存技术主要集中在陆用

燃煤电厂、石油化工、天然气等领域中。国外有少数船研机构开展了针对船舶领域内的 CO_2 捕集技术的研发工作，尚未形成可推广应用的成熟产品，而国内对于船舶领域 CO_2 捕集封存技术的研究还处于起步阶段。

随着国际碳减排战略的实施，CO_2 将成为继 NOx、SOx 后船舶排气治理的重点对象。CO_2 捕集技术作为短期内实现大规模碳减排的可行方案，已受到了国内外知名船东的关注，形成了巨大的潜在市场。国外韩国大宇、瓦锡兰等公司正在积极开展相关技术的研究储备工作，以期在未来市场上取得领先地位。国内中远海运、嵐橋港業(香港)等公司对基于 CO_2 捕集技术的碳减排产品十分关注，其中中远海运已与七一一研究所达成战略协议，以合作的方式与七一一共同推进船舶碳减排装备的研发。可以预见船舶 CO_2 捕集系统将成为未来航运业温室气体减排的主流产品，具有广阔的市场潜力，预计每年可形成数十亿的市场规模。

在航运业面临巨大碳排放减排压力的当前，船载 CO_2 捕集封存技术势必成为我国未来绿色船舶的战略规划产业。碳回收的顺利实施将对国家的“双碳”节能减排中发挥重要的作用。

参考文献

[1] 共谋全球生态文明建设之路（一）——关于生态文明建设的全球倡议[J]. 环境,2023,(09):10-11.
[2] 樊志远,江文成.船舶低碳技术未来发展重点方向[J].中国船检,2019,(07):70-73.
[3] 方宏萍，王洪飞，宋彩霞，等．二氧化碳捕集技术应用研究进展[J]. 山东化工,2024,53(10):128-130+134.DOI:10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2024.10.070.
[4] 步学朋．二氧化碳捕集技术及应用分析[J]. 洁净煤技术,2014,20(05):9-13+19.DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2014.05.003.
[5] 王思佳.脱碳塔真的要来了？[J].中国船检,2021,(05):82-85.
[6] 朱法华,许月阳,孙尊强,等.中国燃煤电厂超低排放和节能改造的实践与启示[J].中国电力,2021,54(04):1-8.
[7] 本刊讯.国内最大规模碳捕集示范工程完成安装建设[J].电器工业,2021,(02):5.

作者简介：崔德馨，无限航区轮机长/硕士研究生；研究方向为船舶动力装置振动分析、故障诊断,邮箱：cuidx@nbosco.com,手机号码：13371122520

探讨船舶运营管理与航海保障

史善金

宁波锦德航运有限公司，浙江 宁波，315000

摘　要：随着网络和交通的快速发展，全球贸易的发展可谓是日新月异。航海业作为国际物流的重要组成部分，其船舶运营管理与航海保障日益备受关注。本文旨在探讨现在船舶运营管理的有效策略及航海保障的关键措施，分析当前航海业面临的挑战，并提出相应的解决方案，以期提升航海安全与效率。

关键词：船舶运营管理；航海保障；航海安全；航海信息服务；运营效率。

一、引言

航海业作为世界贸易的重要支撑，其船舶运营管理与航海保障水平直接关系到航海安全及经济效益。随着硬件、软件的快速发展，国际航运市场的竞争更为激烈；人类文明的发展已明显影响了气候和环境，恶劣多变的气候使航海安全遇到新的挑战。如何提升船舶运营管理水平，优化航海保障措施，已成为航海业亟待解决的问题。本文将从船舶运营管理和航海保障两个方面进行深入探讨，以期为提高航海业的整体竞争力提供理论支持和实践指导。本文以中国的航海业为重点论述。

二、船舶运营管理策略

纵观航运史，可以看出对船舶的管理是不断地进步、不断地优化，这些都源于事故的不断出现，而事故的频繁出现和不断扩大的原因是不断恶化的气候环境和造船速度的空前提升，但人类文明的发展已离不开海运物流。海运物流同样也影响着人类文明、环境气候，打开船讯网可以清楚地看到当前绿色点状分布图，从北纬 80 度到南纬 60 度，所有的绿色点状物都在有规律地分布着，因为有国际、地区的法规和规范在约束它们，这些法规、规范的条款已是保证船舶安全运营的必不可少条件，如同各星球之间的引力一样。记得 1998 年过马六甲时还没有完善的通航分道，没有现在这么好 ECDIS 和 ARPA 设备，晚上看着香港老船长一会在驾驶台前瞭望，一会到海图室定位，利用岸标、灯标、雷达定位以确保船舶航行在计划航线上。如今再过马六甲，已没有那么忙了，船的数量、吨位、船型比之前都有很大增量，现在如果没有这些法规、规范的约束，后果则不堪设想。

1.法规和规范的约束

1）法规、规范管理人才：我们现在基本上还是用欧美的 SMS 管理体系，由于欧美经济的快速发展，欧美做船员的已有减无增，同时，船的数量、吨位、船型也非同昔日，他们对船舶的实际操作已渐渐陌生，再也不会提供更完善的航运法规、规范。航海是一份实践性很强的事业，要有完善和与时俱进的法规和规范时刻相伴。从实践中来到实践中去，博大精深的中国文化是放之四海而皆准的真理，SMS 的精髓亦源于此吧。 建议中国高级船员应积极加入 IMO 组织，提升 IMO 的职能素质，保持海运法规、规范的与时俱进。

2）船舶建造人才：第一次工业革命时间约 1760 年，是机械化革命；第二次工业革命时间约 1870 年，是电气化革命；第三次工业革命时间约 1950 年，是自动化革命；第四次工业革命已经开始，以计算机为基础的 Web3 和智能的结合将会导致新材料、新产品（如波浪补偿舷梯系统）新工艺（如高压水泵除锈、除漆清洗船体）的迅猛出现。这给造船业提供了很大的契机，船型更适合、结构更合理、抗风浪性能更优越、生活更舒适的船舶需要大量的造船人才。

3）船舶调度优化：通过建立智能调度系统，综合考虑航线、天气、区域、船舶性能等因素，实现船舶调度的最优化。如“宁波舟山港核心港区深水航路船舶定线制和报告制及 VTS 管理区”、2024 年 7 月 1 日起试行的“珠江口水上交通安全特别监管区管理规定（试行） 附官方解读”，对于航区交汇、复杂、航道较窄或沿岸航道均可采用这种强制方式嵌入电子海图，以确保所有船舶按规定的航路航行。同时，对船舶、船员的报备；对引航、靠泊信息的方便和及时沟通提供，减轻驾驶员的工作压力。这不仅可以提高船舶的运输效率，减少或避免事故的发生，还能有效降低运营成本。

2. 船舶维护管理

船东应重视船舶的维护保养，良好的维护保养不仅可以节约成本、减少事故、节约修理时间、增加效益。随着通信的快速发展，船岸自动化软件进步也很快，从 AMOS、ABS NS5、SMIS 以及现在的蓝水母等等，可以实现远程办公、检验、安检、培训及审核等。利用这些先进的软件和网络技术建立完善的船舶维护管理体系，定期对船舶进行远程检修和维护，管理公司提供保姆化管理模式，确保船舶始终处于良好的运行状态。同时，加强对船舶操作人员

的培训，提高他们的操作技能、设备维护保养须知、应对船舶突发情况的能力等。

3. 绿色航运发展

积极推广绿色航运技术，减少船舶排放，改进燃料的使用（如改用甲醇、太阳能为燃料），积极探索新材料、新工艺在航海上的应用，如石墨烯涂层的应用（石墨烯涂层不含生物杀灭剂和硅油，不会向海洋释放任何东西，使其成为一种更环保的选择。该涂层能够创造超低摩擦表面，有效防止生物附着，从而降低能源消耗）、高压水泵除锈、除漆清洗船体，降低对环境的污染。这既是航海业可持续发展的需要，也是应对国际环保要求的必然选择，积极探索无人驾驶。

三、航海保障措施

1. 航海安全法规

法规包括法规的制定、完善和执行。作为一个航海大国，海事法规的制定是其他国家制定海事法规的模板。海事法规必须具有可操作性、执行队伍的专业性。目前船舶检查一般分为船旗国监督检查、船舶现场监督及第三方检查等。中国是一个经济快速发展的国家，快速发展的海运经济使规模较小的船东还不适应，经济的繁荣使他们的下一代又很难从船员做起，导致这些船东对法规的理解较弱、守法性较差。建议全面禁止代管船舶，国内开始实行船舶管理公司总经理、DPA 必须有船长或轮机长资历，提升管理公司的守法意识，用规范化的管理来投资。目前国内虽然强制实行海、机务制，但海、机务通常在公司没有真正地参与管理，配备的海、机务也仅是为了获取 DOC，这导致违法的海运事例并没有减少，事故增加。2024 年 6 月 14 日参加了一次海事部门的“水上交通事故报告和统计情况调研问卷(航运企业填写)”小程序调查，其中的第 11 项“您认为船舶发生事故后，公司不愿意向主管机关报告事故的原因有哪些？”A.配合事故调查，影响船舶正常航期 B.事故损失小，双方协商一致 C.因事故调查可能带来的行政处罚 D.可能影响船公司经营 E.其它，以上都是船东所顾虑的。投资人急于追求利润、法规意识淡薄，也致难以监控海域排污严重。航运的利润变小，船员的待遇要求增加 、船舶的维护费用等使一些本就安全意识和法规意识淡薄的投资人瞒报或不报事故的发生，规范管理、强制法规，奖励船员举报，对主动积极报告的投资人（或管理公司）给予减轻处罚，对不报或瞒报的投资人（或管理公司）采取停运或强制关闭措施。优胜劣汰，尽快疏导一批管理较差的投资人（或管理公司）关闭或转行。另外，采取单一主管部门管理，可以双重监督的办法。如水上运输企业的监管、发证、审核均由中国海事主管部门负责，交通运输管理部门可以监督或向交通部门反馈。双重管理是对资源的浪费，如地方海运企业经常须到当地交通运输管理局（或港航局）开会，也要到地方海事局（处）开会，开会的内容都差不多；要接受二个主管部门的检查，检查的内容也差不多；二个主管部门各有自己的平台，海运企业都必须及时维护和更新。就专业性来讲，地方交通运输管理部门的专业性相对很弱，地方海事主管部门专业性较强。加强航海安全法规的完善和执行，加大对违法、违规行为的处罚力度，提高违规成本。

2. 航海信息服务

1）硬件：中国海岸线总长度 3.2 万公里（包括岛屿）；15 条江河，长约 3.6 万公里。地域广阔，江河分布纵深，海上岛屿较多，有很多地方信号较弱，这些给我们的航海信息服务带来不少的挑战。目前由于陆地信号较好使得江、河船通信比较方便；远洋船舶因规范的要求，必须配备海事卫星终端站，大多数公司为节约通信成本或加强通信能力还增设有 B 站、F 站、海卫星等，船岸通信较理想；沿海船舶由于目前一般归类于 A1+A2 航区，如果船舶航行黄海、渤海或湛江东部海域时船岸信息沟通很困难。为此，建议中国籍沿海船舶必须配置北斗无线电设备至少 2 部，以确保任何 24 小时船岸通信无阻。

2）软件：由于 5G、6G 技术的日趋完善，中国船舶应首先强制安装北斗卫星终端站并规范化使用，确保 A1+A2 航区的中国籍船舶具有便捷可靠的通信设备和安全的报警功能。近期

推广的“海上通 APP”，希望中国海事局加快开发和推广，将所有类似的 APP 或小程序、关注等统一在“海上通 APP”上，让船员办（换）证、船员考试培训信息、船舶报备、船位跟踪、潮汐天气信息、公司审核办证等集于一体。对第三方检查平台进行统一汇集，如 VQC 平台、长江高质量选船（船 E 行）或相关的第三检查信用平台（如 OCIMF）等链接网址信息提供在“海上通 APP”里。尽快与华为合作开发基于鸿蒙操作系统的“海上通 APP”，打造中国的“海上通 APP(CMAPP)”，更好地先服务于中国籍船舶，渐渐走向服务全球船舶的航运强国之路。技术和信息的发展是为了更方便、更完善地服务于人类，这需要海事主管部门的强行介入并有长远规划，如海事大学设立专门的学科、明确的研究方向等。建立完善的航海信息服务系统，提供准确的航线、天气、海况等信息，帮助船舶规避风险，为下一代智能化航海打下坚实的基础。同时，加强与相关部门的沟通协调，确保信息服务的及时性和有效性。

3. 应急救援体系

无论船舶建造得多么完美、有多么好的航海信息服务，这仅是降低事故产生的必要方法。人类对大自然的控制能力是相当薄弱的，恶劣天气的多变也会产生航运事故，为此，建立健全的应急救援体系，提高应对海上突发事件的能力，这包括建立救援队伍、配备救援设备、制定应急预案等也是必须的。近年来，目睹了国家对应急救援的重视，成立有“中华人民共和国应急管理部”,组织编制国家应急总体预案和规划,指导各地区各部门应对突发事件工作。组织灾害救助体系建设，指导安全生产类、自然灾害类应急救援，承担国家应对特别重大灾害指挥部工作。负责安全生产综合监督管理和工矿商贸行业安全生产监督管理等。建议增加船岸应急演习的强制化，并将其作为管理公司的年度 DOC 审核的必审项，审核其演习的真实性（是否真的演习）、适合性（是否适合本公司）、资源配置的可行性等。

四、面临的挑战与解决方案

1. 面对的挑战

当前，航海业面临着诸多挑战，如海盗活动、气候变化、区域战争、国际贸易摩擦、维护保养投入不足、船员质量下降（由于船舶建造、更新速度快，数量增加快，国家经济的快速发展，海员的待遇提高有限。同时，船舶的自动化程度增加，船舶减员，船员的劳动强度在增加，高素质人才流失或放弃海员职业，导致船员素质普遍降低，这也是真实存在的）、船东（或管理公司）安全意识不强（船东的观念没有改变，存在追求船舶高利润的思想，过分节约成本，岸基支持不够）、海图信息的共享不完善、法规或规范执行不严（没有按规范建造，检验、安检力度不够）等。

2. 解决方案

针对这些挑战，我们需要采取一系列措施加以应对。我国对亚丁湾的护航就是强国航运的典范，树立航运强国的伟大形象，利于国际航运的发展。同时，加强国际合作也可以共同打击海盗活动；强化北斗应用，增强航海信息服务，做到无死角通信服务，有利于应急救援和船舶避险；推广清洁能源，减少碳排放，降低人类对环境的影响；优化航线布局，降低贸易风险，积极配合国家加快推广数字化人民币走向世界，主导推进全球实行银行多系统（如 CIPS、SWIFT）、区块链技术等结算（国际上许多国家已在行动），突破 SWIFT 单一的贸易结算壁垒；加强《重点跟踪船舶监督管理规定》的执行力度，对被列入重点跟踪的船舶应不定期调取该船舶的维护保养进行核查；提升船员培训质量（诚信良好管理公司，签发船员培训资质，提供船员有偿培训）、强制提高船员待遇；提高船东（或管理公司）素质，总经理和指定人员必须有无限航区船长/轮机长资历，岸基船长/轮机长的工龄可以折算海龄；中国的海图存在两个版本：海事版和航保部版，这也是一种资源浪费，建议尽早统一并做好相关海图信息的可控性和保密性（现在的船员健康证改进得很好，防疫部门和海事部门统一了认可，优化了资源并给船员带来很大便利）。加大惩处力度，如果某项事故或不符合项所致是因船检原因造成（船检签发的形式认可证书，应保证厂家加工的设备或备件的品质），则由船检负责，网络

时代，一切可查，处罚和追责应不难。海事是一个监督机构，安检改由第三方或诚信的船公司联合实施（对检查人员加以法规、规范地培训并发证），避免疏漏。

五、结论

任何企业都应将安全置于第一位，国家主席习近平同志非常注重安全生产，其中的六大要点和十句“硬话”一直是所有企业安全生产的宗旨，国家的重视是安全生产的强大后盾。船舶运营管理与航海保障是航海业发展的重要保障。通过优化船舶运营管理策略和加强航海保障措施，我们可以提高航海安全和效率，推动航海业的持续健康发展。未来，随着科技的不断进步和国际合作的深化，我们有理由相信航海业将迎来更加美好的明天。

参考文献

[1]《国际海上人命安全公约 SOLAS》
[2]《国内航行海船法定检验技术规则（2020）》
[3] 中华人民共和国海事局关于印发《重点跟踪船舶监督管理规定》的通知
[4] 宁波舟山港核心港区深水航路船舶定线制和报告制及 VTS 管理区
[5] 珠江口水上交通安全特别监管区管理规定（试行） 附官方解读
[6]《国内水路运输管理条例》
[7]《国内水路运输辅助业管理规定》
[8] 关于安全生产重要论述六大要点和十句“硬话”，海事服务网
[9]《国际船舶安全营运和防止污染管理规则（ISM 规则）》
[10] 《中华人民共和国海上交通安全法》
[11] 《2006 年海事劳工公约（MLC 2006）》

作者简介：史善金，1970 年生于安徽，大专，无限航区一等船长，1991 年进入上海远洋运输公司外派部，船长海龄 61 个月，2015 加入 STELLA SHIP MANAGEMETN 岸基管理，此后一直在岸基各公司任职。历任船员部经理、体系、海务、指定人员、公司总经理等职务，现任台塑（宁波）港务公司码头船长之职。手机：18955332379，邮箱：462385185@qq.com

由一起搁浅事故谈 ECDIS 使用风险及应对措施

彭健,毛旭东,李亚军,徐天奇

（宁波海运股份有限公司，浙江 宁波，315020）

摘 要:自2010年马尼拉修正案正式将ECDIS(电子海图显示与信息系统,Electronic Chart Display and Information System）纳入强制培训要求以来，ECDIS 在船舶航行中的应用日益广泛，正在逐步替代传统的纸质海图。本文通过分析一起船舶搁浅事故，深入探讨了由于船舶驾驶员对 ECDIS 使用不当导致的航行风险，并提出了针对性的风险分析及应对措施，旨在为航海界提供有效参考，减少因 ECDIS 不当使用而引发的航行事故。

关键词: ECDIS；使用；风险；措施

一、引言

随着现代航海技术的飞速发展，ECDIS 在全球航运业的应用日趋广泛，在提升航行效率、减轻

船员工作负担方面发挥了重要作用，为船员工作提供了极大的便利。然而，ECDIS 的高效性和便利性在一定程度上也掩盖了其潜在的操作风险。近年来，多起因 ECDIS 使用不当导致的船舶事故频发，引起了业界广泛关注。本文将通过分析一起具体的船舶搁浅事故案例，深入分析 ECDIS 使用不当引发的风险，并提出了相应的应对措施。

二、 研究背景及意义

ECDIS 是基于综合导航系统设计理念逐渐兴起的海图技术，其综合了海图显示、海图作业、海图改正、定位与导航、雷达图像叠加等主要功能，解决了传统纸质海图定位不准确，容易出现船位误差等问题[1]。，相对于传统的纸质海图具有极大的功能优势。

2010 年，SOLAS 公约制定了船舶逐步强制配备 ECDIS 的时间表，要求定位信息、船位信息、AIS 信息组合到一起，以提供更好的导航功能，所以 ECDIS 是一种重要的新型航行信息系统，正在逐步被应用到几乎所有的船舶上面，将成为船舶设备不可或缺的一部分。ECDIS 不仅可以持续地显示出当前的船位信息，还可以显示出本船附近的海况以及船流量等信息，可以让驾驶员掌握本船周围的海况信息及船舶会遇态势，提早判断及处理险情，达到安全航行的目的。

如今 ECDIS 在全球航运中具有了一定的地位和规模，从整体来看,尽管 ECDIS 的研究已经逐渐成熟且趋于完善,但是纵观实际来看,由于 ECDIS 使用不当造成的航海事故仍时有发生。因此，通过深入分析相关事故案例，并提出应对措施,对保障船舶航行安全具有重要意义。

三、搁浅事故案例分析

1 船舶信息

MV Kea Trader 是一艘 2194 TEU 集装箱船，总吨位为 25145 吨。该船由中国广州文冲建造，于 2017 年 1 月交付给船主 Belgravia 集装箱航运有限公司，该集装箱船由哥伦比亚船舶管理有限公司管理。

该轮总长度 184.99 米，型宽 30.04 米，型深 16.50 米，夏季吃水 9.5 米，夏季载重 2.1 万吨，该轮机舱被认证为无人机舱(UMS Unmanned machinery space)。

2 驾驶台设备信息

驾驶室配备了 S 波段和 X 波段雷达、一台 ARPA、一个全球定位系统(GPS)、两个陀螺罗经和自动识别系统(AIS)。GMDSS 和海图表都位于驾驶室的后端。船舶配备了二台型号为 JAN-901B 的 JRC ECDIS，分别安装在驾驶室前控制台和海图台上(提供备份)，这两台 ECDIS 都符合经修正的 1974 年国际海上人命安全公约(SOLAS)第 V/19 和 V/27 条的海图配备要求。Kea Trader 轮上没有纸质海图，ECDIS 是主要的导航工具。船上的陀螺仪、GPS、计程仪、回声测深仪和 AIS 均与 ECDIS 相结合，形成了一套完整的导航系统。船上所有海图及航海刊物已更正至航海通告 25/17。

3 事故经过

2017 年 7 月 12 日 0055 时，马耳他注册的集装箱船 Kea Trader 发生搁浅事故，搁浅地点位于太平洋中部 22° 02.28’ S 168° 38.25’ E 处。当时，这艘船正从塔希提岛的帕皮提前往新喀里多尼亚的努美阿。下图 3.1 为 Kra Trader 轮附近海域的海图。



图 3.1 Kea Trader 轮附近海域的海图

在 2017 年 7 月 12 日 0054 时二副感到一阵强烈的震动，然后二副通知了船长，船长此时已经因为船舶震荡而醒来，随后船长上驾驶台，下令将甲板灯打开，探照灯直射到水中，灯光下看到了船舶下方有礁石，证实了船舶在杜兰德暗礁（Reef Durand）处搁浅，见下图 3.2。0330 时，船长将情况通知了岸基公司的经理。这时，大副报告说，一号、二号、三号、四号压载舱有水进入。在船首 7.2 米至 7.9 米及船尾 8.0 米至 8.10 米之间探测到该船周围的海水。



图 3.2 Kea Trader 在杜兰德处搁浅

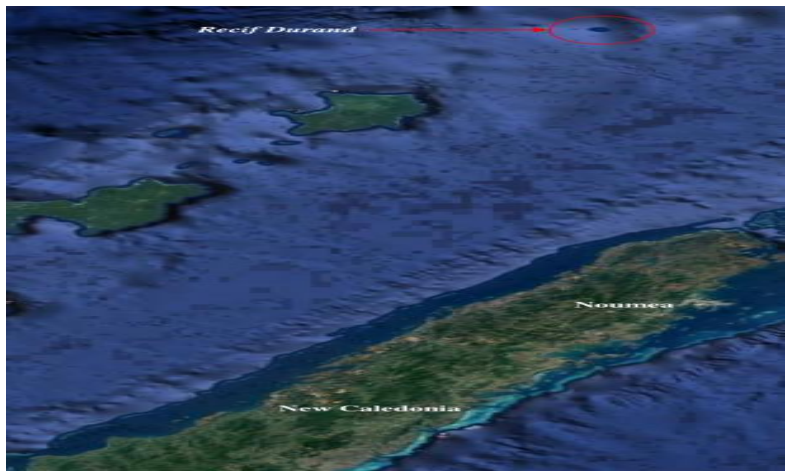


图 3.3 杜兰特的地理位置

4 事故结果

2017 年 7 月 13 日，由专业海事人员组成的 Ardent 打捞队抵达船上，在一号货舱发现少量重油痕迹。到 7 月 23 日，Kea Trader 已经被巨大的海浪击中，机舱舱壁损坏，船周围没有发现石油污染。2017 年 9 月 28 日，船东宣布 Kea Trader 全损，并重新安排救助人员进行打捞。11 月 12 日，该船遭遇了恶劣天气，迫使所有人员撤离该船，11 月 12 日下午，右舷 92 号船壳板断裂，留下一个约 2.5 米的开口，使船体暴露在裂缝中。2017 年 12 月 4 日，Kea Trader 在右舷 92 号船壳板附近断为两截(图 3.4)。



图 3.4 Kea Trader 船体断裂

四、搁浅事故分析

在事故调查过程中发现，船长和驾驶员对 ECDIS 使用存在较多问题。ECDIS 使用不当是导致该起搁浅事故的重要原因，主要体现在：

1.未使用 ECDIS 进行航线检验

二副在 ECDIS 上进行航线修改之后，未应用 ECDIS 的航线检验功能，仅凭借目测去观察新航线是否安全。

根据事故分析得知，由于引航员登船点的位置发生了新的变化，船长在二副下午值班时，让二副将航路点从邓比亚湾引航点移到哈瓦那引航点，二副更改完航线仅通过目测判断新航线安全之后，便告知了船长到新引航位置的距离及预计到达时间。

2.ECDIS 图像比例尺未正确设置

由于 ECDIS 显示图像被过度放大，导致了孤立危险物与航线之间的显示距离较远，导致驾驶员误认为该危险物不会对航行安全产生影响。

二副观察到在船舶右舷 XTL 外的位置出现了孤立的危险标志，但是由于二副将 ECDIS 相关部分的海图过度放大，使得危险物与本船航线距离显示的很远，二副便误认为 XTL 限制区内是安全的。图 4.1 是比例尺为 1:50000 时的海图，此时孤立危险物在 XLT 以外的位置。图 4.2 是事故调查时还原的比例尺为 1:400000 时的海图，此时孤立危险物在 XTL 内。不同的比例尺下，驾驶员看到的危险物与 XTL 的相对位置是不同的。由于二副在 ECDIS 上查阅海图时将海图过度的放大，使得新更改的航线看起来是没有穿过危险物的，所以二副认为新航线是安全可行的，就直接告知了船长。

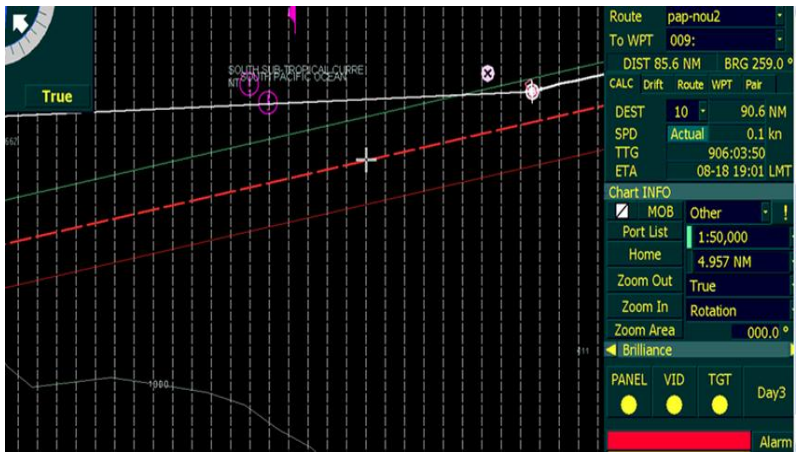


图 4.1 在 1:50000 比例尺下危险物在 XTL 以外

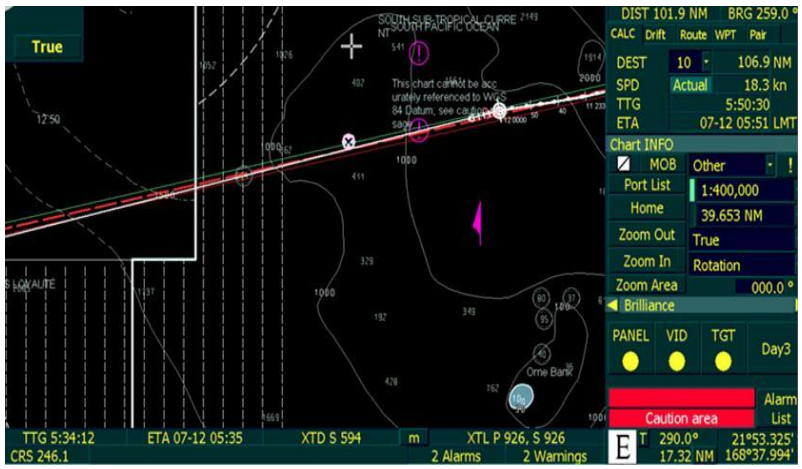


图 4.2 在 1:400000 比例尺下危险物在 XTL 以内

3.船长过分相信值班驾驶员

船长对二副的 ECDIS 的使用能力和航线更改的作业能力十分信任，所以船长认为新更改航线是安全的，没有再对新更改航线进行航线检查。

7 月 11 日 0700 时左右，船长上驾驶台检查船舶预计到达时间、航向和航速。船长查看书面航线计划后，注意到航线计划中无任何航行警告，认为该航路是安全的，批准了修改后的航次计划。晚上 2100 时，船长在夜航命令簿上签署了夜航命令后离开驾驶台。

驾驶员在看到船长签署的夜航命令后，严格执行，未有丝毫的怀疑，这些错误的存在都为事故的发生埋下了种子。

4.ECDIS 声音报警设置错误

ECDIS 的声音警报参数设置为零，即报警功能处于关闭状态，使得 ECDIS 对危险来临前的警报作用失效，驾驶员得不到有效提示。

在调查 ECDIS 警报系统中显示，Kea Trader 轮从（始发港）航行至目的港努美阿（Noumea）港口期间，ECDIS 的声音警报始终被设置为零的状态。

ECDIS 的扇形检测区可以给值班驾驶员们约 6 分钟的时间来响应安全警报，以便及时对产生的危险状况进行处理。但由于警报的声音被关闭，值班人员未能注意到 ECDIS 所检测出的危险状况。

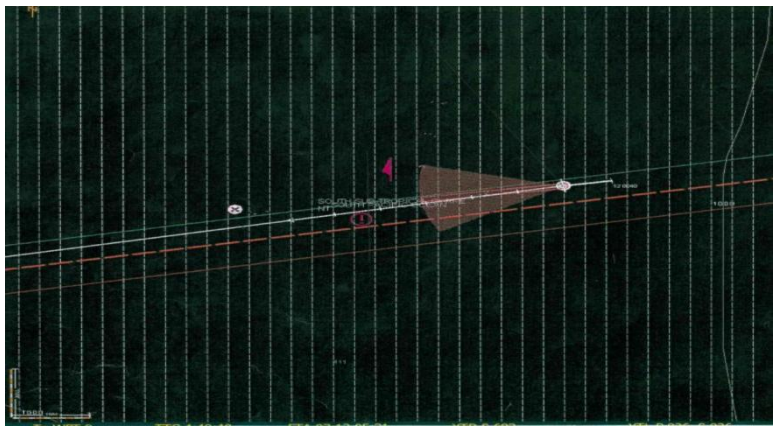


图 4.3 显示安全矢量和扇区检测区

5.驾驶员交接班没有做到交清接明

由于驾驶员对 ECDIS 系统操作不够熟悉，无法正确操作和使用，在交接班时并未对 ECDIS 的安全设置进行检查并记录在航海日志中，从而导致了警报声音被关闭而未被发现。

6.值班驾驶员过分依赖 ECDIS

值班驾驶员盲目信赖 ECDIS 所显示的船舶位置信息是安全的，除了调整船位至计划航线上，未需采取任何行动。

在 7 月 12 日 0000 时，二副和值班水手一起上了驾驶台。二副阅读了船长的夜航命令并签字确认，上面写着:“按照航行计划，保持航向航速。”此时船舶没有偏离航线的警报。在值班期间，值班驾驶员（OOW The officer of the watch）没有查询 ECDIS 上的“警告区域”警报，完全信赖 ECDIS 的信息显示，认为船只在 XTL 中显示的位置是安全的，除了调整航向以恢复航迹外，未需要采取任何行动。由于 OOW 极度信任 ECDIS 设备所给出的信息，不去确认所给的信息是否准确，间接导致了事故的发生。

经过上述的分析可以得知，导致船舶搁浅的原因，主要是由于驾驶员对 ECDIS 的安全设置不熟悉，对 ECDIS 的盲目信赖。下面我们分析上述事故中在 ECDIS 使用上存在的风险应对措施。

五、 应对措施

1.建立健全的 ECDIS 使用管理制度和操作规程

驾驶员在使用航海仪器进行辅助航行时，一定要熟知仪器的功能并掌握正确的操作流程。船上需建立并规范 ECDIS 操作规程，确保每个步骤都有明确的操作指南。特别是在设置航线和导航参数时，应有详细的操作手册和检查清单。驾驶员在新航线设计好之后一定要正确利用 ECDIS 进行航线检验，严格按照操作规程进行操作，避免因个人的操作疏忽而导致风险的发生。

2.强化 ECDIS 的使用培训

虽然驾驶员在考取适任证书时会进行 ECDIS 的培训及考核，但由于实际工作中船舶 ECDIS 的型号存在不同，船员换班之后，导致对新设备的适应期较长。所以船舶管理公司需要定期对船员进行 ECDIS 系统的操作和培训，提高船员的专业素质和操作技能。

3.重视传统的导航手段

单一系统的导航方式存在较高的风险，一旦系统失效，船员可能难以应对,降低航行的整体安全性。在缺乏传统导航手段支持的情况下，船员因过度依赖电子系统而缺乏应变能力，在紧急情况下，船员可能无法及时判断和反应，不能迅速采取有效的避险措施。因此要重视培养船员的安全意识和使用传统导航手段的技能，避免船员过分依赖 ECDIS，忽视传统航海方法，而导致航行安全风险。

4.使用多种方法验证

充分利用 ECDIS 的安全检查功能，及时发现并纠正航线错误，并结合传统导航手段，在纸质海图上，进行双重确认。特别是在重要航段，船长不能过分信任驾驶员，要督促驾驶员同时使用多种导航手段来验证航线和船位，确保航行安全。

六、结语

ECDIS 的出现标志着航海技术领域的一次重大革新，它改变了传统的航海定位与导航形式，为智能船舶的崛起奠定了坚实的技术基础，使船舶自动化驾驶成为可能。目前我国关于 ECDIS 的实践发展还有很长的路要走，这需要我们航海人共同的努力，加强对 ECDIS 在船舶航行应用上的完善，使得技术更进一步的发展。

ECDIS 的应用和发展必定会对未来的船舶航行安全起到积极性的作用，航海研究人员作为推进技术进步的关键力量，要充分发挥自身的专业优势，积极对 ECDIS 进行持续技术创新和改进，使我国航海事业向着更加现代化、数智化方向前进，提高国际航海领域的竞争力和影响力，从而加快实现我国海洋强国的宏伟目标。为此，我们每个航海人都应该积极行动，参与到这一伟大的航海技术革新中来，共同助力我国航海事业迈向更加辉煌的未来。

参 考 文 献

[1] IMO MSC.232(82). Performance standard for electronic chart and display system(ECDIS)[S]. 2006

[2] Oliver Köckritz, Martin Kurowski, Dennis Grunert ,Holger Korte,Axel Hahn. From Nautical Path Planning in ECDIS to Their Realisation Applied for Fully Actuated Ships[J]. IFAC PapersOnLine,2016,49(23):
[3] NP 232 Admiralty Guide to ECDIS Implementation ， Policy and Procedures （UKHO 3rd Edition 2010）
[4] 金伟.ECDIS(电子海图显示与信息系统)的发展与应用[J].信息通信,2019(03):65-66.
[5] 刘军坡,曹玉墀,赵学俊.基于 ECDIS 的航线检验[J].世界海运,2015,38(01):20-23.DOI:10.16176/j.cnki.21-1284.2015.01.006.

作者简介：
彭健：二副，联系电话 15555931914，通信地址：浙江省宁波市江北区北岸财富中心 1 幢，邮箱：779368646@qq.com。
毛旭东：船长，高级工程师，浙江省宁波市江北区北岸财富中心 1 幢 916 室，邮箱：28014658@qq.com。
李亚军：三副。
徐天奇：大副，中级注册安全工程师。

论提高 49500 吨级浅吃水型散货船积载率的实践与探索

黄勇波 黄起栋 毛旭东 安天圣

（宁波海运股份有限公司，浙江 宁波，315020）

摘要：为了提高北方五港至嘉兴电厂航线煤炭 49500 吨级浅吃水型散货船电煤积载率，更好的保障电力供应和经济稳定发展，本文结合实际案例对嘉兴电厂的水文情况和影响船舶积载率的因素进行了深入分析，提出了高船舶积载率的措施和方法，供同类型船舶参考。

关键词：装货积载率；散货船；北方五港

0 引言

嘉兴电厂随着我国能源需求的不断增长，煤炭等大宗货物的运输量持续增加。北方五港作为重要的煤炭输出港口，在保障国民经济平稳运行方面发挥着关键作用。2023 年，北方五港的煤炭吞吐量为 10640.03 万吨。在当前全球能源危机背景下，北方港口的煤炭运输对于保障能源供应安全具有重要意义。浙江浙能嘉兴发电有限公司（简称嘉兴电厂），是国家一流火力发电企业，位于浙江省嘉兴港区。作为区域能源供应的重要支柱，嘉兴电厂拥有 8 台机组，总装机容量达到 530 万千瓦，是全国第二大规模的燃煤发电厂。嘉兴电厂不仅保障了浙江省近十分之一的电力供应，其电力还汇入电网，点亮杭州的“万家灯火”，对浙江省的经济发展和电力需求有着重要的影响。面对进口煤炭需求的激增和煤价的持续高位，北方港口通过增强韧性、稳供保运的措施，保持了煤炭运输规模的稳定，为应对能源紧张局势提供了重要支持。随之从北方五港至嘉兴电厂这条航线上的散货运输业务日益增加。在这一背景下，结合当前航运市场情况，各航运公司积极推行提质增效理念，提高船舶

的装货积载率对于优化运输效率、降低运输成本具有重要意义。北方五港至嘉兴电厂 49500 吨级浅吃水型散货主要运输货种为电煤。据资料显示，2023 年浙江能源集团的航运公司主要负责这类运输，全年电煤采购量 6630 万吨，北方港煤炭供给总量约 5934 万吨。北方五港至嘉兴电厂 49500 吨级浅吃水节能型散货船运输 111 航次，总载重吨位达 512.7 万。

1 北方五港至嘉兴电厂五万吨散货船运输案例分析

1.1 航路及水文分析

北方五港包括:秦皇岛、京唐、曹妃甸、天津、黄骅港，是我国重要的煤炭输出港。秦皇岛港至嘉兴电厂(老铁山)：约 740 海里；京唐港至嘉兴电厂(老铁山)：约 741 海里；曹妃甸港至嘉兴电厂(老铁山)：约 764 海里；天津港至嘉兴电厂(老铁山)：约 790 海里；黄骅港至嘉兴电厂(长山)：约 780 海里，涉及海域环境复杂，需经过老铁山、长山、成山头、长江口、洋山水域分道通航。

嘉兴港位于杭州湾北岸，属于东南季风区，3~8 月以东至东南向风为主，11 月至翌年 2 月以西北至北向风为主，季风气候特征显著。

潮汐属不正规半日潮，潮流基本上为往复流，东西流向，涨落潮流速接近。涨潮流速一般为 3.8 节。乍浦高潮前 3 小时，涨潮流最大，流速 4.5 节，流向 235° 左右；高潮后 4 小时落潮流最大，流速 3.3 节，流向 068° 左右。潮差大，潮流急，是典型的强潮地区。乍浦大潮升 6.2 米，小潮升 4.7 米，平均海面 3.5 米。最大潮差 7.73 米，历年最小潮差 1.06 米，平均潮差 4.76 米。船舶进出嘉兴电厂必须通过金山航道到达，但金山航道内有一个浅点，位置在洋山沉浮北和滩浒山附近航段，航道最小水深 7.5 米，所以 49500 吨级船舶需要侯潮进出。

据上述气象资料显示，水文、气象、浅滩等因素导致进出嘉兴电厂有局限性。所以船舶要想装到最大货量而不亏载，对于吃水大于 10.0 米的船应合理计算潮高，通过滩浒山浅滩的潮高允许值。海上通常做法为：按照海水密度 1.013 克/每立方厘米,富裕水深 0.7 米，使船舶抵达滩浒山潮高允许值为：吃水+富裕水深+吃水变更值-海图水深=潮高允许值，如 11.30m(吃水)+0.7m+0.1m（增加吃水）-7.5m（浅点）=4.6m 于滩浒山潮汐表对照，若当天潮高大于 4.6 米可安全通过金山航道，否则要调整吃水，进出应掌握好在高潮前 1.5~2 小时过浅水区域，否则可能面临搁浅的危险。

1.2 船舶积载率计算

船舶积载率（Loading Rate，简称 LR）的计算公式为：

LR=实际载货量/船舶最大载货量×100%

其中，实际载货量是指船舶实际装载的货物重量，船舶最大载货量是指船舶设计允许的最大载货重量。

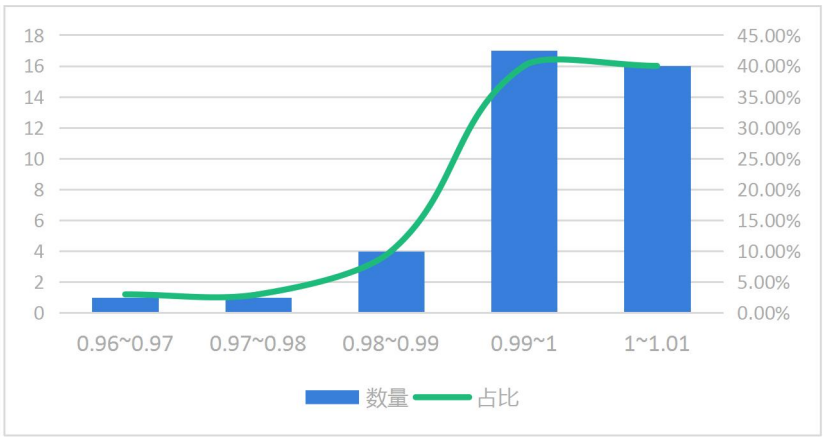


图 1 某 49500 吨级浅吃水型散货船 2022-2024 年积载率数据分布情况

图 1 为某 49500 吨级浅吃水型散货在 2022 至 2024 积载率分布情况，该轮承担着北方五港至嘉兴电厂五万吨散货船的运输任务。2022-2024 年间，船舶积载率主要集中在 0.99~1 和 1~1.01 这两

个区间，占比高达 80%。其中，0.99~1 区间的船舶数量为 17 航次，占比 40%，表明大部分航次在满载状态下航行，充分发挥了船舶的运输能力。而 1~1.01 区间的船舶数量为 16 航次，占比 40%，说明部分航次在运输过程中通过优化提高船舶积载率，保证载货量为不超载前提下的最大值。相比之下，0.98~0.99 区间的船舶数量为 4 航次，占比 10%，反映出少部分航次积载率较低，存在运输资源浪费的情况。而 0.97~0.98 和 0.96~0.97 这两个低积载率区间的船舶数量均为 1 航次，占比均为 3%，说明极少数航次在运输过程中积载率较低，需进一步优化运输方案，提高船舶利用率。总体来看，某轮在北方五港至嘉兴电厂航线上的船舶积载率表现良好，但仍有一定的优化空间。

2 影响船舶积载率的因素

如图 2 所示，积载率与“实装货量”和“可装货量”的相关性非常高，这在意料之中，因为这两个变量直接影响积载率的计算。其他列与积载率的相关性较低，但“压载水存量”和“淡水”与积载率也有一定的正相关性。本文采用散点图和回归分析方法，揭示了这两者与船舶积载率之间的内在联系，并为进一步提高船舶运营效率提供了有价值的见解。

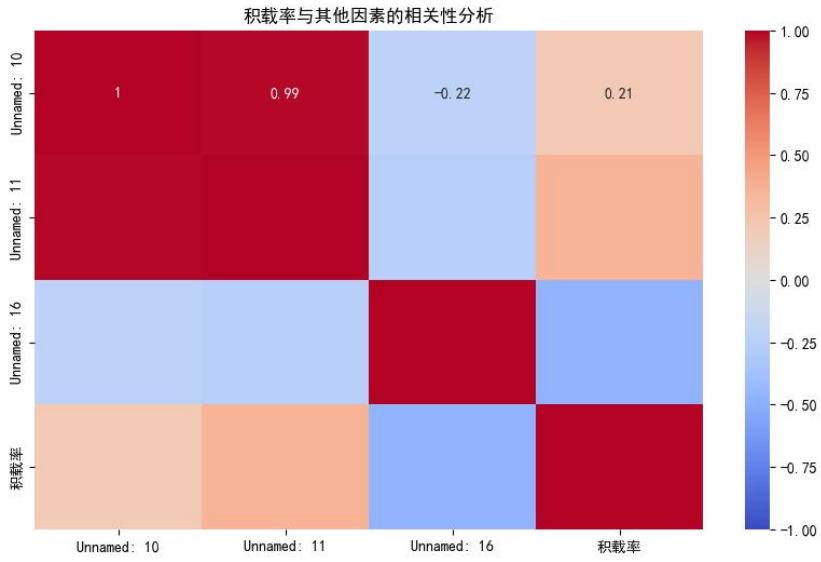


图 2 积载率与其他因素的相关性分析

2.1 压载水存量因素

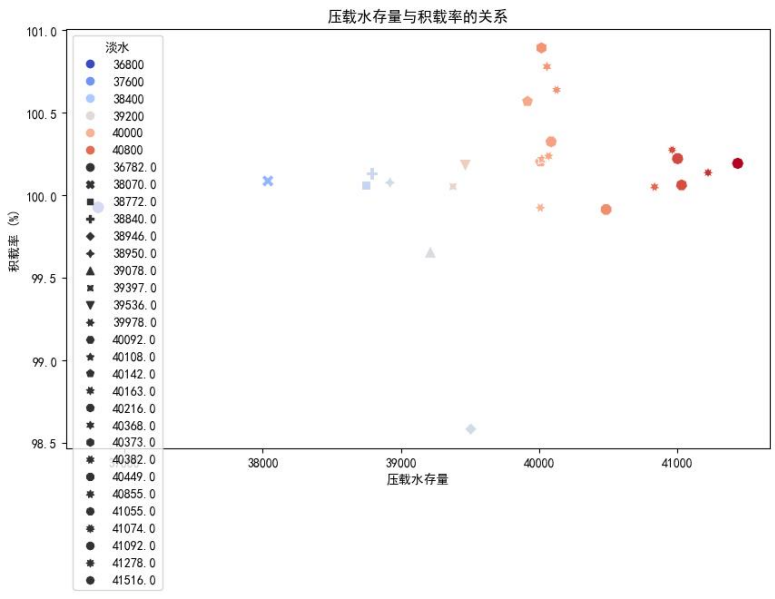


图 3 压载水存量与积载率的关系

如图 3 所示，压载水存量与积载率之间的相关系数为 0.2091，显示出它们之间存在一定的正相关关系。尽管这一相关系数不算高，但它仍然揭示了两者之间轻微的正向关联。当压载水存量减少时，我们可以观察到积载率有轻微上升的趋势。在系统内航线航程通常为 3 天左右的情况下，我们需要综合考虑途中油水消耗、装卸港水密度变化等因素，装港离泊时的吃水差通常被控制在尾倾 10-20cm 范围内，以确保航行的稳定性和安全性。压载水，即为了调整船舶重心和稳定性而存放在特定舱室中的水，说明空载航行时存量的增加意味着船舶有更大的灵活性来应对不同的航行条件。在恶劣天气或海况下，更多的压载水可以帮助船舶保持稳定，从而可能提高其装载能力。此外，压载水的合理分配和使用还可以优化船舶的吃水深度，进而影响其航行速度和燃油效率。

2.2 淡水因素

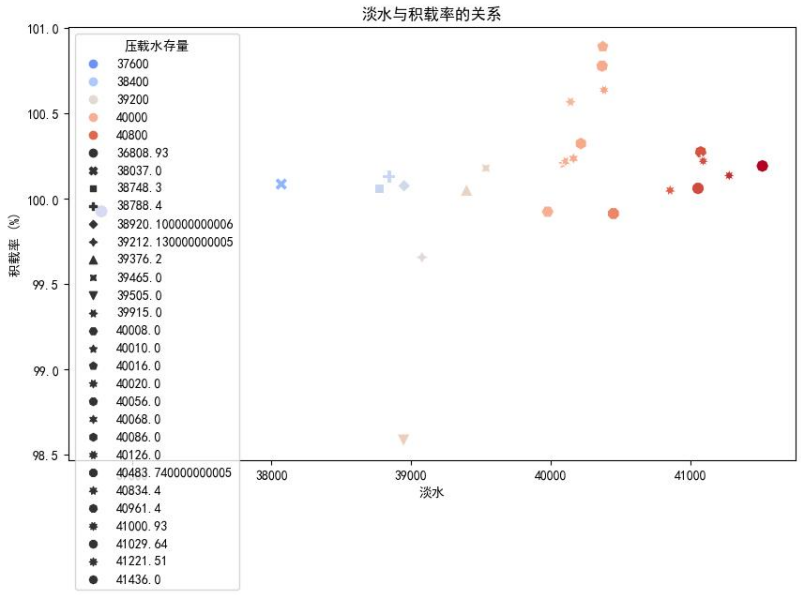


图 4 淡水与积载率的关系

如图 4 所示，淡水与积载率之间的相关系数达到 0.3528，这一数值在一定程度上显示出两者之间存在较为显著的正相关性。这表明在之前的情况下，淡水存量较为充足，对积载率产生了一定的影响。为了进一步提高船舶的积载率，对淡水存量与积载率的关系进行了详细统计分析。通过科学合理地控制淡水存量，成功地优化了资源配置，从而使得积载率得到了有效提升。台风季节和冬季季风季节根据具体情况适当提高淡水存量，保证航次需求，淡水补给点的规划和优化可以减少船舶因淡水不足而不得不减速或改变航线的情况，从而提高整体的运营效率。

2.3 潮汐因素

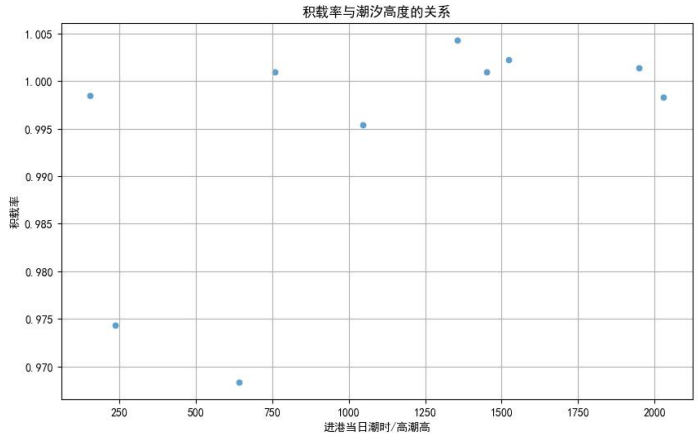


图 5 积载率与潮汐高度的关系

如图 5 所示，积载率与潮汐高度之间存在一定的正相关关系，这一现象揭示了潮汐变化对船舶装载效率的影响。当潮汐高度增加时，船舶可以更充分地利用水深，从而提高积载率。这一正相关关系的相关性系数为 0.55，表明积载率与潮汐高度之间呈现出中等程度的正相关。在这种关系中，潮汐因素成为了影响船舶装载效率的一个重要外部条件。在潮汐较高时，船舶可以装载更多的货物，从而提高运输效率，降低成本。

3 提高船舶积载率的措施

3.1 合理排放压载水

不同的压载水管道配置方案具有各自的运行特性。通常，可归纳为两种主要设计方式：一是压载泵和扫舱泵的管道系统各自独立，这样的设计允许压载泵排水与扫舱泵清空作业同时进行，从而提升了操作效率；二是采用压载泵与扫舱泵共享同一管道的设置，这种情况下，两者无法同时运作，可能会在一定程度上影响排水效率。

在航运系统中，航线航程通常维持在 3 天左右的时间。为了确保船舶的适航性和降低能耗，一般情况下不会采用在尾尖舱载水的方式来使船舶尾部下沉。这是因为，需要考虑到航行途中油水的消耗、装卸港口的水密度变化等多种因素。在装港离泊时，通常会严格控制船舶的吃水差，将其维持在尾部下沉 10-20 厘米的范围内，以确保船舶在航行过程中的稳定性和经济性。这样的操作既保障了航行的安全性，又有效提高了船舶的运营效率。

船舶根据船调室的《航次指令》、进出港吃水限制、季节吃水限制、限制预配载货量和公司其他规定，核实并计算预配载货量，并进行装载。抵达吃水受限的卸货港时吃水差小于 5CM，尽可能平吃水。系统内航线航程时间一般在 3 天左右，考虑到途中油水消耗、装卸港水密度变化等因素，装港离泊时的吃水差一般是控制在尾顷 10-20cm 左右。

船舶核实载货量的准确性。排水量的计算修正。读取船舶六面吃水；船舶吃水左右平均修正；船舶艏艉柱吃水修正；船舶中拱或中垂船体变形修正；船舶纵倾修正；当地港口水密度修正。

载货量的计算：载货量=船舶排水量-船舶常数-压载水存量-燃油存量-淡水存量-空船重量。

减少船舶重载航次压载水残水量；控制淡水存量，保持合理范围；船舶须严格把控船舶的拱垂量在安全合理的范围内。

在执行从北方五港至嘉兴电厂的煤炭运输任务中，某轮展现出了卓越的运营能力和环保意识。该轮船通过深入研究与创新，成功对压载水计算方法进行了优化，并对排放流程进行了精细化调整，精确计算潮汐，合理调度船舶进港时间。这一系列举措取得了显著成效，使得船舶在航行过程中残存压载水减少了 10%，从而为货物装载量的提升创造了有利条件。在确保航行安全的前提下，某轮不仅提高了运输效率，还为我国航运业的绿色可持续发展贡献了宝贵经验。

3.2 优化淡水舱与燃油舱存量管理

为了确保船舶在航行过程中的安全、经济和高效，需要综合考虑航行距离、天气条件、船员需求、航线特点等多种因素，精确预估船舶在特定航次中所需要的淡水量和燃油量。通过实施控制淡水存量上限的策略，在保障基本需求的前提下，避免过量储备淡水，从而有效节约空间，为船舶创造更多的载货潜力。这一举措不仅有助于降低运营成本，提高船舶的盈利能力，还能在一定程度上减少船舶的油耗和环境污染，实现绿色航运的目标。

在航运过程中，淡水作为船员生活必需品，其重要性不言而喻。然而，淡水储备过多不仅占用宝贵的舱容，还会增加船舶的载重，影响航行性能。因此，通过对航行距离、天气条件等关键因素的分析，得以准确预测淡水消耗量。在此基础上，采取控制淡水存量上限的方法，合理调配淡水储备，确保在满足船员日常用水需求的同时，避免资源浪费。与此同时，燃油作为船舶动力之源，其存量管理同样至关重要。根据航线规划、船舶油耗数据和气象预报，能够精确计算所需燃油量，从而优化燃油舱的存量。通过这种精细化管理，不仅提高了船舶的运营效率，还为船舶创造了更大的载货空间，实现了经济效益和环境效益的双提升。

在过往的航运运营中，淡水与燃油的预估不准确问题一直如悬于顶的达摩克利斯之剑，时刻威

胁着航运效率。这一偏差不仅造成了载货空间的巨额浪费，更使得原本能够满载出发的船舶在实际航行中留下了潜力未尽的遗憾。经过深入的数据分析和精细化管理改革，该轮终于破解了这一历史性难题。通过精确限定淡水存储量上限，并精确计算燃油消耗量，成功实现了对关键资源的精确控制，从而在航行中解除了资源限制的枷锁。此举在理论层面上为每次运输任务释放了宝贵的载货空间，使得该轮能在原有基础上额外装载 200 吨煤炭。这不仅显著提升了船舶的运载效能，降低了运营成本，更为我国航运事业的持续发展注入了新的动力，充分体现了我国航运企业在管理创新与资源优化配置领域的杰出能力。

3.3 精确计算进港时间

精确的进港时间对于船舶而言至关重要，因为它直接关系到船舶的安全和港口的运营效率。由于 49500 吨级船舶进出嘉兴电厂需要侯潮进出，才能通过金山航道内滩浒山浅滩，所以船舶需要精确计算进港时间才能装到最大货量，对于吃水大于 10.0 米的船应合理计算潮高，通过滩浒山浅滩的潮高允许值。若当天潮高大于 4.6 米可安全通过金山航道，否则要调整吃水，进出应掌握好在高潮前 1.5~2 小时过浅水区域，否则可能面临搁浅的危险。所以，精确的进港时间不仅有助于提高船舶运营效率、优化资源配置，还能促进海上运输的安全、高效和可持续发展。

4 结论

本文通过对 49500 吨级浅吃水型散货船从北方五港至嘉兴电厂的重载运输问题进行深入分析，探讨了影响船舶积载率的内外部因素，并提出了合理排放压载水、优化淡水舱与燃油舱存量管理、精确计算进港时间等提高船舶积载率的措施。这些措施有助于提高船舶运输效率、降低单位成本，增强市场竞争力，为同类型船舶经营该航线提供参考。在此基础上，航运企业应继续优化资源配置，提升管理水平，以实现煤炭等大宗货物运输的高效、安全与可持续发展。

参 考 文 献

[1]李友生. 载重线规则在船舶运输中的实践［J］. 中国船检, 2023, (04): 87-92.
[2]肖蓉. 现代物流管理理念在内河船舶配载中的应用［J］. 船舶物资与市场, 2022, 30 (12): 11-13.
[3]洪英鹏,杨英超. 浅谈 VLOC 船舶海务管理［J］. 天津航海, 2022, (03): 11-15.
[4]李胜为,毛盛荣,魏天明. 杂货船的配积载计划编制过程及注意事项［J］. 天津航海, 2022, (02): 5-8.
[5]金建元. 船舶超载控制措施［J］. 航海技术, 2019, (03): 57-60.

作者简介：

黄勇波，湖南郴州人，本科，大副，研究方向为提高提高船舶积载率
黄起栋，浙江宁波人，本科，二副，研究方向为提高提高船舶积载率
毛旭东，浙江宁波人，本科，工程硕士，甲类船长，高级工程师
安天圣，辽宁朝阳人，研究生，工程硕士

基于双重差分模型的宁波舟山港交通组织一体化政策影响研究

俞杰,陈茜,郑彭军

宁波大学海运学院，浙江 宁波，315211

摘　要：2019 年 12 月 1 日交通组织一体化工作在宁波舟山港核心港区正式实行，该政策的施行旨在通过港区的统一交通组织达到提升通航效率和通航安全的目的，本文将政策对于通航安全的影响作为研究对象，针对该政策干预的影响分别基于 DID 和 DMLDID 模型进行了量化分析，揭示了政策对于港区通航安全的影响，并对后续的政策改进和调整提供了依据。

关键词：政策评估；交通干预；双重差分模型；机器学习；宁波舟山港

1 引言

政策评估是公共政策研究中的一个重要领域，其主要目的是确定政策实施后产生的实际影响是否达到了预期的目标。通过政策评估，可以为政策制定者提供重要反馈，并提出相应的调整和改进建议，从而优化政策设计和实施过程，提高公共资源的利用效率，促进社会的公平和可持续发展。

政策评估的方法大致可以分为定量评估[1]和定性评估[2]两大类。定量评估注重利用数据和统计方法来估计政策效果，而定性评估则侧重于使用非数值化的信息，如专家意见、案例分析等。政策评估又可根据评估的时期分为事前评估[3]和事后评估[4]，本文的研究内容集中于事后定量评估。

用于政策定量评估方法有很多种，包括双重差分法（DID）[5]、合成控制法（SCM）[6]、倾向匹配得分法（PSM）[7]等，它们有各自的优势和局限性。合成控制法（SCM）是通过构建一个合成的控制组来模拟政策未实施时处理组的行为，通过比较处理组的实际结果和合成控制组的结果来估计政策影响。谭砚文等[8]利用合成控制法评估了东盟自由贸易区的农产品进出口贸易效应；Couto 等[9]采用广义合成控制法对名为反贫困基金的政策进行评估，提供了该政策对减少贫困产生积极影响的证据；Libin Feng 等[10]采用合成控制法评估绿色金融试点政策（ GFPP ）的碳强度减排效应。在非随机政策干预的评估中，有效地控制混杂变量是实现准确因果推断的关键。倾向得分匹配方法（PSM）在处理选择偏差问题中具有优势，PSM 方法是 Rosenbaum 和 Rubin 提出的一个概念，用于平衡处理组和对照组在协变量上的分布。PSM 方法的核心目标是找到处理组和对照组在协变量上的“统计孪生兄弟”，从而减少选择偏差。Yongshan Du[11]等运用倾向得分匹配双重差分（ PSM-DID ）模型分析低碳城市试点政策（ LCPP ）对城市绿色创新效率的影响；李晓钰等[12]运用 OLS 模型和倾向得分匹配法(PSM)进行数据分析，考察社区公共卫生服务对流动老年人口社会融合的影响。

双重差分法（DID）是一种在计量经济学中常用的估计因果效应的方法，它通过比较政策或干预措施实施前后的变化，以及受政策影响与未受政策影响的组别之间的变化，来估计政策效果。在经济学、社会学、公共卫生等领域，DID 法被用来评估各种改革和干预措施的效果。Strumann 等[13]采用双重差分设计检验 2008 年德国首次公开发布绩效数据后，医院服务质量是否有更大的改善；Jia He 等[14]引入了双重差分（ DID ）模型来评价南水北调工程对湖泊富营养化的影响；Murray 等[15]采用双重差分法研究了主要通道设施对房价的因果影响的时间和空间分布。DID 法因果效应评估[16]在交通运输领域的运用也越来越多。胡泓等[17]运用双重差分模型分析了地铁开通对于公交运行的影响效应；李建萍等[18]运用中国 280 个地级及以上城市数据实证检验了高铁开通的减贫效应及其作用机制。为了解决传统 DID 方法中的有效性假设和高维数据问题，Abadie 等[19]提出了 Double Machine Learning-based Difference in Differences（DMLDID）， 通过机器学习算法处理和调整协变量，以此来避免传统 DID 方法在处理高维度数据时的困难，可以更为精确地估计因果效应。DMLDID 学习

算法在金融，工业控制，教育政策评估等领域都有广泛的应用， Xing Lu 等[20]采用 DMLDID 方法论证了碳政策显著降低了企业风险承担；Yingheng Zhang 等[21]采用 DMLDID 因果机器学习方法量化了伦敦夜地铁的社会影响。

综上，可以发现目前存在多种评估政策因果效应的方法。其中，双重差分法作为一种成熟的评估技术，被广泛应用于政策影响分析。该方法视政策实施为一种自然实验，通过构建一个由未受政策影响的控制组和受政策影响的实验组组成的样本，进行比较分析，从而评估政策的净效果。基于这一方法，本研究将聚焦于宁波舟山港交通组织一体化政策，对其实施效果进行深入评估，并提出相关的改进建议，为进一步提升宁波舟山港的交通组织水平提供决策参考。

2 宁波舟山港交通组织一体化政策

为了优化宁波舟山港交通网络、提高港区通航效率和安全性，降低运输成本，浙江海事局于 2019 年 12 月 1 日发布了《宁波舟山港核心港区船舶交通组织实施暂行办法》，明确了交通组织一体化工作的覆盖水域、船舶类型及特殊航道的申报使用方法等。根据《办法》，交通组织一体化政策的覆盖水域包括 2016 年浙江海事局公布的《宁波舟山港核心港区深水航路船舶报告制》和《宁波舟山港核心港区深水航路船舶定线制》规定的相关航道水域，以及 VTS 管理区和交通组织区水域，如图 1 所示。

政策主要涵盖核心港区的深水航路和航道，以及特定船舶类型，并详细规定了船舶在进出核心港区时的报告、交通组织以及特殊航道的管理要求。船舶在进出核心港区之前，需在船舶交通组织服务管理平台进行注册，并按规定时间和格式报告其动态信息，如船名、载货情况、预计靠离泊码头及时间等。此外，船舶还需关注平台公布的交通组织信息，以便及时了解可能的计划变更。对于虾峙门、条帚门等特殊航道，该办法还设定了额外的规定。例如，这些航道的交通组织以船舶在平台录入的进出时间为基础，优先保障特定类型的船舶。同时，船舶在通过这些航道时还需保持与前船的安全距离，并遵守特定时段的重点疏导要求。

政策依靠信息化手段整合港口运行情况，强调了申报平台化、信息公开化、组织统一化等原则，以提供高效的交通组织，确保港区交通的顺畅和港口的可持续发展。

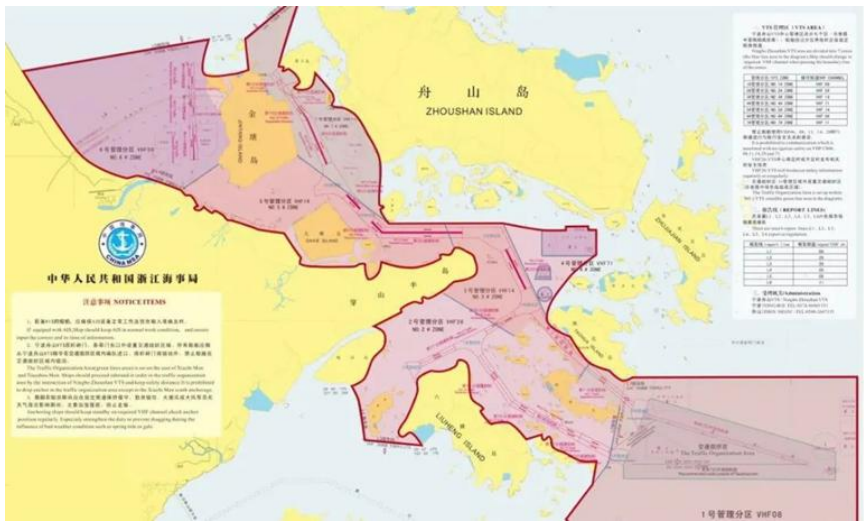


图 1　交通组织一体化覆盖水域示意图

3 政策影响评估研究

3.1 研究方法

3.1.1 DID 模型

采用双重差分模型（DID），将宁波舟山港 2019 年 12 月交通组织一体化政策实施作为核心变量，研究其对于船舶通航安全的影响。模型公式（1）所示：

$$\boldsymbol{Y_{it} = \alpha + \beta(D_i * T_t)i + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it}} \quad (1)$$

其中，μ_i、γ_t分别为个体固定效应和时间固定效应，通过在回归时加入个体虚拟变量和时间虚拟变量便可控制个体固定效应和时间固定效应。

在双重差分方法中控制组提供了一个可供研究的反事实，即可将未受到处理的控制组在观察时期内的“变化”近似于处理组倘若未受到冲击将发生的变化。从处理组前后时期的变化中减去控制组前后时期的变化，即可得到因果效应 β 。可用如公式（2）所示：

$$\boldsymbol{\beta = [E(Y|D = 1, T = 1) - E(Y|D = 1, T = o)] - [E(Y|D = 0, T = 1) - E(Y|D = 0, T = 0)]} \quad (2)$$

其中，第一个方括号内为处理组在政策实施前后的差异效应，第二个方括号内为控制组在相同时间段的差异效应，两个一次差分的差值为双重差分处理效应，即处理组与控制组在政策实施前后的平均变化差异。

对于未受交通组织一体化政策影响的控制组赋值为 0；而处理组则赋值为 1，从而生成一个反映是否实施交通组织一体化政策的虚拟变量。利用此虚拟变量，进一步构建了一个双向固定效应模型，以进行双重差分估计，如公式（3）所示：

$$\boldsymbol{y_{it} = \alpha + \delta\ treat_i \times\ post_i + u_i + \lambda_i + \eta x_{it} + \varepsilon_{it}} \quad (3)$$

其中处理组虚拟变量 u_i捕捉了处理组的组别效应（处理组与控制组的固有差别），处理期虚拟变量 λ_i控制了处理期的时间效应（处理期前后的固有时间趋势），x_{it}为其他控制变量，而交互项 δ 则代表了处理组在政策期间的真正效应，即因果效应。y_{it}为被解释变量，本文选取了基于事故数和险情数，并以其种类和严重程度加权的加权事故风险值和加权险情风险值作为安全指标；$treat_i \times post_i$是模型的主要解释变量，表示交通组织一体化政策是否实施。

3.1.2 DMLDID 模型

为了对“宁波舟山港核心港区交通组织一体化”政策的影响效应进行更为深入的研究，同时验证 DID 模型的有效性，进一步选取结合了机器学习分析方法的 Double Machine Learning-based Difference in Differences（DMLDID）模型。DMLDID 在处理复杂的非线性因果关系时，相较于 DID 模型表现出明显的优势，它通过机器学习算法自动选择出重要的控制变量，并通过正交化处理偏倚，同时能够有效控制偏差，提高了估计的准确性。

3.2 数据

根据数据的可获得性，将宁波舟山港设为处理组，另选温州港和台州港两个港口为控制（对照）组，将政策实施前的年份 2019 年前（包含 2019 年）赋值为 0，政策实施后为 1，据此生成是否实施交通组织一体化政策的虚拟变量。

模型的被解释变量为港区通航安全风险，采用加权事故风险值和加权险情风险值。水上交通事故和险情统计数据来源于浙江海事局官方统计，具有权威性和数据可获得性。鉴于港区通航风险还受到多方面因素的影响，因此，本文另选取了港口货物吞吐量、码头泊位长度、旅客流量、外贸、集装箱数量五个因素作为控制变量，模型中涉及的变量及说明如表 1 所示。

表 1　变量说明与数据来源

变量类型	变量名称	变量符号	指标构造	数据来源
被解释变量	事故风险值	risk	不同等级加权	海事局统计数据
	险情风险值	danger	不同等级加权	海事局统计数据
核心解释变量	是否处理组	treat	宁波舟山港为 1，其他为 0	
	实施年份	post	2020 年以后为 1，之前为 0	
	政策净效应	treat_post	post 和 treat 的交乘项	
其他变量	港口货物吞吐量	logcapacity	港口货物吞吐量取对数	中国统计年鉴
	码头泊位长度	loglength	码头泊位长度取对数	2018-2023
	旅客数量	logpassenger	旅客数量取对数	
	集装箱吞吐量	logcontainer	集装箱吞吐量取对数	中国港口年鉴
	外贸占比	foreign trade	外贸量与货物吞吐量的比值	2018-2023

评估期内加权事故风险值和加权险情风险值如图 2 和图 3 所示，可以看出，事故和险情风险值的变化具有大致相同的趋势，在 2020 年后显著下降。由于宁波舟山港体量最大，其事故和险情风险值远高于另外两个港口。

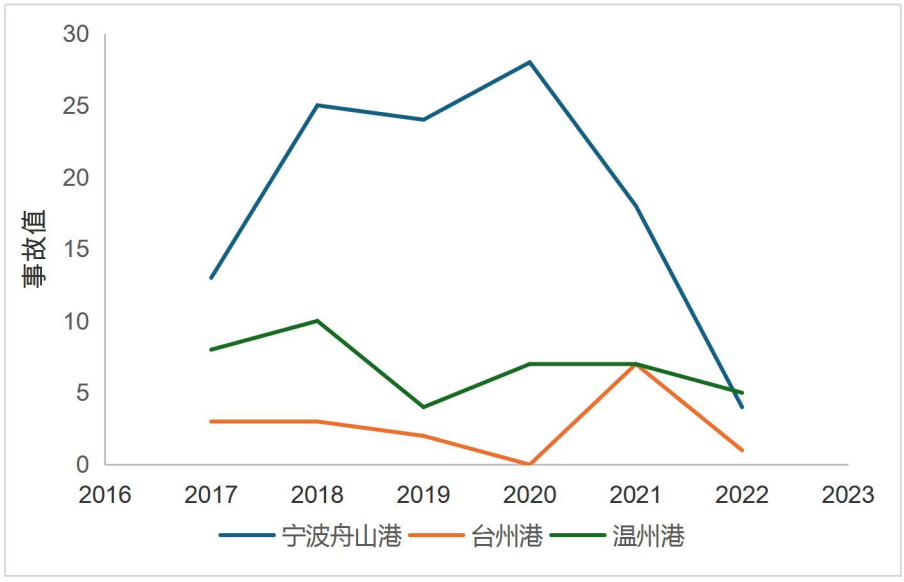


图 2　2017-2022 加权事故风险值

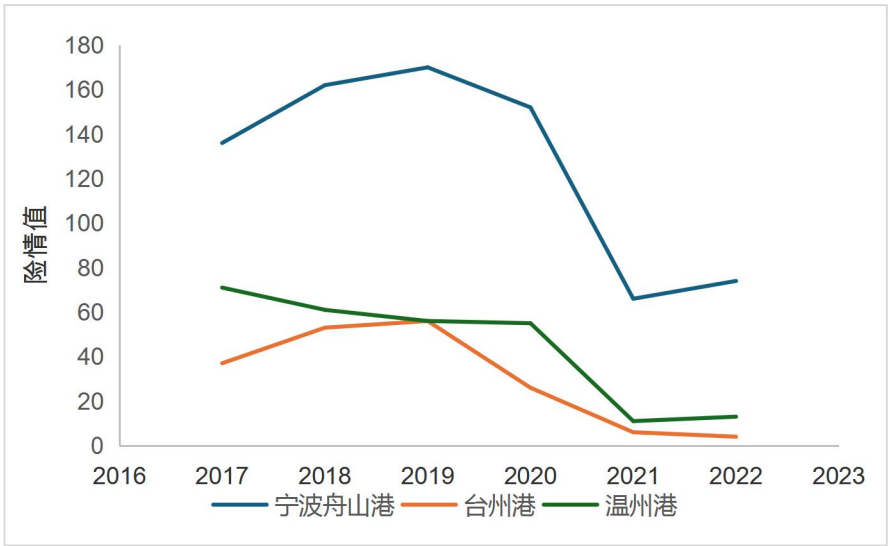


图 3　2017-2022 加权险情风险值

4 结果分析

4.1 DID 模型结果

基于双重差分 DID 模型，本文分别以港口事故风险值和险情风险值作为被解释变量进行建模；解释变量则包括二分类变量{treat}、时间变量{year}、分组项变量{港口}、控制变量{外贸/百万吨，旅客/万人，集装箱/50 万 TEU，货物吞吐量/千万吨，码头长度/千米}；参数为政策实施时间点：{2020}。政策实施前/后 time 取值分别为 0 和 1。控制组(Control)代表未受政策干预，处理组(Treated)代表受政策干预，treat 的取值分别为 0 和 1。

4.1.1 基准回归结果

加权事故风险值的评估结果如表 2 所示。结果显示，显著性 P 值小于 0.001，呈现显著性；政策实施前处理组与控制组的差值为-8.991，政策实施后处理组与控制组的差值为-17.983，两者再进行做差为-8.991，可以认为该政策干预有效，为负向，即随着交通组织一体化政策的实施，港口的事故风险值明显下降。

表 2　加权事故风险值评估结果

结果		系数	标准误差	t	p
政策实施前（Before）	控制组（Control）	0.348			
	处理组（Treated）	-8.643			
	Diff（T-C）	-8.991	1.287	-6.989	0.000***
政策实施后（After）	控制组（Control）	1.526			
	处理组（Treated）	-16.457			
	Diff（T-C）	-17.983	0.91	-19.768	0.000***
Diff-in-Diff		-8.991	1.287	-6.989	0.000***

注：1) * p < 0.1， ** p < 0.05， *** p < 0.01

加权险情风险值的评估结果如表 3 所示，显著性 P 值小于 0.001，水平上呈现显著性，拒绝原假设；政策实施前处理组与控制组的差值为-24.188，政策实施后处理组与控制组的差值为-48.376，两者再进行做差为-24.188，可以看出政策干预非常有效，为负向，即随着交通组织一体化政策的实施，港口发生险情风险明显变少，且减小的程度大于事故风险。这与直观经验是一致的，即险情是

事故的前置阶段，船舶发生险情，如果采取措施不当或救助不及时，就会发生海上交通事故，政策影响是先从险情风险减少开始的。

表 3　加权险情风险值评估结果

结果		系数	标准误差	t	p
政策实施前（Before）	控制组（Control）	9.413			
	处理组（Treated）	-14.775			
	Diff（T-C）	-24.188	5.494	-4.403	0.000***
政策实施后（After）	控制组（Control）	5.538			
	处理组（Treated）	-42.838			
	Diff（T-C）	-48.376	3.885	-12.453	0.000***
Diff-in-Diff		-24.188	5.494	-4.403	0.000***

注：1) * p < 0.1， ** p < 0.05， *** p < 0.01

4.1.2 平行趋势检验

DID 模型的运用需满足平行趋势检验，即在政策发生之前，处理组和控制组具有一致的变化趋势。本文构造政策实施前三年的处理组和年度虚拟变量的交互项，若前三年的交互项系数不显著则通过平行趋势检验。事故和险情风险值的平行趋势检验结果分别如图 4 和图 5 所示，可以看到在 2020 年前（交通组织一体化政策未实施时）处理组和对照组的变化趋势基本一致，而政策实施之后处理组和对照组的变化趋势开始明显偏离，因此通过平行趋势检验。

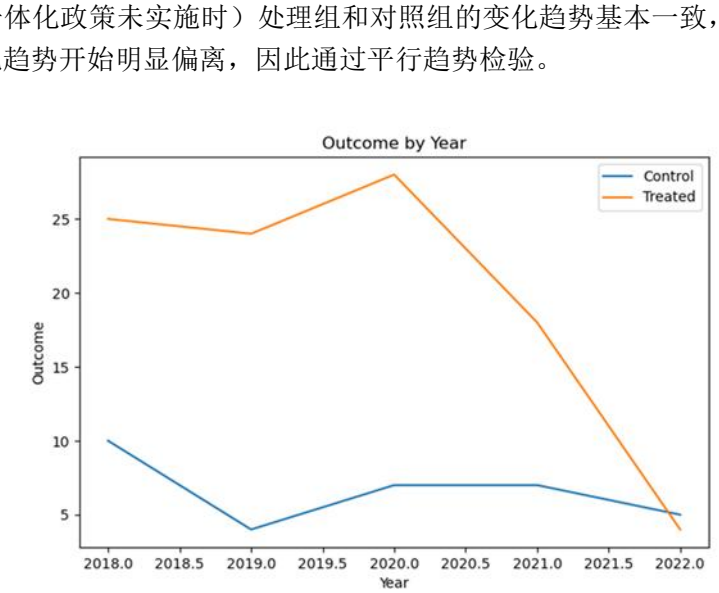


图 4　加权事故风险值平行趋势检验结果

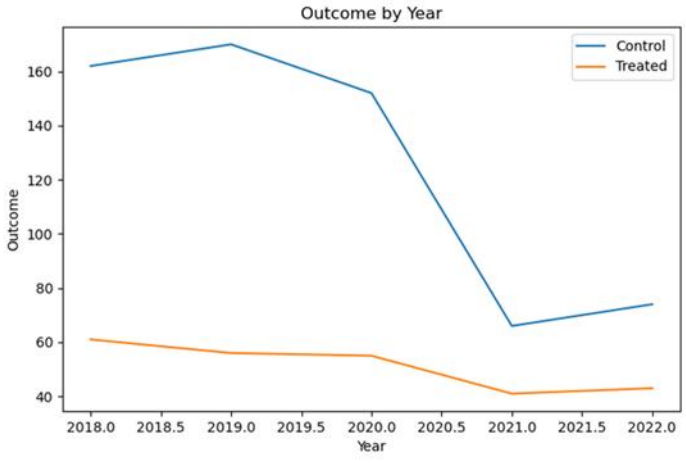


图 5　加权险情风险值平行趋势检验结果

4.1.3 安慰剂检验

除了交通组织一体化政策这一事件之外，其他的影响因素也有可能对船舶进出港安全风险产生影响，即影响可能是由其他政策或是随机因素引起的，而不是由单独的政策实施引起。为排除其他因素的影响，借鉴已有研究的方法，通过改变政策执行时间进行了安慰剂检验。将交通组织一体化政策的实施时间提前一年，即假设在 2018 年年底实施交通组织一体化政策，事故和险情风险值的重差分分别为-5.294 和-14.552，远远小于 2020 年实施交通组织一体化政策的重差分值-8.991 和-24.188，说明通过安慰剂检验，政策的作用是显著的。

4.2 DMLDID 模型结果

4.2.1 基准回归结果

基于前文数据和 DMLDID 算法，得到模型的事故风险值，险情风险值和船舶等待时间结果，分别如表 4 和表 5 所示。从表 4 可以看出，事故风险值的评估结果显著性 P 值小于 0.001，可以拒绝原假设；政策实施前后处理组与控制组的差值为-10.577，可以认为该政策干预有效，为负向，即随着交通组织一体化政策的实施，港口的事故风险值明显变少，与前文 DID 模型所得结果一致，验证了评估结果的有效性。从表 5 可以看出，险情风险值的评估结果显著性 P 值小于 0.001，可以拒绝原假设；政策实施前后处理组与控制组的差值为-48.95，可以认为该政策干预有效，为负向，即随着交通组织一体化政策的实施，港口的险情风险值明显变少，同时险情风险值的差值绝对值为 48.95，大于事故风险值的差值绝对值 10.577，政策对于险情风险值减少影响大于事故风险值减少影响，与前文结论一致。

表 4　DMLDID 模型事故风险值评估结果

结果		系数	标准误差	t	p
政策实施前（Before）	控制组（Control）	4.484			
	处理组（Treated）	-6.094			
	Diff（T-C）	-10.577	0.46	-22.987	0.000***
政策实施后（After）	控制组（Control）	4.451			
	处理组（Treated）	-16.703			
	Diff（T-C）	-21.154	0.325	-65.016	0.000***
Diff-in-Diff		-10.577	0.46	-22.987	0.000***

注：1) * p < 0.1， ** p < 0.05， *** p < 0.01

表 5　DMLDID 模型险情风险值评估结果

结果		系数	标准误差	t	p
事件发生前（Before）	控制组（Control）	19.178			
	实验组（Treated）	-29.772			
	Diff（T-C）	-48.95	4.012	-12.201	0.000***
事件发生后（After）	控制组（Control）	15.269			
	实验组（Treated）	-82.631			
	Diff（T-C）	-97.9	2.837	-34.509	0.000***
Diff-in-Diff		-48.95	4.012	-12.201	0.000***

注：1) * p < 0.1， ** p < 0.05， *** p < 0.01

4.2.2 安慰剂检验

同前文 DID 模型安慰剂检验，改变政策执行时间进行安慰剂检验，将交通组织一体化政策的实施时间提前一年，即假设在 2018 年年底实施交通组织一体化政策，事故，险情和通航效率的重差分回归结果分别为-8.463 和-40.262，均小于 2020 年实施交通组织一体化政策的重差分值-10.577 和-48.95，整体降幅均超过 15%，说明通过安慰剂检验，政策起到了显著的作用，模型结论有效可靠。

5 结论

实施宁波舟山港交通组织一体化政策的主要目标是提高港口通航效率和降低通航风险。为了定量评估该政策的影响，本研究构建了双重差分（DID）模型，深入分析了政策实施前后的数据，量化了政策带来的变化和效果。为了进一步提高模型对复杂数据处理和非线性因果关系估计的准确性，本文又采用了融合机器学习的双重差分模型（DMLDID）。该模型从统计学的角度验证了政策的显著效果，从而增强了研究结果的可靠性。

基于 DID 模型的分析结果表明，政策实施显著降低了事故和险情风险值，有效提升了港区的通航安全。DMLDID 和 DID 模型在评估政策对通航安全影响的结论上高度一致，均显示该政策显著推动了港区通航安全性的提升，明显改善了海上险情和事故的频发状况。

参考文献

[49] Joanne McPeake， Theodore J. Iwashyna， Pamela MacTavish， et al.Could an integrated model of health and social care after critical illness reduce socioeconomic disparities in outcomes? A Bayesian analysis， BJA Open， Volume 9， 2024， 100259， ISSN 2772-6096.

[50] Desta N B ，Tustin J ，Sanchez J ， et al. Environmental predictors of Escherichia coli concentration at marine beaches in Vancouver， Canada: A Bayesian mixed-effect modelling analysis[J]. Epidemiology and infection， 2024， 31-38.

[51] 罗希德.基于事前绩效评估的预算绩效管理实践与思考——以广东省深圳市福田区为例[J].财政监督， 2023， (22): 52-55.

[52] 靳岳明，季昊宇.重大行政决策事后评估制度的建立与完善[J].天水行政学院学报， 2023，24 (02): 100-105.

[53] Lianyan F，Lin Z ，Peili W， et al. Evaluating the Causal Effects of Emissions Trading Policy on Emission Reductions Based on Nonlinear Difference-In-Difference Model[J]. Sustainability，2022，14(23):15726-15726.

[54] David G ，Thomas E ，Nuno G ， et al.Synthetic Control Method: A tool for comparative case studies in economic history[J].Journal of Economic Surveys，2022，37(2):409-445.

[55] Wright B D .Gain Scores， ANCOVA， and Propensity Matching Procedures for Evaluating

Treatments in Education[J].Open Education Studies，2020，2(1):45-65.
[56] 谭砚文，李丛希，曾华盛等. 中国—东盟自由贸易区的农产品贸易效应——基于合成控制法的实证评估[J].中国农业大学学报， 2024， 29 (03): 241-259.
[57] Couto ，Zilania ，Mário ， et al.Evaluating the impact of an innovative anti-poverty program: evidence using the generalized synthetic control method[J]. Applied Economics Letters，2023，30(19):2867-2871.
[58] Feng L ， Sun Z .The Impact of Green Finance Pilot Policy on Carbon Intensity in Chinese Cities—Based on the Synthetic Control Method[J].Sustainability，2023，15(15).
[59] Du Y，Wang H ，An R ， et al.The Impact of Low-Carbon City Pilot Policies on Green Innovation Efficiency in Chinese Cities: An Empirical Analysis Based on the Multi-Period PSM-DID Model[J].Sustainability，2024，16(5)
[60] 李晓钰，李含伟.社区公共卫生服务对流动老年人口社会融合的影响研究——基于倾向得分匹配(PSM)的实证研究[J].中国卫生事业管理， 2023， 40 (06): 408-412.
[61] Christoph S ，Alexander G ，Reinhard B ， et al.Can competition improve hospital quality of care? A difference-in-differences approach to evaluate the effect of increasing quality transparency on hospital quality.[J].The European journal of health economics : HEPAC : health economics in prevention and care，2022，23(7):1-14.
[62] He J ，Li A ，Tan Z ， et al.Potential impact of water transfer policy implementation on lake eutrophication on the Shandong Peninsula: a difference-in-differences approach[J].Hydrology Research，2020，51(5):1063-1076.
[63] Murray ，John，Bardaka ， et al.Evaluating the spatial and temporal distribution of beltway effects on housing prices using difference-in-differences methods[J].Transportation，2021，49(6):1-36.
[64] 谢波，谭徐媛.城市绿色空间对居民心理健康的因果效应及分层分析[J].地理科学进展，2024， 43 (01): 110-124.
[65] 胡（山军）泓．地铁开通对公交的影响[D]．南京大学， 2017. DOI:10.27235/d.cnki.gnjiu.2017.001632.
[66] 李建萍，辛大楞，宋彩霞.高铁开通的减贫效应——基于中国 280 个地级及以上城市的双重差分法实证研究[J].安徽师范大学学报(人文社会科学版)，2020，48(04):128-138.
[67] Abadie， A. 2005. Semiparametric difference-in-differences estimators. Review of Economic Studies 72: 1–19.
[68] Lu X ，DongHao H ，Xie H .The impact of carbon policy on corporate risk-taking with a double/debiased machine learning based difference-in-differences approach[J].Finance Research Letters，2023，58(PC):
[69] Yingheng Z ，Haojie L ，Gang R. Quantifying the social impacts of the London Night Tube with a double/debiased machine learning based difference-in-differences approach[J]. Transportation Research Part A，2022，163288-303.

作者简介

俞杰（1999－）， 男， 浙江宁波人， 硕士研究生， 主要研究方向: 交通安全与环境,手机号：13082989801,E-mail: YJ1305695@163.com
陈茜（2000－）， 女， 安徽蚌埠人， 硕士研究生， 主要研究方向: 交通安全与环境,手机号：13586707716,E-mail: m13586707716@163.com

***通信作者**：郑彭军（1965－）， 男， 浙江宁波人， 教授、博士生导师， 主要研究方向：交通安全与环境。为宁波大学包玉刚领军学者，主持国家重点研发项目、欧盟地平线 2020 项目、国家自然基金、863 子课题、国家海事局、浙江重点研发项目等 16 项。在国际重要学术刊物和学术会议发表研究论文 190 余篇，大多被 SCI、EI 收录。获浙江教学成果一等奖 1 项、浙江航海科技奖一等奖 1 项，中国智能交通协会科学技术奖二等奖 1 项。E-mail: zhengpengjun@nbu.edu.cn

考虑域影响的船用旋转机械故障诊断方法研究

崔德馨

宁波远洋运输股份有限公司，浙江 宁波 315042

摘　要：船用旋转机械设备在具有多个激励源的环境中工作。振动信号的有效特征提取和故障诊断已成为研究的热点。时域同步平均可以有效地处理振动信号。然而，所需的关键相位信号难以获得。在信号处理过程中，会导致故障特征信息的丢失。此外，频乘信号波形是混合的。为了解决这一问题，探索提出了一种多尺度时域平均分解方法，并将信号到图像转换和卷积神经网络相结合，进行自适应特征提取和故障诊断。

关键词：船舶；旋转机械；故障诊断；

1. 研究意义

1.1 选题背景

随着工业的快速发展，船舶机械设备正朝着精密化和智能化的方向发展，行业的进步对现代经济和社会发展起到了极大的推动作用，但愈发复杂的结构也使得因机械设备失效而引发的安全问题逐渐增多。船用机械的安全运行将直接影响船舶的安全航行，但由于船用机械的服役环境通常较为恶劣，这就使得其对可靠性有着极高的要求。



图 1 气阀烧蚀



图 2 离心风机叶片断裂

此外，信息技术和基于“大数据”的数据挖掘技术也加快了智能船舶的发展步伐[1,2]，可以预见，未来 10~20 年内智能船舶是决定航运业发展方向的重要因素。在《2030 全球海洋技术趋势》报告中，智能船舶被列为未来 18 项主流的海洋技术之一[3]。基于大数据的德国工业 4.0 战略，通过整合网络、实体和岸海一体化智能信息服务系统，促进了传统造船业的转型和智能船舶的发展[4,5]。在《中国制造 2025》战略文件中，高科技造船被列为十大重点领域之一，其中智能船舶是其重要组成部分[6-7]。随着船舶动力系统与机舱自动化水平的不断提高，机械设备的监测数据规模呈井喷式增长，其数据种类和数据结构也愈加复杂[8-9]。如何在庞大的数据洪流中准确抓取设备的故障信息，已成为船舶动

力系统故障诊断的研究热点[1,10]。ABB，GE 及西门子等公司也基于大量的船舶机械状态监测数据，在船舶动力系统故障诊断方面开展了深入的研究工作。然而，由于船舶设备自身结构和运行机理的复杂性，及其工作环境的多变性，目前故障诊断工作的数据分析、处理与诊断均面临着重重困难。

目前，常用在船用机械故障诊断的信号处理和特征提取方法[11]包括：傅里叶变换、小波变换、经验模态分解、希尔伯特黄变换、变分模态分解等。但是这些信号处理方法在分析信号时有一定的局限性，如傅里叶变换只能在整个时间轴上积分，利用信号的全局特征得到频域信息，不能描述局部时间段的频域特性[12]。傅里叶变换在分析突变或不平稳信号时效果不理想。小波变换[13,14]拥有数学显微镜的美誉，通过缩放和平移等运算将原始信号分解为一系列的小波系数，这样可以获得原始信号各频率子段的频率特征，实现多尺度细化，在时域和频域均有良好的局部化特征。但是利用小波变换分析信号时，需要预先设定基函数和分解层数。经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)[15]是一种自适应信号视频特征分析方法，但当信号含有噪声时，分解出来的固有模态函数存在模态混淆和伪分量等问题。相比于 EMD 算法，变分模态分解(variational mode decomposition，VMD)[16-18]利用了数学中泛函分析变分理论，通过求解变分问题的最优解，得到模态函数和中心频率，具有坚实的理论基础，对采样和噪音具有较强的鲁棒性，可以缓解模态混叠问题。但是 VMD 算法分解信号时需要预先确定分解层数 k，分解层数 k 取值过小时，算法出现欠分解现象，所得到模态函数不能将原始信号的特征完全表示出来；分解层数 k 取值过大时，算法出现过分解现象[19]。综上可以看出，现有的信号出方法具有一定的局限性，导致信号特征提取不准确，且提取故障特征向量的过程较为复杂，需要较强的研究经验，提取的特征向量具有一定的主观性，影响故障诊断效果。基于现代信号处理的分析方法优势、劣势对比如表 1 所示。

表 1 现代信号处理分析方法优势、劣势

分析方法	优势	劣势
时域分析	1.信息全面、完整； 2.具有快速、实时的特点。	1.无法确定故障类型； 2.准确度低。
频域分析	1.高精度； 2.详细的故障信息； 3.有很多方法可以改进。	1.缺少时域信息； 2.受噪声影响严重； 3.存在盲目性的可能。
STFT	1. 满足了研究局部信号的需要； 2.可以获得时变特性。	1.时频分辨率不能自适应调整； 2.频谱泄露问题。
WT	1.自适应较强； 2.适用于强噪声非平稳信号； 3.有很多方法可以改进。	1.窗函数有很多限制； 2.高冗余度； 3.存在频率混叠的问题； 4.严重依赖小波基的选择。
WVD	具有较好的能量集中性； 时频分辨率高； 时频边缘特性好。	存在交叉干扰项； 具有模式混叠问题； 应用范围有很大的局限性。
EMD	自适应较强； 良好的时频聚集能力； 有很多方法可以改进。	存在模式混叠问题； 对噪声敏感； 存在边界效应。

国务院印发的《新一代人工智能发展规划》指出人工智能的发展是重大的战略机遇，将新一代

人工智能引入船用机械故障分析与定位已成为一种趋势。深度学习作为新一代人工智能的代表，已在自然语言处理、数据挖掘、语音和图像识别等领域有了卓越的成果。深度学习可以通过数据驱动自主挖掘原始输入向量的有效信息。人工智能技术从提出到发展经历了三次浪潮[20]。如图 3 所示。船用机械故障类型辨识和故障定位可以看成是分类问题。可以利用深度学习在图像识别中的优势实现船用机械故障诊断。机械振动信号可以反映当前机械系统的运行工况，但振动信号是一维时间序列，不具备图像性质，不适合直接应用深度学习。可以采用合适的信号处理方法，将机械振动信号转成具有图像性质的像素矩阵作为深度学习方法的输入。对于机器学习算法而言，需要足量且类别分布均衡的训练样本才能使算法拥有较好的泛化能力。然而，在实际工程中，船用机械故障诊断的样本数量较少，且不同类型的故障样本数目相差悬殊，存在严重的样本不平衡问题，若直接利用机器学习算法将很容易出现误判，影响故障诊断的效果。可以采用数据扩充的方式扩充样本集合，解决数据量不足问题，例如对一维时域信号进行加噪声、拉伸和平移等操作扩充样本。但是，这些方式对样本的多样性没有产生质的变化，数据扩充的效果一般。

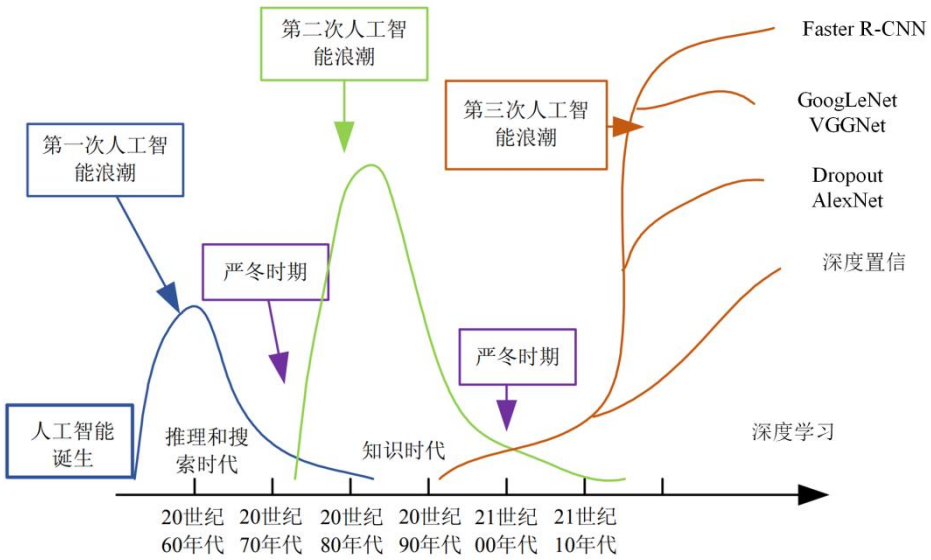


图 3 人工智能三次浪潮

大多数深度学习能够在旋转机械故障诊断中获得较高诊断准确率都是基于一个基本假设：用于模型训练和测试的数据服从相同的数据分布，也就是说采集训练样本的工况与采集测试样本的工况是一致的。然而，在工程实际应用中，旋转机械的原始振动信号经常是在不同的工况下采集的。因为，现实工程应用中的机械设备往往是在复杂多变的非平稳工况下运转的，比如变载荷、变转速和时变转速工况等。因此，这个基本假设在现实情况下很难成立，这种情况可能会引起训练和测试数据集的数据分布相差太大，从而造成大多数深度学习的故障诊断性能大幅下降。这种现象被称为跨域学习问题。为了解决跨域学习问题，域自适应(Domain Adaptation，DA)方法因其强大的跨域学习能力被广泛关注。在域自适应学习中，将训练数据定义为源域数据，将测试数据定义为目标域数据，源域和目标域服从相似但不相同的数据分布。域自适应方法，如子空间对齐(Subspace Alignment，SA)[21,22]，迁移成分分析(Transfer Component Analysis，TCA)[23,24]和联合分布适配(Joint Distribution Adaptation，JDA)[25,26]等已在机械故障诊断中广泛应用。

综上所述，船舶设备的状态监测数据已成为故障预测与诊断的重要资源，而对于具有一定规模数据量且时间连贯性较强的数据集来说，如何采用恰当的智能算法解析运行状态数据，是智能船舶故障诊断的关键技术。通过实施智能故障诊断，可以提取大量监测数据中蕴含的多域故障信息、识别设备故障、监测设备状态并预测运行寿命，从而突破传统故障诊断高度依赖专家和技术人员的瓶颈，解决船舶远航时缺乏专家指导则难以维修的问题[27]，最终为智能船舶和无人船舶技术的发展打下坚实基础。

1.2 研究现状

本文研究重点是基于数据驱动的智能故障诊断方法。所谓“智能”代表所提方法能够自动挖掘故障数据内部关键特征信息，建立特征与不同故障模式之间的映射关系。传统智能故障诊断方法、基于深度学习的智能故障诊断方法和基于迁移学习的智能故障诊断方法是目前基于数据驱动的故障诊断方法的三大研究分支。不同方法的发展流程如图 4 所示。



图 4 智能故障诊断方法的发展流程

1.2.1 传统智能故障诊断方法的研究现状

机械设备的故障信息一般可以通过安装在机械设备上的不同传感器采集，采集到的信息主要包含设备运行的工况信息、实时温度、电流、电压、振动（通常用加速度表征）等，其中加速度形式表征的振动信号是最为常用的故障信息数据集。然而所采集的振动信号往往是非线性、非平稳、非周期的，难以直接发现导致设备故障的关键信息。为了准确地利用采集到的信息进行故障诊断，基于信号处理的特征提取方法成为了最有效的工具。这些特征提取方法可以识别信号的时间和频率分量，从不同角度揭示时变特征，使得表征机械设备是否处于健康状态的节点信息更易暴露。因此，基于信号处理的特征提取方法被广泛地应用到故障诊断领域。基于信号处理的特征提取方法主要包括时域分析、频域分析、时频域分析和非线性参数特征表达方法。

时域分析方法使用与信号时间相关的信息如均值、方差、峰值等表达信号的特征，进一步可以建立特征向量与故障模式的映射关系。如程秀芳等人[28]以轴承的故障信号为识别对象，分别计算了采集到振动信号的峭度、峰值和脉冲因子三个时域指标，然后使用功率谱分析方法得到的时域指标进行了进一步处理，最后对轴承的故障模式准确诊断。

频域分析方法可通过分析信号的频域成分来建立映射关系，其中傅里叶变换是最为经典的频域分析方法。此外，还包括谱分析相关方法，如细化谱、倒频谱和全息谱等。Ali Moshrefzadeh 采用频谱幅值调制来突出具有不同能级的信号的各种分量，提取信号包络谱的脉冲性，从而量化信号的循环平稳性水平，将其输入支持向量机或子空间 k 最近邻，对数据进行分类[29]。崔等人[30]建立了一阶多稳态随机共振系统(CMSR)，将该系统应用于识别电机轴承的故障模式。该系统的参数采用海鸥优化算法(SOA)确定，将带有噪声的轴承故障信号输入到 CMSR，之后对 CMSR 的输出进行傅里叶变换，通过分析傅里叶变换的结果识别相应的故障模式。

时频域分析方法能够同时捕捉到时域和频域内的故障信息，并建立时域和频域信息的关联。常见时频分析方法有希尔伯特黄变换[31-33]、小波变换[34,35]、短时傅里叶变换[36,37]等方法。国内外学者对此开展了广泛研究。苗等人针对旋转机械故障的诊断问题，提出了基于蚱蜢优化算法的参数自适应变分模态分解方法，优化了分解参数对分析结果的影响[38]。Jiang 等[39]使用感应电机电流信号分析和奇异谱分析对行星齿轮箱的太阳轮、行星轮、齿圈和支撑轴承的信号进行了预处理，并采用传统

的机器学习方法确定了其主要的故障类型。李等[40]利用声发射传感器和加速度计获取故障信息，采用深度随机随机森林融合方法提高了齿轮箱故障诊断的性能。张等[41]使用粒子群优化算法分别优化了变分模态分解方法和最大峭度解卷积方法的相关参数，然后结合了经过参数优化的两种方法，对风机轴承的微弱故障进行了诊断。为了能够很好的提取非线性、非平稳信号的特征，黄等[42]提出的经验模态分解(EMD)方法成为了时频分析领域分一项重大突破。但是 EMD 也具有处理某些信号时会产生模态混叠的缺点，这经过 EMD 分解，得到的本征模态函数就变得没有意义，最终影响了所提取特征的可信性。为了抑制模态混叠的发生，提出了集成经验模态分解(EEMD)方法[43],在原始信号中加入了一定幅值的高斯白噪声。

EEMD 也保持了 EMD 的自适应特性，能够自动的将传感器采集到的振动信号分解为一系列的本征模态函数(IMFs)。这些得到的模态函数相比于普通振动信号的时域信息，更能突出故障信号的隐含信息，使得故障诊断变得更容易。近年，EEMD 方法已成为旋转机械故障诊断领域应用的热门方法之一。雷等[44]人研究了 EEMD 方法在故障诊断领域的应用，分别使用重油催化裂化机组和发电机的碰摩故障作为实验案例，验证了 EEMD 方法的可行性。Zhang 等[45]研究了以滚动轴承为诊断对象的相关故障诊断方法，使用 EEMD 对故障数据进行预处理，将所得本征模态函数作为支持向量机(SVM)的输入，最终识别出了不同的故障模式。郁等[46]首先对 EEMD 进行改进，提高了其特征提取能力，并将 EEMD 引入概率神经网络(PNN)中，实现了高精度的故障诊断。姜等[47]为了更加准确的获取旋转机械的早期微弱故障，使用多小波包对 EEMD 方法的分解结果进行了优化，得到了微弱故障增强的特征分量，并利用叶片转子试验数据对该方法进行了验证。

除以上方法，一些用非线性参数来表达特征的方法也逐渐引起关注，如分形维数、近似熵(ApEn)、排列熵(PE)等。Pincus 等[47]提出了 ApEn 的概念，并用其分析生理学的时间序列。Richman 等[48]对 ApEn 进行了改进，提出了样本熵理论。考虑到样本熵的计算结果只能表明一种尺度上时间序列的复杂性，Costa 等[49,50]提出了多尺度熵(MSE)。MSE 突破了样本熵的尺度限制，在多个尺度下呈现时间序列的复杂性。Bandt 等[51]人总结其他熵的优缺点，提出了一种更简单迅速的熵计算方法，也就是 PE。Aziz[52]等人又提出了多尺度排列熵(MPE)，以研究多尺度时间序列中的特征信息，目前 MPE 已被广泛地应用于旋转机械的故障诊断。吴等[53]利用 MPE 从滚动轴承的振动信号中提取故障特征，并通过支持向量机(SVM)识别了滚动轴承的故障模式。李等[54]利用多尺度排列熵方法计算经过局部均值分解的滚动轴承振动信号的多尺度熵值，将得到的熵值组成特征向量集，输入到基于二叉树的支持向量机模式识别模型当中，实现了不同故障模式的自动识别。赵等[55]采用 WPD 方法将振动信号分解为一组子频带信号，然后将每个子频带信号划分为一系列子序列，并计算了相应子频带信号中所有子序列的 MPE 的平均值，使用隐马尔可夫模型识别了滚动轴承的故障模式。Tiwari 等[56]将 MPE 应用于轴承振动信号的特征提取，并通过自适应神经模糊分类器(ANFC)对轴承进行了故障模式识别。

以上信号处理方法能将故障信号中的关键特征凸显出来，但仅仅提取有效特征是远远不够的，还应建立故障模式与故障特征之间的联系，也就是故障模式识别。传统的故障模式分类实际上是使用基于机器学习的诊断模型来建立选定故障特征与机器健康状态之间的关系。基于机器学习的诊断模型通过对特征提取过程中建立的特征向量集进行循环训练，挖掘特征与故障模式之间的潜在关系，进而评估设备健康状态。专家系统[57]、神经网络、SVM[58]以及 KNN[59]、PGM[60]和决策树[61]等是实现这一过程的常用方法，其中反向传播(BP)神经网络应用最为广泛。但 BP 神经网络存在如何合理选择训练的权重和阈值的问题，初始权重和阈值选择的合理与否会严重影响该方法的有效性。此外，在随机干扰下，BP 神经网络的学习和训练速度较慢。特别是，由于 BP 神经网络是一种基于梯度下降的优化方法，局部最优值容易收敛[62]。遗传算法(GA)由于其全局优化特性，可以有效克服 BP 神经网络的局部最优缺陷，解决 BP 神经网络的训练问题[63]。因此，基于 GA 优化的 BP 神经网络(GA-BP)成为一种可行思路。孙等[64]人采用 GA-BP 方法解决了电力变压器的故障诊断问题。Zheng 等[65]应用 GA-BP 算法对电液伺服阀进行故障诊断，结果表明，该方法的结构不仅简单而且可迅速识别故障。

深度学习方法研究现状

近年，计算机硬件功能不断完善，计算能力得到了大幅度提升，促进了深度学习智能故障诊断算法的发展。一些深度学习方法，如深度神经网络、深度置信网络[66,67]、自动编码网络[68]、卷积神经网络[69]和循环神经网络[70]等应时而生。这些方法在计算机视觉[71]、自然语言处理[72]、等领域获得了空前的成功。深度学习能够自动挖掘数据特征，补充了传统机器学习方法在处理原始监测数据方面的不足，极大地提高了识别精度[73,74]。同时，通过深度学习方法可以构建“端到端”的模型，直接从收集到的大量数据中学习所需特征，并识别设备的健康状态，使得故障诊断更加便捷。以深度学习方法为理论核心的、机械设备为服务对象的故障诊断方法也不断涌现。

本文以卷积神经网络为例，进行综述。温等[75]利用分层结构的卷积神经网络(CNN)分别对机械设备的故障位置和故障严重程度开展评测。丁等[76]在数据预处理过程中将一维振动信号转换为小波包能量图像，在方法训练阶段将一系列小波包能量图像组成的训练样本作为深度卷积神经网络的输入，进而训练模型，得到了具有高诊断性能的卷积神经网络故障诊断模型。李等[77]利用粒子群优化(PSO)算法优化 CNN 的关键参数，成功建立了具有关键参数自适应选取能力的故障诊断模型，相关试验验证了该方法的有效性。咎等[78]提出了一种拥有多输入层的 CNN 模型，用于诊断滚动轴承故障，提高了模型的精度和抗干扰能力。宫等[79]使用过渡卷积层和全局池化层代替传统 CNN 中的全连接层，并将改进后的 CNN 与 SVM 相结合用于诊断电机轴承的微小故障。杨等[80]将 CNN 与胶囊网络相结合，改善了 CNN 模型的抗噪性能。郭等[81]对深度卷积神经网络训练过程中的学习率进行调整，使得学习率根据训练阶段的变化自适应分层，该方法能够判别轴承故障类型和故障严重程度。卢等[82]将来自多个传感器的振动信号转换为图像，然后输入到优化后的多分支 CNN(MB-CNN)中，利用风力试验台和离心泵试验台的数据集进行实验，分别获得了 99.47%和 97.32%的预测精度。陈等[83]用循环谱分析方法对故障振动信号进行预处理，将其转换为二维图像并运用到 CNN 的训练当中，使得从原始信号学习代表性特征变得容易。Xu 等[84]将 CNN 与随机森林(gcForest)相结合，开发了一种混合深度学习模型。试验证明，该模型比单独使用 CNN 和 gcForest 两种方法拥有更高的检测精度。

1.2.2 迁移学习方法的研究现状

基于迁移学习的故障诊断方法相比于深度学习方法更适用于域不同情况下的机械设备故障诊断。这里的域不同指的是源域和目标域故障数据，不遵循同分布假设。基于迁移学习的跨域诊断方法通过借鉴相关源域的诊断知识增加模型对目标任务的学习能力。因此，训练数据不足问题可以通过具有足够监督信息的其他数据集相关知识的迁移解决。目前，迁移学习已经广泛应用于情绪分析[85-87]、文本识别[88-90]以及故障分类[91]问题。当前，基于迁移学习的故障诊断方法大致分为三个方向：

（1）基于特征的迁移

基于特征的迁移主要目标是寻找一个合适的映射函数，该函数分别对源域和目标域的原始数据进行特征变换，变换后的源和目标域特征处于一个共同的潜在特征空间，在此空间中，域之间的差异减少，可得到不同域之间的域不变性和任务鉴别性表征，从而能够在新空间内利用由源域数据构建的识别模型进行目标任务的故障诊断。基于特征的迁移学习方法步骤如图 5 所示。

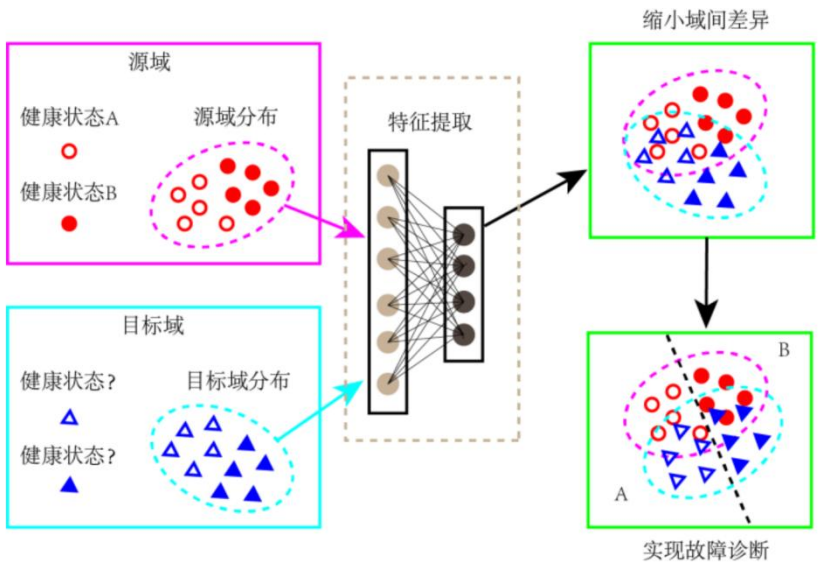


图 5 基于特征的迁移学习方法诊断步骤

（2）基于参数的迁移

该方法侧重在模型层面上共享源域和目标域任务之间的共性知识，意味着可转移的知识可以很好地嵌入到预训练的深度模型中，其结构和参数是通用的，有助于构建目标模型。基于参数的迁移学习方法的目标是找出经过源域预训练的故障诊断模型中可以帮助改善目标域方法的共性信息。将找出的方法应用到目标域的诊断，此时该方法中大部分参数继承于源域模型，对方法进行微调，使得源域模型适用于目标域的诊断任务。基于参数的迁移学习故障诊断过程如图 6 所示[88]。

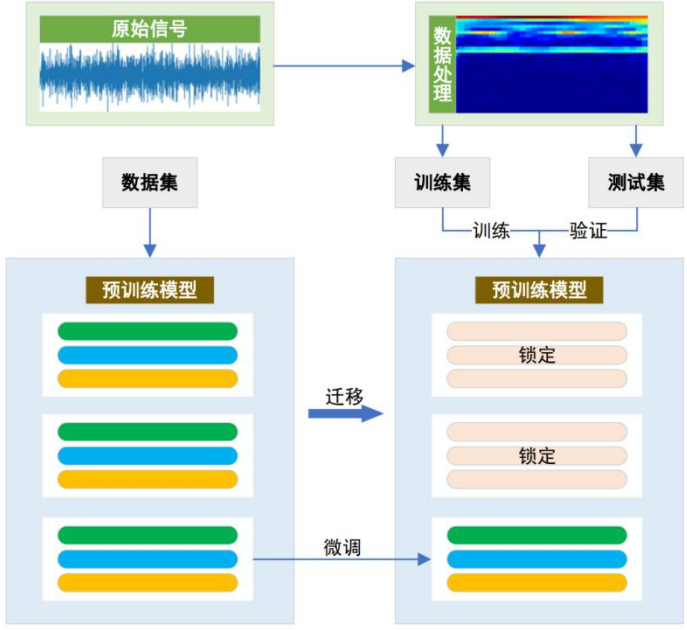


图 6 基于参数的迁移学习方法诊断步骤

（3）基于对抗的迁移方法

该方法的核心思想是同时对抗训练特征提取器和领域判别器，在训练过程中不断增强特征提取网络学习领域不变特征的能力，具体流程如图 7 所示。

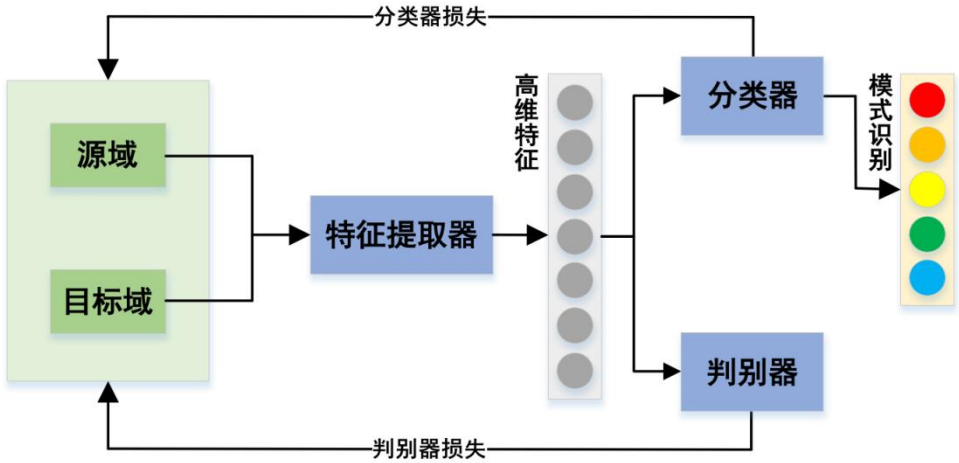


图 7 基于对抗迁移学习故障诊断过程

迁移学习有望将智能故障诊断方法从理论研究扩展到工程应用，但要实现工程应用，依然面临着目标域信息不完备，故障样本不平衡等实际问题。目标域数据集的这种不完备特点使得有效的知识迁移策略更具有挑战，为有效解决这一问题，从数据和方法创新两个角度进行研究，由于数据的扩充需要高的经济成本，因此从多个来源的数据中挖掘共性诊断知识成为解决上述问题的可行思路。

综上所述，三大类故障诊断方法均有其适用场景和局限性，面对不同的故障诊断问题，适用的方法有所差异，表 2 给出了三种不同方法的优劣对比。

表 2 传统故障诊断方法与基于深度学习、迁移学习的故障诊断方法对比[90]

类别	传统故障诊断方法	基于深度学习的故障诊断方法	基于迁移学习的故障诊断方法
特征提取	人工进行参数设计，依赖工程经验和专家知识	自主特征提取	自主特征提取
故障模式分类	基于机器学习方法	通过深度学习模型进行分类	通过迁移学习模型进行分类
诊断准确率	低	高	较高
泛化能力	弱	弱	强

1.3 存在的问题

综上可见，众多学者基于大数据背景开展了大量的旋转机械故障诊断方法研究，取得了丰硕成果，但仍存在一些尚未解决的问题和难点。

（1）基于非线性、非平稳信号的故障诊断方法。通过传感器采集到的旋转机械的故障振动信号往往具有非线性、非平稳和非周期的特点，无法直观地反映机械设备的运行状态。因此，如何更好的提取故障的关键特征有待研究。

（2）基于端到端的智能化故障诊断方法。基于振动信号的故障诊断方法通常需要依据经验选择大量的可调参数来进行特征提取，要求研究或技术人员掌握振动信号的特点，能够根据振动信号的差异对故障诊断方法涉及到的待调参数进行预设，使故障诊断方法能够针对不同来源振动信号提取得到反映设备运行状态的特征信息，进而建立特征信息与故障模式之间的关联关系。这会导致故障诊断系统由于过度依赖人的经验，降低了诊断方法的鲁棒性。

此外，旋转机械部件通常运行于不同环境，传感器采集到的信息也是不同的，适用于一种环境的故障诊断方法可能由于测试环境的变化而失效，一旦测试环境变化就进行故障诊断方法调试显然是不经济的。因此，无人干预的智能化机械故障诊断方法显得尤为重要。目前基于深度学习的端对

端故障诊断模型不断发展，其将特征提取与故障识别两个阶段融为一体。根据故障数据自身特点自适应地更新网络模型参数，逐渐突破了人为因素的限制，实现了智能化的故障诊断。但是，基于深度学习的深度网络模型也面临着模型参数和超参数组合多等系列问题，只有大量的有标签数据才能成功地使网络模型达到收敛状态。因此，需要消耗大量的训练时间，相比于基于振动分析的故障诊断方法，基于深度学习的故障诊断方法的成本大大增加。因此，无人干预的低成本的端对端的故障诊断方法具有重要的工程应用价值。

（3）考虑域不同的故障诊断方法。

虽然已有的基于数据驱动的智能故障诊断方法讨论了测试数据和训练数据同分布场景下的故障诊断问题，然而同分布假设是一种比较理想的状态。实际上，无论是从动力学角度上对旋转机械进行分析，还是依据历史经验对设备故障数据进行振动特性分析，传感器的故障振动信号在特征空间的分布信息均难以预先判断，也难以获取服从同分布假设的训练数据集和待测试数据集。即便能够获取例如设备型号、运行工况、故障程度、振动传递路径等可能影响特征分布形态的关键信息，也需要大量相关的故障模拟试验才能获取足够的用于模型训练的同分布数据，这无疑降低了基于深度学习故障诊断方法的可行性。为了增强模型的普适性，基于迁移学习的跨域故障诊断方法得到了许多关注。结合国内外研究的现状分析，该方法主要有以下待优化问题：

1）同一设备但不同工况的跨域诊断任务。对于同一设备而言，其工作负载通常由于加工任务的不同而发生变化，传感器采集到的故障信号通常源于不同的负载工况，导致虽然所采集的信号代表的故障模式相同，但可能处于不同的特征分布空间。因此，一种负载工况下训练的故障诊断方法仅适用于该工况所对应的分布空间，一旦负载发生变化，其诊断能力也会发生变化。为了使训练好的方法能够在实际工程中产生良好效果，提高已有方法对不同工况的泛化能力具有重要意义。

2）不同设备不同工况的跨域诊断任务。由于机械设备长时间处于正常的运行状态，仅有少部分时间处于故障状态，导致传感器通常能采集到大量的正常状态的运行数据，故障数据由于样本稀少极难采集，这导致了不同故障模式的数据样本数量存在不均衡问题。基于深度学习方法的训练过程所用的来自于不同故障模式的样本数量是相同的，因此只能用具有最少数量故障样本的故障模式确定训练样本总数。有限的训练样本将限制深度网络性能的发挥，导致经过训练的故障诊断方法会产生欠拟合的问题，影响了故障诊断的识别精度。

因此，为了获取更多的训练样本，利用多个源自非同分布故障数据辅助数据集指导训练，不失为提高方法精度的可行方案。但是上述跨域诊断思路会造成更多的源域和目标域间的差异，如设备型号、振动传递路径、环境噪声等。如何消除影响并从不同设备来源的故障数据中提取有指导性的共性信息，实现有效的跨域故障诊断，成为研究的焦点。

1.4 船用机械故障诊断的研究趋势

尽管国内外学者在监测船用机械的局部缺陷故障、评估其状态退化趋势以及量化其健康状态方面取得了诸多的研究成果，但机械故障而导致的航行事故仍时有发生，究其原因，建立可靠的故障诊断与状态监测技术还面临诸多难题和挑战：

1.4.1 单故障到多故障的研究

由于旋转机械的故障产生原因往往不是单一的，而是多种故障因素耦合而产生的结果,机械装备核心部件的磨损、剥落、裂纹等故障往往同时出现或者先后发生，其振动信号也并非多个单故障征兆信号的简单叠加，而是表现为故障特征信号相互耦合，这种多故障的产生给故障诊断带来巨大的困难，盲目地以单一故障对机械装备进行诊断往往会造成错判、漏判。因此，多故障诊断将会是今后故障诊断一大发展方向。

1.4.2 中晚期故障到早期故障的研究

机械故障诊断的意义在于及时掌握设备的性能退化以及故障的动态演化过程，从而对其故障的发展做到防微杜渐，并针对不同的故障状态，采取适当的补救措施。但由于早期故障引起的冲击脉冲能量微弱、通常具有症状不明显、特征信息微弱等特点，极易淹没在复杂的振动信号中，不易辨

识，如不能及时辨识故障征兆，随着服役时间的延长，轻微故障极易发展为严重故障，危害航行安全。因此，从中晚期故障诊断研究转向早期故障诊断研究有必要针对机械早期故障冲击特征微弱的特点，建立提取和增强轴承振动信号的冲击特征的有效方法，为早期故障识别与服役性能评估奠定基础。

1.4.3 人工智能在故障诊断中的应用

自从 Hinton 在 2006 年提出包含多隐含层的深度置信网络开始，深度学习模型以其优越的非线性特征提取和自学习能力，迅速成为故障诊断研究领域的焦点。如今，伴随计算机技术的日新月异，深度学习模型发展非常迅速，各种网络及模块不断涌现。深度学习模型在故障诊断领域展现出了巨大的潜力，然而针对船用机械关键部件的故障诊断应用中仍有很大的研究空间。

2. 研究内容

考虑到船舶故障诊断技术还存在诸多问题，本文以船舶发电柴油机、船用离心风机为研究对象，对其中的一些问题进行深入的分析与研究。拟采用振动信号对船舶发电柴油机及离心风机进行故障诊断，相比于其他方法，振动传感器具有安装简单、成本低廉，对早期故障诊断效果好，诊断效率高等优势，适合多类型及变工况条件下的信号采集。针对研究难点和现有方法的不足，将深度学习算法（例如：卷积神经网络、迁移学习等）、信号处理方法（例如：小波变换、变分模态分解等）和数据可视化(T-SNE)等技术引入到船舶发电柴油机故障诊断中，旨在提高船舶发电柴油机故障诊断的准确率和精确度，以为船用机械故障诊断技术推广提供一些有价值的参考。具体研究思路如下：

（1） 在打牢算法理论知识基础，在老师的指导下，搭建实验平台，合理设置故障点，采集不同故障模式的振动信号。

（2） 将现代信号处理技术与人工智能相结合，将 1D 信号转化为 2D 灰度图像，将故障分析角度从一维时间域上升到二维空间域，增强了原始信号的不可见信息。

（3） 引入生成对抗网络，以图像扩充角度扩充故障样本，解决小样本/数据不平衡问题。

（4） 在网络模型框架中，改进损失函数/模型架构/归一化层，对不同域的数据、特征进行分布适配，减少不同域的差异。

（5） 将二维图像输入到改进模型中。自主挖掘图像特征，配合模式识别算法，实现船舶旋转机械故障类型辨识。

故障诊断流程图如图 8 所示，所设想的模型架构如图 9 所示。

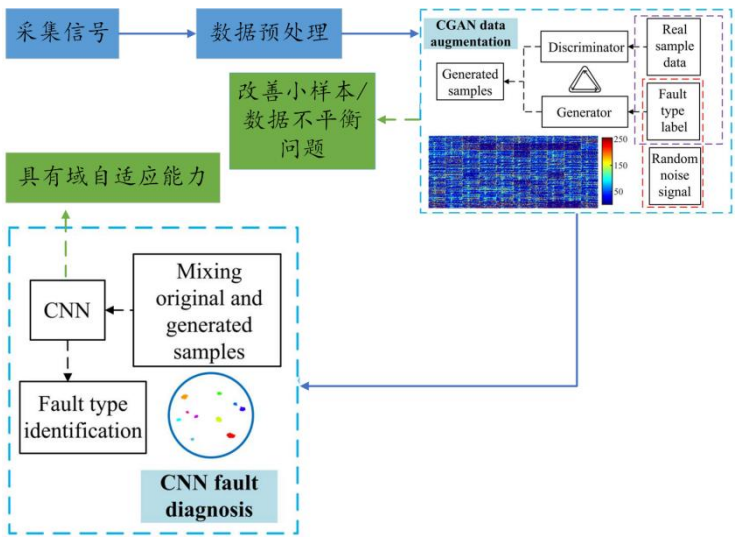
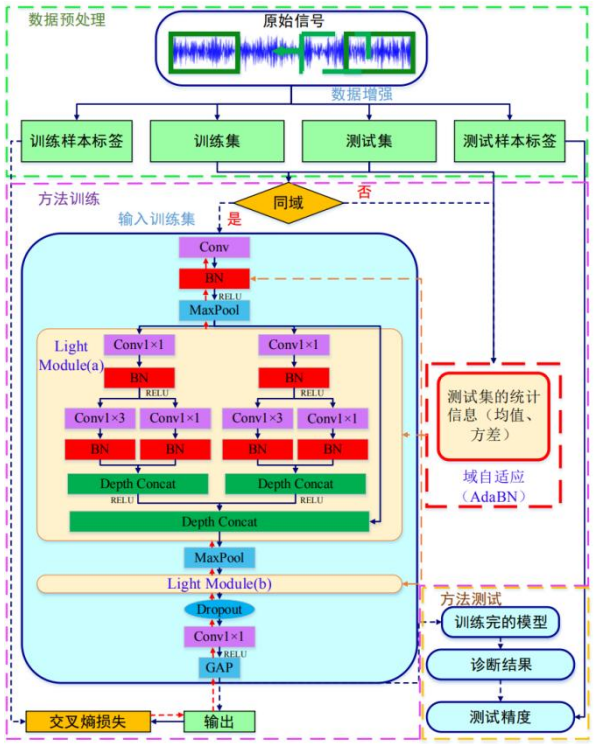
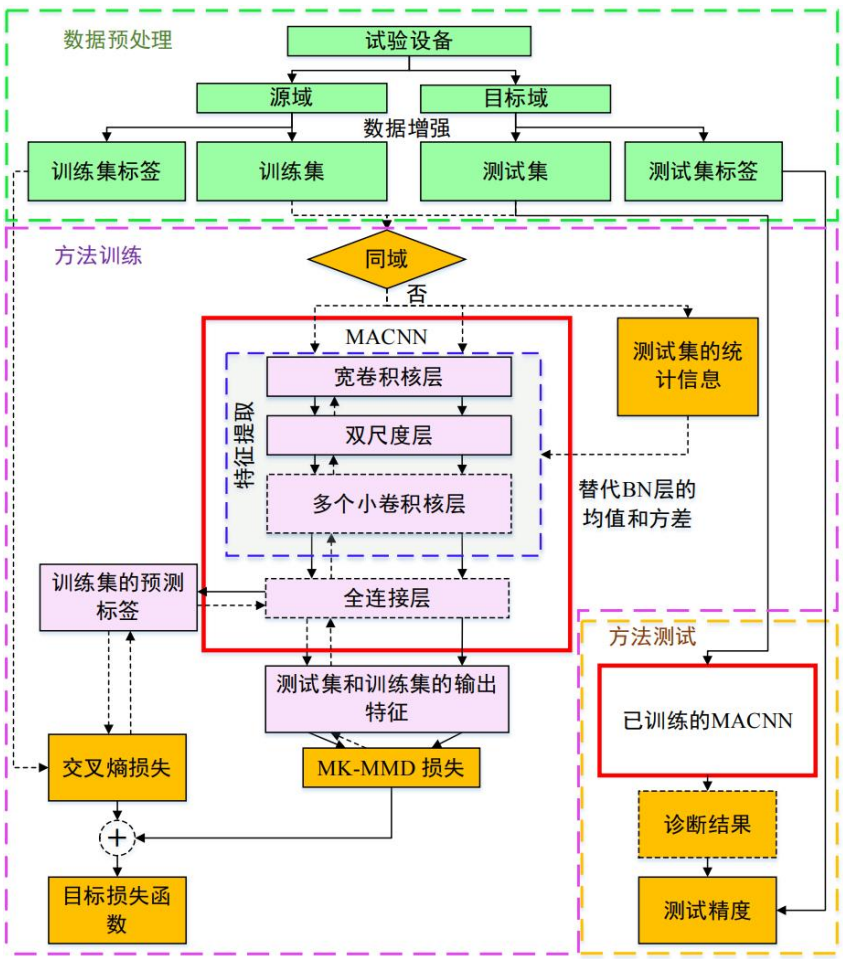


图 8 故障诊断流程图



(a)



(b)

图 9 设想的模型架构

预期研究结果

（1）结合现代信号处理方法，提出一种融合时频分析方法，其能够提高振动信号分析时的时频矩阵精度。

（2）改进网络模型的结构，在模型中添加自适应层，使其具有域自适应能力，对不同域的数据、特征进行分布适配，减少不同域的差异，以提高模型的泛化能力。

（3）所提故障诊断方案能够解决小部分的工程实际应用问题。

参考文献

[8] DUHANEY J A. Mining and fusing data for ocean turbine condition monitoring[D]. Boca Raton, FL: Florida Atlantic University, 2012.

[9] GAO M, SHI G Y, LI S. Online prediction of ship behavior with automatic identification system sensor data using bidirectional long short-term memory recurrent neural network[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4211.

[10] SHENOI R A, BOWKER J A, DZIELENDZIAK A S, et al. Global marine technology trends 2030[R]. Southampton: University of Southampton, 2015.

[11] ZHOU K L, LIU T G, ZHOU L F. Industry 4.0: towards future industrial opportunities and challenges[C]//Proceedings of 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Zhangjiajie China: IEEE, 2015: 2147−2152.

[12] RÜßMANN M, LORENZ M, GERBERT P, et al. Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries[EB/OL]. http://www.inovasyon.org/pdf/bcg.perspectives_ Industry.4.0_2015.pdf.

[13] 中华人民共和国国务院. 中国制造 2025[EB/OL]. https://baike.so.com/doc/6420484-6634156.html.

[14] 吴强. 加快转型升级，推动船舶工业在“中国制造 2025”中率先实现突破[N]. 中国船舶报, 2015-12-16(2).

[15] 唐盖盖, 傅祥棣, 陈宁. 基于 B/S 和 C/S 架构的船舶动 力装置远程故障诊断系统 [J]. 船舶工程, 2018, 40(8): 66–71.

[16] LAMARIS V T, HOUNTALAS D T. Possibility to determine diesel engine condition and tuning from the application of a diagnostic technique at a single operating point[J]. SAE International Journal of Engines, 2009, 2(1): 585–605.

[17] WANG L H, ZHAO X P, WU J X, et al. Motor fault diagnosis based on short-time Fourier transform and convolutional neural network[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(6): 1357–1368.

[18] 曾晓丹．基于深度学习的配电网单相接地故障选线方法研究[D]．福州福州大学，2018.

[19] 潘超,陈祥,蔡国伟等.基于小波包尺度-能量占比的变压器三相不平衡绕组振动特征辨识[J].仪器仪表学报,2020,41(04):129-137.DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2005982.

[20] Zhang S ,Wang J ,Liu H , et al. Prediction of energy photovoltaic power generation based on artificial intelligence algorithm[J]. Neural Computing and Applications,2020,33(3).

[21] 陈泽昊,许永鹏,李喆等.基于小波包分解的直流电缆泄漏电流分析研究[J].仪器仪表学报,2018,39(09):163-170.DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J1802920.

[22] Xuerong Y ,Yifan H ,Junxian S , et al. An Adaptive Optimized TVF-EMD Based on a Sparsity-Impact Measure Index for Bearing Incipient Fault Diagnosis[J]. IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT,2021,70.

[23] Guo Y, Zhang Z. Generalized variational mode decomposition: a multiscale and fixed-frequency decomposition algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2021，70: 1-13.

[24] Dragomiretskiy K ,Zosso D . Variational Mode Decomposition.[J]. IEEE Trans. Signal

Processing,2014,62(3).
[25] Rehman U N ,Aftab H . Multivariate Variational Mode Decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2019,67(23).
[26] 王志坚,常雪,王俊元等.排列熵优化改进变模态分解算法诊断齿轮箱故障[J].农业工程学报,2018,34(23):59-66.
[27] 和敬涵,罗国敏,程梦晓等.新一代人工智能在电力系统故障分析及定位中的研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5506-5516.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.200032.
[28] Fernando B, Habrard A, Sebban M, et al. Unsupervised visual domain adaptation using subspace alignment[C]. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2013: 2960-2967.
[29] Zhu J, Gao F. Similar batch process monitoring with orthogonal subspace alignment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65: 8173-8183.
[30] Zhen J. Detection of array signal number with multiple sensors based on transfer component analysis[J]. IEEE Access, 2019, 7: 128676-128683.
[31] Liu Y, Zhang Y, Coleman S, et al. Joint transfer component analysis and metric learning for person re-identification[J]. Electronics Letters, 2018, 54: 821-823.
[32] Long M, Wang J, Ding G, et al. Transfer feature learning with joint distribution adaptation[C]. 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, 2013: 2200-2207.
[33] Luo H, Wang C, Wen Y, et al. 3-D object classification in heterogeneous point clouds via bag-of-words and joint distribution adaption[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(12): 1909-1913.
[34] 蔡冬林. 基于 ACCESS 数据库的船舶动力装置故障诊断专家系统 [D]. 上海: 上海海事大学, 2004.
[35] 程秀芳, 王鹏. 基于时域和频域分析的滚动轴承故障诊断[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2020, 42(01): 58-64.
[36] Moshrefzadeh A. Condition monitoring and intelligent diagnosis of rolling element bearings under constant/variable load and speed conditions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149: 107153.
[37] Cui H, Guan Y, Chen H, et al. A novel advancing signal processing method based on coupled multi-stable stochastic resonance for fault detection[J]. Applied Sciences, 2021, 11(12): 5385.
[38] Soualhi A, Medjaher K, Zerhouni N. Bearing health monitoring based on Hilbert–Huang transform, support vector machine, and regression[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(1): 52-62.
[39] Wang X M, Ren Z. A sensor fault diagnosis method research based on wavelet transform and Hilbert-Huang transform[C]. 2013 Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2013, 81-84.
[40] Su Z Y, Zhang Y M, Jia M P, et al. Gear fault identification and classification of singular value decomposition based on Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2011, 25(2): 267-272.
[41] Zhao M H, Kang M S, Tang B P, et al. Multiple wavelet coefficients fusion in deep residual networks for fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4696-4706.
[42] Peng Z K, Chu F L. Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2014, 18(2): 199-221.
[43] Zhao M H, Kang M S, Tang B P, et al. Multiple wavelet coefficients fusion in deep residual networks

for fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4696-4706.
[44] Peng Z K, Chu F L. Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2014, 18(2): 199-221.
[45] Zhang X, Miao Q, Zhang H, et al. A parameter-adaptive VMD method based on grasshopper optimization algorithm to analyze vibration signals from rotating machinery[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018, 108: 58-72.
[46] Jiang Z, Han Q, Xu X. Fault diagnosis of planetary gearbox based on motor current signal analysis[J]. Shock & Vibration, 2020, 1-13.
[47] 张俊, 张建群, 钟敏, 等. 基于 PSO-VMD-MCKD 方法的风机轴承微弱故障诊断[J]. 振动测试与诊断, 2020, 40(02): 287-296.
[48] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971):903-995.
[49] Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
[50] S. Shevchik, F. Saeidi, B. Meylan, and K. Wasmer, “Prediction of failure in lubricated surfaces using acoustic time-frequency features and random forest algorithm,” IEEE Trans. Ind. Inform., vol. 13, no. 4, pp. 1541–1553,Aug. 2017.
[51] Lei Y G, He Z J, Zi Y Y. Application of the EEMD method to rotor fault diagnosis of rotating machinery[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2009, 23(4): 1327-1338.
[52] Zhang X Y, Zhou J Z. Multi-fault diagnosis for rolling element bearings based on ensemble empirical mode decomposition and optimized support vector machines[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2013, 41(1-2): 127-140.
[53] Yu Y L, Li W, Sheng D R, et al. A novel sensor fault diagnosis method based on modified ensemble empirical mode decomposition and probabilistic neural network[J]. Measurement, 2015, 68: 328-336.
[54] Pincus S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1991, 88(6): 2297-2301.
[55] Richman J S, Moorman J R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy[J]. American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, 2000, 278(6): 2039-2049.
[56] Costa M, Goldberger A L, Peng C K. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series[J]. Physics Review Letters, 2002, 89(6): 068102.
[57] Costa M, Goldberger A L, Peng C K. Multiscale entropy analysis of biological signals[J]. Physics Review Letter.E, 2005, 71(2): 021906.
[58] Bandt C, Pompe B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series[J]. Physical review letters, 2002, 88(17): 174102.
[59] Aziz W, Arif M. Multiscale permutation entropy of physiological [C].Proceedings of the 9th International Multitopic Conference, Karachi, 2005.
[60] Wu S, Wu P H, Wu C W. Bearing fault diagnosis based on multiscale permutation entropy and support vector machine[J]. Entropy, 2012, 14(8):1343-1356.
[61] Li Y, Xu M, Wei Y, et al. A new rolling bearing fault diagnosis method based on multiscale permutation entropy and improved support vector machine based binary tree[J]. Measurement, 2016, 77: 80-94.

[62] Zhao L Y, Wang L, Yan R Q. Rolling bearing fault diagnosis based on wavelet packet decomposition and multi-scale permutation entropy[J]. Entropy, 2015, 17(9): 6447-6461.
[63] Tiwari R, Gupta V K, Kankar P K. Bearing fault diagnosis based on multi-scale permutation entropy and adaptive neuro fuzzy classifier[J]. Journal of Vibration and Control, 2015, 21(3): 461-467.
[64] Wei W, Tao Z. Research and implementation of fault diagnosis of seed source assembly device based on expert system[C]. 2018 IEEE 4th International Conference on Control Science and Systems Engineering, 2018.
[65] Yin Z, Hou J. Recent advances on SVM based fault diagnosis and process monitoring in complicated industrial processes[J]. Neurocomputing, 2016, 174: 643-650.
[66] Ji S Y, Xu X M, Wen C L. A kind of K-Nearest neighbor fault diagnosis method based on MIV data transformation[C]. 2017 Chinese Automation Congress, 2017, 6306-6310.
[67] Arauz J, McClure J W. PGM Structures in self-organized healing for small cell networks[C]. 2013 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking, 2013, 7-12.
[68] Sun H Q, Sun L H, Liang Y C, et al. The module fault diagnosis of power transformer based on GA-BP algorithm[C]. Machine Learning and Cybernetics, 2005.
[69] Zheng F L, Zeng L C, Lu Y D, et al. Fault diagnosis research for servo valve based on GA-BP neural network[J]. Journal of Computational & Theoretical Nanoscience, 2015, 12(9): 2846-2850.
[70] Hinton G E, Salakhutdinov R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 2006, 313(5786): 504-507.
[71] Bengio Y, Lamblin P, Popovici D, et al. Greedy layer-wise training of deep networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2007, 19: 153.
[72] Poultney C, Chopra S, Cun Y L. Efficient learning of sparse representations with an energy-based model[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2006: 1137-1144.
[73] Sermanet P, Chintala S, LeCun Y. Convolutional neural networks applied to house numbers digit classification[C]. 2012 21st International Conference on Pattern Congnition, 2012: 1204.3968.
[74] Funahashi K, Nakamura Y. Approximation of dynamical systems by continuous time recurrent neural networks[J]. Neural Networks, 2008, 6(6): 801-806.
[75] Voulodimos A, Doulamis N, Doulamis A, et al. Deep learning for computer vision: a brief review[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2018: 1–13.
[76] Young T, Hazarika D, Poria S, et al. Recent trends in deep learning based natural language processing[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2018, 13(3): 55–75.
[77] Perez H F, Tabik F, Lamas A, et al. Object detection binary classifiers methodology based on deep learning to identify small objects handled similarly: application in video surveillance[J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 194: 105590.
[78] Zhang C S, Bi J J, Xu S X, et al. Multi-imbalance: an open-source software for multi-class imbalance learning[J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 174: 137–143.
[79] Wen L, Li X Y, Gao L. A new two-level hierarchical diagnosis network based on convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2020, 69(2): 330-338.
[80] 李涛, 段礼祥, 张东宁, 等. 自适应卷积神经网络在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2020, 39(16): 275-282.
[81] 咎涛, 王辉, 刘智豪, 等. 基于多输入层卷积神经网络的滚动轴承故障诊断模型[J]. 振动与冲击, 2020, 39(12): 142-149.
[82] 宫文峰, 陈辉, 张美玲, 等. 基于深度学习的电机轴承微小故障智能诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(01): 195-205.

[83] 杨平, 苏燕辰, 张振. 基于卷积胶囊网络的滚动轴承故障诊断研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(04): 55-62.
[84] Guo X J, Chen L, Shen C Q. Hierarchical adaptive deep convolution neural network and its application to bearing fault diagnosis[J]. Measurement, 2016, 93: 490-502.
[85] Lu W, Liang B, Cheng Y, et al. Deep model based domain adaptation for fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(3): 2296-2305.
[86] Chen Z Y, Mauricio A, Li W H, et al. A deep learning method for bearing fault diagnosis based on Cyclic Spectral Coherence and Convolutional Neural Networks[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 140: 106683.
[87] Xu Y, Li Z X, Wang S Q, et al. A hybrid deep-learning model for fault diagnosis of rolling bearings[J]. Measurement, 2021, 169: 0263-2241.
[88] Wang Q, Clegg J, Mattos H G, et al. The role of emotions in intercultural business communication: language standardization in the context of international knowledge transfer[J]. Journal of World Business, 2018, 27: 100–110.
[89] Moravčík E, Basterrech S. Image-based facial emotion recognition using convolutional neural networks and transfer learning[J]. Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, 330: 3-14.
[90] Valentina F, Giulio B, Damiano P, et al. Enhancing mouth-based emotion recognition using transfer learning[J]. Sensors, 2020, 20(18): E5222.
[91] Raffel C, Shazeer N M, Roberts A, et al. Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer[J]. Journal of Machine Learning Research, 2020, 21: 1-67.
[92] Yang L, Zhang J P. Automatic transfer learning for short text mining[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2017, 2017(1): 1.
[93] Nguyen H T, Duong P H, Cambria E. Learning short-text semantic similarity with word embeddings and external knowledge sources[J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 182: 70–81.
[94] Qian W W, Li S M, Yi P X, et al. A novel transfer learning method for robust fault diagnosis of rotating machines under variable working conditions[J]. Measurement, 2019, 138: 514–525.
[95] 刘秀丽, 徐小力. 基于特征金字塔卷积循环神经网络的故障诊断方法[J]. 上海交通大学学 报, 2022, 56(2): 1006-2467.
[96] 金桐彤. 考虑域影响的旋转机械故障诊断方法研究[D]. 吉林大学,2023.DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2022.007800.
[97] 郭威. 配电线路故障类型辨识及故障选线定位方法的研究[D]. 华北电力大学(北京),2023.DOI:10.27140/d.cnki.ghbbu.2022.000031.
[98] Hou SZ, Guo W, Wang ZQ, et al., 2022. Deep-learning-based fault type identification using modified CEEMDAN and image augmentation in distribution power grid. IEEE Sensors Journal, 22(2):1583-1596. Doi:10.1109/JSEN.2021.3133352.

作者简介：

崔德馨，无限航区轮机长/硕士研究生；研究方向为船舶动力装置振动分析、新能源、故障诊断,邮箱：cuidx@nbosco.com,手机号码：13371122520

急流场中甲板船稳泊研究及桥梁施工中的应用

方念坚

台州港引航站，浙江 台州，318000

摘　要：在复杂的急流场环境中，甲板运输船稳泊技术对于桥梁单孔主跨超过 200m 的超长节段钢箱梁安全吊装施工和提高施工效率至关重要。本文以余温公路灵江特大桥施工为例，旨在探讨急流场中通过对甲板船进行横向受力分析，锚泊定位和拖轮推力综合计算，确定载有超长节段钢箱梁甲板船横向定位吊装施工方案，望能给予同类型桥梁施工提供借鉴和参考。

关键词：急流场 稳泊技术 横向定位 钢箱梁吊装

余温公路灵江特大桥主桥桥跨布置为（120+260+120）m=500m，采用三孔一联钢混组合连续刚构桥，见图 1。根据通航净空和两端连接线要求，主桥设对称纵坡 3.5%，竖曲线半径 7000m。在主跨跨中设置 90m 长钢箱梁，钢箱梁按整孔吊装施工，制造分 6 个梁段，分别为钢混结合段（4 个长 6m 钢混结合段，结合面往混凝土箱梁侧长 2.0m，往钢箱梁侧长为 4.0m）和钢箱梁整体吊装段（2 个）；其余部分采用混凝土结构，采用变高梁。本次研究技术重点是 82m 超长钢箱梁甲板船急流场中横向定位稳泊技术及吊装施工方案，见图 2 和图 3。

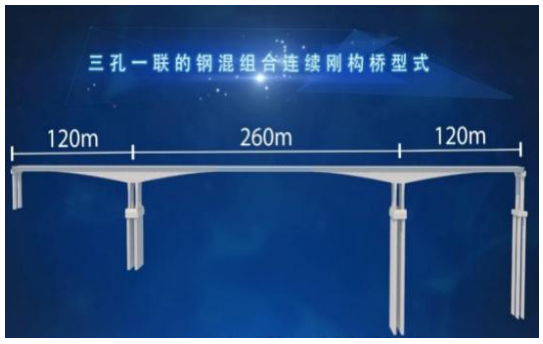


图 1 主桥布置



图 2 船舶横向定位吊装实景

1. 急流场

椒（灵）江水系：椒（灵）江水系是浙江省第三大水系河流，自源头至入海口全长 202km，流域面积 6590.71km^2，上游段称永安溪（长 138.5km）为山溪河流，河势弯曲、坡陡流急；中游段称灵江（长 44.7km）为感潮河流，河势弯曲、河宽变化大，桥址位置见图 4；下游段称椒江（长 18.8km）

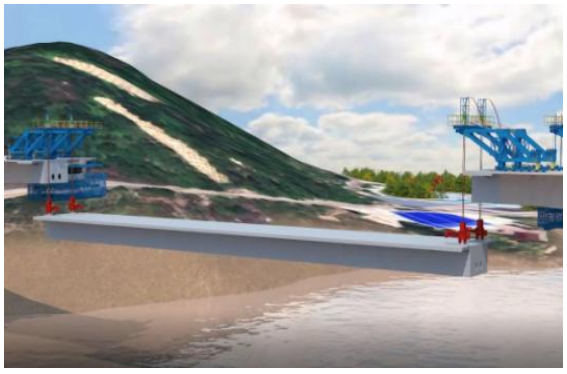


图 3 超长钢箱梁吊装模拟



图 4 急流场桥址位置

为感潮河流，河势顺直、宽浅。椒江河口属强潮河口，潮型为不规则半日潮。实测资料表明，当洪峰流量达 2500m^3/s 时，潮流界下移距口门仅 20km 处；当洪峰流量达 7500m^3/s 时， 海门港区没有

涨潮流；若遇特大洪水，淡水舌可冲抵口外 25km 之多，至头门岛、一江山岛附近。灵江为感潮河流，潮流动力较强，平时由潮流控制，每天二次涨落，平均潮差 4m 左右。新建桥址上游约 400m 处为弯道，流态复杂，流速较急 （涨潮最大流速 1.72m/s，平均流速 1.17m/s；落潮最大流速 1.54m/s，落潮平均流速 0.78m/s），台汛期下泄洪水影响大。

2. 船舶资料

（1）甲板船主要船舶参数：

总吨位 1964，净吨位 1099，载货量 3041t，总长 98.0m，型宽 17.5m，压载艉吃水 2.5m，艏吃水 2.5m，设计航速 10.0kn，龙骨以上最大高度 20.3 m，装载后吃水 2.5m，水线以上最大高度 17.8m，卸空后空载吃水 2.3m，水线以上最大高度为 18.0m ，见图 5 和 6。



图 5 甲板船

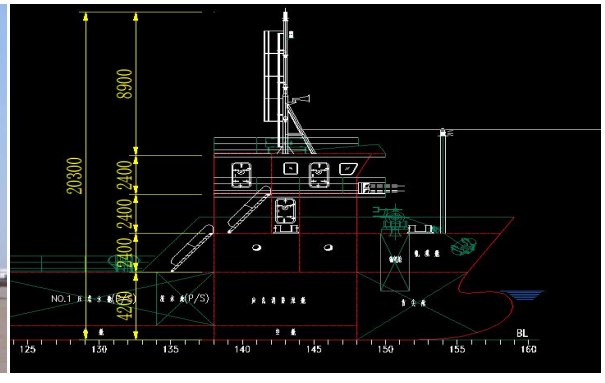


图 6 甲板船侧面尺寸

（2）拖轮主要船舶参数：

拖 1：总长 37.7.0m ，型宽 10.0 m,类型 Z ，功率 4800HP,吃水 3.7m

拖 2：总长 40.0m ， 型宽 9.6 m,类型 FPP，功率 2025HP,吃水 3.0m

3. 超长节段钢箱梁甲板船横向定位稳泊技术分析

3.1 确定超长节段钢箱梁吊装施工方案

超长节段钢箱梁吊装时运输船需要在桥位线中心横向定位，将占据整个双向通航水域，航道将进行临时双向封航。一个需要核算定位甲板船受力分析，另一个需采取安全保障措施，包括申请海事部门封航、警戒船上下游警戒和显示锚标警示标志等。在急流影响下，施工船容易发生偏荡现象，若锚抓力不足可能导致走锚失控、碰撞跨墩提梁机等风险，甚至影响吊装中的钢构件掉落造成二次风险。施工时要高度重视急流对甲板船横向定位吊装施工不利影响，通过技术分析和精准计算合理布置锚缆和足够功率拖轮，确定有足够系缆力、锚抓力和顶推力的吊装施工方案。超大节段钢箱梁吊装作业时为防范甲板船偏荡及走锚影响吊装施工，配备拖轮协助横向稳泊定位，以保障吊装施工安全是必要的。吊装施工方案要根据潮汐和现场情况确定锚、缆和拖轮布置方案。

甲板船需要用锚和拖轮来横向定位，根据潮汐和现场情况，小潮落潮时段进行吊装施工更为稳妥，初步吊装施工稳泊布置方案为：艏部 1 只斯贝克锚（2t），艏部设 1 只 AC-14 大抓力锚（2.75t），考虑到甲板船定位时需要左右前后微调和保证最大受力效果，出绳方向与水流方向夹角约为 14°；艉部设 1 只 AC-14 大抓力锚（3.5t），同样原因，出绳方向与水流方向夹角约为 10°，艉部设 1 根 Φ34mm 钢丝绳，系固于岸基带缆桩处，考虑到定位时需要左右前后微调，出绳方向与水流方向夹角约为 65°。拖轮则在甲板船下游侧顶推协助稳泊。初步稳泊布置方案经过计算确定其合理性和可行性，布置方案见图 7。

3.2 横向船舶受力分析锚泊定位计算及确定锚泊设备选型

3.2.1 计算说明

船舶在锚泊时受到风力、水流及波浪等环境力的作用，这些力按其不同的作用方向组合构成作用于船舶的外力，由锚泊系统承受。根据本次船舶运输的目的，船舶必须设置定位锚泊设备，使锚

泊设备在作业时能控制船位，或在有限范围内改变船位。以船舶本身为中心，向四周抛出四只锚及相应锚索系住船舶，合理的多点锚泊布置方式是降低锚索负荷和保持水平偏移较小的重要因素。

3.2.2 新建桥址航道通航水深安全分析

根据《海港总体设计规范》（JTS165-2013）[1]确定运输船所需通航水深，航道通航水深可按下列公式计算： $D_0=T+Z_0+Z_1+Z_2+Z_3$ 式中：D_0—航道通航水深（m），D_0= T+0.7m，运输船和拖轮的最大吃水为 3.7m，则所需最少海图水深为 4.4m。桥梁所在基准面位于 85 国家高程下 1.316m，吊装施工桥位处泥面高程-5.78～-12.42m，海图水深均低于-4.4m，满足运输船和拖轮全天候作业水深要求。

3.2.3 计算及选型

根据项目位置特点，本计算书计算船舶单向迎流状态（即船舶侧向迎流），下面将分别按上述船型计算锚泊受力及锚泊设备选型：

（1）甲板船受力计算 [2]

侧向受力：$F_y=F_{wy}+F_{cy}+F_{mdy}$

F_{wy}风力采用下式计算， $F_{wy}=0.613\Sigma\ (C_sC_hA_i)\ Vw^2$

式中： C_s-形状系数，实取 C_s=1（主船体）； C_s=1.1（甲板室群）； C_s=1.1（大节段）； C_h-高度系数，实取 C_h=1； A_i-受风构件正投影面积，实取 A_i=115 m^2 （主船体）；A_i=44 m^2（甲板室群）； A_i=344 m^2 （大节段）； V_w-有效风速，计算按 6 级风最大风速取。 $V_w=0.6V_{10}+0.4Vt=0.6\times12.4+0.4\times1.2\times12.4=13.39$ m/s ，V_{10}-10 min 平均风速，取 V_{10}=12.4 m/s ，V_1- 1 min 平均风速，取 $V_1=1.2\ V_{10}$=14.88 m/s ，则 $F_{wy}=0.613\times（1\times1\times115+1.1\times1\times44+1.1\times1\times344）\times13.39^2$ =**59.55 kN。**

F_{cy}水流力采用下式计算， $F_{cy}=72.37SVc^2$

式中： S-船体湿表面积， $S=Ld(1.36+1.13C_B B/T)=95.55\times3.00\times(1.36+1.13\times0.87\times17.50/3.00)=2034m^2$

V_C-水流速度，$V_C=V_w+V_T$ ，V_w-风生水流速度，$V_w=0.01\ V_{10}$=0.124 m/s ， V_T-潮生水流速度，取 V_w=1.77 m/s （根据当地水文资料取最大值） ，V_C=0.124+1.77=1.894 m/s ，则 $F_{cy}=72.37\times2034\times1.894^2$ =**528.04 kN。**

F_{mdy}波浪力采用下式计算， $Fmdy=0.13C_{mdh}B^2\ LH_S^2$

式中：C_{mdh}-平均波浪漂移系数，C_{mdh}=0.68（查表得） B-船宽=17.50 m； L 水线间长=95.55 m； H_S-有义波高=2 m； d-吃水=3m，则 $F_{mdy}=0.13\times0.68\times17.50^2\times95.50\times2^2$ =**10.34kN。**

综上所述， 侧向受力 $F_y=（59.55+528.04+10.34）\times10^3$ = **598 kN。**

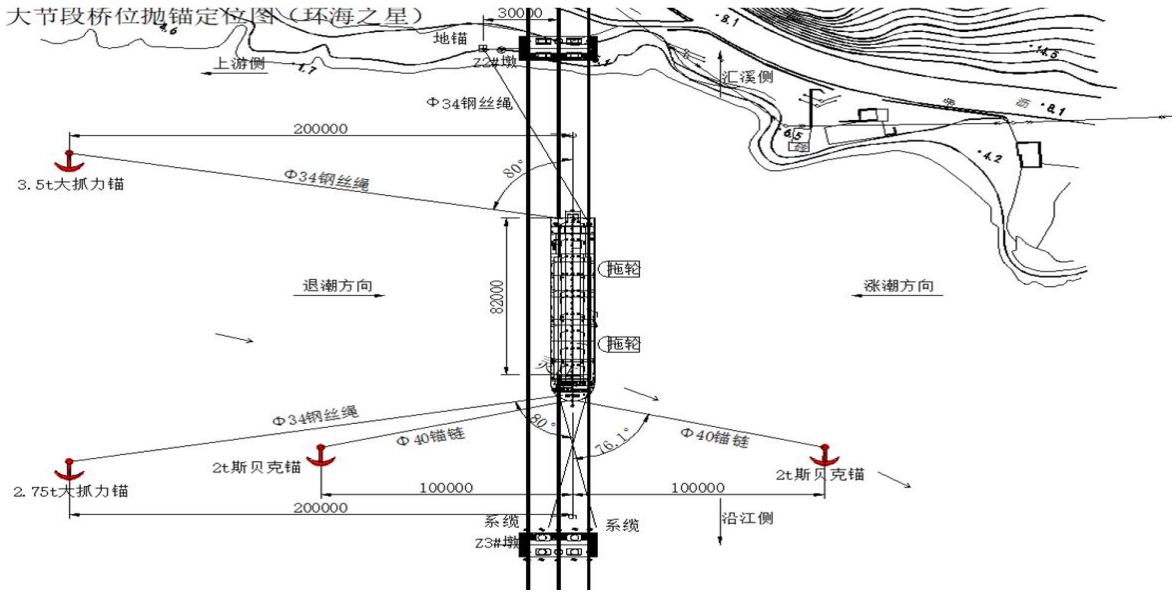


图 7 甲板船稳泊定位示意

（2）实船定位能力

本船定位时设计为辐射状抛锚，艏、艉分别采用锚泊及系泊相结合的方式，锚泊示意如下，本船仅在退潮时作业，计算仅考虑退潮时：实船定位示意图，见图 7。

① 上游：艏部 1 只斯贝克锚（2t），配Φ40mm 锚链，出绳方向与水流方向夹角约为 14°，锚链破断拉力大于 896 kN；部设 1 只 AC-14 大抓力锚（2.75t），艉部设 1 只 AC-14 大抓力锚（3.5t），每只锚配Φ34mm 钢丝绳，破断拉力大于 625kN；出绳方向与水流方向夹角约为 10°。艉部设 1 根Φ34mm 钢丝绳，系固于岸基带缆桩处，钢丝绳破断拉力大于 625kN，Φ450 带缆桩安全工作负荷 SWL=382kN，计算考虑安全余量，取带缆桩安全工作负荷 382kN，出绳方向与水流方向夹角约为 65°。

② 下游：艏部设 1 只斯贝克锚（2t），配Φ40mm 锚链，锚链破断拉力大于 896kN（退潮不计下游）。

③ 根据船舶设计手册，锚抓力计算公式如下： AC-14 锚抓力=2.75×8=22 t（AC-14 锚抓力系数取 8），AC-14 锚抓力=3.5×8=28 t（AC-14 锚抓力系数取 8） F 斯贝克锚锚抓力=2.00×5=10.00 t（斯贝克锚抓力系数取 5）， 带缆桩的安全工作负荷为 382kN，钢丝绳侧向拉力 382kN， 出绳方向与水流方向夹角约为 65°。上游：（2 只 AC-14 锚，1 只斯贝克锚，1 根系固索），即 $F_{(AC-14锚1)}$ =22×9.81×cos10° =213 kN，$F_{(AC-14锚2)}$=28×9.81×cos10° =271 kN ，$F_{(斯贝克锚)}$=10.00×9.81×cos14° =95 kN， $F_{缆}$=382×cos65° =161.2kN。

上游：$F_{总绳}=F_{(AC-14锚1)}+F_{(AC-14锚2)}+F_{(斯贝克锚)}+F_{缆}$=**740.2** kN；

（3）拖轮推力计算[3]

两条拖轮在逆水侧顶推辅助定位。 $F_{拖}=F_{拖1}+F_{拖2}$=48×9.81+27.6×9.81= 741.6 kN 。

综合计算结果，锚泊及拖轮提供得总约束力：

$F_{总}= F_{总绳}+ F_{拖}$=740.2+741.6=1481.8 kN＞598 kN。

根据上述计算，本次超长节段运输船定位设备选型如下：

上游：（1）艏部：1 只 AC-14 大抓力锚，重量 2.75t，配Φ34mm 钢丝绳；1 只斯贝克锚，重量 2.00t，配Φ40mm 锚链；（2）艉部：1 只 AC-14 大抓力锚，重量 3.5t，配Φ34mm 钢丝绳； 1 根Φ34mm 钢丝绳，系固于岸基带缆桩（SWL 不小于 382kN）；（3）钢丝绳拉锚用：2 根 6×37S+IWR-34mm，钢丝绳，长度不小于 250m；系泊用：1 根 6×37S+IWR-34mm 钢丝绳，长度不小于 250m。下游艏部：1 只斯贝克锚（2t），配Φ40mm 锚链（退潮时不计受力仅稳泊用）。

综上所述，甲板船在两艘拖轮辅助下，所选配的定位设备所能产生的最大约束力大于船舶所受环境力总和，而且能保证吊装施工精准定位需要，定位能力和需求满足吊装施工作业要求。因此本文研究的吊装施工稳泊布置方案是合理的、可行的。

3.3 建议

建设单位应与利益相关的码头业主提前做好封航期间有妨碍事宜沟通，征得他们同意，以便顺利开展施工作业；施工前落实好拖轮、警戒船、锚标及其它安全保障措施，制定完善的各项应急预案；吊装时机尽量选择良好气象海况的小潮时段。

4. 结语

通过以上分析超长节段钢箱梁运输船在急流场下横向稳泊定位吊装施工技术难点和可行性，急流场横向稳泊定位需要做相应技术分析，得出研究结论作为技术支撑，才能安全科学高效完成超长节段钢箱梁吊装施工作业。跨江桥梁超长节段钢箱梁吊装施工难度大技术含量高，希望本文阐述的在急流场中通过多点锚泊和拖轮配合稳泊横向定位且已成功实施的吊装施工方案在跨江桥梁单孔主跨超过 200m 的超长节段钢箱梁吊装施工中得到广泛应用。

参考文献

[1]中交第一航务工程勘察设计院.JTS165-2013 海港总体设计规范[S].北京：人民交通出版社,2014.3.

[2]船舶设计实用手册（第 3 版）[S]. 北京：国防工业出版社,2013.8.
[3]洪碧光.船舶操纵[M].大连:大连海事大学出版社,2008.

作者简介：方念坚，高级引航员。通信地址：台州市椒江区江滨路46号，电话;13566887397。 邮编318000.电子邮箱：693514161@qq.com

台州红脚岩渔网运输船的现状及对策研究

孟祥龙

台州海事局 临海海事处 318000

摘 要：本文旨在探讨台州红脚岩渔网运输船的现状，并提出相应的发展对策。随着渔业的不断发展，渔网运输船作为渔业产业链中的不可或缺的一环，渔网运输的作用目前是不可替代的。然而，目前渔网运输作业面临着很多挑战，如政策导向、人员素质、船舶管理、安全问题、环保压力等。通过对相关现状的分析，本文提出了优化政策力度、加强管理规范、提升安全措施及推动产业升级等对策，以促进渔网运输船行业的健康、可持续、高质量发展。

关键词：关键词：红脚岩 渔网 运输 产业升级 安全 环保

一、引言

渔网运输船在渔业生产中承担着将新的渔网从陆上运输到海上作业的渔船上，同时再将渔船上的废旧渔网从海上运回到陆地上的重要任务，其作业方式具有很强的行业特点，如作业具有季节性，要求高效率运转，船舶必须配备作业吊机，废旧渔网发酵会产生大量有毒气体，无法用舱盖板密封等诸多特点。了解渔网运输船的现状并制定有效的对策，对于保障渔业的稳定健康高质量发展具有非常重要的意义。

二、渔网运输船存在的必要性及生态意义

渔网运输船的运行状况直接影响到渔业捕捞的效率和成本，同时对海洋的生态环境保护也有非常积极的作用，以台州临海红脚岩的渔网运输船为例，平均 1 艘渔网运输船帮助 5 至 6 艘渔船进行渔网运输，在一个生产季节，1 艘渔船会产生 5 万片左右的废旧渔网，红脚岩的渔网运输船大致在 30 艘左右，粗略估算，红脚岩这个作业点一年内的废旧渔网数量就达到了 900 万片左右，如果这些废旧渔网都遗弃在海上，将会对海洋环境造成毁灭性的损害。

三、台州红脚岩渔网运输船的现状

（一）船舶数量与规模

近年来，渔网运输船的数量有所增长，除渔业生产需求的不断扩大这个原因以外，也与舟山、台州三门等地的渔网运输作业点的关停有较大的关系。目前台州红脚岩参与渔网运输的船舶数量在 30 艘左右，船舶规模也呈现多样化，从小吨位的船只到相对大型的运输船都有。

（二）船舶技术装备水平

目前的渔网运输船配备了基础的导航、通讯及与船舶航行及人员救生、消防等与安全相关的设备，但是船舶作业必须要用的装卸设备，一部分船舶尚未按要求装配，自能由船东私自改装，有一定的安全隐患，影响了运输效率和安全性。

（三）船舶安全管理状况

目前，台州红脚岩参与渔网运输的船舶绝大部分都是省外的船舶检验机构发的检验证书，部分

船舶有管理公司，很多船舶都是船东自主经营自主管理，存在一定的不规范现象，大方面的违章行为也时有发生，如船舶证书不齐全、船员无证、不按要求配员等问题。在细节方面，如开航前自查、航次计划制定、图书资料配备等经常达不到要求。此外，对于船舶的维护和保养及船舶防污染方面也欠缺多大。

（四）运输作业特殊需求与航行安全矛盾日益突出

渔网运输船需要将新渔网运送至海上作业的渔船，再将渔船作业后的废旧渔网运回岸上回收，将价值较高的网坠拆解下来回收利用。实际作业过程中，一艘渔网运输船舶与几条，甚至与十几条渔船签订运输合同，这样的情况下，一是运输船舶一定要有吊机进行网具装卸，二是运输船舶的作业地点要根据渔船位置而定，三是对作业的效率要求很高，一旦船期耽搁，对一系列的渔船正常作业都会产生影响。另一方面，由于渔网的密度很小，船舶载满渔网的时候，载重量还远未达到船舶的参考载重量，同时，运输废旧渔网的时候，由于网上残余的渔获会发酵产生大量的有毒气体，故渔网运输船舶不能加装舱盖。但由于渔网运输船舶的船舶类型是普通货船，船舶检验机构要求船舶必须有舱盖，对船舶安装吊机的条件要求也比较高，很多船舶达不到要求，无法安装符合要求的吊机，这样的情况下，船舶运输存在一定的安全隐患，但是又无法从根本上解决。从渔船作业、船检机构、海事管理机构各自的角度出发，都没有问题，但是各方的要求无法达到平衡是目前最大的矛盾。

四、红脚岩渔网运输船目前面临的困难

（一）法规政策不完善

现行的一些法规政策对于渔网运输船的管理存在真空，没有充分考虑到这个行业的特殊性，没有充分考虑到这类船舶的特殊性，给基层海事管理机构的日常监管带来了极大的挑战，如私自改装加装吊机，不使用舱盖板等，单纯依靠处罚手段不能形成执法闭环，导致矛盾异常突出。

（二）渔网运输行业的市场竞争激烈

渔网运输作业具有很强的季节性，作业时间大约在每年的 8 月到 10 月中旬左右。船东为了盈利，会想办法多租用运输船舶，导致目前运输船数量的增加，使得市场竞争加剧，参与运输的船东之间为了盈利，相互间举报，甚至恶意举报的现象高频次的出现，严重干扰了基层海事机构的正常执法活动，浪费了大量的执法资源。

（三）行业人员素质参次不齐，整体有待提高

渔网运输船舶行业中的大部分人文化水平不高，对于海上运输行业的形式变化反应很迟钝，对于日常监管的要求不理解，很多的船东安全意识淡薄，凭借经验及经营惯性进行营运，同时，一些船东举债参与经营，风险承受能力很差，以上情况都不同程度的影响了渔网运输船舶的安全运营。

五、渔网运输船舶的发展对策及建议

（一）完善法规政策

渔网运输行业的特殊性，以及涉及的产业面比较广，涉及管理的地域多，对陆地环境生态的影响较大。各地对此类船舶的处置方式也不一致，比如舟山以前也存在较多此类船舶，后来由于环境问题大部分都关停了。去年三门洞港渔港也因为安全生产事故原因关停了此类船舶。受此影响，大部分船舶都转移到红脚岩。由于此类船舶主要活动水域为台州、舟山两地，建议建立台州、舟山两地相关部门参与的联合协商机制，统一管理标准。同时，经了解舟山少量该类船舶是纳入渔业辅助船舶的，建议有关部门参考舟山的做好进行纳规管理。特别是无吊机证书的船舶，目前经排查有 9 艘，据了解均为临海本地人营运，从事网具运输近 30 年，此类船舶的船籍港均为外省，办理吊机证书存在较大困难。同时这批船舶的船东家庭普遍较为困难，均靠从事网具运输生活。下阶段，如果此类船舶吊机证书无法办理，将失去生活来源。

同时，渔网运输船的运行状况直接影响到渔业捕捞的效率和成本，同时对海洋的生态环境保护也有非常积极的作用，以台州临海红脚岩的渔网运输船为例，平均 1 艘渔网运输船帮助 5 至 6 艘渔船进行渔网运输，在一个生产季节，1 艘渔船会产生 5 万片左右的废旧渔网，红脚岩的渔网运输船

大致在 30 艘左右，粗略估算，红脚岩这个作业点一年内的废旧渔网数量就达到了 900 万片左右，如果这些废旧渔网都遗弃在海上，将会对海洋环境造成毁灭性的损害。故此，渔业网具运输是一定要存在的，根据近三十年的历史经验，网具运输的安全隐患存在，但是总体上是可控的。在此情况下，需要向上级充分反应该行业的必要性及存在的困难，争取上级的政策支持，将目前的渔网运输船纳入渔船进行监管，避免目前的多部门管理，责任不明晰，监管矛盾突出的现状。

在此情况下，高层应加强相关法律法规的制定和修订，针对渔网运输船舶的特点针对性的明确渔网运输船的管理要求及牵头部门，让监管切合实际的进行。

（二）加强国际合作，推动产业升级，实现高质量发展

借鉴国际上先进的渔网运输船管理经验和技术，加强与其他国家和地区在渔业领域的交流与合作，引导渔网运输船行业向规模化、专业化、现代化方向发展，鼓励从业者采用先进的技术及管理模式，政府出台鼓励性政策，推动提高整体竞争力，实现高质量发展。

（三）加强船舶管理，提高从业者素质，提升整体安全水平

严格船舶登记和检验制度，确保船舶具备合法资质和良好的技术状况。建立健全的船舶档案，加强对船舶运营过程的动态监管。强制要求渔网运输船配备齐全的安全设备，并定期进行检查和维护。加强从业者的安全培训，提高其安全意识和应急处理能力。加强从业者的专业技能培训和职业道德教育，建立船员资质认证制度，确保船员具备相应的能力和素质。

六、结论

解决渔网运输船的现存问题，规划高质量渔网运输船舶的发展对于渔业的可持续发展至关重要。面对当前存在的问题和挑战，需要政府及社会各方共同努力，采取有效的对策加以解决。通过完善法规政策、加强国际合作，推动产业升级，实现高质量发展，加强船舶管理，提高从业者素质，提升整体安全水平等措施，能够促进渔网运输船行业的健康、稳定发展，为渔业生产提供更好的支持和保障。同时，号召政府及社会持续关注该行业的发展动态，不断适应新的变化和要求，将有助于渔网运输船在未来的发展中能够生存并更好地发挥作用，实现经济效益与社会效益的双赢。

参考文献

[1] 中华人民共和国海上交通安全法
[2] 中华人民共和国海洋环境保护法
[3] 中华人民共和国渔业法实施细则（2020 年第二次修订）

作者简介:孟祥龙 ,13706575210,台州海事局临海海事处副处长,电子邮箱:yigeyou.xiang@163.com

海上风电海事安全监管研究

石传波

（台州海事局 浙江 台州 318000）

摘 要: 当前，能源发展正处于深刻变革和重大调整的关键时期，面对全球气候变化和生态环境恶化的双重挑战，大力发展可再生能源已成为能源发展的必然趋势。海上风电是可再生能源的重要组成部分,大力发展海上风电是推进能源革命和构建清洁低碳、安全高效能源体系的重大举措，是保障能源安全的必然选择，是实现碳达峰碳中和目标的重要途径。随着海上风电不断向深海、远海发展，参加海上风电施工和安装的船舶数量快速增长，船舶安全事故也易发多发。因此，围绕海上风电全生命周期安全监管，从海事管理视角，深入开展调查研究，剖析存在问题，厘清海上风电各阶段安全管理职责边界，提出服务保障海上风电产业发展对策建议，规范海上风电海事管理和服务，

构建海上风电全流程、全链条安全监管和服务保障体系，打造高质量的海上风电智慧监管模式。

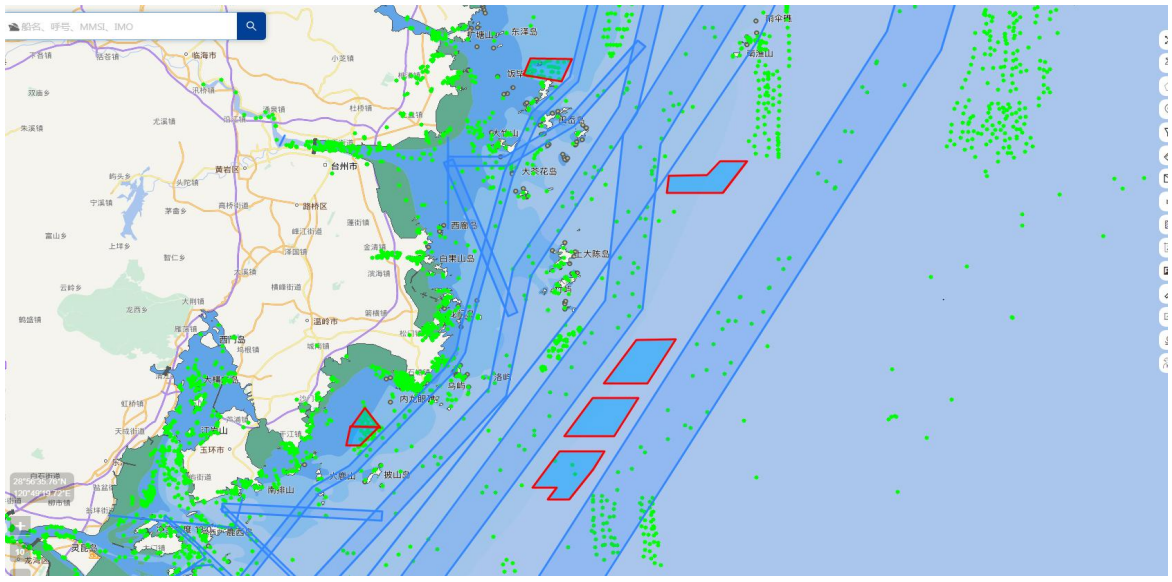
关键词：海上风电；能源体系；安全管理

党的二十大报告提出，要有计划分步骤实施碳达峰行动，深入推进能源革命，加快规划建设新型能源体系，积极参与应对气候变化全球治理。为深入推进能源革命，有计划分步骤实施碳达峰行动，加快规划建设新型能源体系，我市高度重视海上风电的发展，并取得显著成绩。截至目前，我市海上风电累计核准 2529MW，其中并网 529MW。随着海上风电不断向深海、远海发展，参加海上风电施工和安装的船舶数量快速增长，船舶安全事故也易发多发。因此，围绕海上风电全生命周期安全监管，从海事管理视角，开展海上风电场前期选址、施工安全管理、运维安全管理研究，提升海事海上风电场智慧监管水平十分必要。

1.台州海上风电发展现状

1.1 海上风电规划情况

根据《浙江省海上风电场工程规划报告（2021-2035 年）》，台州规划海上风电场 3 个（远海 Z03 除外），为临海 1 号（大唐能源）、温岭 1 号（上海电气）、温岭 2 号（上海电气），规划装机容量均为 500MW。



图：台州沿海海上风电场分布图

1.2 海上风电建设情况

截止目前，台州沿海已建成并网发电海上风电场共有 2 个，为浙能台州 1 号海上风电和华电玉环 1 号海上风电，装机功率为 300MW（40*7.5MW）和 229MW（22*7+10*7.5）。玉环 2 号海上风电已于今年 5 月开工建设。

2、海上风电安全管理现状

2.1 海上风电开发建设基本流程

海上风电项目建设的基本流程为：预可研-立项-核准-可研-前期相关专题（环评、海域使用论证、航评、通航安全专题）-初步设计-施工图设计-水上水下施工作业许可-开工建设-竣工验收。项目核准需提交项目列规文件、用地预审意见、用海预审意见；核准后至开工前，需完成相关专题论证、初步设计、施工图设计和水上水下施工作业许可等工作；项目完工后，开展交工验收、竣工验收和通航安全技术参数备案。

国家能源局负责全国海上风电开发建设管理，各省（自治区、直辖市）能源主管部门在国家能源局指导下，负责本地区海上风电开发建设管理。

项目前期论证阶段，由能源部门综合协调推进相关工作，资规、交通、环保、海事等部门指导建设单位开展海域使用、航评、环评等相关专题论证。

项目核准后建设单位组织研究制定保障安全施工的措施，包括工程安全组织及管理措施、施工图审查、安全投入计划、施工组织方案、应急预案等内容，该项工作一般由建设单位独立完成。

建设阶段，海事部门主要围绕施工船舶和船员管理、船舶防污染、周边水域通航秩序等对项目施工开展通航安全管理。海洋部门开展项目海域使用管理，不定期开展风机施工、海缆敷设现场巡查。水规总院下属的可再生能源质量监督站根据电力管理部门委托对海上风电建设质量行为和工程实体质量进行监督，期间共开展四次检查，分别在开工前、桩基施工前、风机吊装前、并网前。施工安全管理一般由建设单位和施工单位内部管理，属地政府、能源部门等很少介入。

运维阶段，海事部门主要围绕船舶和船员管理、船舶防污染等方面履行自身职责，能源、交通、渔业等其他单位几乎没有介入管理。

2.2台州海上风电安全管理主要做法

海事部门统筹安全监管和服务保障，初步构建起海上风电事前、事中、事后全流程、全链条安全监管和服务保障格局，有力保障了辖区 2 个海上风电“零事故、零污染”建设运营。

2.2.1 使出“服务+风电”实招，赋满发展“风电能”

一是主动介入、充分会商，建立专班化运行机制。充分认识到海上风电项目社会关注度高、影响面广,具有较强的排他性和永久性,对海上通航环境和通航秩序有重大影响的特点,成立内部专班，发挥专业优势，科学研判项目对通航安全的影响。依托通航安全专题会制度，指导建设单位开展通航安全专题研究，全面辨识风电场建设存在的通航安全风险，从源头上消除因项目选址、方案设计不合理等带来的安全隐患，为业主单位提供工程建设各阶段清晰工作指引，也为后续海事监管提供依据。

二是严格把关、高效审批，开通行政许可绿色通道。要求建设、施工单位通过制度明确长效管理举措，进一步明晰公司、船舶、船员层面各岗位职责；对风电业主单位和施工单位开展安全生产大检查，推动全部完成整改。通过内外部联合把关，协助施工单位完善施工作业方案、安全应急预案、施工保障措施，组织专家对施工通航安全保障方案进行技术审查，指导施工单位完善许可申请材料，开辟许可办理绿色通道，高效办理施工许可。

三是先行先试，全程参与，首创由第三方专业机构全过程提供水上安全技术保障服务。针对以往风电场业主、参建各方对海上风电场施工困难理解不一，对海上施工管理能力和风险预判经验性不足的特点，海事部门充分考虑参建各方的迫切诉求和水上安全保障现实需要，和项目建设单位一道探索全新的保障模式，基于一体化、集成化、信息化的系统理念，首创由一家专业机构统一负责和协调，打造“一个标准、一支队伍、一套体系”的保障服务模式，全阶段、全方位保障了项目本身施工安全和过往船舶的安全，降低了业主工作量和成本。

2.2.2 使出“智慧+风电”真招，擦亮管理“风云眼”

针对风电场施工水域范围大、距岸远、通航环境复杂、通讯信号差、公共监管设施和应急装备建设匮乏等问题，海事部门加强海事监管业务指导与技术支持，与海上风电建设单位共同探索搭建“一平台一图一库”的海上风电智慧管控平台，保障海上风电场工程项目的管理和运营做到“看得见、管得住、叫得应、可追溯”。

“一平台”就是搭建海上风电场安全监控平台。通过系统模拟、数字孪生、AI 预警、信息共享、物网互联等技术集成综合运用，构建“1 个平台+4 个场景+7 大系统+N 个应用”的安全监控平台，实现与智控平台数据互联互通。通过风机上的高清 CCTV 和小物标雷达，实现施工现场动态实时监控。

“一图”就是搭建全息电子海图场景。通过可视化大屏，加上增设电子围栏、AIS 航标、CCTV 等方式，高保真还原风电场和周边船舶、航路动态，实时全览风电场运营情况、船舶分布情况、船舶风险动态情况等，将复杂的海域情况数字化、智能化、可视化形成多维感知的全息电子海图场景。

“一库”就是搭建智能风险预案库。通过浙江海上智控平台重大活动场景，全面掌握施工水域

船舶信息，建立恶劣天气风险研判机制，利用 VHF、短信、微信等方式将预警信息传达给施工单位，按照研判结果分种类、吨级、批次指导风电施工船舶避风。

2.2.3 使出“监管+风电”硬招，夯牢安全“风电桩”

一是立足“三张清单”，严把人员安全关。以施工单位为主体，以码头为源头，以交通船为载体，建立出海人员信息事前报备、出海人员信息登记、出海人员上下船点验清单，实时核查出海人数及海上作业人数，共保障施工人员安全上下船。

二是立足“事前+事中”严把船舶安全关。主动对接施工单位，提前获取拟参加施工船舶清单，落实专人对船舶证书有效性、船舶违章情况等基础信息提前核查，并制定船舶安检计划，做到入场前安检率 100%。同时加大现场检查力度，常态化实施“不发通知、不打招呼、突击登轮”等方式开展施工船舶现场风险隐患排查，严厉打击查处船舶未经许可参与施工、船舶超载、配员不齐等违法违规行为。

三是立足“二个从严”，严把通航安全关。深度应用“重大活动场景”，推动所有施工船下载安装“浙海行”APP，实时上报船舶、人员动态，畅通信息互通渠道，从严提升风电场水域动态管控能力。结合“台海天网”等监管平台，利用全要素“水上大交管”和 VHF、AIS、CCTV 等信息化手段构建水工立体化监管网格，对施工水域进行 24 小时监控，实现施工全过程动态全掌控。

2.2.4 使出“协同+风电”高招，舞动合力“风叶桨”

立足恶劣气象海况联动防控、海上人员动态管控、海上风险隐患协同治理、海上应急处置协同联动等方面推动建立海事、发改、渔业、海警、属地政府等多部门协作机制。内部，解决海事处安检力量不足的困难，统筹协调局安检中心、指挥中心对施工平台支腿船开展联合安检，清退重大改建船 1 艘；外部，联合举办海上风电综合应急救援演练，有效整合各方资源，应急力量储备资源共享，丰富海上应急救助手段，防范化解水上安全风险。

2.3其他海事管理机构海上风电典型做法

一是省内各分支局注重因地制宜，创新海上风电不同环节安全管理水平。宁波海事部门协同建设单位开发“出海人员动态管控”小程序，创建“码头码”“船舶码”“风机码”，实现船舶在船人员实时展示，施工人员出海动态全程留痕。舟山海事部门坚持企业为主，海事指导，创造性建设重大项目服务保障中心，按“主中心+分中心”模式实体化建设和运作。针对海上风电监管问题，温州海事部门牵头业主单位开发建设“风电保”，初步实现了海上风电场“看得见、管得住、叫得应、可追溯”。

二是江苏海事部门依托地方政府，构建起海上风电综合监管格局。五部委文件下发后，江苏省结合辖区实际，对文件要求作了进一步细化，制定印发了《关于加强海上风电项目安全风险防控工作的意见》。市、县两级政府高度重视，创新海上风电管理体制机制，压实各方管理责任。如东县成立了海上风电运维安全生产专业委员会、海上安全联合执法领导小组，以县政府办公室名义下发《关于进一步加强海上风电施工运维安全管理的通知》，对企业责任、各监管部门责任、属地政府责任进一步明确，对海上风电实施综合监管。

三是广东海事海事强化部门联动，构建海上风电应急协同格局。广东海事部门会同省安委会办公室、省应急管理厅制定《广东省海上风电应急救援协同机制》，以广东省海上搜救中心名义印发《广东省海上风电水域险情应急预案》，全面强化海上风电应急救援协同管理。

3、海上风电项目安全监管存在的主要问题

3.1 规划选址阶段

一是风电开发核准未有效落实部委文件要求。目前风电项目核准仅需要向发改部门提供项目列规文件、用海预审意见、社会风险评估备案意见、项目可研报告和核准申请报告即可。虽然根据五部委《关于加强海上风电项目安全风险防控工作的意见》要求，风电项目在立项时应充分征求海事部门意见，但地方政府强势推动海上风电开发，该文件要求并未有效落实。

二是风电场设计未充分考虑渔船通航需求。海上风电项目通常占用海域面积较大，部分位于渔

船进出港作业的必经水域，但目前海上风电规划与建设均未结合实际条件，考虑预留渔船进出港通道，缺少对整片海域风电场群的系统分析，对后续渔船穿越风电场管理造成较大困难。

三是海事前期介入缺少相应法律依据。前期海事部门除了参与其他行业管理部门的环评、航评、海域等专题论证，主要依靠要求建设单位开展通航安全专题论证，通过专题会议纪要形式提出通航安全保障方面的相关要求。目前海事部门对与选址论证依据主要为部海事局印发的《海上风电场选址通航安全分析技术指南（试行）》，但该指南的约束效力和通用性存在一定局限。

3.2 施工建设阶段

一是外界对海事职责定位存在一定误区。从现行法律法规和五部委文件看，海事部门主要负责船舶管理、水域通航秩序管理以及海上事故调查，即通航安全管理。但在实践层面，因相关管理制度的不完善、相关部门现场监管的缺位，海事部门在海上风电安全监管领域充当着“兜底”角色，导致属地政府和相关部门认为海上风电安全监管是海事应当承担的职责，造成工作的被动，迫切需在对各方职责进行明确，同时对海上风电海事部门“管什么”“怎么管”“管到什么程度”作进一步界定。

二是海上风电海事监管手段相对不足。海上风电远离陆地，施工水域气象、海况恶劣，施工船舶多、施工人员多、施工工艺复杂，运维期运维船舶频繁进出风电场水域，若管控不当，极易发生事故险情。而海事部门现有雷达、CCTV、AIS 等感知体系、VHF 等通信设施以及执法船艇无法对海上风电水域实施有效覆盖，尤其是随着深远海海上风电的开发，海上风电建设期监控能力不足问题愈加突出，施工现场呈现出“看不到、叫不应、管不住、救不了”的困境。

三是现场监管海事部门存在“单打独斗”。五部委文件要求加强海上风电建设环节安全管理，地方政府要组织海事、能源、渔政等部门对海上风电项目施工现场开展联合监管执法。但目前，海上风电建设、运维现场监管主要由海事部门承担，属地政府、其他涉海部门在项目核准后建设、运维阶段基本不参与，而溜桩、穿刺等突出风险管控已超出通航安全管理范畴，海上风电现场监管、海上防台等海事“单打独斗”，亟待按照五部委文件要求，建立跨部门海上风电联合执法体系，统筹形成工作合力。

3.3 风电运维阶段

一是业主单位对运维期海上风险认识不足。目前台州辖区海上风电均处于质保期内，海上运维由风电厂家负责，业主单位重点关注的是风机的正常运转，对因恶劣气象海况、船舶航经通航密集区、船员航行操作不当等可能引发的周边船舶触碰风电设施，运维船舶发生碰撞、自沉、人员落水等水上交通事故风险的认知和应对举措不足，存在重经济效益轻安全的麻痹思想。

二是运维船舶的准入和管理缺乏统一标准。在准入方面，目前仅关注运维船舶的“交通”属性，对“运维”功能的专业性要求不足。运维船舶采用传统靠泊模式靠离风电桩基、升压站，受风浪条件影响显著。因此，其抗风等级、适靠性等均应适应其“运维”属性，目前无统一标准。在管理方面，运维船舶也没有统一的开停航、人员登乘、航行安全保障等标准。

三是海上风电应急保障设施及保障体系不完善。当前海上风电项目飞速发展，风电场区发生事故险情的风险不容忽视，但受限于风电场区通航特点，不能通过救助飞机及大型船舶开展救助。同时，由于地方政府应对风电新业态快速发展的准备尚不充分，相对应的海上风电项目保障设施及保障体系建设仍不完善。应急管理体系建设不完善，缺乏适应风电水域应急救援特点的装备投入和应急救援队伍等。

4、海上风电安全管理建议

4.1 健全海上风电规划核准体系

4.1.1 完善海上风电核准管理，优化海上风电规划布局

对接发改部门，推动落实五部委《关于加强海上风电项目安全风险防控工作的意见》和浙江省有关要求，完善海上风电项目核准管理，推动把通航安全相关内容作为项目核准的重要条件。联合港航、渔业等部门主动参与海上风电规划修订，确保规划环节风电场选址通航影响相关论证客观深

入，与航路、航道、锚地等通航资源保持足够安全距离，推动海上风电开发与海上交通运输、渔业等产业融合发展。

4.1.2 深化海上风电选址分析，保障通航与风电建设更好兼容

在海上风电选址论证阶段，深化基于船舶 AIS 实际交通流数据分析，结合拟建风电场区域通航环境特点，评估项目建设近远期对通航安全产生的影响，推动风电场选址和平面布置设计方案优化到位。会同渔业主管部门加强海上风电规划布局对渔船进出港通道影响研究，结合实际需求，推动项目在初步设计确定平面方案时预留渔船进出港通道。

4.1.3 强化通航安全专题会成果应用，建立“双核查”机制

规范运行海上风电项目通航安全专题会制度，通过会议纪要成果，强化各行业主管部门、地方政府等职责落实，明确项目选址、设计、建设、运营等全生命周期保障措施，并对照专题会要求，建立对施工前、完工后两个重要环节的“双核查”机制，作为水工许可审批和技术参数备案的前置条件，确保专题会共识性要求全面落实到位。

4.2 健全海上风电施工风险防控体系

4.2.1 监管服务双轨并行，源头管理严格把关

做好海上风电施工安全监管，需要从施工源头抓起，在优服务的同时，做到严把关。一是开辟海上风电政务办理“绿色通道”，专人跟踪，提供申请材料预审服务，实施许可审批“加速办”“容缺办”。二是强化施工船舶源头把关，指导施工单位建立施工船舶准入、退出机制，明确选船标准。加强海上风电改造作业平台、改装船舶安全检查，严防不合格船舶参与施工作业。三是优化单航次临时材料运输船舶管理，在落实远程信息核查、严格现场检查等安全措施后，可先行安排装卸作业。

4.2.2 丰富实时感知手段，升级安全监管模式

加强海上风电安全监管，需要立足制度运行，完善软硬件配备，为现场监管赋能，实现现场监管“看得见、叫得应、管得住”。一是推动雷达站、VHF、AIS、CCTV 等感知通信设施和监控平台与风电场同步规划建设。坚持系统管理理念，将风电场感知通信设施和远程监控平台建设纳入通航安全专题会要求，明确与风电场同步规划、设计、建设、投入运营。工程建设前期，固定监控设施建设不具备条件时，要求在打桩船等大型施工船上临时设置远程监控系统。二是用好浙江海上智控平台和重大水上活动场景。坚持需求导向和科技赋能，不断迭代升级重大水上活动场景，提升海上风电施工船舶、施工人员、交通艇、警戒船艇管控能力。三是探索“海巡艇+无人机”监管模式，提升现场监管成效，探索形成智慧监管体系。

4.2.3 不断培育专业人才，提升一线执法能力

提升海上风电海事监管效能，一线执法人员执法技能是关键。一是做好海上风电监管技术储备。要密切关注海上风电发展前沿技术，掌握不同施工工艺、特种船舶、运维船舶等存在的风险，提前谋划应对新出现风险的对策。二是加强海上风电专业人才培育。建立风电监管实训基地，总结梳理风电特种船舶特点、安检流程、常见问题，通过“培训+实操”的模式，全面提升一线执法人员特种船型安检技能。

4.3 规范海上风电运维安全管理体系

4.3.1 督促业主单位落实安全主体责任

防范运维风险，应秉承“标本兼治、源头管理”的基本理念，健全完善管理体系。一是指导业主单位建立健全安全生产组织管理、投入保障、风险防控、隐患排查治理、应急处置等机制。二是加强对运维单位的监督和协调，督促合理编制综合安全管理、人员安全管理、设备设施安全管理、船舶安全管理等各类安全规章制度。

4.3.2 指导业主单位完善运维管理模式

建立和完善风电运维船舶管理制度，确保风电运维船舶的安全、高效运营，为海上风电行业发展提供保障。一是科学确定运维船准入标准。探索将运维船舶吨级、抗风性能等选船要求纳入通航安全专题会，一并论证分析，明确运维船舶准入标准，避免低标准船参与作业。二是创新运维管理

模式，发挥海事专业优势，探索经济实体与属地国企合作，打造共管共赢运维管理平台。三是强化运维作业安全管控。指导业主单位按照“定船、定人、定点、定航线”的“四定”原则，制定《海上风电场运维船舶准入和退出制度》《海上风电场运维人员出海管理制度》等，对运维船舶、运维人员进行有效管控，规范运维船舶航行、停泊、作业。

4.3.3 推广应用风电监管智慧平台

迭代升级智控平台重大活动运行场景，通过优化平台智慧功能、完善管理制度，加强对海上风电场船舶、出海人员的实时管控和监控预警，向海上风电场管理者、运维人员等使用方提供全景化、数字化、智能化的全览监控服务，提升海上风电智治管理水平。

4.4 构建海上风电综合治理体系

4.4.1 加强顶层设计，完善工作机制

会同能源部门规范海上风电项目开发建设运维，按照“管行业必须管安全、管业务必须管安全、管生产经营必须管安全”要求，推动风电各方责任有效落实。对接属地发改部门，推动规范海上风电设计方案、施工图、施工方案审查流程，规范海上风电施工建设。推动优化海上风电施工工艺，同步落实施工通航安全保障措施。统筹海上风电各阶段施工，运行总体施工通航安全保障方案评审机制，指导施工单位优化施工工艺，合理安排施工组织，制定针对性安全保障措施。

4.4.2 加强部门联动，形成监管合力

推动地方政府牵头，联合有关主管部门、业主单位齐抓共管，构建风电场区“三方联动”治理格局。建立海上风电联合执法机制。严格落实五部委文件要求，定期组织海事、能源、渔政、应急等部门开展联合执法检查。健全跨部门协同工作机制。建立健全海上风电跨部门信息通报、案件移送等协同工作机制，畅通地方政府、有关主管部门和业主单位间信息渠道，联防联控，合力推进海上风电行业安全治理与交通安全治理。

4.4.3 依托属地政府，提升应急救援能力

推动属地政府牵头，完善海上风电应急预案、应急演练和应急救援协同机制，对可能引发的海上风电突发事件处置纳入政府应急救援体系建设；建立健全海上风电项目应急管理联动机制，统筹调度本辖区有关力量，全面落实海上风电项目核准、建设、运维、应急全流程安全管理责任。特别要加强海上应急救援力量建设，推进应急救援基地、队伍和装备建设。

参考文献

[1].英国海上风电 40GW 怎么实现.[J]. 电力设备管理，2021.
[2].参考消息网. 2023.
[3].南通海上风电运维船需求预测分析.[J]. 水上安全，2023.
[4].光明网. 2024.
[5].让海洋强国“生态光环”日益璀璨. 中国经济时报. 2023
[6]海上风电场选址通航安全分析技术指南（试行）.2021.

作者简介:

石传波，台州海事局，专业领域：本科：航海技术；研究生：公共管理
通讯地址：浙江省台州市椒江区白云山西路 26 号
邮编：318000，座机电话和手机号：0576-88311695,18357669676
传真：0576-88311696，E-mail：1522070020@qq.com。

5 万吨级船舶减载靠泊浙能台二电码头的风险分析及对策

张文彬

（台州港引航站.台州 318000）

摘　要:通过介绍升级后的浙能台二电码头进港靠泊过程中存在的各种风险，并分析其原因，结合多年的引航经验，阐述 5 万吨级船舶减载进港靠泊该码头的操纵应对策略和关键点，以期为同行们提供参考。

关键词：减载靠泊；风险分析；操纵对策

引 言

浙能台州第二发电厂位于台州三门湾西南侧的牛山嘴，属台州港健跳港区，是以煤炭为原料的火力发电厂，有一个与之配套的 3.5 万吨级的卸煤码头（水工结构按 5 万吨级散货船舶设计），码头平台长 292 米，宽 28 米，码头走向 143.5°-323.5°，码头前沿停泊水深约 14.5 米-17.3 米，年设计通过能力为 470 万吨，于 2015 年 5 月 3 日靠泊第一艘船，为了适应生产需要，经充分认证后于 2018 年提升到 5 万吨级散货船舶减载到 4.5 万载重吨以下且吃水不超过 10 米的乘潮作业要求。

1　进港航道和锚地

1.1　航道现状

根据浙江海事局颁布的《浙江沿海及主要港口航行指南》,进入健跳港区有北航路和南航路两条航线，航路等级为 B 级，宽度为其中心线两侧各 1 海里范围的水域。受自然环境条件限制的航路，其宽度以自然水域可航水域的宽度为限，现主要介绍北航路,如图 1 所示。

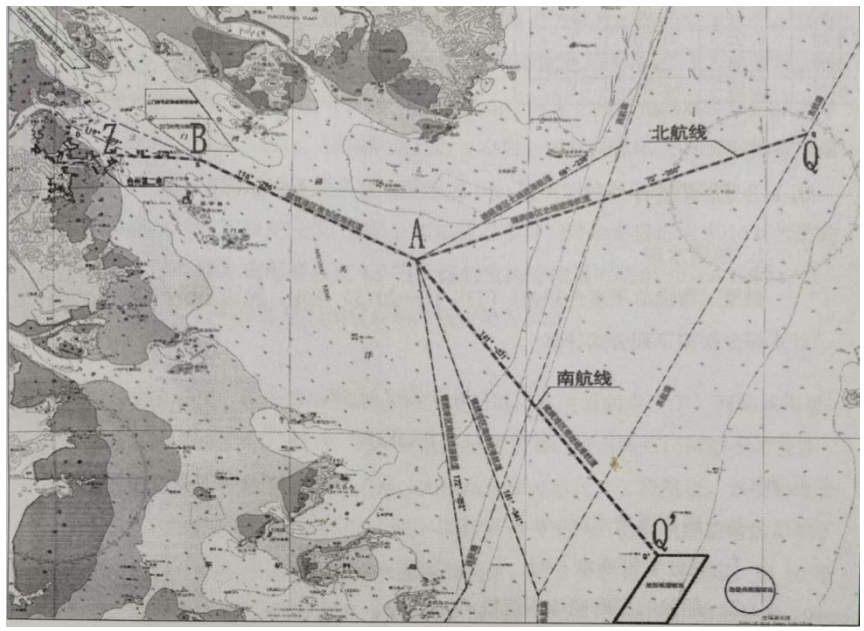


图 1

自北方港口过来的煤船，沿浙江沿海的东航路进入油菜花屿东侧水域（Q 点）右转 45°，航向 250°，航行 13.9 海里后，至草鞋襟屿灯桩南侧处 TB337°、D3.4 海里处（A 点）转向 296°，航行 8.9 海里后，至青士头灯桩北侧（B 点）转向走 275°，航行 2.7 海里抵达卸煤码头前沿回旋水域。

航线全长 25.5 海里，转向点共 2 处，最大转向角 46°，航道水深小于 11 米的浅段长约 17.3 海里，最浅处水深 5.5 米（最近扫测数据），位于青士头北侧推荐 3.5 万吨级进港航道内，离码头西南角仅 0.8 海里处的航道中线南侧。

1.2 通航水位

三门湾具有非正规半日浅海潮性质，潮波形态为驻波。根据码头附近海域的长期潮位站健跳水文站观测资料，多年最高潮位 5.57 米，最低潮位-3.6 米（85 国家高程基准，理论最低潮面上 3.24 米），平均潮差 4.16 米，最大潮差达 7.16 米。三门湾潮差较大，为船舶乘潮进港创造了良好条件。根据健跳站潮位资料分析乘潮 1 小时，能航保证率 90%的乘潮水位为理论最低潮面起算 4.71 米,乘潮 2 小时，通航保证率 90%的乘潮水位为理论最低潮面起算 4.59 米，乘潮 3 小时，通航保证率 90%的乘潮水位为理论最低潮面起算 4.39 米。不同乘潮水位及其保证率如下表 1 所示：

乘潮水位及其保证率表（理论最低潮面） 表 1

保证率(%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1 小时	6.32	6.05	5.89	5.7	5.52	5.33	5.15	4.93	4.71
2 小时	6.05	5.79	5.64	5.47	5.32	5.15	4.98	4.78	4.59
3 小时	5.61	5.4	5.26	5.12	5	4.85	4.7	4.55	4.39
4 小时	5.07	4.91	4.77	4.67	4.59	4.49	4.37	4.25	4.11

1.3 航道富余水深的设定

确定富余水深时，从安全操纵角度考虑，驾引人员希望富余水深大一些，从经济效益角度考虑，港口经营人员希望船舶多装点货，富余水深小一些，这就要求在安全与效益之间取得一个平衡，既要确保安全，又要保证一定的效益。影响富余水深的因素包括航行下沉、波浪、纵倾、最小深度及其他因素等，即：

$$UKC=s+h_1+h_2+h_3+h_0$$

式中：s-船舶航行时船体下沉量；

h_1-船舶航行龙骨下最小富余深度；

h_2-波浪富余深度；

h_3-船舶纵倾富余深度；

h_0-其他富余深度。

一般 5 万吨级中型船舶的航行下沉量 s 取 0.3 米，由于三门湾底质为软性地质（泥底），龙骨下最小富余深度 h_1取 0.25 米，三门湾是个半遮蔽水域，波浪富余水深 h_2取 0.15 米，进港时船舶尽量调平吃水，船舶纵倾富余深度取 0.1 米，台二电码头属海港，海水密度几无变化，因此 h_0为 0，即 UKC=0.3+0.25+0.15+0.1+0=0.8（米）。

因此，5 万吨级船舶减载到吃水 10 米时船舶要保持至少 10.8 米的水深，在过进港航道最后一段的浅点 5.5 米处时,当时潮高要在 5.3 米以上,通航保证率 60%，重载进港一般都安排靠初落，就是为了控制在最高潮时段过浅点，在确保安全情况下取得最大效益。当处于小潮汛时，潮位较低，为保持 0.8 米的富余水深，可能减载得更多。

1.4 锚地

三门湾水域掩护条件较好，现有锚地 4 处，分别是：大甲山待泊锚地、猫头水道小轮锚地、锚头驳载锚地和蛇盘水道避风锚地，虽然这些锚地离台二电码头较近，遮蔽条件也较好，但这些锚地水深都不能满足 5 万吨级重载船舶锚泊的要求，因此，到港船舶只能到头门东待泊锚地抛锚待泊，那里锚地水深介于 18.2-22.2 米之间，整个锚地能满足 5 到 7 万吨级船舶候潮锚泊要求，另外还有个临时锚地，该待泊点位于南田岛南侧，北渔山北侧，西侧为沿海东西习惯航路，可供台二电煤码头设计代表船型单艘 3.5 万吨级或 5 万吨级散货船锚泊，海图水深在 25 米左右。

2 主要引航风险分析

2.1 航道水深不足的风险

从待泊锚地至南北航道交汇点 A，此航段最小水深 8.4 米，从 A 点到内航道 B 点，此航段最小水深 7.2 米，从 B 点到码头前沿回旋水域 Z 点，此航段最小水深仅 5.5 米，推荐航道宽度约 400 米，最浅点位于航道中心偏南一侧，距泊位西南角仅 0.8 海里左右，对航行影响最大；而且推荐航道的南侧就有一个 5 米等深线包裹着的浅滩，浅滩有往北延伸的趋势，在 2017 年航道海图水深最浅还有 5.9 米，目前只有 5.5 米，还是定点清理过的水深。

整个进港航程近 30 海里，10 米吃水的船舶进入 10 米等深线就要候潮，在 B 点前富余水深还在 1 米以上，在最后一段 B 到 Z 段航程 2.7 海里，富余水深仅 0.8 米，船舶进入减速准备入泊时段，航向 275°，与流向夹角约 53°，浅水效应明显增强，船舶停车后保向困难，稍有不慎就有搁浅的风险。

2.2 航道与码头轴线的交角较大对靠泊带来的风险

台二电码头进港航道最后一段推荐航道走向为 275°，距离 2.7 海里，直指泊位，与码头轴线成 50°的交角，进港过程中一般都还有从东南方向来的涨水流，受流压差的影响，船首向与泊位轴线交角还要大，航道南侧接近 5 米等深线，航道内还有浅点，船舶进港靠近航道北侧航行，增加了调整靠泊角度的难度；另外，在抵达码头前沿旋回水域时还有涨潮流时，即使有 2 条 4000 马力拖轮协助，如果调整不好入泊角度，仍会使船舶离泊位越来越开，横距越来越大，在开港初期靠泊中，有些引航员对水流情况掌握不好，调整入泊角度困难，甚至出现 1 个多小时还靠不上码头的情况，存在较大的操纵风险。

2.3 靠泊时间窗口较短

船舶为了最大经济效益一般都乘潮进港，最大限度地利用潮高，把富余水深都留到规定的极限值，因此靠泊时机大多选择高潮后初落时段，一般选择码头自有潮汐预报表高潮后 20 分钟到 40 分钟入泊，过早抵达旋回水域时可能还有涨水流，入泊角度过大会出现两拖轮顶不动，水流作用在内侧，横距反而越来越大，出现久靠不上的情况；过迟抵达旋回水域，高潮后 40 分钟以，落潮流就急了，落潮流冲击泊位西北端形成强大的推开流，船首拖轮需全速顶推，必要时还需船尾拖轮协助或大船车舵配合来调整靠泊角度才能成功靠泊，有时由于各种因素影响，潮汐潮流与预报有出入，靠泊时间窗口把握不好，对驾引人员造成很大的困惑。

3 典型船舶的引航操作实例及操纵关键点

3.1 典型船舶的引航操作实例

选取“MZ507”轮靠泊引航操纵为例，该轮船长 199.95 米，船宽 32.26 米，载重吨 48521，本航次载煤 44883 吨，吃水 10.1/10.1 米，当天最大潮高 5.45 米，富余水深 0.85 米，左舷靠泊，计划在高潮后 20 分钟靠泊，偏北风 5-6 级，船舶航行轨迹如下图 2 所示。



图 2

1）船位 1：航速 7 节，计划航向 274.5°，距泊位东南角约 2.7 海里，开始减速，左舷受流和右舷受风的影响，停车后保向困难，应及早减到微速进，既能达到减速又能保持船艏向，预配了 5-7°的流压差，走推荐航道的北侧，尽量让富余水深多一点，避开 5 米等深线附近的浅点。

2）船位 2：航速 4 节以下，在右艏舷和右艉舷处带妥拖轮，距离码头东南角约 0.8 海里，过了南侧航道浅点，如果继续沿航道北侧航行，船舶相对泊位位置太高，入泊角度太大，不利安全靠泊，由于过了浅点后的水深相对较深，可以向左大幅转向，对着小牛觜灯柱航行，将船位向航道南侧调整。

3）船位 3：离泊位东南角 0.3 左右，航速控 3 节以下，倒车减速，在艉舷拖轮的作用下，向右调整航向近 80°，实现华丽转身，在首尾拖轮的作用上调整好入泊角度。

4）船位 4：船舶在两拖轮作用下调整入泊角度，在大船自身余速作用下驶向泊位前沿并控制好横距。

5）船位 5：船舶抵达泊位对开横距约 100 米，航速控制在 0.5 节以下，此时要根据当时的流向流速来调整船首向，一般按常规操作即可安全靠泊。

3.2.靠泊操纵几个关键点

船舶操纵的主体是驾引人员，驾引人员的船舶操纵技能差异对船舶安全靠泊带来影响，结合多年的台二电码头引航经验，归纳几点在进港靠泊过程中应注意的几个问题。

3.2.1 航行和控速

5 万吨级重载煤船在进港过程中，虽然是乘潮进港，但浅水效应明显，尤其在到达泊位前的最后一段航程，富余水深不到吃水的 10%，又受横流的影响，船舶保向困难，停车就会出现船首右偏，用舵难以摆定，因此要及早用微进车，一方面达到降速的目的，又能保持舵效，必要时可早点带上拖轮，用尾拖后拉来达到减速的目的。

3.2.2 调整入泊态势

在过了最浅点后，船位相对泊位的位置较高，入泊角度大，横距也很大，单靠拖轮顶推靠泊相当困难，此时最好将船首向左转，将船位向航道南侧推进，再在拖轮作用下大幅度转身以获得最佳的入泊角度和横距，这是较少使用拖轮即能安全高效靠泊的关键。

3.2.3 入泊操纵

船舶在抵达泊位前沿之前，应观测或感知当时的潮流情况，当发觉当时潮流与预计不一致时，特别在大潮汛时期，落水流比预报来得晚，码头前沿还有涨水流，因此要调整入泊角度尽量要小，甚至是 0°或小负角，在前后拖轮的作用下向泊位靠近，在离泊位 1 到 2 倍船宽时再调整入泊角度为正，否则船舶内舷受流，即使有 2 条拖轮全速顶推也无法成功入泊，甚至会出现船舶越靠离泊位越远的情况；小潮汛时落水流比较正常，靠泊也相对容易些；如遇到落水流已较强时，船头会遭受到很强的冲开流，靠泊时可适当加大入泊角度，两拖轮协助，有时还要再结合左满舵进车才能顺利靠泊。

3.3 安全保障措施

1）进港前应严格检查本船车舵等设备工况

由于三门湾是浅水湾，重载船舶都需乘潮进港，港内没有供 5 万吨级重载船舶抛锚的应急锚地，拖轮资源也仅仅能满足协助靠泊，一旦进港过程中出现车舵故障，就会存在搁浅的风险，因此进港前务必要严格检查船舶重要航行设备，以确保船舶进港靠泊安全。

2）除了在休渔季节，三门湾进港航道常有渔网和渔船，引航员在登轮前应观测好，登轮后及早联系让其驶离航道，拒不驶离的通知渔政部门，同时做好避让措施，对于影响船舶航行的渔栅，由引航站通知相关部门给予拆除。

3）台二电码头的遮蔽条件较差，尤其在偏东或东南风影响涌浪入侵时，断缆情况时有发生，因此靠泊期间应做好稳泊工作，加缆和减少缆绳的磨损很有必要，或让拖轮协助稳泊，最坏情况就是解缆离泊，以策安全。

4. 结束语

5 万吨级减载船舶进靠浙能台二电码头引航操纵存在一定的难度风险，富余水深小、靠泊时间窗口短、航道与泊位交角过大、不利的流速流向等因素增加了靠泊操纵的难度，驾引人员要加强学习，充分了解各种不利因素，不断总结经验，制订周密的引航操纵计划，提高自身的操纵预见性，实现安全高效靠泊的目标。

参考文献

[1] 洪碧光.船舶操纵

[2] 浙江海事局.浙江沿海及主要港口航行指南

作者简介:

张文彬,台州港引航站高级引航员，浙江省台州市椒江区江滨路 46 号,手机号 13857600296 邮箱 zjx3797@163.com.

浅析无人机在海事执法调查取证中的应用

徐群

台州椒江海事处，浙江 台州 318000

摘　要：随着科技的飞速发展，无人机技术已广泛应用于多个领域，其在海事执法中的调查取证工作更是展现出了巨大的潜力和优势。无人机以其独特的机动性、高效的作业能力和先进的传感器技术，正在逐步影响传统的海事执法模式，如何利用好这一“利器”成为重要的执法课题。

关键词：无人机；海事调查取证

一、引言

随着无人机技术的飞速发展，其性能不断提升，成本逐渐降低，使得无人机在各个领域的应用成为可能。传统的海事调查取证手段限制较多，部分类似于船舶事故调查、水上污染监测等情况较难取证。本文旨在探讨无人机在海事执法过程中调查取证的优势，利用无人机的特点，开展近岸盲区巡航、船舶事故调查、水上污染检测等活动，论证无人机在海事执法中调查取证的必要性，为后续完善无人机调查取证程序提供参考。

二、无人机在海事执法中调查取证中的优势

（一）克服地理条件限制

海事执法往往涉及广阔的水域和复杂的地理环境，如江面、海面、港口等。传统的执法手段，如巡逻船艇，在视程、速度和灵活性上存在一定限制，存在一定盲区，无人机可以快速起飞并到达指定区域，无需受道路拥堵或地形限制，这使得执法部门能够迅速对违法行为或事故现场进行响应和处理。

同时，无人机可以与巡逻船艇等海上执法装备协同工作，形成陆海空立体监管系统。通过无人机的高空俯视和广泛覆盖能力，可以及时发现并报告潜在的安全隐患和异常情况，提高海事巡检的整体效率。

（二）提高取证效率

无人机搭载的高清摄像头、红外热像仪等先进设备，可以实时传输高清影像资料，为执法人员提供现场第一手资料，可以有效改善以往只能登轮检查，船舶离港便无法进行调查取证的困境，这极大缩短了取证时间，提高了执法效率。

（三）增强执法威慑力

无人机在海事执法中的广泛应用，不仅提高了执法效率，还增强了执法威慑力。无人机的高空飞行和实时监控能力，使得违法行为无所遁形，有效遏制了违法行为的发生。同时，无人机取证作为一种新兴的技术手段，也向公众展示了海事执法部门科技赋能、创新执法的决心和实力。

（四）降低执法成本

相比传统的巡逻船艇等执法工具，无人机的运营成本更低。无人机无需人员驾驶，减少了人力成本。同时，其飞行速度快、覆盖范围广，可以在短时间内完成大量巡查任务，降低了执法成本。

（五）拓展执法场景

无人机在海事执法中的应用场景非常广泛，包括但不限于船舶吃水核查、航道巡查、污染监测、应急搜救等。通过不断更新无人机机载设备，拓展在海事执法中的应用场景，可以进一步提升海事监管的智能化水平，为构建安全、绿色、高效的水上交通环境提供有力保障。

三、无人机在海事调查取证中的应用

（一）船舶监管与违法查处

1. 船舶吃水核查：无人机可以迅速升空，对航道上的船舶进行吃水核查，确保船舶在航行过程

中符合安全要求，有效防止了船舶超维护水深航行等违法行为。

2.航线监控：无人机可以实时监控船舶的航行路线，确保船舶按照规定的航线航行。对于偏离航线的船舶，无人机可以迅速拍照取证，为后续处理提供依据。

3.违法查处：无人机搭载的高清摄像头可以清晰拍摄船舶的违法行为，如非法排污、超载运输等。

（二）海域巡查与应急救援

1.海域巡查：无人机可以对广阔的海域进行巡查，及时发现并报告海域内的异常情况，如油污泄漏、非法捕捞等。

2.应急救援：在海上事故发生时，无人机可以迅速到达事故现场，通过搭载的热成像、夜视等设备，搜索被困人员并提供实时影像资料，为救援工作提供有力支持。同时，无人机还可以携带救生设备，如救生圈、浮标等，进行远程投送，提高救援效率。

（三）辅助决策与指挥

1.现场监测：无人机可以将现场的实时画面传输给指挥中心，帮助指挥人员了解现场情况，做出正确的决策和指挥。

2.数据分析：通过对无人机收集的数据进行分析，可以评估海事执法的效果，发现潜在的问题和风险，为后续的执法工作提供参考和依据。

四、无人机执法存在的问题

（一）配套制度不健全

1.现有法律体系存在滞后性

“法无授权不可为”是伴随现代法治而产生的一项公权力行使原则，其直接表现就是“职权法定”，意味着行政机关执法人员只有在事先依法取得明确的法律授权的情况下才能实施相应的具体行政行为，因此无人机执法同样需要法律法规进行具体的授权。

从我国现有的规定来看，目前我国关于无人机相关的法律法规主要是由中国民用航空局制定的规范性文件和公安部出台的部门规章，但是这两种规范性文件也大多仅集中于规范无人机的机型的种类、包装和基本飞行的技术标准，基本是着眼于无人机机身的硬性特征，法律的效力等级低、规定内容不具体，缺少对行政执法过程的使用无人机的具体细则，导致现有的法律体系无法应对使用无人机执法的产生的风险，具有法律滞后性。

2.无人机执法的程序规范不健全

无人机是辅助执法的一种方式，不同于执法记录仪随身佩戴在执法人员身上，因为无人机监控具有流动性和广泛性的特点，便可打破某些条件下的时空限制，助力执法机关增强实施监控的广度和深度，因此必将引发公共利益和个人隐私保护安全的矛盾。

对于执法部门使用无人机执法的条件是什么，违规操作或是违反职责的事件导致的公民财产和生命安全受到危害该承担怎样的法律责任，以及执法机关用无人机执法获取的电子证据效力问题，取证材料是否涉及到保密性、公民的隐私权及行政程序合法性目前都还是一片空白，这些都是需要进一步明确的。

3.内部规范化体系文件缺失

海事小型无人机建设标准尚缺乏。据调查，我国海事系统无人机设备配置主要以厂家推荐为主，尚未形成针对海事巡航执法差异化场景需求的无人机设备配置标准。

海事系统内部无人机应用分级管理体系尚未建立，缺乏专门的管理和操作岗位设置，无人机巡航执法管理体制和运行机制亟待完善。

另外，海事小型无人机日常管养制度尚未建立。目前海事系统无人机应用尚处于起步阶段，海事小型无人机系统的运输存储、保养、维修、保险及配套设施建设等缺乏制度规定和标准规范，极易造成海事无人机应用出现“重建设、轻管养”现象，加剧无人机故障率、降低无人机使用寿命。

（二）缺乏专业执法人员

在实际工作中，由于业务亟需，很多操作人员往往培训不精就草率参与无人机执法操作，给无人机的飞行安全埋下了隐患。即使是考取证件后也没有足够的练习，实战经验不足。并且即使是学习了相关的专业知识，也只是会简单的操纵无人机，不懂得无人机内部的运作原理。因为专业培训缺乏和执法人员对无人机的原理知识、操纵系统不熟悉，会导致操作失误，甚至危害公民的人身和财产安全。要想对无人机进行熟练操作，丰富的理论基础熟练与扎实的业务实践经验操作二者缺一不可。

（三）难以充分实施说理式执法

《行政处罚法》中的第四十二条、第五十五规定，执法人员要二人及以上，行政机关才能进行在现场调查或者进行检查，同时应当向当事人或者有关人员出示证件。执法人员不出示执法证件的，当事人或者有关人员有权拒绝接受调查或者检查。在无人机“非接触性”执法过程中，执法人员不能第一时间出示证件给相关人员查看，无法取得行政相对人的信任。

同时，行政机关在调查、做出决定前，都要告相对人的事实、理由和依据，让相对人参与进来，听取他们的陈述和申辩，对其意见予以考虑，说明其采纳或者不采纳的理由。目前，参与执法的无人机受技术所限只能单方面传递执法人员的意图，无法实时采集行政相对人的陈述申辩，因此不能形成一个执法沟通的良性循环。

另外，在使用无人机进行执法时，虽然有时是基于正当的理由对公民进行执法，但行政相对人无法看见执法主体，无人机也不能及时给予情感上的反馈，两者不能进行良好的沟通，可能会产生抵触情绪，排斥这种执法行为。

（四）行政相对人的权力保障缺失

首先，通过无人机，执法机关可以实现全方位、无死角的监控，使被监控者的行踪曝露在视野范围内。其次，应用无人机的人脸识别、热成像仪等功能，使得在日常监控中，可以将事、人、物结合起来监控，形成数据链条。无人机执法收集的个人信息数据如何处理，若处理不当，会有数据安全隐患，将会造成行政相对人的个人隐私泄露。无人机监控过程中造成公私边界模糊，个人领域空间划分不清，伦理道德之下关于保护个人隐私的规定也遭到冲击，使得侵犯隐私权成为可能。最后，无人机因其机身小巧的特点，具有较强的隐蔽性，在执法时如果不告知相对人正在执法，相对人便会无从知晓，剥夺了当事人的知情权，侵犯当事人的合法权益，故要求执法机关使用无人机执法时应当进行行政公开，让当事人知晓正在实施执行的任务，同时依据所收集的信息做出行政决定的，要将其决定公开，告知当事人理由。

（五）无人机飞行易受外部因素的影响

目前，执法一般配备轻型多旋翼无人机，该类型不但续航时间短，而且在巡航期间，易受到沿岸高楼、过江高压线、桥梁、信号塔等因素影响，容易造成无人机无线通讯信号中断、指南针异常等问题，可能引发无人机失控返航或者坠毁。

五、无人机执法问题的解决方案

（一）平衡好执法和民众个人隐私的关系

无人机用于日常管理和执法监管，其中可能涉及的个人隐私和数据安全，是公众关注的焦点，平衡好执法需求与民众个人隐私保护之间的关系至关重要。

一是明确法律框架，确保合法合规。要判断无人机参与交通执法是否侵犯隐私，关键在于明确执法的目的和手段是否合理合法，因此亟需制定相关法律法规，明确规定无人机使用的范围、条件、限制及违规责任，确保海事部门在利用无人机进行取证时，有明确的法律依据和操作规程。同时，法律还应强调对公民隐私权的尊重，明确界定哪些情况下可以合法使用无人机进行监控，哪些行为侵犯了个人隐私权，对于滥用无人机收集的信息或者将其用于非法目的的行为，应予以严厉惩处。

二是加强技术监管与安全保障。一方面，无人机抓拍并非“一拍了事”，无人机传回的数据，后台还将进行人工辨别，经后台人工审核通过后，才会录用作为证据，最大限度减少误判率。另一方面，对于执法用无人机所收集到的信息，应当建立严格的存储和使用制度，执法部门应采用加密技

术、匿名化处理等手段，确保在收集、存储、传输数据过程中，个人隐私信息不被泄露。同时，建立严格的访问控制机制，确保只有授权人员才能查看相关数据。此外，发展隐私保护算法，自动识别和过滤敏感信息，减少人为干预带来的隐私泄露风险。

三是增强公众沟通与宣贯。海事部门应加强与社会的沟通，通过媒体宣传、执法前发布无人机飞行时间、区域等形式，普及无人机调查取证的目的、流程、限制。同时，建立反馈机制，鼓励公众对无人机使用提出意见和建议，形成良性互动。

四是实施差异化策略，精准查违。在具体执法过程中，根据案件性质、取证要点，梳理出适合无人机取证的案由，高效完成证据固定，避免漫无目的地巡航，浪费无人机资源和侵犯群众隐私。

（二）加强人才培养

加强与高校、科研机构等单位的合作，开展无人机专业人才的培养和引进工作。通过设立专项基金、建立实训基地等方式，为无人机操作人员提供系统的培训和实战演练机会。同时，鼓励和支持无人机操作人员参加专业认证和考试，提高其专业素养和技能水平。

（三）推动技术创新与应用拓展

1.加强技术研发

鼓励和支持无人机技术的研发和创新工作，提高无人机的性能和应用能力。针对海事执法的特殊需求，加强无人机在续航能力、有效载荷、无线通信等方面的技术研发和应用推广。通过搭载对讲、视频等设备，达到与行政相对人面对面的效果，及时做到执法信息互通有无，保障行政相对人合法权益。

2.拓展应用场景

积极探索无人机在海事执法中的新应用场景和模式。例如，利用无人机开展事故调查，其快速响应、全面勘察、高效取证、环境监测以及协同工作等特点为事故调查提供了强有力的支持。

结语

无人机正逐步成为海事执法部门在执法过程中的调查取证的重要工具。随着技术的不断进步和应用场景的不断拓展，无人机将在海事执法中发挥更加重要的作用。海事部门将继续加大投入力度，推动无人机技术的创新与应用，完善法律法规，建立完善的机制体制，为无人机在执法过程中调查取证提供有力的法律依据，为建设海事强国贡献力量。

参考文献

[1]朱敏.公安机关使用无人机执法的法治化研究[D].大连海事大学 2022 硕士学位论文

作者简介：现任台州椒江海事处一级行政执法员；手机：18257642547。

从海事监管角度浅析浙江海上风电建设从沿岸向深远海发展安全风险和建议

庄林锋

台州海事局 浙江省台州市 315000

摘　要：随着我国海上风电从沿岸向深远海快速发展，施工安全风险剧增，安全问题日益突出，给海事安全管理带来巨大压力和挑战。浙江省海上风电产业在全国范围内起步较晚，但发展速度和规模已呈现后来居上的趋势,可是相

应的海上风电海事监管监管机制和配套制度尚不完善，存在较高履职风险。笔者从海事监管的角度，调研梳理了浙江沿岸、近海、深远海风电建设过程中存在的风险，提出一些浅显的建议，希望为“十四五”后期近海风电以及“十五五”期间深远海风电建设提供一些帮助。

关键词：深远海风电；海事监管；安全风险；建议

一、研究背景

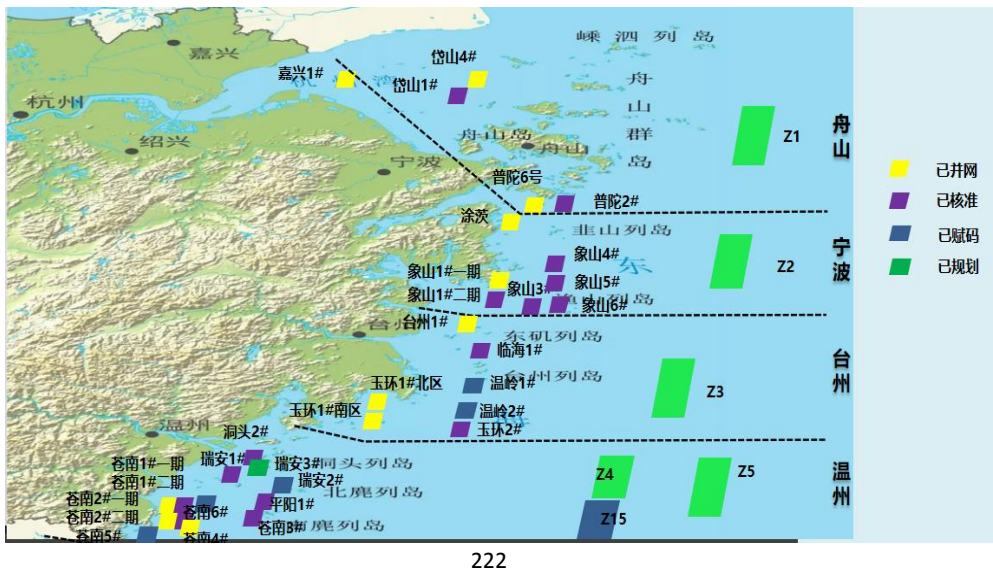
在“碳达峰、碳中和”的目标背景下，海上风电作为新能源的排头兵，正在成为全球绿色低碳技术的制高点，海上风电发展速度呈现越来越快的趋势。从全国来看，“十四五”期间全国海上风电总规划装机超 100 GW。从《浙江省海上风电发展规划 》来看，到2025年，全省海上风电累计并网装机达到600万千瓦以上；到2030年，全省海上风电累计并网装机达到1500万千瓦以上；到2035年，全省海上风电累计并网装机达到2500万千瓦以上。

从海上风电开发区域来看，‘十四五’期间，海上风电项目基本以省管近浅海海域为主，近海海域受海洋生态红线、港口、锚地、航道、军事区、渔业养殖等影响，可用于海上风电开发的海域十分有限。在经历了 2019 -2021 年国内海上风电“抢装潮”以后，20 米水深以内规划的海上风电已基本开发建设。为缓解各方用海矛盾，海上风电逐渐向深远海快速发展。业内普遍认为，水深 30~60m、离岸距离 30~130km 的海上风电项目，将成为“十五五”期间的主流。笔者从海事监管的角度，结合自身工作实际，借鉴学习浙江、江苏、广东等地兄弟海事局海上风电监管经验，梳理海上风电从近浅海水域向深远海海域建设期间的安全风险，提出服务保障海上风电产业发展对策建议，希望为“十四五”后期近海风电以及“十五五”期间深远海风电建设提供一些帮助。

二、建设环境

从建设海域来看，深远海风电较沿岸风电离岸距离较远，水深更大。目前业内对深远海风电存在两个层面的定义。在规划角度，习惯于将我国专属经济区、大陆架及所管辖的领海外其他海域的海上风电项目，看作深远海项目。也就是说，领海基线外 12 海里是领海属省管区，往外 200 海里是国管区，即深远海海域。在工程角度，一般认为水深大于 50m 的为深海，场区中心离岸距离大于 70km 的为远海。

根据《浙江省海上风电场工程规划报告（2021-2035 年）》，浙江沿海领海基线以内风电场 14 个，省管区规划海上风电场 18 个，分布于舟山、宁波、台州和温州海域，规划总装机容量 850 万千瓦，规划海域面积 1080 平方公里，场址离岸直线距离约 23-55 公里，水深 15m-49m。国管区共规划海上风电场 6 个，装机容量 2800 万千瓦，规划海域面积 4424 平方公里。截止 2024 年 7 月，浙江沿海已建成并网发电海上风电场共有 11 个，其中宁波 4 个、舟山 2 个、温州 3 个、台州 2 个，11 个海上风电场共有装机容量 290 万千瓦，使用海域面积 385 平方公里，布置风机 494 台，年发电量超过 100 亿度。



以温州外海的浙江深远海海上风电示范暨信息能源骨干管网试点项目（Z15）为例，总装机规模 200 万 kW，海域面积约 271km，场址中心离岸直线距离约 105km，位于浙江沿海公共航路外航路东侧，水深约 55~67m。

该水域存在风险主要有：①自然条件复杂，施工难度大。该水域常年风力在 6 级及以上，风力 8 及以上天气占比 1/4 以上；水深达 60m 左右，水深较深，施船舶抛起锚困难，如遇风、浪、流叠加的情况，船舶的实际可操纵性较差，控制船位的能力较弱。同时警戒船存在较长时间的巡航警戒，或漂航警戒，或旁靠勘探船舶，人员容易发生精神松懈。②沟通渠道不畅，相互协调能力较弱。该水域航行多为外轮和远洋渔船，施工船舶和此类船舶沟通存在一定难度，加之渔船活动的不规律，渔船碍航等因素导致航经船避让难度较大，增加避让施工水域风险。③监管手段不足，感知体系不完善，施工水域出现看不见、叫不到、管不住、救不及的窘境。由于雷达、VTS、VHF 等海事监管手段未覆盖外海水域，考虑到海巡艇的抗风等级和海事人员实际，很难实现外航路外常态化巡检，需要付出巨大的成本，承担极大的风险。

三、风机发展趋势

单座风力发电系统包括风电机组、风电基础以及输电控制系统三大部分。近年来，从沿岸风电向近海发展的过程中，风力发电机组也正朝着大兆瓦风力发电机组发展，机组容量从最早的 3、6、8 MW 快速跃升至目前的 12、15、18MW，通过采用大兆瓦、大容量风电机组，可以有效降低风电场度电成本，减少风电场占用海洋面积，进一步缓解能源用海和交通用海矛盾。

为支撑起大兆瓦风力发电机组，适应深远海水深条件，海上风电项目基础型式也从多桩承台和单桩向导管架和漂浮式基础演变，且桩径越来越大、桩长越来越长、导管架重量越来越重。海风基础主要包括海塔（塔筒）、管桩、导管架，目前水面以下海风基础按照是否连接海床，主要分为固定式和漂浮式，一般深远海适用漂浮式风机。一般认为，20 米水深以下的海风，使用单桩基础和高桩承台基础为主，20 米-60 米使用导管架基础为主，60 米以上水深以漂浮式基础为主。

单桩基础：是目前海上风电工程中应用最广泛的一种基础型式，主要由钢管桩构成，由桩腿插到海床以下实现固定。单桩基础由于其结构简单、易于建造、无需过多前期准备等特点，是目前中国海上风电应用最广泛的基础类型。以台州 1 号海上风电为例：7.5MW 风机单桩单桩基础水深 在-8m～-14m，单桩直径 7.5m-8.5，桩长 80-102m，最重约 1750 t .

浙江海域风电单桩基础参数

项目	风机容量 / MW	单桩直径 / m	单桩桩长 / m	单桩桩重/ t	单叶片长度	起重船
浙能台州 1 号	7.5	7.5-8.8	80-102	1300-1750	100	宇航起重系列（3200、3800t 全回转起重船）
国电象山 1 号	9.0	7.5-10	75-110	1500-2000	110	宇航起重系列（3200、3800t 全回转起重船）

导管架基础：导管架基础结构因其在深水海域的优势，占比将会逐渐增多，是除单桩基础外，使用最多的类型，适用于 20-50 米水深海域。通常有 3-4 个桩腿，桩腿之间用撑杆相互连接，形成一个有足够强度和稳定性的空间桁架结构。桩腿主要使用小钢管桩，根据小钢管桩和导管架结构施工的先后顺序，分为先桩导管架和后桩导管架两种。导管架式基础安装前，需要首先在海底钻孔，装入导管，之后一般采用整体吊装或滑落入水压载竖立的方式将其安装至预先准备好的导管内，再顺着导管打桩，最后在导管与桩之间浇灌水泥，使其成为一体。以玉环 2 号海上风电为例：16MW、18MW 风机导管架基础水深范围 －36m～ －40m，桩长 89m ～ 104m，单根桩最重约 350-400 t，

导管架重 2200-2550t.

大兆瓦风机基础设计参数导管架参数

项目	风机容量/MW	导管架高度/m	钢管桩桩长/m	钢管桩桩重/ t	导管架重量/ t	叶片长度/m	起重船
华能玉环2号	16	74	89	350	2200	123	华西 5000（5000t 全回转起重船）
	18	76	104	400	2550	126	海建 3000（3000t 全回转起重船）

漂浮式基础： 本质上是漂浮在海面上的平台，利用系泊或锚针在海底进行位置的固定，通过三力的平衡来维持海上风电机组基础结构的稳定性，适用于深远海域风电发展。目前浙江沿海尚未建设和实验浮式风电，笔者了解到的均为试验案例：2022 年我国首个海上浮式风电--中国海装“扶摇号”漂浮式风电装备在平均水深 65m 的广东湛江海域进行试验;2023 年 5 月 20 日，中海油“海油观澜号”漂浮式机组在离岸 136km、水深 120m 的海域完成了安装，并入海上油田群电网。

四、风电建设流程

海上风机的安装工作主要包含 3 个部分：风机基础安装、风机发电机组安装（包括叶片、机舱和塔架等）以及海缆安装；如果是漂浮式风机基础，还包括锚链系统的安装及对接工作。施工期结束以后，风场投入并网运行后，主要是后期消缺、运维和风机故障大部件更换。

（一）大部件运输：风电设备主要有风机、风叶、塔筒、导管架等物件，都属于超重、超长、超高且贵重的大型不可解体构件。其中海上升压站又是海上风电工程中体积最大、重量最重的构件。一般风机部件装船运输方式选用“一船一套塔筒”、“一船两套机舱轮毂”、“一船一套叶片”等方式运输，不同于相对成熟的集装箱、干散货等大宗货物的海上运输，这些大型构件运输船在将大型设备运至风场进行组装具有专业性强、技术要求高、风险大的特点，它是海上风电建设最为关键的环节，是影响施工进度的重要因素，更是许多施工单位安全生产的重中之重。

（二）风机基础安装：

单桩基础由全回旋式起重船配套一个稳桩平台和液压锤进行单桩基础施工作业，基础自重入水后，对单桩基础进行液压锤沉桩桩施工。桩顶标高达到预定高度后，起重船绞锚离开机位，后续单桩基础防冲刷保护等工作由吹填船及运输船完成。如此反复完成所有沉桩作业。部分风场还会进行多作业面同步施工。

导管架基础安装分为基础桩安装和导管架施工。基础桩安装和单桩基础安装使用船舶和施工工艺相同，导管架施工包含下放、对位及安装。根据计算，单个机位的四桩导管架基础桩施工总时长约 72 小时，单个机位导管架安装施工总时长约 24 小时。

（三）风机安装：根据作业特点，可将风电安装船分为漂浮式、坐底式、自升式、自升自航式和半潜式。漂浮式安装船可用于不同水深海域，移动速度快，但作业时稳性较差，尤其当波浪引起船舶运动时，会引起安装部件的运动，给安全作业带来很大风险 ；坐底式安装船在浅水海域虽然适用性较好，但移动速度慢且无法在深水海域使用 ；自升自航式安装船兼具移动速度快、作业水深大和稳定性高等优点 ；半潜式安装船各方面表现均较优异，但租金高昂。目前最常见的风电安装船是自升式（包括自升自航式）安装船。

（四）海缆敷设：随着风电场址距岸越来越远，海上风电海缆路由的长度和施工工期也相应增加。以玉环 2 号海上风电场海缆路由为例，场区中心点离岸距离约 34km，风电场通过两回 220kV 海缆自东向西依次穿越东航路、西航路、沿岸小型船舶航路 3 条公共航路，月均交通流约 10000 余艘。

220kv 升压站至登陆点海缆 2 根长度约 56km，共 112km。66kV 风场内共 8 条回路，海缆总长度 54.6km。预计施工工期约 3 个月，使用万吨级配置 DP1 定位系统，四角侧推的主缆敷设船，配合拖轮、锚艇、警戒船等辅**助船。**

（五）运维管理：目前，无论是海事部门还是业主单位对运维作业的管理都属于粗放型，只关注了运维船舶的“交通”属性，没有考虑风电桩基、升压站的靠泊能力和风电场水域风浪特点，缺少对运维船舶吨级、抗风性能等的要求，低标准船舶参与运维作业突出，易引发水上交通事故。此外，辖区目前投产运营的风电场尚处于质保期，运维作业主要由厂商承担，业主单位更多关注风机是否正常运转，很少对运维船舶进行管理。

五、风险总结

从风险研判角度，笔者将其分为交通运输风险、施工作业风险和其他风险三部分。

（一）海上交通运输风险

①船舶操纵风险：大型构件高度大，特别是导管架和升压站等部件，高度超 20 米，在航行过程中一定程度上会阻碍驾驶员视线；受风面积大，船舶操纵难度大。

②船舶碰撞风险：大部件出运码头基本都在浙江范围以外，多在江苏广西等地，运输航行路线较远，航经的部分水域非正式航道、无助导航标志的复杂水域，在此期间若瞭望疏忽或操纵措施不当，存在较高的船舶碰撞、搁浅和缠绕渔网等风险。同时，施工船舶运输路程长，运输过程增加了附近水域的交通流量，加大了船舶之间的碰撞概率。

③绑扎、系固、配积载风险：绑扎、系固、配积载方案不科学，大部件重量大，对甲板局部压力大，对船舶结构强度要求高，装载不当将严重影响船舶甲板的稳性和强度。造成大部件入海、甲板变形或破裂，未采取正确的绑扎、系固、衬垫等措施，受海上风浪影响，可能会产生移动造成磕碰、损坏乃至滑入海中灭失。

④安全管理风险：大部件运输施工单位缺少完整合规的装载方案或操作规范指引，海上风电大件运输装载方案编制多靠经验，理论依据不够充分，编制的应急预案不完善。公司及项目负责人对选配船、工装布置、绑扎加固、海上航行与运输、风场靠泊整个作业过程，监管松散。码头方与船舶方缺乏有效沟通，信息交互传递不及时，现场工作人员盲目装载，产生安全隐患。

⑤商渔船碰撞风险：浙江沿海是我国传统渔业捕捞密集区，含有舟山、鱼山和温台三大渔场，三条公共航路和一条小型船舶习惯航路贯穿南北，开渔后沿海日均通过商船约 3500 艘次、作业渔船约 15000 艘次。拟建风电场位于东、外航路之间，与三大渔场高度重叠，将严重挤压渔船捕捞作业空间，可能导致渔船进入风场和公共航路内开展捕捞作业，风机和船舶缠绕渔网风险将大幅增加。

（二）施工作业风险

①大型船舶应对恶劣天气风险：此类船舶受风面积大、受台风、强对流大风天气影响大，无自航能力，避风需拖轮协助，操纵能力受限，船舶撤离慢、航行时间长。自升式安装船支腿抛锚对锚地要求高，溜桩、穿刺等风险突出，产生的支腿孔破坏锚地正常功能。此外，浙江沿海避风锚地和待泊水域缺乏规划设置，部分大型无动力施工船需要跨区域防台避风，面临的风险和挑战增加。

②碍航风险：无动力起重船、打桩船工作时抛八字锚，定位锚缆及主牵引钢缆会对航经该水域的渔船、小型船舶具有碍航性，存在船舶碰撞施工船舶、主牵引钢缆及定位锚缆的风险。在风机基础沉桩施工完成、机组及上部构件尚未安装时，受潮汐的影响风机桩基础的出水面可能会被海水淹没或难以被船舶发现，对附近水域通航船舶具有很高的碍航性。

③转卸吊装风险：大件货物吊装对船舶稳性影响较大，引起船舶倾斜，容易引起货物移动，对船壳造成破坏，严重造成船舶稳性消失，船舶倾覆和人员伤亡。而且大件货物的吊装较为复杂，如操纵不当，容易引起人员伤亡，另外，本工程为海上作业工程，风浪流对船舶大件货物吊装影响较大，容易引发事故

④人员管理风险：施工人员数量多，作业工种多种多样，虽然部分人员接受了海上安全培训，但依然缺乏海上实践经验， 人员的素质各不相同，对海上施工风险预估不够。加上海上风电施工过

程涉及单位较多， 各家单位人员归属主体不同，分散于项目不同区域， 管理异常艰巨，部分管理人员以电力行业为主，对海上施工风险预估不足，仍存在抢工期、重生产轻安全的情况。

⑤多作业面相互影响风险：施工期间需投入大量船机设备，船舶管理难度大，施工船在进场、移位及避风期间，多需要采用拖带方式进出施工水域，且施工船舶需交叉、配合作业，施工中可能会出现相互干扰的情况，存在施工船舶之间发生相互碰撞或触碰定位锚缆的风险。

（三）其他风险：

①运维风险：随着已建成风电场区数量的不断增加，运维船舶、运维人次随之大幅上升，但目前浙江尚无运维母港，运维登乘点设施简易，未取得港口经营许可证，运维船舶靠泊、人员上下无法得到安全保障，出海船舶、出海人员无法有效管控，留下水上安全隐患。同时，在港口规划修订时，地方政府未充分考虑海上风电发展对运维母港的现实需求，运维基地、配套码头、运维船舶临时停泊点等未纳入港口规划布局。

②应急救助能力不足风险：海上风电因其特殊性，大型应急救助船艇、救助直升机进入风电场水域受到较大限制，对应急救助要求相对较高。现阶段，辖区缺乏适应风电水域应急救援特点的装备投入和应急救援队伍，海上风电应急救援未纳入地方应急管理体系，各部门间仍存在机制体制壁垒，未形成相互统筹、相互兼顾的“一盘棋”式应急救援体系。

六、建议

海上风电场安全管理是一项系统工程，应强化系统谋划，以长远发展、协同共治和智慧管控为理念，统筹推进产业一体发展和优化升级。基于近海风电场海事监管经验对深远海风电建设提出以下建议：

（一）强化事前预防，统筹海风产业发展与通航安全。海上风电场安全管理是一项长期工程，特别是深远海风电场，建设规模大，工程时间长，对通航安全影响大，海事等部门应注重前期把关，发挥专业特性、进行专业指导、提出专业建议。①指导建设单位做好选址、设计、建设、运营全生命周期不同阶段专项研究和评估，科学客观评估项目实施对通航安全的影响和存在的风险，协调处理好风电场建设与船舶通航之间的关系，优化风电场平面布置方案和海缆路由方案，开展风电场配套防撞、导助航、电子围栏等安全设施配备专题研究，制定相应的保障措施。

（二）强化科技赋能，完善基础设施设备。将基础设施设备配置纳入深远海风场建设必要条件，不断加强风场感知能力、通信能力和新质保障能力建设，督促业主和建设单位按照“三同时”要求配齐配全，实现了海上风电场“看得见、管得住、叫得应、可追溯”。包括①加强气象和海况监测，建议通过购买当地气象部门的气象服务、签订第三方的专业气象服务协议等措施来有效预测和监测施工窗口期。②配套建设 AIS 收发基站、风场雷达、VHF 通信设备、具有夜视、长视距、防爆功能的视频监控（CCTV）等通信和感知设备，确保能够接收、识别、主动探测场区内及周围足够范围内的船舶动态信息，实现船舶 VHF 通话和自动广播功能。③配套网络传输通信设备，通过卫星、微波通信等基础设施设备，确保满足场区周边信号覆盖、电传、数据实时传输，实现相关数据、图片、音频、视频等信息的在“场区—船—岸”间交互。④搭建海上风电安全监管平台，融合雷达、GIS、AIS、CCTV、气象海况、船舶人员动态和风电场产能等数据信息，实现一屏集成、动态一屏展示、人船实时可联和产能实时更新。⑤开展利用风机和升压站开展孤岛生存保障研究，打造海上应急救助站，提高风电场海上突发事故下人员自救及求救的机会。

（三）强化主体责任落实，加强施工安全管理。①完善保障方案。聚焦海上风电施工标段多、大型施工船舶多、施工人员多、分段分区多作业面施工，科学分析不同施工标段、不同施工阶段相互影响，推动合理安排施工组织，科学确定施工警戒、拖轮值守等针对性保障措施。②完善安全管理体系，推动海上风电施工安全风险管控的标准化管理，为海上风电安全作业提供指导，规范作业人员行为，避免或减少海上风电安全事故的发生。③加强人员安全培训教育。提高员工安全意识和辨识危险因素、安全作业、应急处置的能力。④加强船机设备安全管理，根据风电场的气象、海况、

水文地质环境，风机装备的情况选择合适的船舶进行作业，指导施工单位根据不同船舶作业特点针对性地制定安全专项施工方案和应急处置方案。

（四）强化协同共治共享，打造海风综合监管格局。海上风电安全管理涉及多个部门，需各部门协同发力，统筹形成工作合力，实现海上风电多方共管格局。①加强顶层设计。在五部委《关于加强海上风电项目安全风险防控工作的意见》文件基础上，结合海上风电安全监管存在问题，在省级层面研究制定海上风电项目安全管理指导意见、出台海上风电建设运维安全技术标准。②明确各方职责。按照“管行业必须管安全、管业务必须管安全、管生产经营必须管安全”，推动市县级属地政府发文明确海上风电安全监管各部门职责、属地政府职责，实现海上风电多方共管。③健全跨部门协同工作机制。协同谋划海域布局、科学分配用海资源、着重解决商渔矛盾、合力保障建设安全、共同服务投产运维，建立跨部门海上风电联合执法体系，对海上风电建设和营运全周期协同监督管理。④协同提升风电保障能力。推动海上风电集中的县（市、区）政府成立海上风电建设运维安全生产专业委员会，定期研判海上风电安全形势，一体化推进运维母港建设、应急救助能力、避风待泊水域划定等工作，同向发力提升海上风电保障能力。

参考文献

1.《深远海风电，“十四五”蓄力正当时 》作者：赵靓 来源：风能
2.《海上风电工程施工安全管理现状与对策分析 》作者：黄辉；徐浩；胡红亮；胡华宾；周国兴；张强 来源：水电与新能源
3.《海上风电开发 基础选型先行 》作者：杨润思 来源：国信证券
4.《海上风电工程施工安全管理现状与对策分析 》作者：黄辉；徐浩；胡红亮；胡华宾；周国兴；张强 来源：水电与新能源
5.《海上风电通航安全自主监控系统及应用》 作者：李剑锋 来源：实验室研究与探索
6.《海上风电项目中导管架基础施工技术综述》 作者：田伟丽 来源：中国港湾建设
7.《重大件货物海运市场现状和未来发展趋势 》作者：陈矗立 来源：世界海运

作者简介：庄林锋，台州海事局指挥中心四级主办，从事通航管理及水上水下活动和作业审批许可2年，基层海事处水工现场监管5年。手机号码：13736670572，邮箱 642827198@qq.com。

浅谈涉海工程疏浚与吹填中的安全管理

杨俊[1]，曾渊[2]，王宽[2]

（1 浙江头门港投资开发有限公司，浙江 台州，317015；
2 台州市港航事业发展中心，浙江 台州，318000）

摘 要:本文以浙江省临海市某涉海港口工程疏浚与吹填施工管理为背景，从安全问题分析、建立安全保证体系、健全的安全管理制度、海上作业安全管理措施、纳泥区安全管理措施等方面进行了阐述，突出了项目安全管理特点，保障了工程建设的顺利完成。

关键词:涉海工程；疏浚；吹填；安全；管理；措施

1 工程概况及特点

项目位于浙江省临海市以东海岛，通过吹填疏浚泥和宕渣填筑形成陆域面积约 38 万 m^2。本工程共设置两个吹填区，通过一艘 3500m^3/h 绞吸船进行施工作业，根据陆域纳泥区可纳泥量分别接收港池和航道试挖槽疏浚泥约 165 万 m^3；其中，港池疏浚泥 71 万 m^3，航道试挖槽疏浚泥约 94 万 m^3。

沿吹填区边线布置临时围埝，全长约 1950m，局部利用永久堤坝。临时围埝内外坡坡比 1:1，顶宽 1.5m，沿旱地用含泥量高的宕渣填筑，分两层回填，围埝内侧铺设一层复合防水土工膜然后采用袋装土护坡，同时考虑到吹泥管的拆装方便，采用山皮石铺设埝顶路面。

工程在疏浚过程中需要根据疏浚区和吹填区疏浚泥的使用量调整疏浚船的工作水域，同时港池疏浚区紧邻一期运营码头，而航道试挖槽疏浚区为渔民习惯捕鱼区，因此项目实施过程中面临着非常大的外部和内部安全管理压力。疏浚船移位和作业，调整疏浚吹填管路，适时移动纳泥区吹填管口，陆域纳泥区周边的安全维护等，更是工程建设期间安全管理过程中的重要环节。

2 常见的安全问题

2.1 安全管理制度不完善

目前，在港航项目安全管理过程中，制度相对单一，没有科学完整的管理体系。众所周知，安全管理工作需要投入大量的资金，但是在实际管理过程中施工单位却总是会有意无意地削减安全生产费用资金投入，导致安全技术和设备的缺乏，严重影响了安全管理的质量和水平，同时也因此会引起安全隐患。因此，各参建单位要将安全责任落实到人，通过监督体系建设，完善安全管理制度和切实可行的保障措施，并予以实施，从而提高安全生产水平。

2.2 人员缺乏安全教育

虽然各级政府和企业都很重视安全生产,但是港航项目的施工现场大多为“放下锄头就是工人”的体力输出型作业人员，他们的主要特点是人员流动大、普遍知识水平不高、对事物的接收能力较一般、安全意识较薄弱，因此安全教育经常性存有落实不到位的情况发生。同时，随着近些年建设市场的快速发展，参建单位的安全管理人员业务水平也存有一定的不足，导致培训的人员和内容覆盖面缺失，即使有教育培训大部分也是人员分散的、内容浮于表面的、形式泛泛的、培训时间短等，收效甚微。导致大部分参建人员并不能很好的了解安全生产，缺少对安全隐患的认知和重视，无法将安全生产落实在日常工作中，只有发生了安全事故了，大家才会意识到安全生产的重要性。

2.3 作业人员工作量大

港航作业为劳动密集型产业，施工人员每天需要从事大量的体力劳动，工时也会相应增加，施工人员往往会缺乏休息，在一定程度上降低了工作效率，同时也会因身体疲惫发生不可预见的安全事故。

3 安全管理工作

3.1 准备工作

项目施工单位进场施工前，参建单位需要落实以下工作：

（1）参建单位要结合设计文件进行现场调查

对工程当地的气温、降水、风况、雾况、雷暴、台风等气象条件，潮位特征、波浪等工程水文，地形地貌、地质构造等工程地质资料进行收集，并对项目情况进行充分了解。

（2）完成因施工而影响到渔民等利益的政策处理工作

如渔民习惯捕鱼作业区、习惯性航道的占用，捕鱼设施的拆除，因航道改变涉及到的临时码头以及施工导致捕鱼作业的暂停等等需要与渔民协调的工作。

（3）完成通航安全评估

根据国家海事局颁布的通航安全评估管理办法，结合项目现场情况，编制相关评估材料，并完成通航安全评估。

（4）办理水上水下活动许可证

根据交通运输部发布的相关管理规定，及时办理水上水下活动许可证，加强与地方海事部门的

联系，结合海上施工作业对相关区域的影响，及时发布航行通告。

3.2 建立健全安全保证体系

各参建单位分别成立施工安全管理机构，并结合企业的内控管理设置领导小组具体实施相关工作，明确项目负责人为第一责任人，签订安全施工作业责任书，落实安全生产责任制。各单位结合项目规模配足配齐安全管理专职人员，坚持“管生产必须管安全”、“管基建必须管安全”、“管技术必须管安全”、“管经营必须管安全”、“管业务必须管安全”的“一岗双责”的安全施工生产管理理念，各司其职，各负其责，认真落实各级安全生产责任。

3.3 健全安全生产管理制度

（1）危险源安全评价制度

施工前，施工单位结合项目施工特点对可能的危险源进行辨识，编制重大危险源台账，必要时邀请咨询单位编制项目施工安全风险评估报告。施工单位结合风险评估报告和重大危险源，编制有针对性的专项预防和专项措施方案，按照风险程度组织方案审核后指导项目建设过程中的安全生产。

（2）安全责任书和保证金制度

要求施工单位与作业班组、设备负责人签订安全责任书，参建单位项目负责人与业主单位签订安全责任书，各级明确安全责任层层落实安全职责。业主单位鼓励施工单位与班组间落实安全保证金制度，从而强化施工单位对班组尤其是对船舶设备的管控力度，通过安全保证金的扣罚以约束班组在施工生产过程中的不安全活动。

（3）方案的编制和实施制度

监理和业主单位结合项目施工组织设计的总体部署和预控措施，对施工单位编制的各专项施工方案进行可行性审查，必要时组织专家论证，结合专项方案内容提出针对性的安全管理要求和安全措施；同时在专项实施过程中严格把控安全管理的实施情况并及时予以纠正；当现场作业偏离原预定方案时，及时分析原因，同时对方案进行调整经有效的审查后，重新予以实施。

（4）严格落实海上设备和人员进、出场制度

所有进场船舶等海上设备须证件齐全，足额配备合格船员以保障船舶运行安全，船上消防、救生等应急设施齐全，满足现场施工安全要求，同时按照海事部门要求办理相关准入手续。所有涉水作业人员根据岗位要求持证上岗，落实人员登记和考勤制度。

（5）安全技术交底和培训制度

根据危险源辨识情况和全体作业人员的岗位要求，分别进行安全技术交底和相关安全技术业务培训，使全员明白所从事工作的安全风险和注意事项，通过对项目的了解和培训使他们掌握自救和互救的基本方法，从而减少或避免安全事故发发生。

（6）应急预案制度

施工单位根据项目特点编制海上落水、吹填区落水、生活工作区消防等应急预案并联合码头运行单位开展应急演练。通过应急演练，提高作业人员的安全意识，强化遇险自救、互救的能力。

（7）其它安全管理制度

在施工过程中，要求参建单位定期开展安全例会，并根据项目特点和各自的职责出台相应的安全管理制度（如：安全检查、例会、消防管理、培训、安全费使用、应急救援、安全事故处理、环保问题处置等制度），并对照制度开展日常工作，同时加强安全管理过程中的人员沟通，使现场从业人员从被动管理向主动管理转变，从而有效管控施工过程。

3.4 落实海上作业安全管理措施

（1）标识标牌及航行公告

开工前，主动联系地方政府和海事部门，根据施工需要落实作业干扰避让措施，设置必要的标识标牌，发布航行公告，在习惯航道和渔民作业区公示施工船舶作业和对周边海域的影响作业范围，其公示内容包括：本次作业的警示标志、吹填管线浮标、施工船舶锚缆浮标的警示位置和周边影响范围等。

（2）施工期协调

为了应对作业过程中复杂的渔民协调问题，提前做好与渔民的解释工作和宣传工作，必要时租赁警戒船在施工船舶和渔船之间协调，同时借助政府力量协调不配合施工管理的渔船。

（3）施工船舶警示防护

海上施工船舶在白天悬挂作业信号旗帜，夜间安全要求设置警示信号灯。

（4）码头前沿作业警示防护

在码头前沿施工时，相邻码头已建成运行，为防止附近工作船只误入不明水域，现场在已施工水域和未施工水域的分界处设置警示旗和警示灯相结合的警示设施。

（5）试挖槽作业警示防护

在航道试挖槽施工时，因该区域为渔民的习惯捕鱼区同时也是他们的习惯性航道，他们的船只行动比较自由加上施工船会不定期的变换通航位置，因此需要设置引导过往船只的指引标志，指引标志应醒目、简洁、易懂。同时对所有吹填浮管设置禁行指示灯和指示旗，所有沉管必须满足附近渔船在最低潮位时的通行，并在沉管的下沉过渡段设置禁行指示灯和指示旗以及满足当地渔船防撞要求的防撞浮筒。

（6）无关船舶的停泊管理

在疏浚施工期间，港池和航道试挖槽水域均不允许与工程无关的船舶停泊，通过警示旗和警示灯圈出范围，并结合警戒船、交通船和扩音设备警示和劝离施工区域停泊的船只，防止船舶在退潮后发生倾覆事故。

（7）配备交通船

疏浚施工过程中，使用交通船负责接送安全人员及其他作业人员，并作为海上船舶的有关设施的日常检查用船。

（8）配套设备管理

施工船舶在做好浮管管线、锚缆和锚的警示工作的同时，对不使用浮管应及时拆除，或移至安全水域并设置警示灯，对完成作业的船舶应及时撤离工作水域至指定停泊水域，以确保周边船只和生产作业安全。

（9）通信设备

由于是近海施工，手机等无线信号均可正常使用，因此在施工过程中，施工单位配备专人通过手机和对讲机相互联系并及时解决作业过程中遇到的问题。

（10）应对恶劣天气

联系气象部门定制头门海域信息，施工期间及时关注气象变化，同时与海事、应急管理等部门建立预警机制，与地方政府加强恶劣天气期间的联防联控，坚决杜绝恶劣气象条件下的作业事故发生。

（11）安全演练

根据船舶设备危险源识别，及时组织安全演练（如：人员落水、溢油、失火等），通过逼真的事故模拟，让参建人员从理论到实践学习，提高他们应对突发实践的能力。

3.5 纳泥区安全管理措施的落实

（1）交通卡口管理

吹填纳泥区位于二期工程陆域，紧邻已投产一期码头工程并连接着通往陆地的疏港公路（国道），须在二期工程和一期工程间设置硬质隔离措施不准施工人员和生产人员混入，同时在进出疏港公路的便道口设置隔离防护卡口，杜绝与工程无关人员进入陆域施工区域。

（2）人员、设备规范作业

围埝施工机械设备及车辆证件齐全、安全装置有效，在规划道路上行驶并做好道路维护工作，作业人员区分岗位持证上岗，现场设置专人指挥。

（3）纳泥区周边防护

纳泥区周边设置安全警示标志，在围埝上设置专门通往埝顶的通道并设置卡口。在纳泥区出入口、排泥口及两个纳泥区间的道路醒目位置设立安全警示标志及通知、通告，并在低矮围埝顶设置硬质隔离网，从而达到提醒和杜绝闲杂人员禁止进入施工现场的目的。

（4）纳泥区作业安全管理

纳泥区作业开始后，通过肉眼巡查和沉降观测两种方式定期检查围埝安全稳定情况，同时在移动吹泥管口位置和开展其他需进入纳泥区的作业时，配置必要的观察人员，同时在纳泥区安装视频监控设专人管理，避免遇险盲区，遇到危险时做到及时响应。

（5）纳泥区工后安全管理

吹填施工完成后，纳泥区周边防护措施不得撤离，各卡口在杜绝工程无关人员进入的同时，纳泥区视频监控专人管理工作需继续落实，定期组织人员（2 人及以上）对纳泥区的围埝稳定进行巡查。以上工作持续至纳泥区消除人员溺亡风险后终止。

4 结语

随着国家海洋经济建设的大力发展，港口建设步伐也将不断加快，疏浚吹填作为港口建设的一个重要环节，其安全管理也将受到越来越多的关注和重视。我们在吸取建设管理经验成果的同时，要积极探索新的、有针对性的、可行性强的管理措施，完善和落实好项目建设过程中的全面安全生产管理工作，顺利推进港口安全建设。

参考文献

[1] 张冠群,曹煜.浅谈港口与航道工程施工中的安全管理工作[J].科技创新导报,2018N0.34:16-17.
[2] 叶凯,徐金龙.关于港口与航道工程施工及其安全管理工作的分析[J].城市建设理论研究:电子版,2018(1):36.
[3] 邵一娟.基于航道工程施工要点及安全管理研究[J].居舍,2017(20):133.
[4] 陈军.关于港口与航道工程施工及其安全管理工作的分析[J].门窗,2017(9):206.
[5] 岳科伟,王帅军,李子涛.浅谈疏浚工程安全管理[J].科技风,2012,12:268.

作者简介：杨俊：男，1985 年 10 月，浙江临海，浙江头门港投资开发有限公司，工程技术部副主任，港口航道，浙江省临海市头门港经济开发区北洋九路 66 号，317015，0576-85171066（固话），18257661088（手机），105791088@qq.com

台州市水运工程建设档案管理工作中存在的问题和对策探讨

林 盈

（台州市港航事业发展中心，浙江 台州，318000）

摘 要：文章阐述了水运工程档案管理工作的专业性、系统性等特点，介绍了台州市水运工程“十三五”建设发展成就和“十四五”规划建设情况，分析了水运工程建设档案管理工作中存在的问题。最后提出了四条对策措施：加强政策宣贯提高工程参建各方的认知，完善管理制度明确职责建立标准，加强从业人员培训工作提升素质素养、以数字赋能提升档案管理工作效能。可为类似档案管理工作的效能提升提供参考。

关键词：台州市；水运工程；档案管理；对策措施

0 引言

水运建设项目文件材料一般是从项目立项审批（核准备案）至竣工验收过程中直接产生的，交通运输部 2009 年 6 月 8 日印发的《关于印发水运建设项目文件材料立卷归档管理办法的通知》（交办发[2009]225 号），水运工程建设项目档案管理提出系统的要求，涵盖工程管理、维护及改建和扩建等方面内容。

水运工程档案是对水运建设过程的真实记录，能够真实反应水运建设全过程及各个活动的真实情况。水运工程档案在建设期，是施工单位施工的工作依据，是监理单位对水运工程建设的质量、进度控制的依据；在竣工验收期，是行政主管部门对水运工程质量监督部门验收的依据；在水运工程投入使用后，是运行管理部门调度运用和维修养护工程的依据；是发生争议时，双方责任认定或举证的重要依据；是类似水运工程建设时，提供参考经验，避免重复工作，节省资金的经验参考依据。因此，水运工程档案在水运建设和管理中具有非常实用的价值。

1 水运工程档案管理特点

1.1 水运工程档案的专业性

水运工程档案涉及港口、航道、船闸等多个专业领域，其中防波堤与护岸有与水利的海堤密切相关，台州的部分渔港工程有纳入水运工程质量监督，是多技术，多工艺的综合运用，因此档案管理的内容及种类相对繁杂。项目实施要经历筹备、开工、实施、竣工验收等多个阶段，涉及到发改、海事、港航、海洋、水利、消防、环保等多个部门，积累的档案复杂多样、专业性强。

1.2 水运工程档案的系统性

水运工程本身就是一个复杂的系统工程，从水运建设准备阶段的立项、审批、勘测、设计到施工、监理及竣工验收等资料复杂且内容繁多，这些环节联系紧密，缺一不可。水运工程档案也必然将这些资料有机组合一起，形成一个配套齐全的系统档案，因此水运工程的档案具有较强的系统性[3]。

2 台州市水运工程建设发展概况

2.1 台州市水运工程“十三五”建设情况

“十三五”期间，台州市港口基础设施建设进一步提升，累计完成投资 62.65 亿元，新增码头泊位 12 个，其中万吨级以上泊位 2 个，新增设计年通过能力约 1300 万吨/年。建成乐清湾进港航道一期工程，并完成该航道正常性养护。建成头门港区一期码头改扩建工程、头门港区二期工程、大麦屿港区多用途码头一期工程等重大项目。截至 2020 年底，拥有通用散货、集装箱码头和客滚码头等共 197 个码头泊位，其中千吨级以上泊位 88 个，万吨级泊位 11 个，最大靠泊能力 10 万吨，通过能力 6809.3 万吨，集装箱通过能力 41.3 万标箱。

表 1 “十三五”台州水运工程投资统计表（单位：亿元）

年度	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	合计
投资额	11.85	14.5	14.6	14.5	7.2	62.65

2.2 台州市水运工程“十四五”规划建设情况

规划实施项目 41 个，总投资 88.39 亿元；规划预备类项目 23 个，总投资 174.65 亿元。重点完善头门、大麦屿、海门、健跳、龙门、黄岩等港区基础设施，新建码头泊位，打通进港航道等集疏运通道。

航道方面：重点推进新建头门港区进港航道一期工程、大麦屿进港航道养护工程、龙门港区南航道疏浚工程等项目。码头方面：重点推进大麦屿 LNG 储运项目、多用途码头、头门港区油品码头、龙门港区多用途码头、健跳港区现代港口物流基地及材料产业园码头工程等项目。

3 台州市水运工程档案管理中存在的问题

随着台州市水运工程的大量开工建设，水运工程档案管理的作用和重要性也将得到显现，充分

分析档案管理中存在的问题，将会有力保障工程的建设和管理养护，服务地方社会经济的发展。对于民营经济发达的台州来说，项目建设单位往往只重视工程建设质量和进度，容易忽视档案管理的重要性，档案管理工作中存在的问题相对较多。

3.1 参建各方对档案工作重视程度有所欠缺

水运工程建设过程中，参见各方往往对质量、安全、进度、造价比较注重，对于档案管理的工作重视程度不足。“档案资料后补”成了行业普遍。该行为反映出来的本质问题是制度和程序上的不规范，严重的话会因过程资料不完整造成返工或者重新鉴定等情况，反过来会直接影响工程的质量和进度。

3.2 水运工程档案标准化程度低

水运工程档案在产生、收集、整理和归档的过程中标准化程度不高。工程参建单位之间存在沟通不足、理解偏差等情况，以至于工程档案兼容不高；同时水运工程档案的形式具有多样化特征，有文件、图纸、图表、声像等形式。工程档案该以何种形式归档未完全明确，如工程技术人员和档案管理人员之间未进行充分沟通，会致使工程档案形式上混乱。

3.3 水运工程档案人员缺乏

由于人员和经费等原因，很多单位没有专门设立档案管理部门，专职档案管理人员。同时由于水运工程有较强的专业性，需要既懂水运工程专业技术，又懂档案业务的档案管理人员，这样的复合型人才是非常缺乏的。

同时由于水运工程对比公路工程来说工期较短，还存在一个档案管理人员管理多个项目的情况，档案管理人员只负责资料的整理归档，与工程技术人员缺少沟通，导致对工程的具体实施过程掌握不足，一定程度上存在施工过程和工程档案资料两张皮的现象。

3.4 信息化程度不足

近几年企业对档案信息化管理的重视程度有虽有一定的提高，但仍存在很多不足，比如数字化开展不及时、不全面，没有专门的档案数字化软件等等。

3.5 水运工程档案资料存在真实性模糊现象

部分档案资料该是原件的不是原件，或者是临时在档案专项验收前开始收集的，缺少当事人签字，就采用补签或代签等。签字不规范、影像资料缺失、归档不及时、甚至遗失等情况在检查验收过程中经常出现，直接导致工程档案的真实性上的偏差，从而降低了档案的可使用价值。

4 对策措施

4.1 加强政策宣贯提高工程参建各方的认知

结合工程的开工核查、日常检查、专项检查等全过程检查，大力宣传工程档案的重要性和规范性，引起工程参建各方在思想上加以重视，并落实到实际管理工作中去，从工程建设一开始就进行建章立制加以规范，像管理工程一样去管理档案，避免事后弥补、弄虚作假等现象发生。通过一到两年的规范管理，树立起台州市水运工程档案管理工作的模板样板，并加以宣传，树立起赶学比超的氛围。

4.2 完善管理制度明确职责建立标准

完善的档案管理规章制度，是做好水运工程档案工作的保障。认真贯彻实施新《档案法》，研究学习国家档案局颁发的《国家重大建设项目文件归档要求与档案整理规范》和交通部颁发的《水运建设项目文件材料立卷归档管理办法》，从立项开始知道项目竣工的全过程，制定一整套符合工程建设实际的档案管理制度和统一标准，并明确各方职责。

4.3 加强从业人员培训工作提升素质素养

近年来，水运工程管理的制度、规范等不断更新，随之而来的是工程档案整理归档的要求也发生了一定的变化。针对新情况新问题，需要进行统一标准[5]，可通过培训教育的形式来进行规范，避免“仁者见仁、智者见智”的现象发生，提升台州市水运工程档案工作的规范化、标准化工作水平。在准备阶段，可对档案管理工作人员进行专业系统的培训，使得更全面地掌握档案管理知识；

在工程建设过程中，定期邀请档案专家培训、指导，不定期组织档案管理人员积极参加档案部门组织的培训[6]，参观学习优秀单位的档案等形式，增强档案管理人员的责任感，从而提升档案管理水平

4.4 以数字赋能提升档案管理工作效能

充分利用现代化设备和网络技术，尝试建立全过程档案的数字化管理模块，将建设、施工、监理、设计、检测等工程参见各方的工程档案资料通过 App 或小程序等形式进行串联起来，直接让水运工程的档案资料已数据的形式跑起来，提高工程档案工作的效率、提升工程档案的真实性，避免档案遗失、后补等现象发生。同时可以直接调用档案资料，提高档案的利用率和利用水平，直接服务工程建设过程。

5 结语

时代在变化，我们水运工程档案管理工作的方式方法也在慢慢发生变化，要提高台州市水运工程档案管理工作的水平和效率，需要学习其他地区、其他行业的先进经验，并在此基础上制定出适合本地的具体管理办法和制度，建立起水运工程档案管理的体系，提升数字化应用的水平，将会更好地服务于台州市水运工程项目的维护与管理，一定程度上可以降低今后的运营成本，提高台州港口的竞争力水平。

参考文献：

[1] 陈平,田勋.水运工程施工档案管理刍议[J].珠江水运,2023,(20):32-34.
[2] 邵涵.浅谈优化水运工程监理竣工档案资料管理的措施[J].四川劳动保障,2024,(04):135-136.
[3] 呼爱琴,李军.加强水运建设工程档案管理的一点认识[J].陕西档案,2005,(03):33.
[4] 陈碧霞.水运工程档案管理工作若干问题的思考[J].档案管理理论与实践-浙江省基层档案工作者论文集,2014,(00):114-117.
[5] 聂琴.水运工程项目档案标准化[J].中国水运,2014,(01):50-52.
[6] 胡志富.找准水运工程档案管理提质切入点[J].建材与装饰,2016,(33):145-146.

作者简介：林盈：（1987.10），女，浙江黄岩，科学教育，本科，馆员，台州市港航事业发展中心，从事港口管理相关工作，台州市椒江区江滨路 46 号，318000，联系电话：13777669295，E-mail：2061672067@qq.com

无人船的应用前景分析

潘颢杰

台州椒江海事处 浙江 台州 318000

摘　要：本文综述了无人船在航海业中的发展历程、应用前景及面临的挑战。随着科技的不断进步和海洋强国战略的推进，无人船作为未来航海业的重要发展方向，正受到业界的广泛关注。文章首先回顾了无人船的发展历程，从国际社会的早期探索到我国无人船研发的重要进展。随后，文章详细阐述了无人船在远海运输中的诸多优势，包括满足极端环境航行、降低运行成本、提高航行效率、保障海员生命安全以及提升世界航运效率等。然而，无人船的应用也面临着航线开辟、船舶设计等方面的挑战。为此，文章提出了相应的建议，强调了加快北极航线测绘探索、提升船舶设计水平等措施的重要性。通过本文的探讨，旨在为未来无人船在航海业中的广泛应用提供参考和借鉴。

关键字：无人船、自动化、航运效率

引言

纵观人类波澜壮阔的航海史，每一次的进步都源自于航海人的不断探索与科技进步，步入 21 世纪，在科技兴国、海洋强国的国家战略下，运用无人船在航海业也成为了业界关注的重要课题。无人船，即通过大数据、互联网、人工智能等综合运用，让船舶能够实现部分的自动化或者完全的自动化，能够自动感知周边水域气象情况并自动设定航线，能够对全船各设备的运作进行控制，进而施加自动的加减速、舵效进行自动航行，还能够发现、观察来船，并与之配合实现默契的自动避碰。无人船有着自身的优越性，是未来航海业发展的必然趋势，当下业界关于无人船的探索也在如火如荼的展开中。

一、无人船的发展历程

纵观国际社会，早在 2005 年，欧洲就开始开发内河航运综合信息系统，研究如何将信息、通信、电子、计算机处理等技术运用到内河航运系统中。2016 年，英国罗尔斯罗伊斯公司就提出了无人船自主航行船，且取得了一定的成效。2016 年，美国军方研究世界最大的无人船“Sea Hunter”号，该船没有远程操纵系统，岸基人员远程发出指令，无人船自行进行智能判断做出完成该项任务的反应。至 2019 年 6 月，美国军方继续加大对于无人船的投资，提出要实现以无人舰船替代部分有人舰船满足美国海军发展要求。

韩国三星重工、大宇造船等在 2009 年开始就探索将信息技术运用到船舶中，并在 2011 年建成了世界上第一艘只能船，直至 2015 年获得了近 200 艘智能船订单，交付了 104 艘。日本的知名船社三井航运公司在 2017 年提出了开发无人远洋运输系统的计划，并联合了日本多个国家级机构单位和知名企业参与其中。

2017 年，我国国务院在《新一代人工智能发展规划》中强调了无人船的发展。2018 年 11 月，由外高桥造船为招商轮船建造的 40 万吨智能超大型矿砂船（VLOC）“明远”号命名交付。这是我国“无人船 1.0 研发专项”的首艘示范船，是全球最大的无人船。2019 年，中国电子科技集团第 36 研究所打造的江浙首艘无人船下水。

二、无人船在远海运输中的应用展望

无人船在远海运输中具有诸多优势，正是这些优势，让无人船被认为是未来航运业的发展趋势。

（一）满足任意极端环境下的航行

无人船首先免去了对人员的考虑，只需要关注各项电子元件、机械设备的工作环境，这也就让无人船能在极端炎热、严寒的区域顺畅航行。如近年逐步开通的北极航道航行中，如果应用无人船，将大大减少极寒气候的干扰。其次则是因为不需要考虑人员的作业、生活，船舱可以设计为完全封闭，这将让船舶对大风浪的适应能力更强，更难以倾覆。

（二）运行成本低、效率更高

普通的远海船舶在航行中，首先在设计上要考虑大量人员生活、作业等需要，要专门设计各类的生活区、通道、作业空间，要配备各类的饮食、水源等。而无人船则可以免去对生活区、通道等的设计，也不需要储备太多的饮食、水源。其次是普通船舶为了满足船员随船作业，不得不牺牲船舶运力，而无人船则不存在这方面的牺牲顾虑。最后是普通船舶需要支付大量的人力资源开支，而无人船则可以省下这些开支。这些都意味着无人船的运行成本更低、效率更高。

（三）保障海员的生命安全

无人船对海员生命安全的保障主要表现在两方面，一方面是无人船可设计为封闭式，外人无法打开，这也意味着无人船在航行中能大大避免海盗的侵扰问题，广大的航海人的生命安全也得到了保障。再一方面是无人船采取电脑控制，由智能化的程序来完成自动的航线规划、航速控制、避碰操作，这大大避免了船舶航行中人为因素导致的事故。

（四）提升世界航运效率

在无人船的发展中，我国也在整体推动 5G 网络、人工智能等的发展，随着未来无人船的成熟，

各船舶的航运活动将能被纳入到智能化的中枢系统中，由人工智能的方式对辖区内的船舶运输活动进行控制，这能有效的减少船舶的空载率。尤其也让船舶与码头、与其他运输车辆的衔接效率大大提高，整体世界航运效率也将得到提升[1]。

三、无人船的应用挑战与建议

无人船所具有的诸多优势不言而喻，但也必须要看到在我国无人船的应用发展中还面临着若干的问题。

（一）航线开辟方面

一直以来，对航线的设计中需要考虑到沿途大风浪的问题、极端气候的问题，而随着无人船的应用，这些方面的影响大大降低。如近年逐步开通的北极航线，在个别时期时存在极寒影响，这种影响让北极航线的开通还十分有限。随着无人船的应用，势必需要将北极圈纳入到航线的考虑中，这需要我国航运业加快对北极航线的测绘探索，要增强卫星覆盖，尽早的获取详实的北极航线资料，为我国的无人船应用提供充分的参考。

（二）船舶设计方面

无人船相较于普通船舶有着巨大的不同，免去了大量船员跟船，意味着在无人船的设计中需要考虑怎样提升运力、减轻能耗、提高安全性。这将对业界的船舶设计工作带来巨大考验，必须要能够立足于无人船的特点出发，要紧密围绕无人船的功能性、实用性着手进行设计。要摒弃原先一些因为“人”而产生的先进经验，转变思维，更多的考虑如何保证各项电子元件设备的正常运行，如何确保对外的接发天线能清晰准确的传递接受信息等等。

（三）海员专业能力

有一些海员对无人船产生了担忧，认为会到广大海员失业。实际上广大海员应当关注的是积极学习转型，无人船在先期的应用中依旧需要船员进行远程遥控，依旧需要在码头的接驳作业。但广大船员必须要转变思维，围绕无人船的发展趋势来学习提高，加深对无人船的了解，积极探索各类软件、程序、电子系统的运行逻辑和原理，从而在无人船的大潮中依旧有自己的光明前景。

（四）改进监管方式

现行国际社会对船舶的监管主要是围绕有人船为主，而无人船的应用也势必会对目前的监管方式方法带来冲击，因此要适当的改进监管方式方法。如以往对船员的监管，更改为对船舶航迹信息数据的监管，要推动国际无人船控制中心数据互通监督。在监管方式上，从海事巡逻艇登船检查、码头登船检查等，转变为岸基检查为主，主要包括监控中心直接实时的监控各无人船是否正常航行，监管岸基中心是否正常开展工作。这需要监管中心重点采用信息化的方式去监管在航的船舶，同时将富裕的人力用于码头的检查工作[2]。要进一步深化“陆海空天”一体化水上交通运输安全保障体系的建设，把握数字化变革与互联网技术应用的发展趋势。目前在我国各地区海事部门的管理工作中以及在推进技术革新、管理创新、服务创效等举措，这也势必能有力的推动我国海事监管工作更加契合无人船的发展趋势。

结语

总之，无人船是航运业未来再发展的关键焦点，这是值得每一个航海人所关注的。科技强国、海洋兴国，每一个航海人在当下的新时代中都肩负有重要的职业责任，应当积极的了解、参与到无人船的发展中，为中国的航海事业发展贡献出应有的力量。

参考文献

[1]郭胜童,徐凯,彭宜蔷.全球智能船舶及规范发展动向[J].中国船检,2019(04):29-34.
[2]封波,智能船舶发展战略规划研究[J].船舶工程,2020,42(03):1-8.

作者简介：中国海事台州椒江海事处，一级行政执法员；手机：13073816766。

生态护岸在台州航道养护工程中的应用

王宽[1] 刘瑶[2] 郑念念[3] 赵新宇[1]

（1 台州市港航事业发展中心，浙江 台州，318000；
2 浙江省环境科技有限公司，浙江 杭州，310013；
3 郑念念 台州市水利工程质量与安全事务中心，浙江 台州，318000）

摘 要：在航道工程建设过程之中，传统护岸在结构形式和材料选择上过多的追求防洪功能和岸坡的安全性和耐久性，忽视了生态环境的保护和水土保持。基于“人水和谐、回归自然和可持续发展”的生态建设理念，生态护岸已经成为航道养护建设的新趋势。文章主要对生态护岸在台州内河航道养护建设工程中的应用情况进行了介绍，期望对后续台州内河航道养护建设提供参考。

关键词：传统护岸；生态护岸；航道养护；航道建设

为了积极的响应浙江省水运发展“十四五”规划，结合大运河国家文化公园和全省四条诗路文化建设，以“回归自然生态、塑造活力水岸、拥抱地域文化”为理念，台州市持续推进以航道养护和景观建设于一体的“美丽航道”建设，将航道打造成周边村镇居民活动、休闲、游玩的活力滨水景观带。基于“人水和谐、回归自然和可持续发展”的治理理念，生态护岸已经成为台州内河航道养护建设的新趋势。

1 台州内河航道现状

台州市域内河流众多，共有航道 102 条，航道总里程 1007.19km。通航航道 96 条，通航航道总里程 993.01km，其中四级以上航道 64.69km，六、七级航道 217.67km，七级以下航道 710.65km[3]。台州市内河航道主要分布在温黄平原和椒北平原，主要航道包括椒（灵）江、永宁江、金清新港线等干线航道和栅温线、七条河航线、黄路金线、温松线、前四线等重要支线航道。

台州市内河运输均为货物运输，运输货种主要是建材、煤炭、水泥等散、杂货种，另外有少量的农资物品和日常生活用品。货运量主要集中在椒（灵）江、金清新港线、永宁江、栅温线、黄路金线、温松线、七条河航线、前四线等几条干线和重要支线航道上，并通过一般支线航道将货物疏散到台州市域的各个村镇。

椒（灵）江、永宁江、金清新港线等干线航道已经有完善的工程措施，航道等级可以达到航道的定级等级。七级以下航道由于缺乏资金投入，扶持程度不够，使航道的部分航段缺乏相应的疏浚、治理和养护，造成航道狭窄、线形弯曲、水深较浅，通航能力低，致使航道逐年萎缩，影响了航道的通航能力，造成内河运输发展缓慢，运量下降，降低了内河水运竞争能力。

2 生态护岸的概念和分类

2.1 生态护岸的概念

生态护岸是以河流生态系统为中心，以创造良好的河道环境和自然景观为前提，融合水利工程学、环境科学、生物科学、生态学、景观学等多个学科，集安全性、稳定性、景观性、生态性、自然性和亲水性于一体的综合型河道护岸[1]。

2.2 常用生态护岸的分类

传统护岸为满足河道的防洪、排涝、通航等功能，多以混凝土、浆砌块石、预制块等人工材料为基础，建设硬质护岸，割裂了土体与水体的自然联系，不利于生态环境的发展；生态护岸最大限度的保持了护岸的原始状态，或者说模拟护岸的原始状态，在满足护岸稳定、安全的前提下，又可以满足生态性和景观性的要求。

生态护岸根据对岸坡的处理形式分为自然型护岸和复合型护岸[2]。

2.1.1 自然型护岸

自然型护岸多见于河岸开阔、岸坡土体稳定性较好、水流冲刷较小和水位变化不大的河段，基本无硬质材料工程措施，在河岸和岸坡上种植水生植物，通过植物固土护坡，仅根据需要在坡脚处抛填块石护脚。

2.2.1 复合型护岸

复合型护岸是将松木桩、块石、钢筋混凝土、混凝土预制块或金属箱笼等天然或人工材料与植被种植相结合，可以增强岸坡稳定性和抗冲刷能力，同时具有一定的生态性、景观性。复合型护岸一般用于水位变化较大、河床不平整、河流存在冲刷的河段。河流冲刷相对较弱的河段，多采用木材、石材等天然材料进行护底，上部铺设生态袋种植水生植物的护岸形式；河流冲刷较大的河段，多采用浆砌块石、钢筋混凝土、金属箱笼等人工材料进一步辅助增强植被护岸的抗冲刷能力，常见的有多孔种植混凝土、混凝土生态窝、三维植被网、连锁混凝土砌块等形式。

3 生态护岸在台州内河航道建设中的应用

近年来，我市积极争取上级财政资金补贴，充分应用地方财政和水利、交通等相关部门的资金，并与美丽航道、清廉航道、旅游航道建设相结合，积极开展航道养护建设，力求通过先行试点建设，以点带面，全面推进台州内河航道建设。下面就代表性的两种生态护岸形式的应用进行简要介绍。

3.1 自然型护岸建设

自然型护岸建设代表性航段为前四线美丽航道养护项目。前四线起于前所升船机，经椒江北区和洞港水系，途经椒江区的前所、章安、临海市的杜桥、上畔、机诸等乡镇，终于三门县泗淋乡洞港闸，全长 39.26km。该航道是椒北平原内的一条重要航道，属于台州市内河“二江六线”之一，航道定级等级为七级航道。目前该航道全线均未达到七级航道标准，通航能力较差，两岸基本为原始护坡。

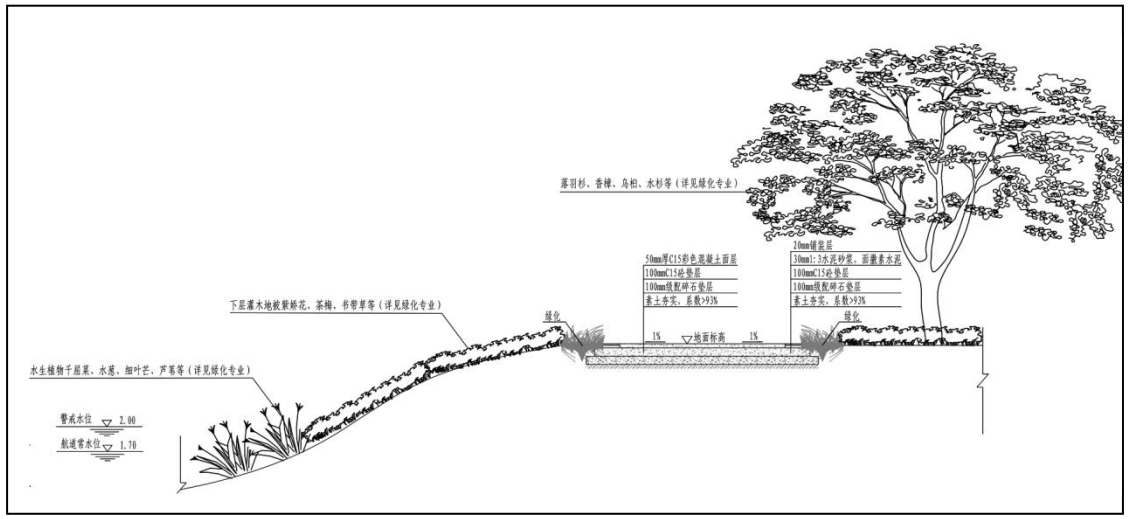


图 1 斜坡式护岸典型断面图

前四线美丽航道养护项目位于临海市桃渚镇，按内河限制性七级航道标准建设。工程对前四线航道连盘村和万安村航段进行养护建设，建设护岸长度 816m，绿化面积约 1.1 万 m^2，工程建成后，航道底宽达到 16m，最低通航水深 2m。护岸的设计充分考虑了河道的安全性和生态性，首先要满足抵御洪水和防冲刷的要求，保证河岸能够抵御洪水和波浪等影响而免受进一步侵蚀，防止水土流失；在充分考虑了安全性的前提下，尽量使人工护岸的硬朗线条柔和化、生态化，为各种植物创造适宜的生存条件，建立完善的水体生态系统。根据航道两侧现状护岸条件的不同和使用情况的不同，本工程护岸共采用两种形式：直立式护岸和斜坡式护岸。直立式护岸总长 123.4m，适用于航道后方设置景观平台、台阶、文化娱乐广场等设施的航段，护岸主体结构由 250mm 厚 C25 素混凝土底板、M15 浆砌块石墙身、C25 素混凝土压顶组成，墙后回填土方，碾压夯实。斜坡式护岸总长 693.1m，适用于航道两侧后方临岸侧未设置景观平台的航段，为自然草坡入水航段。岸顶建设彩色混凝土步道。

斜坡式护岸顶部为彩色混凝土步道，间隔设置路灯、休息座椅、文创雕塑和航道宣传标语等。迎水面下层灌木地被设置茶梅、紫娇花、书带草等，常水位及以下标高处设置水生植物千屈菜、水葱、芦苇、细叶芒等。护岸后方绿化带种植落羽杉、香樟、水杉等乔木，地面铺设草皮，如图 1。

前四线美丽航道养护项目以“创建万里美丽经济交通走廊”为指导思想，以“修一条路，造一片景，活一方经济，富一方百姓”为创建理念和目标，是响应全省发展旅游、创建港航行业美丽航道的要求，在桃渚镇连盘村和万安村段开展的试点建设项目，以“回归自然生态、塑造活力水岸、拥抱地域文化”的设计理念，努力将其打造成周边村镇居民活动、休闲、游玩的滨水景观带，以达到美化航道两岸环境、改善周边村居条件的目的，同时可以提高村民对航道保护重要性的认知度和满意度。

3.2 复合型护岸建设

复合型护岸建设代表性航段为栅温线标准航段建设项目（浃里陈大桥至古宅徐桥航段）和椒江区三条河航段标准化养护项目。栅温线起点为椒江区栅浦闸，经过椒江区葭芷街道、洪家街道、路桥区的路南街道、峰南街道、温岭市泽国镇、横峰街道，终止于温岭市区太平街道大桥头，全长 41.17km。其中椒江区境内 10.88km，椒江与路桥界河段 0.88km，路桥境内 8.99km，温岭市境内 20.72km。河道宽度为 23～35m，水深为 1.8～3.0m，航道定级等级为七级航道。目前该航道达到七级标准的航段 29.40km、八级标准航段 12.07m，航道状况较差的主要集中在椒江区和路桥区航段，具体表现在河道中间水深不足，航道底宽达不到标准。三条河航线位于城市中心腹地，起点为椒江区岩头闸，终点为青龙浦，航道里程 13.69km，河道现状宽度 19-25.5m，为内河限制性准七级航线，主要通航 50 吨级以下船舶。目前该航道现状通过能力较低，船舶流量较少，两岸为原始护岸，不能满足路桥、温岭等地的运输需求。

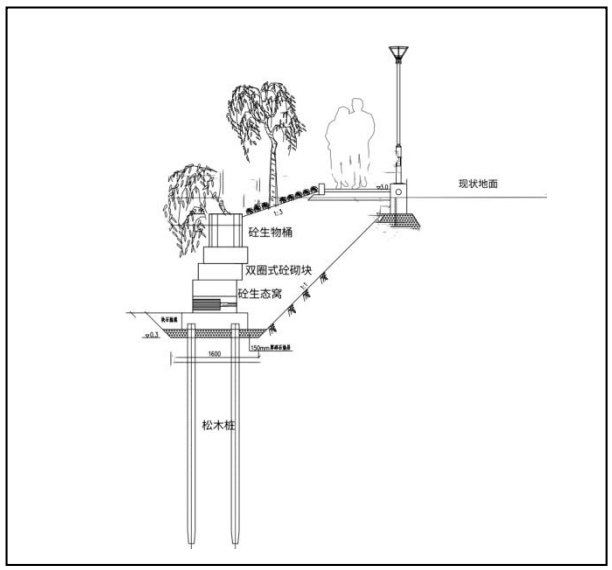


图 2 复合型护岸典型断面图

栅温线标准航段建设是对栅温线通航能力较差的浃里陈大桥至古宅徐桥航段约 1.3km 进行养护建设，按内河七级航道标准实施，工程建成后，航道底宽达到 16m，最低通航水深 2m。椒江区三条河航段标准化养护项目对四甲海保浦到回龙庙 1#桥之间的航段进行养护建设，按内河限制性七级航道标准实施，全长 920m，建设护岸 748m，绿化提升 1300m^2，工程建成后，航道底宽达到 12m，最低通航水深 1.5m。两条航段养护建设工程措施基本相同，采用航道疏浚、生态护岸建设与岸后景观绿道布置相结合的方式。护岸采用预制块体进行砌筑，底板下设置直径 140mm、长 6m 的松木桩进行地基加固处理。基础前采用抛石回填护脚，底板采用 300mm 厚 C30 现浇钢筋混凝土，其下设置 150mm 碎石垫层。底板上依次放置 C30 水泥砂浆砌筑的预制生态窝、双圈式混凝土砌块和混凝土生物桶砌体，在生物桶砌体中填种植土，种植云南黄馨等植物。墙后 1：3 边坡每隔 5m 间隔种植垂柳、桂花

等，底面铺设种植沿街草。绿化与绿道间采用路缘石进行分隔，绿道顶面采用 80㎜ 厚 C20 彩色透水混凝土，其下设置 150㎜ 水泥稳定碎石垫层和 150㎜ 碎石垫层，回填土夯实。路边间隔设置路灯、休息座椅、文创雕塑和航道宣传标语等，如图 2。

栅温线标准航段建设项目和椒江区三条河航段标准化养护项目的实施，能有效拓宽航段的通航宽度和通航水深，提高航道的通航能力，有效保障船舶的通航安全，充分发挥了内河航道运量大、运价低、污染少、占地少、投资省的优势，对路桥、温岭等地的建筑材料需求起到一定缓解作用；工程的实施增加了河道的过水断面面积，提高了河流行洪能力及两岸的防洪标准，是提高区域防洪减灾能力的有力保障；同时在航道两岸形成景观绿道，很好的改善了周边的环境、美化了城市岸线风景，促进人水和谐，有效助力沿线旅游经济发展和城市品质提升，增加了城市竞争力。

4 生态护岸在台州内河航道应用前景

台州市内河众多，纵横交错，具有良好的水路运输发展基础，形成了完善的干支成网、江海通达的内河水运网络。由于水路运输具有运量大、投资省，对环境影响小等特点，适宜于大宗低值散货的运输。但是我市七级以下航道整体的治理、养护水平偏低，航道通航能力较弱，在《台州市航道及锚地规划》中也提及，要以经济效益和环境保护相统一的原则，多形式、多渠道筹集建设资金，加快内河航道建设，提高内河水运竞争能力[3]。

生态护岸集工程性、生态性、环境性、景观性等功能于一体，是内河航道建设应用的大趋势。在台州大力推进生态护岸在航道养护建设中的应用，不但可以提高航线航道的通航能力，提高区域的防洪能力和水土保持能力，也是改善周边环境和美化城市岸线风景，促进人水和谐，增加城市竞争力的重要举措之一。未来台州的内河航道将是一幅“水清、岸绿、河畅、景美”的生态画卷。

参考文献

[1] 李焯然,江洧,李仟等.河道生态型护岸研究进展[J].广东水利水电,2019,(04)：20-23+29.
[2] 杨仲军.生态护岸在航道整治工程中的应用[J].华东科技:学术版,2014 年第 6 期，166+170.
[3] 浙江交通勘察设计院有限公司,台州市港航管理局,《台州市航道及锚地规划》（2006 年-2020 年）.

作者简介：王宽(1983-),女，硕士，工程师，水工结构工程，台州市港航事业发展中心，从事水运工程质量安全监督工作，电话：13634007656，通信地址：台州市市椒江区江滨路 46 号，邮箱：52551669@qq.com

《安全生产法》在海事监管领域适用研究

奚圣达

台州椒江海事处 黄岩海巡执法大队 浙江台州 318000

摘 要：2021 年 9 月 1 日，修订后的《安全生产法》正式实施，赋予了更多的监管方式和执法手段，但该法在海事监管领域实际适用不多，本研究旨在讨论《安全生产法》在海事监管领域适用的可行性以及具体适用的情形，从而进一步加大对海上违法违章行为的打击力度，全面保障海上安全形势持续稳定。

关键词：可行性、新理念、安全生产主体责任

近年来，浙江辖区海上安全形势严峻，海上交通事故时有发生，严重威胁着人民群众生命和财

产安全，与人民群众对海上交通安全新秩序的期待存在较大差距。2021 年 9 月 1 日，修订后的《海上交通安全法》《安全生产法》正式实施，对海上交通安全监督管理提出了新的更高要求，并赋予了更多的监管方式和执法手段。2022 年 4 月，国务院安委会制定部署《安全生产十五条措施》，进一步强化安全生产责任的落实，要求坚决防范遏制重特大事故。海事管理机构作为《安全生产法》规定的负有安全监督管理职责的部门，应进一步加强对《安全生产法》的适用研究，切实扭转海上安全形势，确保海上交通安全、有序、畅通。

目前，基层海事依据《安全生产法》开展监管，多集中在该法第 65 条第（四）项，对未持有船舶检验证书的船舶、非法参与海上运输的内河船以及三无船等实施强制扣押，对其他执法手段运用不足，未能充分发挥《安全生产法》对海事监管工作的支撑作用。

一、《安全生产法》在海事监管领域适用的可行性

从法律关系上看，《安全生产法》第 2 条规定，在中华人民共和国领域内从事生产经营活动的单位（以下统称生产经营单位）的安全生产，适用本法；有关法律、行政法规对消防安全和道路交通安全、铁路交通安全、水上交通安全、民用航空安全以及核与辐射安全、特种设备安全另有规定的，适用其规定。据此对于涉及海上交通安全的条款，《安全生产法》与《海上交通安全法》是一般规定与特别规定的关系，当《海上交通安全法》对相关事项有规定时，此时应适用《海上交通安全法》，无需再考虑适用《安全生产法》。当《海上交通安全法》对相关事项无规定时，此时应适用《安全生产法》。

从适用对象上看，《安全生产法》第 10 条第 3 款规定，应急管理部门和对有关行业、领域的安全生产工作实施监督管理的部门，统称负有安全生产监督管理职责的部门。《海上交通安全法》第 4 条第 2 款规定，国家海事管理机构统一负责海上交通安全监督管理工作，其他各级海事管理机构按照职责具体负责辖区内的海上交通安全监督管理工作。因此海事管理机构应当认定为负有安全生产监督管理职责的部门。

因此，海事管理机构可以且应该适用《安全生产法》进一步加强海上交通安全监督管理。

二、《安全生产法》相比《海上交通安全法》的新理念、新要求、新方法

（一）提出了“三管三必须”原则。《安全生产法》提出坚持人民至上、生命至上，把保护人民生命安全摆在首位，并提出管行业必须管安全、管业务必须管安全、管生产经营必须管安全的“三管三必须”原则。

（二）强化了安全生产主体责任。一是提出了生产经营单位应当建立健全全员安全生产责任制，企业主要负责人应严格履行安全生产第一责任人职责，并明确了安全生产管理人员等其他对象的安全管理职责。二是要求生产经营单位构建安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防体系，强调安全生产关口前移，从隐患排查治理前移到安全风险管控，健全风险防范化解机制。

（三）丰富了对违法行为的监管手段。一是赋予了负有安全生产监督管理职责的部门吊销有关证照，实施职业禁入，降级，撤职，责令停产停业，违法行为公示等多种手段。二是针对拒不改正情形，规定对生产经营单位被责令改正且已受到罚款处罚的，可以按日连续处罚。三是针对安全生产领域“屡禁不止、屡罚不改”等问题，规定对违法行为恶劣的生产经营单位可以提请县级以上人民政府予以关闭。

（四）规定了对责任事故的履职调查。明确了对于生产安全责任事故除了应当查明事故单位的责任并依法予以追究外，还应当查明对安全生产的有关事项负有审查批准和监督职责的行政部门的责任，强调“有权必有责”，要谨慎用权、严格审批、严加监管。

三、主要适用情形及相关工作建议

（一）指导和监督航运企业落实安全生产主体责任

《安全生产法》第 3 条、第 4 条规定航运企业应当强化和落实安全生产主体责任，建立安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制，健全风险防范化解机制。航运企业是生产经营活动的主体，应当主动落实安全生产主体责任。海事管理机构对海上交通安全负有监督管理的职责，应当指

导和监督航运企业落实安全生产主体责任。

1.以责任清单形式压实航运企业主体责任。一是梳理并制定航运企业安全生产主体责任清单，对清单内容逐条明确监管措施、岗位人员。二是通过公司审核、船舶审核、公司检查等方式指导和监督航运企业落实责任清单要求，加强岸基支持和预警监控，海事管理机构可与航运企业签订安全生产主体责任承诺书，督促航运企业主要负责人严格履行安全生产和防污染工作第一责任人职责。三是推动航运公司开展覆盖全体人员的安全生产培训。将外包、劳务派遣等人员与企业员工纳入统一管理，定期开展安全生产知识和业务培训，全面提升人员安全生产技能和安全生产意识。

2.全面落实构建双重预防体系要求。一是明确航运企业应将构建安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防体系的要求纳入本企业安全管理体系管理，实施动态监控。指导航运企业摸排企业安全风险底数，优化防控措施；督促航运企业严格落实船舶安全检查制度并组织船舶开展船舶安全检查，全面排查船舶事故隐患并及时消除，加强前端管控。二是制定双重预防体系审核标准，将双重预防体系构建情况作为安全管理体系审核重点内容，对存在的问题开具不符合项，并要求立即整改。

《安全生产法》规定的责任主体包括生产经营单位，主要负责人，安全生产管理人员，直接负责的主管人员和其他直接责任人员等，以上表述需要与航运企业内部责任主体一一对应，方可依据《安全生产法》落实安全生产责任。

3.明确航运企业内各责任主体。《安全生产法》中的生产经营单位对应海事领域的船舶所有人、经营人、管理人，包括自然人、法人、其他组织。主要负责人对应航运企业的董事长、总经理以及实际控制经营的自然人等。安全生产管理人员对应航运企业分管安全生产的负责人、海务部门、机务部门、安全与防污染管理人员以及具体承担安全管理职责的人员等。直接负责的主管人员和其他直接责任人员对应航运企业分管安全生产的负责人、安全与防污染管理人员以及具体承担安全管理职责的人员等。

（二）加大对违法行为的处置力度

《安全生产法》赋予了负有安全生产监督管理职责的部门吊销有关证照，实施职业禁入，降级，撤职，责令停产停业，违法行为公示、按日连续处罚、提请关闭等多种惩戒手段，并对多种《海上交通安全法》中未规定的违法行为明确可实施行政处罚。

4.适用《安全生产法》对海事违法行为实施处罚。对于三无船、内河船非法参与海上运输等严重违法行为，适用《海上交通安全法》实施处罚后，还应当充分考虑适用《安全生产法》赋予的按日连续处罚、职业禁入、提请关闭等惩戒手段予以严厉打击。若船舶所有人、经营人均为自然人的，此时对该自然人应当分别视为生产经营单位，直接负责的主管人员和其他直接责任人员实施处罚。

（三）运用“说理式执法”推进违章缺陷整改落实

《安全生产法》从公司管理的角度要求航运企业、主要负责人等对象严格落实安全生产主体责任，《海上交通安全法》则侧重于某一具体违法行为的责任人员，当前基层执法中释法说理对象经常为公司委托的经办人员、责任人员等，释法说理的效果不明显。因此需进一步完善释法说理机制。

5.完善释法说理机制。一是拓展释法说理对象。将释法说理对象从船员、公司委托的经办人员向航运企业主要负责人、安全与防污染管理人员等延伸，通过约谈、电话、邮件等形式，详细告知违法事实情节、违反的法律法规、造成的危害后果等内容，帮助正确认识并及时改正。二是发放安全管理建议。对于屡次违章、被滞留或者发生海上交通事故的船舶，应当向航运企业或其主要负责人发放安全管理建议书，要求在公司内部就相关问题开展全面排查，限时反馈安全管理建议落实情况。对安全生产主体责任落实不到位的航运企业，应约谈其主要负责人，提醒和告诫相关安全生产问题，督促落实安全生产责任。

《安全生产法》规定了航运企业、主要负责人等违法对象应当积极改正违法行为，其中有 11 条规定了对逾期未改正的处罚情形，有 2 条规定了对拒不改正的处罚情形，大幅提升了违章未纠正的成本。《海上交通安全法》仅在第 106 条规定了对碍航物的所有人、经营人或者管理人逾期未改正时可以实施代履行。违章缺陷“查而不纠”存在着较大的安全风险和履职责任风险，因此应适用《安

全生产法》加大对违章情形未纠正的打击力度。

6.严格推进违章缺陷整改落实。一是关注整改落实情况。指定专人及时跟踪航运企业及其所属船舶对安全管理建议以及违法行为、缺陷、不符合项的整改落实情况，严禁船舶“带病”航行。二是严惩未按规定改正。对于航运企业或船舶逾期未改正的，应当实施行政处罚，并责令航运企业停产停业整顿或者责令船舶停止航行作业。船舶有未改正前逃逸、抗拒执法等拒不改正情形的，依照要求按照原处罚数额按日连续处罚。对有《安全生产法》第 113 条规定情形的，海事管理机构应当提请县级以上人民政府对航运企业予以关闭，做到规范一批，整改一批，取缔一批，从整体上提高航运企业安全管理水平。

（四）严格执法刚性要求及海事执法决定的跟踪落实

《安全生产法》第 87 条规定了对生产安全责任事故应追究法律责任，体现了权力与责任并存的理念。水上交通事故大多是责任事故，海事管理机构一旦履职不到位即面临着失职追责的风险，因此海事管理机构要全面加强海上交通安全管理，确保履职尽责。

7.全面依法履行海事监管职责。一是严格落实上级执法刚性要求。梳理水上交通安全监管责任清单，强化水上交通安全监督检查，重点关注涉客涉危船舶，紧盯各类违法行为不放，督促企业彻底整改，坚决整治执法检查“宽松软”问题。二是严格落实海事执法决定。对发现的违章行为、船舶缺陷、不符合项以及发放的安全管理建议，督促航运企业及时整改落实，对未按规定整改的要进一步落实惩戒措施，确保相关执法决定得到贯彻执行。三是严肃事故调查和责任追究。按照“四不放过”原则，严格开展事故调查工作，查明事故事实和原因，认定事故责任。对于不认真履行职责，发生水上交通事故的，要严格追究监管责任。四是梳理行政审批事项。要对涉及水上交通安全的行政审批事项开展定期评估，对基层接不住、监管跟不上的事项要及时研究解决。

参考文献

[1]刘晓笛，杜聪.推动安全生产目标、责任、措施“三落实”[N].中国应急管理报，2024（0627）.
[2]骆涌，尚海龙.论厘清安全生产“综合监管”和“行业监管”的关系——以政府规制体制变迁为视角[J].行政与法，2024（2）.
[3]李瑰华，党志慧.“生产经营单位”的概念怎么界定[J].劳动保护，2023（11）.
[4]张洋洋.跨部门安全生产综合监管的几点思考[J].现代职业安全，2023（10）.

作者简介:现任中华人民共和国台州椒江海事处黄岩海巡执法大队副大队长，手机:15068690515，邮箱,13433016272qq.com。

关于如何推动港内交通艇规范化发展的研究
--以台州三门港为例

卢红运

台州三门海事处 318000

摘　要：近年来，随着台州海洋经济发展，港口贸易、船舶修造等产业发展迅速，重点涉水工程陆续上马，港内涉及舾装辅助、人员交通、物资补给等港口配套作业服务需求激增，与合法合规交通艇运力不足的矛盾日益突出，并带来擅自使用“三无”船、人员超载、恶劣天气冒险开航等隐患。本文以台州三门港港内交通艇的治理为研究对象，对标客渡船安全管理标准，以构建完备合规的港口基础服务体系为目标，探索实践港内交通艇监管“合、堵、引、

管”工作法，推动港内交通艇迈入规范化良性发展轨道。

关键词：关键词：交通艇；规范化；集约化；责任

一、台州三门港交通艇治理前状况

（一）缺乏正规的交通艇。台州三门港初期并无正规交通艇，均是无证的“三无船”和“渔业辅助船”或是船舶修造企业内自建的自用船，因船舶条件以及成本等原因要么无法通过船舶检验，要么通过检验后维护成本高，船东均选择逃避检验和监管的方式持续使用这些无证船舶，这就导致安全隐患持续发展和长期存在。

（二）监管责任不明确。权责交织，这些无证的“三无船”、“渔业辅助船”、“自备船”涉及多个涉海执法部门，包括沿海乡镇政府，但是并无明确的牵头部门对于上述无证交通艇实施整治，而考虑到当前地方海洋经济发展又存在现实需要，一旦“一刀切”的全部取缔却无法在短时间内补齐足够的合规运力，进而导致监管部门举棋不定，无法彻底消除隐患。

（三）发展无序，恶性竞争。正规交通艇与无证交通艇竞争劣势明显，本身正规交通艇在建造过程中就需要更多的成本，运营期间需要保持正常配员等也需要更多成本，而“三无船”、“渔业辅助船”、“自备船”无需考虑这些，因此他们的运营成本也就更低，针对正规交通艇的加入，其可以进一步压低价格，导致交通艇经营困难，甚至主动退出市场，这就导致正规交通艇的发展无以为续。

二、海事部门采取的对策及成效

（一）突出“合”字，传导压力，强化协同。在深化兼顾发展与安全的认识共识上，迅速行动，形成齐抓共管合力。一是思想重视。以处置信访件为契机，局处协同多次走访相关船厂及乡镇调研排摸实情，阐明“三无船”“渔业辅助船”参与人员交通安全隐患和责任风险，提出安全管理建议，倒逼船厂企业直面运力需求，进一步明确沿海乡镇“三无”船、纳规船管理属地责任，坚定彻底解决问题的决心，形成整改整治共识。二是迅速借力。通报并推动三门县政府统筹考虑港口发展与港内交通艇配套，明确走“建设正规交通艇，规范港内交通艇管理，从根本上消除安全隐患”的路径。同时，发挥三门县海上安全委员会实体化运作的平台效能，强化海事、港航、渔政、公安海防、乡镇等合力，着力构建港内交通艇规范协同治理新格局。

（二）突出“堵”字，露头就打，严治发力。严厉打击不合规船舶参与港内涉客运输，挤压非法生存空间，净化港区通航环境。一是露头就打。明确无论是“三无”船，还是渔业辅助船，擅自改变用途从事艏装辅助、涉客运输作业的一经查实，立即联合乡镇予以拆解处置。将“三无”船非法搭客作为执法处置重点，有力发挥海事日常“远程+现场”的监管优势，以及涉海职能部门、相关乡镇执法联勤联动的机制作用。2023 年共联合乡镇等查扣 22 艘，拆解 10 艘，移送 22 人，行政拘留 7 人。二是承诺践诺。约谈并推动辖区船厂、水工业主单位承诺自觉抵制使用“三无”船、渔业辅助船等不合规船舶运送人员，对发现的违法船舶责令主动拆解并视频留档海事存证，并鼓励向海事举报提供线索。

（三）突出“引”字，提升运力，解决供需。探索有为政府与有效市场的良性互动。一是明确长远规划。引导鼓励修造船厂发挥自身技术资源优势，实施新建专用交通艇计划，从长远上满足自身港口辅助生产作业所需，并适时为其他船舶提供人员接送服务获取适当经济收益。二是明确过渡办法。推动船厂购置、租用有证合规船舶作为临时过渡方案，补充非合规交通艇被取缔后，以及新造交通艇建造时间空档的运力空白。经协同治理，2023 年初，浙江铭飞造船有限公司购置拖轮 1 艘，租用交通艇 2 艘。目前，该公司和浙江新洲造船股份有限公司共完成 3 艘交通艇的建造、检验、备案等工作，并投入使用。三是明确合规流程。要求交通艇须依法经船检检验发证，由海事办理登记并发证，由台州市港航予以备案；船上操作人员须经培训和考试合格并取得相应适任证件。

（四）突出“管”字，严把关口，夯实责任。按照“船舶适航、船员适任”最本质的要求，做好日常监督管理。一是严把入场关。组织开展交通艇专项安全检查，重点详细检查救生设备、航行

设备、动力装置等情况，强化船员消防、应急、救生、主要设备等实操检查。积极协调船员培训机构开展教育培训，督促按要求配备适任船员。二是严把开航关。实施港内交通艇清单化管理，要求值班员准确掌握交通艇营运区域、锚泊水域、备案用途、抗风等级等。指导船东规范落实交通艇进出港报告制度。突出恶劣天气海况预警预控，加大对交通艇预警信息落实情况核实，重点关注并严格限抗风等级航行、超载、超备案用途等活动。三是严把营运关。联合三门港航、船级社召开港口辅助作业船舶安全和防污染会议，宣贯海交法、港口法、船舶安全监督规则、港口经营管理规定等法律法规，要求所有人和经营公司压实安全和防污染主体责任，规范经营用途，严格按照备案水域和备案项目提供服务。突出交通艇营运期间现场检查与远程管控相结合，责成全程开启 AIS 设备，实时掌握交通艇动态；增加检查频次，严防船舶带病航行，杜绝超规定区域航行。

目前，三门港区已有 8 艘交通艇完成港航备案，正常运营 7 艘，涉及港口服务企业 7 家。活动相对固定分布在蛇盘水道 4 艘、健跳江 2 艘、浦坝港水道 2 艘。

三、推动港内交通艇规范化发展的后续建议

（一）业主单位应进一步履行好安全生产主体责任，结合船舶状况和辖区实际加快建立健全安全与防污染制度、乘客信息登记制度等持续提升自身安全水平。

（二）地方政府则进一步担起属地责任，做好安全与发展之间的平衡，并结合港口开发开放，以构建港口基础服务体系为抓手，适时规划建设港口服务公共码头。同时，积极对港口辅助配套实施集约化管理。

（三）海事等执法部门应进一步发挥共享共治理念，坚持人命安全至上的原则，结合丰富的监管经验和参照客渡船监管模式，探索形成交通艇日常监控、安检、现场监督等长效管理机制。同时，警惕防范井喷式市场发展初期带来的无序经营、恶意竞争等现象，同步高度关注队伍廉政风险和执法责任风险。

四、结论

水上交通安全涉及广大人民群众的交通出行，作为监管部门要特别重视交通艇的规范化管理，因此这就需要监管部门创新思路，突出“合”、“堵”、“引”、“管”四字诀积极协同各涉海部门共同引导和打击，进一步培育和扶持港内正规交通艇的合规化和良性发展，才能更好的为港区海洋经济提供坚实的安全基础。

作者简介：卢红运，台州三门海事处四级主办，联系电话：18858665607，邮箱：598627539@qq.com。通讯地址：台州市椒江区白云山西路 26 号。

新形势下台州航运业高质量发展的建议

陈柯

台州市港航事业发展中心，浙江 台州，318000

摘 要：党的二十大报告明确作出“发展海洋经济，保护海洋生态环境，加快建设海洋强国”重要部署，台州作为中国沿海城市之一，想要在“经络海洋、向海图强”中实现高质量发展，必将离不开航运业的加持。本文通过深入分析台州航运业当前发展优劣势和面临的机遇与挑战，进一步找准发展主赛道，为台州航运业在海洋强国战略背景下实现高质量发展提供建议参考。

关键词：台州航运业；高质量发展；海洋强国

0 前言

航运业高质量发展是经济双循环的战略通道，这不仅关乎我国经济双循环生命线的建设，也是经济双循环的安全保障。党的十八大以来，习近平总书记在更广泛的视野上对航运业进行谋篇布局，规划“海洋强国、航运强国”建设。台州作为向海而兴的城市，台州航运历史悠久，通过分析自身的竞争优势、劣势、机遇及挑战，有助于发掘出符合台州航运发展的路径和模式，为高质量发展贡献具有鲜明特色的台州航运元素。

1.优势分析

1.1 航运基础扎实

截至 2023 年，全市共有 97 家水路运输企业，在册船舶 320 艘，共 541.1 万载重吨，运力规模稳居全省第三位。平均吨位达 1.7 万载重吨，超全省整体水平（1.3 万载重吨）。航运企业主要经营范围为国内沿海省际普通货船运输，重点往返于秦皇岛、连云港、天津港、上海港等港口；油化船主要流向广东深圳方向；国际航运主要在东南亚海域航行。全市完成水路货运量 1.3 亿吨、货物周转量 1774.2 亿吨公里，占全省总量的 10.9%、15.4%，位列全省第三，仅次于宁波、舟山。根据交通部印发的《2023 年中国航运发展报告》显示，台州的一家民营航运企业（浙江协海集团有限公司）船队规模名列全国第八、全省第一，综合实力国内领先。

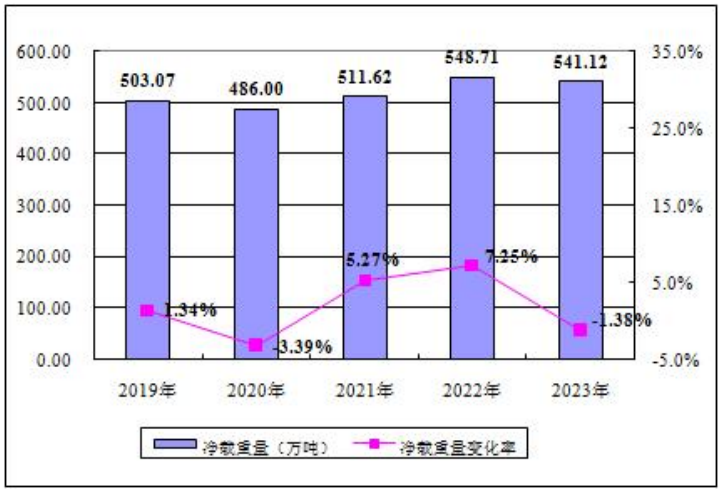


图 1　近五年船舶净载重吨发展趋势图

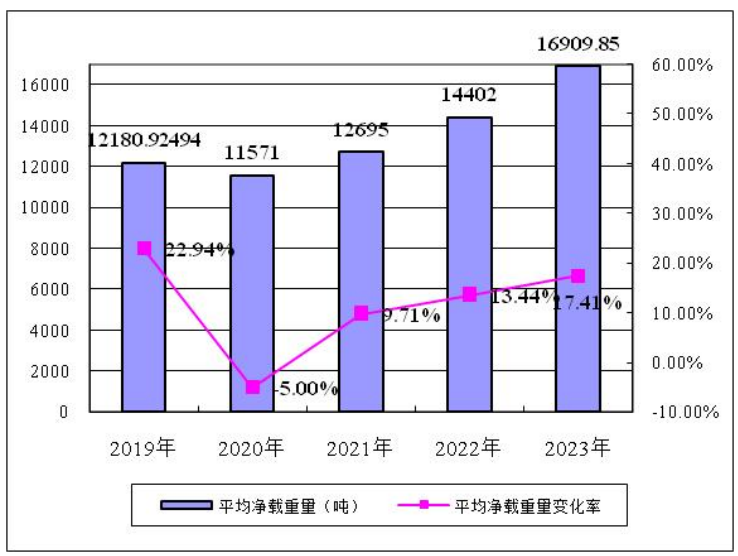


图 2　近五年船舶平均吨位发展趋势图

1.2 海洋情怀浓烈

作为向海而兴的城市，台州航运历史悠久，航海元素早已融入台州人的基因，已拥有一批从事国内国际综合性业务发展的航运企业，拥有大批具有丰富航海经验的船东队伍。据不完全统计，台州籍船东在全球范围内拥有运力 2000 万多载重吨；与航运业密切相连、相辅相成的台州造船业在中小型船舶建造上一直领先全国，造船质量、数量、吨位、能力等指标均居国内民营造船行业前列，培育了一批年产值超亿元的国际知名造船企业，并带动鱼童新材料等一批船舶配套企业发展壮大。

1.3 地理位置优越

台州位于浙江省中部沿海，拥有浙江省三分之一的大陆海岸线，五分之一的海岛，是全省唯一、全国少有同时拥有三个湾区（台州湾、三门湾、乐清湾）的城市；台州位于长三角、海西、台湾三个区域的交汇点；台州 9 个市区县中除天台、仙居外全部濒海濒江，“靠海吃海”的地理环境如同世界第一航运大国希腊。

2.劣势分析

2.1 经营主体规模偏小

台州暂无大型的航运央企，以民营企业为主，缺乏行业品牌。虽全市运力总量处于全省前三，但企业分散，各自运力规模较小，船队运力结构还不够合理。航运企业以国内营运为主，国际营运能力不足。企业普遍存在经营模式单一、管理能力薄弱、专业化程度较低、创新意识不足等现象和问题，缺乏可持续竞争力。

2.2 相关支持力度不足

一是缺乏长期有效的行业扶持政策，行业发展缺乏有效资金保障。虽各县（市、区）有出台相关政策，但与周边地区相比，无论从政策奖励的力度还是涉及广度均存在差距。二是和航运业发展较为紧密的航运经纪、船舶管理、船员劳务等行业[1], [2]，相关政策也较为缺失。三是海事、港航、边防、海关、检疫、船级社等部门信息不能有效共享通用，有关联多个部门的事项效率较低，多部门间协作共建支持行业发展能力有待提升。四是船东资金来源主要依靠股东的原始积累和吸收大量的民间资本，获得银行融资额度十分有限，加上金融机构缺乏对航运业周期性发展的支持，融资期限偏短，对于资金密集型的航运业来说，没有金融机构的大力支持便没有了发展的底气。

2.3 相关产业不够发达

一是基础设施条件不足，“以港兴航”条件欠缺。台州港大型化、专业化码头泊位不足，缺少有竞争力的综合性深水港区，港口吞吐量规模总体靠后。进出港大宗商品吞吐量小，台州籍船舶回母港机会少。二是航运服务发展滞后，行业环境亟需改善，特别是高端航运服务如国际物流，航运金融保险、航运经纪、航运管理、海事法律、航运咨询等与宁波、上海相差悬殊。三是支柱性产业链还未集聚。虽然台州初步形成了大陈航运集聚区，集聚了一批航运及上下游企业，但是整体规模、营商环境与上海、青岛等地的存在较大差距。

2.4 各层次航运人才欠缺

台州人才引进和培养未成体系，仍没有一所航海类的专业性大学，培养和发展地方性人才较为困难，同时对外也无人才引进配套措施以招纳业内高端人才，使得高级海员以及精通海运政策、经济与法律方面的专业人才缺乏，高端航运智库建设尚处于空白状态，一定程度阻碍航运业高质量发展。

3.新形势下的机遇与挑战

3.1RCEP 实施为台州航运高质量发展带来的机遇与挑战

《区域全面经济伙伴关系协定》（RCEP）于 2022 年 1 月 1 日正式生效实施，标志着全球人口最多、经贸规模最大、最具有发展潜力的自由贸易区正式落地。根据商务部国际贸易经济合作研究院测算，到 2025 年，RCEP 可带动成员国出口、对外投资存量、GDP 分别增长 10.4%、2.6%、1.8%。因此，RCEP 将为台州航运高质量发展带来全新机遇和巨大的市场，有力推动台州航运企业转型升级，提升综合实力。但同时也看到，台州航运企业也将面临更加激烈的市场竞争，如何抓住政策风口、抢占市场资源，是台州航运需要面临的挑战。

3.2 建设世界一流强港为台州航运高质量发展带来的机遇与挑战

《浙江省世界一流强港建设工程实施方案》于 2023 年 3 月正式发布实施。根据方案内容，港航

基础设施、港口集疏运体系、航运服务业、港产城高质量融合发展、港口联动发展等内容是建设世界一流强港的重要举措。因此，台州作为浙江省第三航运大市，将给台州航运业发展带来巨大的政策资源和发展机遇。但同时也看到宁波舟山港在此次建设中占据政策的绝对优势，台州急需找准定位，在规避宁波舟山港“虹吸效应”中，抓住“外溢效应”发展台州航运业。

3.3 突发事件增多为台州航运高质量发展带来的机遇与挑战

当前地缘政治冲突、自然灾害频发，对全球供应链的稳定性构成严重威胁。2023 年爆发的“红海危机”和因干旱造成的巴拿马运河限行均有长期化趋势，船舶绕航比例居高不下，导致市场运力短缺，进一步推高国际市场运价，从而越来越多的国内船舶流向国际运输市场，为国内航运业带来一定的发展机遇，但对此台州航运还缺乏信息敏锐度和形势科学研判的能力。

4.建议与对策

围绕“强化航运发展能级、优化航运服务水平、深化航运治理创新”(“三化”) 发展方向，打造“企业主动、政府推动、行业联动”发展新格局，加快走出一条台州航运业健康可持续发展道路。

4.1 强化航运发展能级

充分把握 RCEP 实施和浙江省世界一流强港建设工程的契机，利用头门“国家级经济开发区”和”国家保税区”和大陈岛特殊政治地位，发挥台州船东、船舶修造优势，顶层谋划，打造具有台州特色的航运服务集聚区[3]，以航运服务带动港航产业集聚，以港航产业发展反哺航运发展。重点推进头门三期工程、头门港区进港航道一期工程、浙东南大宗商品物流园区码头等项目建设，加快航运物流园区[4]、航运大楼等项目落地。大力培育具有全国影响力的航运龙头企业，以龙头引领,开拓沿海、近洋等市场，扩大船队规模，优化运力结构，做强内贸内支。有能力的航运企业尝试进军成品油运输、集装箱班轮运输等专业领域，向液货危险品、LNG、汽车滚装船等具有更高附加值、更强专业性的业务领域发展[5]。鼓励企业与货主、金融、造船等企业建立紧密合作、风险共担、互利共赢的长期稳定关系，完善运输保障机制。

4.2 深化航运治理创新

推进港口、口岸、航运企业、堆场等数据开放共享，打造航运公共信息大数据云平台，为各类航运服务平台和贸易、物流企业提供数据支撑。推进航运交易服务数字化，鼓励区块链技术在航运交易领域的应用，支持航运交易标准化和行业信用评估业发展。加快建设航运大数据中心，实时动态监测船舶流量，提高运输节点的服务效率，为行业发展提供强有力的数据支撑。推动船舶证书电子化，“云船检”、“船省心”一网通办、“一船多证一次通办”。研究制定海事咨询、航运保险、航运法律仲裁、航运金融、船舶经纪等复合型高层次航运人才培养方案，加大高校航运学科建设和航运专业人才培养力度，鼓励高等院校开设航运专业，提高航运人才教育水平。举办高质量发展论坛、行业峰会、船舶配件展会等活动，邀请业内权威专家，为台州航运业把脉问诊。组建航运智囊团，发布沿海运价指数、《运情》刊物，为航运及上下游产业从业者提供及时有效的行业资讯和专业指导。

4.3 优化航运服务水平

全面提升造船技术、检验服务，推动台州航运业与造船业的联动发展[6]。鼓励和引导国内国际大型船舶集团投资、参股加盟我市船舶工业发展。构建多层次研发创新平台，开展关键核心技术攻关，升级换代散货船、油船、集装箱船等主流船型，提高区域品牌影响力。推进船代、货代等传统航运服务业提档升级，支持利用互联网和大数据创新经营模式和业态，支持相关市场主体发展壮大，培育具有竞争力的航运代理、船舶管理市场主体。培育发展高端航运服务，整合引导航运企业发展，引进大型知名航运物流企业落户，构建船舶运输、船舶交易、航运金融保险、航运信息咨询等配套完善的航运服务产业体系[7]。深化银企合作，为航运企业量身定制普惠场景服务，为我市航运业发展创造良好融资环境。依托港口物流和商品贸易，积极发展船舶融资租赁、债券融资、产业基金等特色航运金融业[7]，支持各类航运资产证券化，大力提升航运服务能级，引导培育航运经济。

参考文献：

[1] 蒋淑华,焦华富,管晶.航运服务集聚区的空间范围界定及功能识别——以上海市为例 [J].长江流域资源与环境,2021,30(12):11.

[2] 王列辉,张楠翌,林羽珊.全球高端航运服务业的时空演化及影响因素分析[J].地理研究,2021.

[3]方舟,吴佳璋,李倩雯.关于推动宁波航运服务业高质量发展的思考[J].宁波通

讯,2023,(19):43-44.DOI:10.16710/j.cnki.cn33-1272/d.2023.19.030.
[4] 魏际刚，李苍舒．推动航运经济高质量发展[J]. 水运管理,2024,46(07):1-4.DOI:10.13340/j.jsm.2024.07.008.
[5]蔡恒.“一带一路”建设引领福建航运经济高质量发展[J].福建交通科技,2019,(04):146-148.
[6]申红飞,马欣,高佳雯.建设世界一流强港背景下浙江省航运业高质量发展对策[J].中国水运,2024,(04):19-21.DOI:10.13646/j.cnki.42-1395/u.2024.04.006.
[7]关于加快推进现代航运服务业高质量发展的指导意见[J].交通财会,2024,(01):91-92.

作者简介：陈柯，1990 年 7 月，浙江台州人，研究生学历，交通运输规划与管理专业，中级经济师、中级工程师职称，航运处副处长,台州市港航事业发展中心，从事航运管理，通信地址：浙江省台州市椒江区江滨路 46 号，邮编：318000，联系电话：19957667192，邮箱：303820649@qq.com。

关于在浙江沿海开展 VHF 分段分频通信的研究——以台州为例

沈亚明，何智仁

台州三门海事处海游海巡执法大队

摘　要：移动通信、卫星通信迅速发展的今天，VHF 通信仍是船舶导航、避让、海事救助以及安全信息发布的重要手段。本文以台州为例，就浙江沿海 VHF16 公共频道通信饱和、干扰问题开展分段分频通信对策研究，助力浙江沿海海上通信顺畅、高效，打造安全有序的浙江沿海海上通航秩序。

关键词：VHF 通信；分段分频；服务监管；干扰

一、台州沿海 VHF16 频道使用现状

（一）海事部门 VHF16 频道使用情况

自 2021 年 9 月 10 日浙江沿海公共航路调整实施以来，浙江海事局下辖分支局纷纷按照全要素水上“大交管”运转模式积极依托 VHF16 公共频道加大浙江沿海“三纵六横”公共航路船舶引导，全面理顺浙江沿海船舶交通流、改善浙江沿海通航环境，构建起相对科学合理的航路和渔区界限，从源头上降低商渔船碰撞风险。以台州水域为例，2024 年 6 月 7 日至 8 月 6 日，辖区船舶交通流量 22659 艘次（抵港船 9237 艘次，航经船 13422 艘次），台州海事局空港式水上“大交管”各单位、部门累计通过 VHF16 公共频道开展船舶点验 73660 艘次，实施预警预控播发 108 次。

（二）港渔部门 VHF16 频道使用情况

渔业部门智能防碰撞语音提醒。台州沿海渔船配备了商渔船避碰预警系统，当监测 DCPA/TCPA 有碰撞风险的时候，自动通过 VHF16 公共频道播发“MMSI xxxxxxxxx，在你船方位 XXX，距离 XXX，有渔船靠近，请注意行驶。”的智能防碰撞语音提醒，提醒特定商船避让渔船。因台州籍渔船数量达到 4000 余艘次，绝大多数分布在浙江沿海公共航路附近捕捞作业，在每年的非禁渔期间台州水域海上智能防碰撞语音播发数量较大，并且单条语音播发持续时间较长。

（三）风电业主 VHF16 频道使用情况

1、电子围栏触发式 VHF 安全提醒。以浙能台州 1 号海上风电场为例，划定距离风电场外围风机

500m 范围作为风电场安全水域，设置电子围栏，除风电场维护工作船、公务船和小型渔船外，其他船舶禁止进入风电场安全区。按照 1300 米、850 米以及 500 米为界限设置三个不同级别的警戒区域，当船舶穿过二级预警线时，按照一定的规则预计进入一级警戒区的船舶，VHF 甚高频电台发出“某某船舶即将闯入风电场水域”的语音播报信息，提醒船舶尽快驶离。

2、风电监控中心。截至目前，台州沿海已建成有浙能台州 1 号海上风电、华电玉环 1 号海上风电，风电业主单位配建有风电监控中心，配备专职安全管理人员利用 VHF16 公共频道在船舶行驶穿过一级预警线时人工干预未听劝阻船舶，确保闯入船舶远离风电场水域。

二、VHF16 频道使用过程中存在的突出问题

（一）台州海事部门存在呼叫船舶识别难、频道干扰问题

创新实施空港式水上“大交管”后，台州海事局指挥中心、船舶交通管理中心、基层海事处值班室均使用 VHF16 公共频道对外开展工作，对外呼叫主体使用“台州交管”统一名称，因海事部门内部各单位、部门服务监管水域物理距离较近，呼叫时形成一定干扰；同时在接听船方呼叫时存在无法识别船舶分布概位问题，容易形成多单位、部门联动转接后才能由相对应单位、部门实施船舶呼叫确认、答复，造成一定的频道资源浪费。

（二）台州港渔部门存在智能语音占用干扰公共频道问题

据台州沿海航行船舶反馈，在非禁渔期间，受渔船智能防碰撞语音提醒密集发送影响，台州沿海 VHF16 公共频道通讯受到较大干扰，绝大多数时间段内航行船舶交汇协调避让需要采取变通措施约定其他频道开展正常通信，确保协调避让一致、航行安全。

（三）台州沿海航行船舶存在占用频道开展非安全通信问题

目前，存在部分台州沿海航行船舶占用 VHF16 公共频道聊天情况，主要表现为在公共航路航行的航经船舶在 VHF16 公共频道谈论工资、补贴等，更有甚者在台风影响避台锚泊期间长时间占用 VHF16 公共频道唱歌娱乐情况。海事部门尚未配置水上无线电定位装置，无法锁定相关船舶开展针对性教育提醒，解决非安全通信问题尚需相关设备配置到位之后才能精准开展。

（四）台州沿海 VHF16 公共频道存在受不同信号源干扰问题

台州沿海 VHF16 频道信号干扰主要存在两类情况：一是明确信号源干扰，主要表现在天气晴朗早晨收到来自江苏泰州、张家港交管，福建泉州、厦门交管以及夜间时段收到来自宁波交管、梅山码头等地的海事部门、码头方的 VHF 信号；二是未知信号源干扰，在过去三年期间，台州海事局船舶交通管理中心曾受到一不明信号源干扰数天，干扰期间正常通信受到不小的制约。

三、实施 VHF 分段分频通信做法参考

（一）沿海港区——宁波舟山 VTS 中心 VHF 通信分区

宁波舟山 VTS 分频通信特点表现为各区块水域物理距离较近，选用不同 VHF 频道通信杜绝干扰。宁波舟山 VTS 中心 VHF 通信共分七个区：VHF 通信分区划分与 VTS 管理区域划分保持一致，具体 1#-7#分区请参考管理区域划分。船舶在不同的分区内应保持相应 VHF 频道的守听，经过分区界限时应按规定转换频道。在 1#管理分区内值守 VHF08 频道；在 2#管理分区内值守 VHF28 频道；在 3#管理分区内值守 VHF14 频道；在 4#管理介区内值守 VHF71 频道；在 5#管理分区内值守 VHF14 频道；在 6#管理分区内值守 VHF06 频道；在 7#管理分区内值守 VHF11 频道。禁止船舶使用 VHF06、08、11、14、28 和 71 频道进行与航行安全无关的迪话。VHF26 ：VTS 中心将定时或不定时发布相关的安全信息。

（二）长江港区——江苏 VTS 中心 VHF 通信分区

江苏 VTS 分频通信特点表现为各监管水域物理距离较远，交替使用固定几个频道开展通信杜绝干扰。江苏 VTS 由沿海连云港 VTS 中心和长江江苏段南京、镇江、泰州、江阴、张家港、南通等六个 VTS 中心组成。船舶南京段呼叫交管在 VHF10、11 频道，其中南京长江大桥以上 VHF11 频道，南京长江大桥以下 VHF10 频道；船舶镇江段呼叫交管在 VHF09、10 频道；船舶泰州段呼叫交管在 VHF10 频道；船舶江阴段呼叫交管在 VHF09 频道；船舶张家港段呼叫交管在 VHF10 频道；船舶南通段呼叫

交管在 VHF10、11 频道。VHF69：船舶在江苏水上区域值守频道。

四、台州沿海 VHF 分段分频通信研究

（一）台州沿海 VHF 分段分频通信原则

1、平稳过渡，沿用原 VTS 服务专用频道。尊重船方使用习惯，降低船方因分段分频通信带来的使用不适应等问题，沿用原海门、大麦屿 VTS 服务区频道开展相应区域海上服务监管通信。

2、合理划分，减少航经船舶转换频道次数。全面考虑船方在台州辖区转换 VHF 值守意愿，鉴于台州辖区公共航路南北分界线长达约 45 海里，以航海者普遍熟悉了解的知名岛屿为分界线将台州沿海航路划分成南北两个区域开展分频通信，在保证通信高效的前提下降低船舶转换频道次数。

3、杜绝干扰，实现航经到港船舶专频专用。了解相邻分支局 VHF 现有频道使用情况，其中宁波海事局已使用 VHF06、08、11、14、26、28 和 71 频道，温州海事局已使用 VHF09、14、25、27 频道，研判相邻海事部门 VHF 单站点通信距离参数确定我局各区域 VHF 频道设置，杜绝相邻分支局通信干扰，确保专频专用。

（二）台州沿海 VHF 分段分频通信建议方案

1、划定公共航路服务监管频道。以台州水域最具代表性的岛屿——大陈岛为界，分南北片区划定海事部门台州沿海公共航路服务监管频道，其中大陈岛以北服务监管频道为 VHF09，大陈岛以南服务监管频道为 VHF08。

2、划定台州各港区服务监管频道。沿用原海门、大麦屿 VTS 服务区频道，其中椒江海事处辖区服务监管频道为 VHF10，玉环海事处辖区服务监管频道为 VHF73，三门海事处辖区服务监管频道为 VHF07，温岭海事处辖区服务监管频道为 VHF06，临海海事处辖区服务监管频道为 VHF16。

参考文献

[1]《宁波舟山 VTS 指南》宁波、舟山海事局
[2]《江苏 VTS 用户指南》江苏海事局
[3]《温州 VTS 用户指南》温州海事局

作者简介：

沈亚明，台州三门海事处海游海巡执法大队副大队长，三级主办；何智仁，台州三门海事处四级主办；联系电话：15657672690，邮箱：rrwsym@126.com；通讯地址：台州市三门县健跳镇健阳路 12 号。

浅谈近代海洋文明对海洋发展战略的启示

毛著刚

台州海事局 318000

摘　要：海洋文明作为近代以来占主导地位的文明，引领了世界发展的潮流，造就了多个世界级帝国，代表着先进生产力，而大陆文明在面对海洋文明时却逐渐处于下风，研究两种文明的特点对于制定国家发展战略具有重要意义。

关键词：大陆文明；海洋文明；发展战略；海权

引言

近代以来，海洋文明引领世界的发展潮流，主要发达国家都为海洋文明，代表了先进的文化和生产力。在中国 5000 年的历史长河中，中国在政治、文化、科技军事等各领域上曾经长期领先于世

界，拥有漫长的海岸线和海洋资源，但为什么没有发展出海洋文明呢？这需要我们从历史、地理和文化等各方面全面分析原因，重新审视大陆文明和海洋文明，从中得到启示，为制定发展战略起到借鉴作用。

1 两种文明

人类文明体系主要可以分为大陆文明和海洋文明。大陆文明是以农耕为主的农业文明，而海洋文明是一种以航海和商业扩张为代表的文明，这两种文明是不同的，各有特点，也有很大的差别。大陆文明和海洋文明在人类历史上交替发展，都为人类的发展做出过重要的贡献，两种文明的博弈一直都存在，两者最大的区别是一个是向内求，一个是向外求，各有优劣，分析两者的特点，吸取两者优点具有重要意义。

1.1 大陆文明的特点

大陆文明是内向性的、稳定的、家族性的，要求继承和保守，不追求变化。大陆文明要求保守，祖祖辈辈在同一片土地上生活，在疆域固定下来后基本保持稳定，只是在内部不断进步和发展。黄河流域的文明就是一种大陆文明，中国的华夏文明因山水阻隔不容易跟其他文明直接交流，是世界上独特的一支文明，保留了几千年的特色。以大陆的农耕文化为基础的华夏文明在历史上是非常辉煌的，但大陆文明过于稳定也导致了人们的思想被禁锢，难以扩展自己的文明到更远的地方去。虽然中国有着漫长的海岸线，有着先进的造船技术和科技，但是中国的文明却是缺乏海洋意识的。在西方发展海洋事业，把自己的势力向世界各地扩张的的时候，中国却是反方向走的，实行了海禁政策，不允许出海，错过了伟大的大航海时代、工业革命和资本主义的大发展，逐步落后于西方国家。

1.2 海洋文明的特点

海洋文明是外向的、冒险的、个人型的。海洋文明需要不断开拓和冒险，如果一成不变就没有出路，欧洲到南亚的这些文明就是海洋文明，不同国家直接交流较多，混合也较强烈。海洋文明的国家国土面积相对较小，需要不断地向外开拓、交流和贸易，获得商业利益。海上强国的崛起伴随着探索、冒险甚至掠夺。航海家、发现家、海上的商人和王室实际上是一个利益共同体。地理大发现是欧洲人完成的，地理发现家后面有海盗和海军的影子，是国家支持下的开拓活动。伴随着海洋文明的发展，西方在思想和科学上迎来了大发展，从牛顿到达尔文，众多伟大的思想家和科学家集中出现，是海洋文明对思想的解放造就了一个个伟大的巨人。由这些伟大的思想家的学说继续推动了科学和技术的进步，加上国家和民间的不断对外扩张，造就了一个个伟大的海上帝国。

1.3 大陆文明和海洋文明在近代的冲突

当西方的海洋文明来到东方后，两大文明不可避免地发生了冲突。在面对强大的海洋文明时，大陆文明由于没有跟上时代的发展的步伐，在各方面全面落后于西方，处于被动挨打的境地。近代中国的落后是从海上开始的，不仅是两次鸦片战争在海上被打败、甲午战争在海上被打败，后来的八国联军侵华甚至于 1937 年的淞沪会战也是在海上败的。中国在海上吃的亏太多了，太值得我们记住和深刻反思了。21 世纪华夏要振兴也必须从海上站起来，从海上的竞争中赢回来。东西方文明的的差异和对比是五四运动以来一直绕不开的话题，虽然大陆文明和海洋文明没有好坏之分，但是历史证明我们确实忽视了在海洋上的发展，吃了很多亏，所以这是我们必须要重视的。500 年来的教训足够了，让我们认识到文化的重要性，既不要妄自菲薄，全面否定自己，也不要排斥外来文化，凡是外来文化好的方面都应该学习和借鉴，始终对文化保持开放、包容的心态。

2 思想与技术的发展对社会变革的推动作用

2.1 技术对社会变革的作用

思想和技术都对国家的发展起到重要的推动作用，但是思想的力量是划时代的。以对海洋文明发展起重要作用的技术为例，中国当年的造船技术非常先进，其他各方面的技术都非常完备，包括火药、热兵器、指南针，造纸、印刷都是中国人发明的。火药是热兵器的来源，指南针是航海的基本工具，没有指南针就不可能远洋，造纸是整个人类文化勃兴的先决条件，活字印刷术使文化更方便地传播。这些条件在中国宋代实际上全部具备，使宋代兴起了对外贸易，但却没有带来宋代在文化和体制上的变革。到了明代，航海技术发展到我国古代的巅峰，远远领先于世界，也开启了郑和下西洋的伟大创举，但是仍然没有发展出海洋文明，所以技术在社会变革中的作用很有限。

2.2 思想对社会变革的推动作用

技术是经验模型，哲学和社会科学是思想模型。经验模型不改变思想，哲科模型却会带来思想变革，这决定了技术和思想对人类文化的影响力是完全不同的。中国的四大发明全都是技术，指南针是偶然把横磁铁悬浮起来发现它总是指向南北极，它丝毫不涉及思想理论上的探索；火药是炼丹

术士炼丹造成的意外事故；造纸和活字印刷术是典型的民间操作，跟思想变革、逻辑建模没有关系，是典型的技术。而从古希腊以来的哲科思维是通过思想变革再引起的技术变革，因此它首先造成的是思想文化的影响，其次才造成实际操作的影响，这就是两者的区别。中国当年的造船技术极为先进，但是为什么不能扩展成为一个蓝色文明，一定程度上是因为它缺少必要的天文思想。

3.逐利是海洋文明发展的动力

中国缺乏巨大的商业逐利的动力，因而没有继续拓展的动力。中国地大物博，在这片土地上几乎能够生产和创造出人们生活所需要的一切商品，只在内部循环就可以满足人们的需要。即使是开通商埠对外贸易，也主要集中在周边一些国家和部落之间。而反观西方，哥伦布为什么会远洋，是因为当年进入强烈的商业趋利时代，哥伦布一心想要到东方的印度和中国去攫取黄金，取得巨额利益，这是哥伦布远洋的最重要目的。哥伦布环球航行还有一个思想逻辑在前，就是他相信托勒密的地心说，相信地球是圆球这个学说。而中国主体意识是盖天说，认为是天圆地方，将人们束缚在了自己生活的土地上。哥伦布从大西洋一路向西，他的目标却是到达东方的印度，他凭什么敢这样走，就是因为罗勒密的地心说模型给他带来的启发，在一路向西的过程中无意中发现了美洲大陆。中国在宋代就开始的海洋贸易活动，不能演变为海洋文明的原因是既缺乏必要的天文逻辑模型，也缺乏强烈的商业获利的动力。商业趋利的思想在中国是被压制的，在中国文化的义利观里趋利是被压抑的。在中国传统社会中，商业被称为“末业”，农业则被称为“本业”，主流经济思想就是以农为本，以商为末，“舍本逐末”是不允许的，因此要“重本抑末”，导致统治阶级产生重农抑商的思想，这种思想对中国历史有着深远的影响。

4 海洋文明的发展需要来自国家的支持

4.1 中国的海上活动缺乏官方的强力支持

海洋文明的发展需要官方和民间的共同支持和努力，尤其是需要官方的支持。首先来看中国，海上丝绸之路发展于春秋战国时期，形成于秦汉，在唐宋时期达到了兴盛，带动了广州、泉州、宁波等港口城市的崛起和发展。明清时期开始转变，尤其是郑和下西洋活动规模宏大，海上活动到达顶峰，但海上活动更多的是宣扬国威和确立朝贡关系，并未对海上发展为对海洋和海上贸易的控制，到明朝中后期因为倭患严重更是开启了海禁政策。明朝的主要敌人是北方的游牧民族，因此重心在陆地而不是在海上。海商被定义成倭寇，成为了罪犯。虽然东亚海域有海商、海盗组成了一个区域性的海洋秩序，初来的欧洲商人也要服从于这个秩序，但这是一种纯粹发自民间的海洋秩序。遗憾的是，这种发自民间的秩序没能突破区域限制而扩展到全球，没能获得官方支持，最终走向了与陆地政府对抗的命运，决定了后来的失败。清朝初年一度也实行海禁政策，但到统一台湾后逐步废除了海禁，主要与东南亚国家进行贸易活动。清朝官方不直接参与对外贸易，而是设立海关和利用中介行商进行管理。到乾隆年间对通商政策进行严格限制，实行“一口通商”政策，并且对西洋船只严加稽查，英国派遣马噶尔尼使团访华交涉希望扩大贸易，遭到了乾隆皇帝的拒绝，这也加速了中国与世界的脱轨。清朝年间的海上贸易主要以外国商船来华交易为主，本国商船仅在东南亚海域航行，未曾穿越马六甲海峡向西航行，海上活动缺乏官方的支持和鼓励，没有向外扩张的动力。由于朝廷的自大、政府的束缚和重农抑商的传统，使得政府没有对外扩张和开拓海洋的思想，也就没能开启海洋文明了。

4.2 欧洲的航海活动由国家主导

欧洲海洋文明之所以能蓬勃发展，是因为背后有官方的支持。葡萄牙是最早海上文明的开发者，由于奥斯曼帝国阻断了东西方的贸易通道，欧洲人需要的香料难以从从陆路获得，就要找到从海上到东方的通道。15 世纪前后葡萄牙的恩里克王子以半官方的名义办了一个海洋学校，组织民间和官方的力量建立远洋船队持续探索整个非洲西海岸，顺着非洲西海岸到达好望角，进入印度洋最终到达东方，因此他被誉为开启欧洲大航海时代的核心人物。通过开辟新航线、垄断香料贸易、获得巨额收益使航海活动更加得到国家的支持，其他欧洲国家也纷纷效仿，开启了大规模的航海活动。在此期间西班牙伊莎贝拉女王资助了哥伦布的探险活动，希望找到去往印度洋的航线，却意外地发现了美洲大陆，发现了银矿和其他贵金属。在巨大利益的诱惑下各国开始环球航行，迎来了地理大发现的高潮。在西班牙王室支持的麦哲伦船队完成了人类历史上第一次环球航行。英国、法国、荷兰也加入到对世界的探索和竞争，英国航海家库克三次远征太平洋并发现了澳大利亚、新西兰、纽芬兰和夏威夷群岛。通过一系列的海上探索活动，欧洲国家扩大了对世界的认识和贸易范围，迅速完成了资本主义发展的原始积累，开启了工业革命，引领了世界的政治、经济和文化的发展，欧洲开始主导世界。正是官方对海洋探索的支持开启了一个伟大的大航海时代。

4.3 日本的崛起

这里有一个例外，那就是后来的日本。前期因为闭关锁国没能赶上大航海时代，但经过“黑船扣关”事件后，认识到与西方的巨大差距，开启了明治维新，从此日本全面学习西方，制定了“脱亚入欧”的国家战略，于是在短短几十年内迅速崛起为海上强国。正是由于国家的全力投入和支持，举全国之力全面学习欧洲，才能在短时间内赶上欧洲的发展步伐，称为亚洲海上强国。因此，国家的支持和思想观念的转变在开启海洋文明过程中起着核心作用。

5 大陆文明对发展海洋文明的制约

大陆文明的经济基础并不是贸易，而是耕作。大陆丰富的资源和广袤的土地可以满足社会对于粮食和其他产品的需要，中华文明就是如此。在黄河流域和长江流域丰富的水资源和肥沃的土壤加上温暖的气候，人们通过耕作就可以获得粮食，久而久之以小农经济为基础、以家庭为单位的生产力的方式就固定下来了，成为千年以来封建统治的经济基础。大陆国家即使封闭起来完全不和外界进行贸易一样可以维持下去，甚至还可以发展地不错，比如清朝就是小农经济发展的巅峰。对于大陆文明来说对外贸易只是锦上添花，甚至是可有可无。因为大陆文明可以自给自足，自然没有必要冒着风险去掠夺和殖民了，这样也造成了大陆文明某种程度上的故步自封、不思进取，欠缺对外拓展的动力。大陆文明追求稳定性甚至会刻意打压贸易，士农工商，商人虽然有钱但是地位却最低。同样是商人，在大陆文明中过去被认为是末流，而在以资本主义为代表的海洋文明中，商人有着很高的政治地位。海洋文明因为生存过于依赖贸易，因此具有很强的外向性，当供给不足或者供给远大于需求时就会想法设法开拓新的市场倾销商品。因此，大陆文明因其自身的特点，是抑制海洋文明的发展的。

6 海洋文明对国家发展战略的启示

6.1 大陆文明和海洋文明没有优劣之分

大陆文明和海洋文明有各自的优点和不足，但最近几百年来海洋文明却毫无争议地占据了主导地位，但并非海洋文明才代表着先进，代表着人类的未来。最近 500 年以来的世界级的超级帝国都是来自于海洋文明，第一个是西班牙成为世界帝国 100 多年；第二个是英国，成为世界霸主 300 多年；第三个是美国，是这个世界最近几十年来的霸主。这三个都是典型的海洋文明的代表，因此很多人都认为海洋文明才代表着人类的未来。但是真的如此吗，最近几百年来海洋文明的确独领风骚，但在这之前呢，世界第一是以中华民族为代表的大陆文明，而且这个第一当了至少 2000 年。从目前来看基于大陆文明的中国在打通了生产、制造和贸易的任督二脉之后，在短短的几十年内从几乎一穷二白飞速发展成为世界第二大经济体，传统海洋文明的代表则无一例外地都在逐渐地衰落。西班牙和英国已经没落，美国作为世界霸主也在近几十年已经是颓势尽显了。由于大陆文明的稳定性和包容性，有强大的人口基数、广袤的国土面积、稳定强势而深厚的文化底蕴会一直屹立不倒，一旦吸收了人类文明的优秀成果改变落后的生产力、建立良好的生产关系后后将迅速崛起。因此，不同的时代两种文明的优势各有不同，没有优劣之分。

6.2 大陆文明应积极吸收海洋文明的优点

海洋文明的崛起是因为地理大发现。西方海洋文明的国家突然发现自己的市场由存量市场变成了增量市场，不需要在自己的土地上激烈竞争，只需要去开拓新的市场就能获得巨额利益，于是纷纷向外发展。迅速增加的增量市场使欧洲国家在短时间内积累了大量财富，促进了科技和工商业的快速发展，逐步成为世界帝国，对落后的农业国家形成了降维打击。经过了几百年的发展，大航海时代的红利已经被瓜分完毕，各国的差距越来越小。互联网大发展使人类的信息传播几乎可以做到同步。从大航海时代的存量市场变成增量市场后通过几百年的发展现在重新又变回了存量市场。经过几十年的发展我国由一个落后的农业国一跃称为先进的工业国，现在已经是世界上最强的工业国家之一，工业门类最为齐全，能生产全世界所需要的任何商品。但是由于巨大的工业生产能力，国内市场不能完全消化这些产能，导致产能过剩，加剧了本国企业之间的竞争。为了破解这个难题除了继续增强我们的竞争优势外急需要借鉴海洋文明的优势，向外发展，拓展新的市场，转移我国的过剩产能，创造更多的财富。

6.3 夺取海洋的控制权

6.3.1 控制海洋

控制海洋是国家和全球权利的重要基础。这包括建立强大的海军以确保对海洋的控制，以及通过控制重要海峡和航道来影响全球贸易和政治格局，没有强大的海军就无法保证对海洋的控制权。一个国家如果能充分控制海洋，就能控制世界的贸易和财富，从而控制全世界。这要求国家不仅要

有强大的海军，还需要在重要的战略位置上拥有海军基地和港口。

6.3.2 重视海洋军事安全

海洋对于国家军事安全的重要性，认为海洋可以保护国家免受敌人在本土的攻击，而制海权在战争中的影响力远大于陆军。力求在海上打败敌人，避免将战火引向陆地，只有夺取了制空权和制海权才有力量在面对来自海上的敌人时在海上与敌人决战并置敌人于死地。

6.3.2 国际贸易与财富的控制

通过控制海洋，一个国家能控制海上交通和贸易，进而控制世界财富。海洋对于国家经济安全和全球影响力的关键作用。国家的发展不能仅停留在陆地和周边国家，要努力地向更远的地方延伸。这就需要强有力的海上力量来保护本国商船、侨民和海外贸易的利益，为海外贸易提供坚强的后盾。

6.3.3 要有向外拓展的民族精神

一个世界强国一定要渴求物质利益，追求国内外有利可图的商业往来，民强烈地追求海洋权益、追逐海外利益的民族精神。政府要具有海洋意识且对海军重视，政策上具有连续性
，重视海上贸易和海外市场，将国家对海洋的控制扩展到军事和海洋贸易上。努力向外求发展，不局限于区域发展。要有全球视野，向全球拓展增量市场，以大陆为基础，将国家实力伸向海外，使我国的国家实力和国际地位再上一个新台阶。

7.结语

思想决定行动，行动来源于思想。只有解放思想才不会拘泥于固有的条条框框，才会借鉴人类创造的一切优秀文化成果，武装自己的头脑，运用于实践努力发展本国的经济、科技和文化。辩证地看待两种文明的优缺点，吸收两种文明的一切优点为我所用。以中华传统文明为基础，吸收海洋文明的外向型思想，发展海上力量，改变积极防御的战略，突破区域大国的束缚，积极拓展海洋权益和海外利益，创造国家实力新的增长点，在海洋上创造新的辉煌，让中国再次伟大！

参考文献

[1]阿尔弗雷德·塞耶·马汉.海权论[M]美国.同心出版社.2012 年

作者简介：

毛著刚，台州海事局，三级主办，工学学士、法学硕士，通信地址：台州市椒江区体育场路 1036 号，
联系电话：15057275890，邮箱：308124129@qq.com

海上船舶防污染常见问题及对策

朱进岳

温州市港航管理中心船检处，浙江温州

摘　要：根据船舶现场检验案例，结合当前船舶防污染标准及船舶法定检验技术规范，分析指出船舶防污染存在的典型问题，并提出整改意见。再结合检验实践，对船舶防污染相关方提出建议，促进船舶防污染工作得到有效落实。

关键词：船舶；防污染；生活污水；油污水

一、前言

2018年1月16日，环境保护部、国家质量监督检验检疫总局联合发布《船舶水污染排放控制标准》（GB3552—2018）（以下简称“2018标准”），并于2018年7月1日正式实施。同年，交通运输部下发了《关于做好船舶水污染物排放控制标准实施工作的通知》（交办海函〔2018〕1034号），该通知明确了对现有船舶水污染排放进行追溯，且应符合“标准”要求。

2020 年 8 月 1 日，《国内航行海船法定检验技术规则2020》（以下简称“规范”）正式实施，将“2018标准”纳入并做了细化。在此背景下，船检部门着重船舶防污染设备进行检查，仍发现存在一些不满足“2018标准”的问题，极易带来滞留或行政处罚风险。本文将结合检验实例，分析存在的问题并提出整改建议，供相关方参考。

二、正文

（一）案例一：油水分离设备（滤油设备）执行标准不符合规范要求。

情况描述：2023年7月，对一艘转入船舶“RZXX”轮开展临时检验。发现该船安放龙骨时间为2007年3月22日，油水分离设备执行MEPC.60(33)决议要求（图1）。

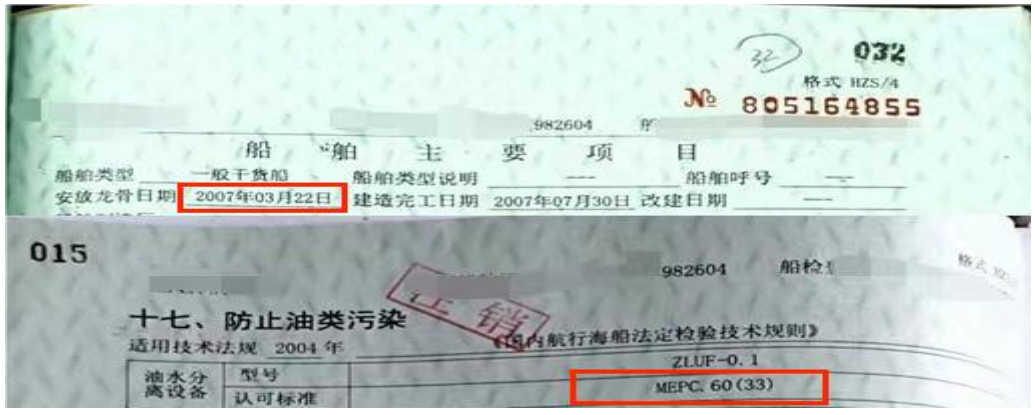


图1 《国内航行海船安全与环保设备记录》HZS/4、HZS/6

问题分析：该船安放龙骨时间为2007年3月22日，适用的船舶法定检验技术规范为《国内航行海船法定检验技术规则2004》《国内航行海船法定检验技术规则2006修改通报》。

规范要求：根据《国内航行海船法定检验技术规则2006修改通报》第5篇第2章3.2.3款脚注：在2007年1月1日或以后安装上船的滤油设备，参阅国际海事组织MEPC.107(49)号决议批准的《船舶机器处所防污染设备的导则和技术条件》。

结论及整改意见：该船油水分离设备不符合规范要求，应更换符合MEPC.107(49)号决议要求的油水分离设备。

案例启示：国内航行海船油水分离设备执行标准与该设备装船时间相关，且区别于国际航行船舶。根据船舶法定检验技术规范梳理如表1：

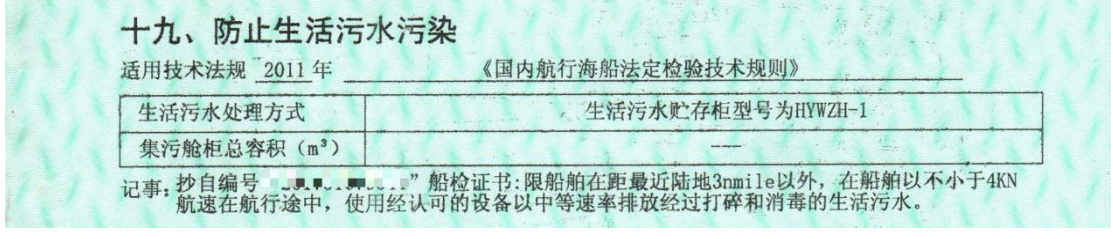
序号	设备装船时间	设备技术要求

1	2007 年 3 月 1 日以前	参阅由国际海事组织以 **A.393(X)** 号决议通过的《关于油水分离设备和油分计国际性能和试验技术条件的建议案》**或**由国际海事组织海上环境保护委员会以 **MEPC.60(33)** 号决议批准的《船舶机器处所防污染设备的导则和技术标准》
2	2007 年 3 月 1 日或以后	参阅国际海事组织以 **MEPC.107(49)** 号决议批准的并经 MEPC.285(70)决议修订的《船舶机器处所防污染设备的导则和技术条件》

表 1 油水分离设备执行标准

（二）案例二：实船证书生活污水处理设备与其记事栏允许排放条件不一致

情况描述：2024 年 3 月，对一艘转入船舶“ZJ10XX”轮开展临时检验。在进行“船、证、图”一致性核查时，发现该船《国内航行海船安全与环保设备记录》中“防止生活污水污染”一栏，生活污水处理方式采用生活污水贮存柜，而记事栏记载“船舶在距最近陆地 3n mile 以外，在船舶以不小于 4kn 航速在航行途中，使用经认可的设备以中等速率排放经过打碎和消毒的生活污水”（图 2）。经检查和了解，发现该生活污水贮存柜设有投药口、粉碎泵，但核查生活污水贮存柜相关资料，发现其产品证书仅体现生活污水贮存柜。


十九、防止生活污水污染

适用技术法规 2011 年 《国内航行海船法定检验技术规则》

生活污水处理方式	生活污水贮存柜型号为HYWZH-1
集污舱柜总容积（m^3）	——

记事，抄自编号 [redacted] 船检证书:限船舶在距最近陆地3nmile以外，在船舶以不小于4KN航速在航行途中，使用经认可的设备以中等速率排放经过打碎和消毒的生活污水。

图 2 《国内航行海船安全与环保设备记录》“防止生活污水污染”一栏

问题分析：①该船生活污水处理设备（生活污水贮存柜）虽然设有投药口和粉碎泵，但是在其产品证书中未体现其粉碎消毒的功能及其对应的检验标准，故不够能认定为粉碎消毒柜。②对于“船舶在距最近陆地 3n mile 以外，在船舶以不小于 4kn 航速在航行途中，使用经认可的设备以中等速率排放经过打碎和消毒的生活污水”中所描述的“经认可的设备”，其检验标准应符合国家标准，即《船用生活污水处理系统技术条件》,且应提供对应的船用产品证书，方可认定为“经认可的设备”。

规范要求：根据“标准”及规范要求，该船采用生活污水贮存柜处理生活污水，故仅允许距最近陆地 12n mile 以外，以不少于 4kn 船速在航行途中，以中等速率进行排放或收集并排入接收设施。

结论及整改意见：《国内航行海船安全与环保设备记录》中“防止生活污水污染”一栏，生活污水处理方式与记事栏中允许排放的条件不一致，容易造成船员误排放。故要求船东更换的符合规定的粉碎消毒柜，或者将排放条件限制在距最近陆地 12n mile 以外排放。

案例启示：①船检证书应规范填写，如生活污水处理设备为贮存柜，则其排放水域应为距最近陆地 12n mile 以外；如需要在距最近陆地 3n mile 以外排放的，则其生活污水处理型式应为粉碎消毒，应准确填写。②“经认可的设备”粉碎消毒柜应符合《船用生活污水处理系统技术条件》标准，根据标准生效日期梳理如表 2，其型式认可证书（中国船级社签发）可参考图 3。

序号	设备装船时间	设备执行标准
1	2015-12-01 以前	GB10833-1989《船用生活污水处理系统技术条件》
2	2015-12-01 或以后	GB/T 10833-2015 《船用生活污水处理系统技术条件》
3	2024-03-01 或以后	GB/T 10833-2023 《船用生活污水处理系统技术条件》

表 2 《船用生活污水处理系统技术条件》



产品名称/Product

防止生活污水污染设备
Sewage Pollution Prevention Equipment
船用生活污水粉碎消毒柜
Marine Sewage Comminuting and Disinfection Tank

认可标准/Approval Standard

1. MARPOL附则IV防止船舶生活污水污染规则及其修改通报
MARPOL Annex IV Regulations for the Prevention of Pollution by Sewage from Ships and its Amendments
2. 中华人民共和国海事局 《国内航行海船法定检验技术规则》（2020）及其修改通报第5篇第5章
Chapter 5, Part Five of Technical Regulations for the Statutory Surveys of Sea-going Ships Engaged on Non-international Voyages (2020) and its Amendments, MSA, P. R. China
3. 中华人民共和国海事局《远洋渔船法定检验技术规则》（2019）及其修改通报第15篇第3章
Chapter 3, Part Fifteen of Technical Regulations for the Statutory Surveys of Ocean Fishing Vessel (2019) and its Amendments, MSA, P.R. China
4. GB/T 10833-2015 《船用生活污水处理设备技术条件》
GB/T 10833-2015 Marine Sewage Treatment Equipment Specification

图 3 船用生活污水粉碎消毒柜型式认可证书

（三）案例三：机舱私自机装生活污水贮存柜

2024 年 1 月，对“JTXX”轮开展换证检验。该船《国内航行海船安全与环保设备记录》中“防止生活污水污染”一栏，记录有生活污水贮存柜，未另外设置集污舱（柜）。实船在机舱发现舱柜一只，与之前的生活污水贮存柜存在管路连接。经了解得知，该船原生活污水贮存柜容积偏小，难以满足实际需求。为此，增加一只集污柜，用于贮存生活污水。

问题分析：该船存在对船舶生活污水处理系统私自改建行为，私设管路容易可能对原来生活污水系统造成影响，进而带来违规风险。

规范要求：根据本法规对船舶所进行的任何检验完成以后，未经同意，对经过检验的结构、 布置、机器、设备及其他项目，概不应变动。

结论及整改意见：该船生活污水处理系统存在私自改建的行为，增加的舱柜对船舶空船重量、重心有影响，应立即恢复原状。考虑到实际需求，船东可及时联系设计单位，对该船生活污水处理系统进行合理化设计并送审。图纸经批准后，方可按图施工。

案例启示：船东对船舶污染物不得乱排已经有了充分认识，但对于应遵循的法定程序没有足够了解，对此需要加强。

（四）其他缺陷：

在船舶防污染设备现场检验过程中，仍存在很多问题，主要包括以下几方面：

1、管路方面：存在私自改装、油类排放接头和生活污水排放接头存在错用、生活污水舷外排出阀采用不带关闭装置的防浪阀、残油柜手摇泵手柄缺失、取样管未设置、再循环管未设置等、生活污水系统空气管头未采用防火型；

2、机电设备：生活污水处理装置排放泵、气泵、投药泵等故障，油污水处理装置活塞泵故障等、油水报警装置、生活污水高低位报警故障；

3、备品备件：生活污水处理装置、粉碎消毒柜等没有足够的药剂（如消毒氯片、培养菌粉末）以及防污染设备的易损件。

三、相关建议

（一）检验部门

船检部门应加强对船舶防污染设备的检验，做好船舶技术监督。同时应提升检验服务能力，如在证书记事栏中明确船舶生活污水排放条件（表 4），为船员提供指导。

生活污水处理形式	记事栏说明
生化处理	在距最近陆地 3n mile 以内排放生活污水，生活污水处理装置正在运转，且船舶在航行中，同时排出的污水在其周围的水域中不产生可见的漂浮固体，也不使变色；或收集排入接收设施
粉碎消毒	在距最近陆地 3n mile 以外，以不少于 4kn 船速在航行途中，以中等

	速率进行排放，排放率见批准的《船舶未经处理的生活污水排放率计算书》或收集排入接收设施
贮存柜	在距最近陆地 12n mile 以外，以不少于 4kn 船速在航行途中，以中等速率进行排放，排放率见批准的《船舶未经处理的生活污水排放率计算书》或收集排入接收设施

表 4 生活污水处理型式及记事栏说明

值得注意的是：①部分现有船舶在送审设计阶段，未对《船舶未经处理的生活污水排放率计算书》进行送审。建议船舶经营人应及时与设计单位沟通，由设计单位计算并送审。

（二）海事部门

海事部门应加强船员培训，船员应掌握船舶污染物排放标准及允许排放的条件，同时应熟悉掌握油污水系统、生活污水系统的相关操作以及相关处理装置、报警装置的维护保养，强化船员环保意识，形成“不能排、不敢排、不想排”意识形态。

（三）船舶经营人

船舶经营人应强化公司管理，全面掌握船舶防污染设备的配置情况及相应港口防污染要求。特别是生活污水处理设备应与船舶营运期间船上人数以及其他有关的因素（水域、码头接收设施等）相适应。

对于在距最近陆地 3n mile 以内排放生活污水的，其船舶应在航行中，故船舶在码头考虑、锚地避风时均无法排放生活污水，建议考虑加装生活污水贮存柜，以应对突发情况（无法排放且无法接收、生活污水处理装置故障等情况）。

对于实船航线与最初设计图纸预定的航线有调整，或者新转入的船舶。应考虑其容量是否满足当前营运需求。

（四）船员

船员应加强学习，提升环保意识，做到“两个熟悉、一个做到”：熟悉船舶防污染方面的法律法规及港口所在地的防污染政策；熟悉船舶防污染设备设施的日常操作和维护保养；做到船舶污染物正确排放，切实保护水域环境清洁。

四、结束语

随着“绿水青山就是金山银山”的发展理念深入实践，污染防治攻坚向纵深推进。《加快建设交通强国五年行动计划（2023—2027 年）》中更是明确指出，要加强交通运输污染防治生态环境保护，推动交通用能低碳多元发展。船舶防污染工作涉及方方面面，需要海事、船检、航运公司、船员等各方共同努力，形成船舶防污染综合治理立体格局。

参考文献

[1]中华人民共和国环境保护部、国家质量监督检验检疫总局. 船舶水污染物排放控制标准，2018.
[2]中华人民共和国海事局.国内航行海船法定检验技术规则2020.2020.
[3]中华人民共和国海事局.国内航行海船法定检验技术规则2006修改通报.2006.

作者简介：朱进岳，处长，温州市港航管理中心船检处，温州市龙湾区新三路 16 号高新大厦，13505779736，646999@qq.com

基于电子围栏技术的海上“小交管”应用研究

霍小明[1] 俞 毅[2]

（1.东海航海保障中心温州航标处，浙江 温州 325003；2.东海航海保障中心，上海 200086）

摘 要：随着边缘计算、大数据、人工智能技术的飞速发展，航标新技术不断得到应用和拓展。电子围栏作为无线电航标技术范畴，其应用场景和优点不断得到凸显，其广泛应用于海上风电场、海洋牧场等新业态以及水上施工水域管理、岛礁水域避险、桥梁防碰撞等预警应用管理，对船 舶流疏导、航行风险预警等发挥着重要的“小交管”作用。

关键词：电子围栏；航标；碰撞预警；小交管

一、引言

近年来，随着海洋经济的快速发展，海上活动日益频繁，风电场、海洋牧场以及跨海桥梁等建设加快步伐，同时随着陆岛交通的快速发展，陆岛间的联系愈发紧密，海底管道、管缆等错综复杂。风电场、海洋牧场建设所处水域大多位于沿海水域及航路周边，其建设的同时对周边航路船舶产生较大影响，虽然项目业主单位按照国家航标相关法律法规，以及技术标准和规范等要求，对水上工程项目配布了助导航设施，但被动式的提供助导航服务已逐渐不能很好满足发展中的新业态、新场景需求，特别是能见度不良情况下，视觉航标的助航效能极其有限，由此，日益增多的海上风电场、海洋牧场等项目对船舶安全、便捷航行带来较大挑战，同时海上风电场、海洋牧场等项目本身的安全也会受到巨大威胁，因此亟需应用航标新技术来弥补航标助航效能的不足，形成既能够发挥航标助航效能又能够起到主动警示和提醒过往船舶的工作局面。

二、电子围栏技术及功能

电子围栏系统通过 AIS 等系统感知船舶的位置，根据水域和船舶航行特征，实时分析船舶运动态势。当出现危险局面时，及时发出电子信息和声光报警信息，警示危险船舶，从而起到保护围栏内的设施和船舶的作用，同时系统可提供 VHF 人工值守功能，方便值班人员对现场船舶实时监管。

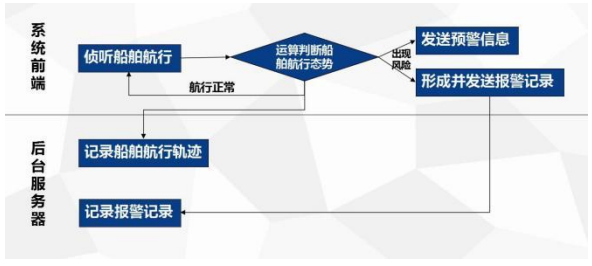


图 1 围栏工作基本框图

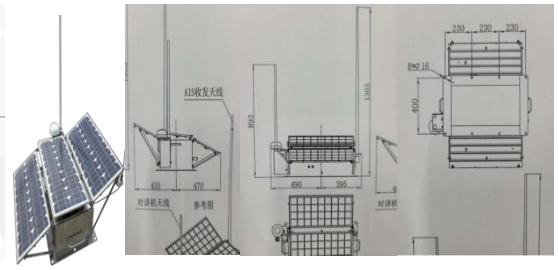


图 2 系统前端设备

三、场景应用研究

（一）海上风电场水域“禁入”预警

海上风电场作为电子围栏系统应用最为广泛的场景之一，在风电场施工期及营运期均能起到非常好的警示效果。在风电场施工期阶段，电子围栏系统可设置一个按照危险程度分为“提醒”“警示”“驱离”三个等级围栏的海上作业区域，保障风电场施工期作业船舶、设施安全及附近水域船舶航行安全；在营运期,电子围栏系统可设置一个场区警戒线，同时可叠加声、光、CCTV、小目标雷达等技术提供更为精准的预警服务，同时后台管理人员还可通过该系统进行人工干预。

辖区苍南水域已建成苍南 1 号、2 号、4 号风电场，在建苍南 5 号风电场，大力发展风电资源的同时对周边水域的船舶航行造成较大影响。苍南 4 号海上风电场为该水域的第一个建设项目，场区位于浙江省苍南县东部海域，场区水深 24m～30m，涉海面积约 53.2km²，中心离岸距离约 36km。本

工程周边水域渔船作业频繁，且航迹纵横交错，受航行和作业条件影响，场区及周边水域非运输船交通流分布与其他船舶交通流之间具有较大的差异性。另外场区附近有东航路和西航路两条主要交通流，距离场区边缘 1～2 海里。一旦有船舶误入到风电场场区影响施工或者碰撞风机都有可能造成巨大的经济损失，因此 4 号风电场除按照现有风电场航标技术标准规范配布助导航设施外再增加电子围栏系统的配布，形成主动预警和助航信息相互弥补、冗余叠加的助航+预警的格局，将对保障该场区施工期作业安全起到重要作用。

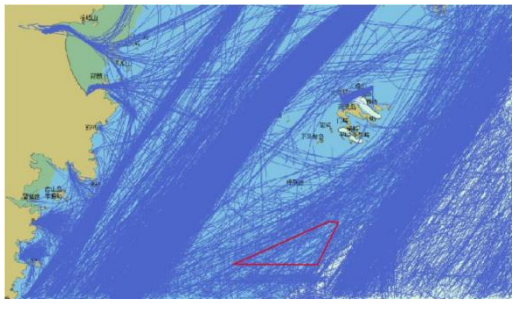


图 3 风电场周边东、西航路船舶航行状况

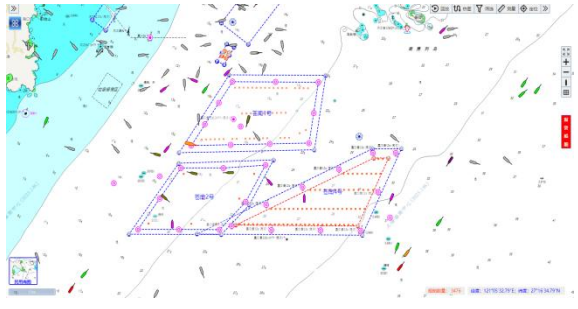


图 4 风电场围栏布设

苍南 4 号风电场自 2021 年 4 月 1 日布设电子围栏系统至 2023 年 12 月 31 日，系统发挥了重要警示作用，共提供一级预警船舶 8700 余艘次，并据电子围栏系统统计分析，尤以渔业捕捞船、货船为主，其中捕捞船 4500 余艘次、货船 1350 余艘次，有力保障了风电场的施工作业安全以及过往船舶航行安全。

（二）海底管道“禁停”预警

海底管道场景主要是禁止航经船舶在管道附近锚泊，当电子围栏系统通过程序运算检测到航经船舶非正常减速时，系统将通过 AIS 报文信息和 VHF16 频道语音报警方式提醒船舶禁止锚泊，可有效保护管道安全。

册子岛—镇海海底管道自舟山册子岛西岙，经大菜花北侧至镇海岚山中转油库，册镇管道全长 44.5km，其中海底管道建设竣工长度为 37.5km，于 2006 年建成投产。管道沿线理论水深位于 0～22m 之间，水深分布不均，潮差变化较大，潮流流速快，地质地貌复杂。管道铺设运行后，受客观自然条件和人类活动等因素综合影响，管道所处海域水动力条件发生了变化，部分区域海床发生了不同程度的冲刷，致使沿线管道出现了悬空现象。册子岛附近海域状况复杂且管道周边有跨海大桥及航道、锚地，来往船只一旦抛锚， 将对海底管道造成较大安全风险。需要及时警示过往船舶，以保证海底管道的安全。

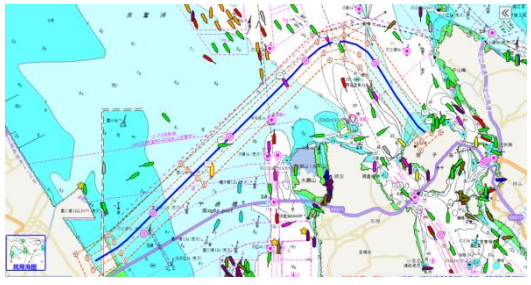


图 5 册子岛—镇海海底管道围栏布设

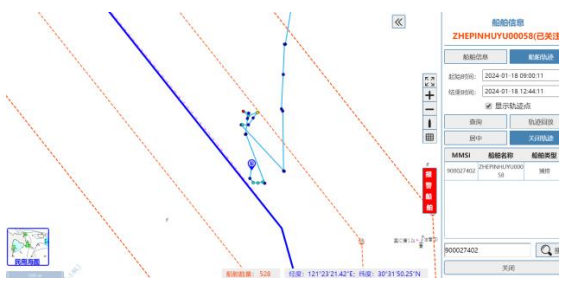


图 6 船舶驶离管道水域

本场景中，电子围栏系统监测到一船舶在管道预设报警水域内航速行为异常，并立即通过 VHF16 频道语音警示该船舶驶离管道水域，船舶接收到报警信息后立即调转航向驶离该水域。

（三）施工水域“导流”预警

施工水域周边通航环境复杂，船舶航行安全风险压力大，电子围栏系统保障策略可疏导船舶有序航行，避免在施工水域发生交叉、追越等危险行为。

项目起点衔接戚家山枢纽，路线向东(舟山方向)延伸，设置金塘海底隧道下穿宏源路，盾构隧

道上穿在建甬舟铁路盾构隧道，后在富山路下方埋设，与在建甬舟铁路隧道共廊带平行布置入金塘水道，其中海中段结构水平净距 46～470m。公路隧道穿金塘水道至舟山金塘岛大浦口登陆。路线全长约 18.038km。由于甬江口水域附近船舶交通密度大，隧道路由涉及码头水域、航道水域及锚地水域，对通航环境的影响很大，为最大限度地避免和减少水上水下活动对通航环境的影响，维护通航秩序，保护通航资源，保障通航安全，促进水运经济的发展，依据施工概况和水域通航环境现状，就涉水工程施工期的施工通航安全进行分析研究，提出保障施工通航安全措施和建议，以期降低通航安全风险，保障施工期间船舶通航与
施工作业的安全，并形成施工条件安全保障方案。



图 7 船舶施工水域有序通行

本场景中，对施工水域布设电子围栏系统，通过播发区域预警信息，提醒过往船舶注意航行安全，引导船舶有序通行。

（四）桥区水域“纠偏”预警

对于复杂桥区水域，电子围栏系统可有效发出预警，纠正船舶航向，避免船舶误入桥梁禁航桥孔或触碰桥墩风险，对防止船舶触碰桥梁有着重要作用。

大门大桥是浙江省重点工程项目，该工程起点位于乐清市翁垟镇，接翁垟地方公路，路线向东跨越沙头水道，终点为小门岛最西南端，同步建设小门岛接线，与小门大桥相接。路线全长约 9.32km，其中大门大桥长约 6135m。大门大桥附近水域船舶流量较大，船型多，根据实际通航情况设置如下图所示的电子围栏，设置禁航区、航道区、预警区等引导船舶顺利过桥。

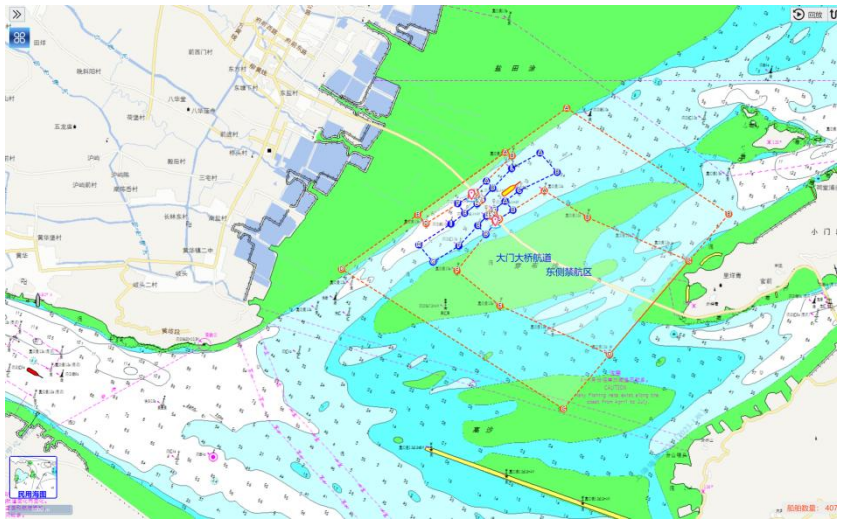


图 8 大门大桥电子围栏设置示意

2021 年 11 月 28 日晚 21 时 01 分，东海 85 轮在过大门大桥时，出现偏航的情况，围栏系统通过程序运算并判断该船舶可能会触碰大桥桥墩，因此系统立即通过 VHF16 频道向船舶推送偏航语音

预警，随后船舶调整航向消除风险。

（五）岛礁区“危险”预警

船舶航行于岛礁区风险极高，稍有不慎，船舶有可能触碰礁石发生触礁沉没事故，电子围栏系统可以有效标识岛礁水域，并设置报警区域，船舶一旦误入触发报警阀值，系统可及时发出预警信息，提醒船舶谨慎航行，远离岛礁水域。

册子水道主要有百亩暗礁和半洋礁两暗礁。暗礁的西侧为宁波舟山港核心港区定线制水域，沿定线制水域过西堠门的船舶较多，其东侧为定海老塘山港区，进出港靠离泊的大型船舶交通流密集。册子水道涨潮为西北流，落潮为东南流，流速 2～4 节。在百亩暗礁附近设有册子灯浮。但尽管设置册子灯浮，在 2016 年～2019 年共计发生 3 起船舶触礁事故，主要发生事故的水域均为册子岛百亩暗礁，共计造成经济损失 500 余万元。因此自 2020 年起在百亩暗礁水域设置电子围栏，通过 VHF 手段对航经相关水域的船舶提供预警提醒服务，该水域再未发生触礁事故。

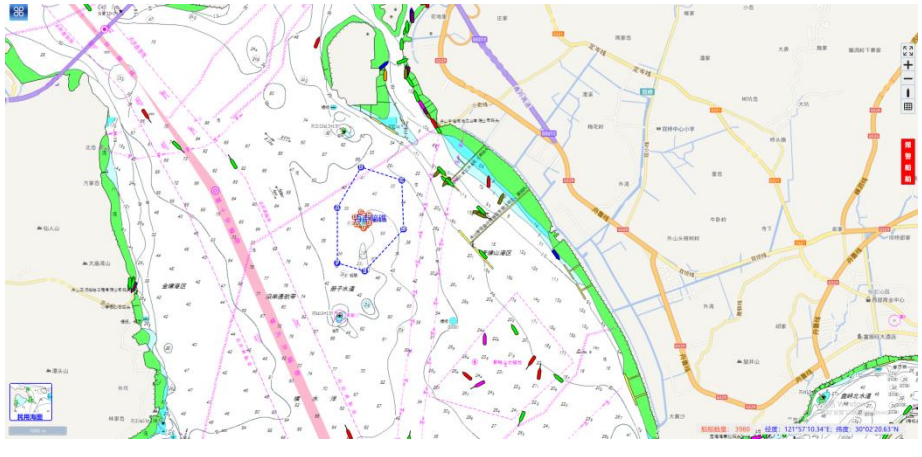


图 9 百亩暗礁电子围栏布设

综上场景应用案例，电子围栏系统像是矗立在现场的“电子警察”，忠诚守候、主动示警，发挥着水上“小交管”作用，提醒过往船舶不要驶入、不要锚泊、有序航行、不要偏离、远离危险水域等，为船舶安全航行和设施本身安全提供重要保障。

四、问题和建议

电子围栏技术的应用对海上风电场等场景水域船舶安全航行起到重要的作用，但随着场景应用的不断增加，围栏系统也带来一些新的问题，如果不针对性的解决和提出对策措施，势必会影响系统的可持续使用。

（一）需考虑使用中存在的问题

1.VHF16 频道占用问题

电子围栏是通过 VHF16 频道向越界船舶发出语音报警信息的，而 16 频道是海上船舶通信的公共频道，如果某一水域场景应用较多，频繁使用 VHF16 频道将会对水域周边船舶公共频道通信造成严重影响，进而会带来船舶航行新的风险和隐患。

2.船舶 AIS 信息延时问题

电子围栏是基于 AIS 技术进行应用的，系统前端接收到越界 AIS 船舶信息后，通过网络传回岸端服务器，并经过信息处理再通过岸端服务器发送到现场，这个过程因为传输、运算处理、反馈等节点，再向船舶发送预警信息时已经延时了，这样就有可能导致船舶越界等紧迫局面的出现。

3.系统安全性问题

电子围栏系统如果没有经过专门的网络安全策略设置和高级别的等保要求设定，系统的安全性将会得不到保证，一旦受到外界入侵系统，将带来极其严重的后果。

（二）建议和措施

1.制定合理的区域报警策略

电子围栏作为场景辅助管理的技术手段，在场景应用时，必须基于不同场景的特点和水域通航现状，制定个性化的区域报警策略，要充分考虑周边船舶通航状况、船舶种类、报警水域设置的范围、报警触发后播发频率和间隔等因素，同时系统内部运算程序计算应尽可能精准，以及通过优化算法筛选出真正需要获取预警信息的船舶，减少无风险船舶触发报警的概率，还可设置船舶触发报警后 VHF16 频道播发频次及有效性等问题。总之，合理的区域报警策略和精准的算法可以大大减少 VHF16 频道被占用的情况，有效解决场景水域相互干扰问题。

2.边缘计算技术的应用

电子围栏应用边缘计算技术，采用现场点对点的工作模式，减少因传输、运算处理、反馈等节点产生的延时问题，提高现场信息的实时性和有效性，实现前端不依赖于网络环境即可实时预警。

3.高等级网络安全策略应用

电子围栏现场数据通过场景现场专线传回岸端服务器，杜绝因公网传输带来的数据安全隐患，岸端服务器和数据存储应制定高级别的网络安全策略，确保网络安全和数据存储安全，同时可考虑应用区块链技术，确保信息安全。

五、结语

随着国家海洋强国战略的不断实施，海上活动参与者将越来越多，保障海上船舶安全、便捷、经济、通畅航行是航海保障部门应尽的职责和使命，如何更好履职和提供导助航服务是航保单位永恒的命题，电子围栏技术在海上风电场等场景的应用能够有效弥补传统导助航系统存在的不足，起到了现场交通服务“小交管”的作用，对顺畅水域船舶航行和保护场景设施自身安全均有着非常重要的作用。随着航标新技术的发展和不断推陈出新，特别是人工智能的应用，航保单位将继续深挖和开发系统应用，更好服务海上活动各方参与者。

参考文献

［1］ 杨晓环.一种优化的AIS与VTS融合算法.交通部上海船舶运输科学研究所学报.2022.

［2］ 纪宁毅，尹杰.海上风电场建设施工期风险点的识别与控制.机电设备，2019，36(03):40-43.

作者简介：霍小明，东海航海保障中心温州航标处，浙江省温州市惠民路 1638 号，325003，hxm-023@126.com；俞毅，东海航海保障中心，上海市四平路 190 号海事大厦，200086

大型 LNG 船舶进温州港的引航和操纵

陈志良

温州港引航站

摘 要： LNG（liquefied Natural Gas）具有易燃、易爆等特性，LNG 船舶在进出港过程中一旦发生碰撞、搁浅、触碰等事故，易导致更严重的次生事故，给海上人命财产安全和海洋环境带来重大不利影响。浙能温州液化天然气码头为 2023 年 8 月开始运营，为保障大型 LNG 船舶进出港安全，特别是靠泊安全。本文分析了浙能温州液化天然气码头的进港航道、码头平面布置、回旋水域、碍航物、水文气象等通航环境，通过一次低潮位和一次高潮位的引航进港掉头靠泊实例，结合大型 LNG 船舶的特性提出了大型 LNG 船舶的进港航速控制、掉头时机选择，拖轮使用、碍航物的避让及靠泊角度和速度等操纵要点；概括了 LNG 船舶进港靠泊浙能温州液化天然气码头引航操纵要点和注意事项。本研究为引航站安排大型 LNG 船舶进港靠泊浙能温州液化天然气码头提供了技术支持，有效的保障了 LNG 船舶在港口的航行安全。

关键词：液化天然气船舶；航行；掉头靠泊；引航；操纵

0 引言

液化天然气船舶是世界上危险性最高的船舶之一。业界对大型 LNG 船舶的航行、靠离泊等工作均有严格的要求。《液化天然气码头设计规范》（JTS165-5-2021）中 5.3.10 规定，海港液化天然气船舶或装置停靠码头时船艏宜朝向有利于船舶紧急离开码头的方向[1]。浙能温州液化天然气码头受岛礁影响，回旋水域设置在码头东侧，大型 LNG 船舶掉头靠泊操纵困难。本文结合引航员对大型 LNG 船舶的操纵特性、航道码头水文情况及靠离泊技术的摸索和总结，围绕二次不同潮水情况下的引航进港靠泊，探讨大型 LNG 船舶进港掉头靠泊的安全合理性。

1 码头情况

温州液化天然气（LNG）码头位于小门岛东北部华尾咀矶头北侧水域，西距已建华电公司 5 万吨级 LPG 码头约 600m，地理坐标约为 28° 00′ 35″ N、121° 04′ 37″ E。该 LNG 码头靠泊的主力船型为 17.5 万 m^3 的大型 LNG 船舶，最大设计船型为 Q-Max 型（26.6 万 m^3）。码头设计前沿线为 108° ～288° ，LNG 码头长 415m、宽 110m，码头前沿停泊水域设计底高程为-14.8m；回旋水域布置在 LNG 码头靠外海方向，呈“椭圆”形，长轴为 Q-Max 船型 的 3 倍船长即 1035m、短轴为 2.5 倍船长即 690m，设计底高程为-14.8m。码头进出港航道满足主力船型 LNG 船舶单向全潮通航，兼顾最大船型乘潮通航考虑，设计宽度 360m。码头回旋水域与航道连接段长约 1.1 海里。

2 大型 LNG 船舶操纵特性

（1)大型 LNG 船舶盲区大，影响瞭望[2]。薄膜型的 LNG 船舶通常驾驶台前右侧有一收集 LNG 挥发气体的舱室，进一步影响瞭望，特别是右舷靠泊时，不利于观察船位；

（2 船型大、吃水浅、干舷高、船型宽，受风影响比其他船型更加明显[2]；

（3)部分大型 LNG 船舶具有汽轮机停车和主机换向时间长的特点[3]。

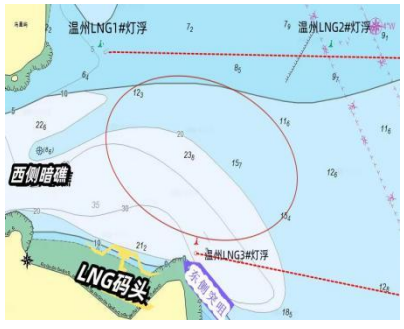
3 潮流

码头水域水流总体以往复流为主，由于近岸流速相对较小，流向略分散，但主流总体集中。码头东端 MX1 站涨潮流速对应流向集中在 280° ～300° 之间、占 23.89%，落潮流速对应流向集中在 100° ～120° 之间、占 22.55%，流速大于 1m/s 的连续 15 天出现有 2 次，均在涨潮流期间，且对本项目码头而言均为压拢流。码头西端 MX2 站垂线平均流速均小于 1.0m/s，落潮流速对应流向主要集中在 90° ～110° 之间、占 21.81%， 涨潮流速对应流向主要集中在 270° ～290° 之间、占 19.29%。

4 航道和碍航物情况

4.1 航道

进港靠泊 LNG 码头的航道全长 17 海里，由内航道和外航道组成，以 Z0 灯浮为界。外航道总宽度为 800m，东侧 360m 深槽的设计底高程为-14.8m，满足 26.6 万 m^3 LNG 船舶（控制吃水 12.0m）单向全潮通航；西侧 440m 为自然水深航道，最浅水深为 12.2m。内航道航道宽 360m，设计底高程为 14.8m，满足 26.6 万 m^3 LNG 船舶单向全潮通航。





删除[陈]:

设置格式[陈]: 缩进: 首行缩进: 5 字符, 行距: 单倍行距

图 1 LNG 码头平面示意图 图 2 LNG 船舶进港航道示意图

4.2 碍航物

浙能温州液化天然气 LNG 码头的回旋水域西侧 200 米处存在暗礁，概 位 121° 04′ 29″ E、28° 00′ 48″ N，礁石处水深 8.6m。码头东侧岸线突咀存在石质浅滩（85 高程下 6m），突咀伸出码头面延长线约 45 米，最近处距停泊水域仅 10 米。回旋水域北侧存在浅滩。

5 靠泊及航行实例

5.1 “雅锐”（YARI LNG）轮涨未掉头靠泊

5.1.1 船舶资料

表 1 “雅锐”轮主要参素

船长(m)	船宽（m）	吃水(m)	载货量（t）
294.2	44	11.1	67485

5.1.2 潮汐资料

2023 年 8 月 7 日，码头附近黄大岙高潮时 1302，潮高 591cm；低潮潮时 1906，潮高 154cm。

5.1.3 航行、掉头靠泊

该轮计划 8 月 7 日 1245 时靠泊小门岛 LNG 码头，掉头右舷靠泊，偏东南风 3～4 节，靠泊时间为黄大岙高潮前 15 分钟，当时为大潮汛，潮流较急，进港时流速约为 2 节，掉头时流速预计在 1 节左右。引航员 1010 时在温州外 1 号灯浮登轮点登轮，登轮时“雅锐”轮航速 5 节。船舶航行速度控制在 12 节左右，航向 315 度。过 W1 灯浮后开始减速，过 W6 灯浮时航速降为 7 节，航向调整为 310 度，并开始带拖轮。拖轮布置在左舷首、艉各二艘，两艘 5000 马力拖轮“温消拖 16”系左舷最前面，“温消拖 17”系左舷最后面，另二艘 4000 马力拖轮放中间，图 3 是“雅锐”轮掉头靠泊示意图。引领该轮至位置 1 之前，带好所有拖轮，航速降至 5 节。1210 时船舶到达位置 2，航速 4 节，利用船艉拖轮平行拉，控制航速；1213 船舶到达位置 3，驾驶台平 LNG 2 号灯浮时，船速控制在 1.5 节，利用船首拖轮垂直拉，船艉拖轮垂直顶开始向左掉头。根据船舶转向速度，适时利用中间两艘拖轮顶拉。待船舶至位置 4，船首拖轮停车，并回到顶位，利用船艉拖轮及船舶惯性，使船舶完成掉头，此时船舶航向为 95 度左右，船位位于码头东北侧（位置 5），此时启动船舶倒车后退至码头正横外。后退过程中为避免船舶大幅度偏转，采用船艉两艘拖轮顶进行抑制，后退速度控制在 1 节以内。一旦拖轮无法抑制船首偏转，需要立即停车。1225 时船舶到达位置 6，距码头横距大于 0.2 海里，改用 4 艘拖轮一起顶，并使船舶与水流有一定的角度，使船舶外侧受流，利用本船推进器控制船舶前冲后缩。到达位置 7 时，船舶位于码头外侧约 0.1 海里。此时提前部署船首和船艉拖轮垂直拉，并使拖缆适当受力，利用中间两拖轮顶，使船舶向码头贴拢。在进靠过程中，适时调整船舶靠泊角度和横向速度，使之以小于 5cm/s 的横向速度缓慢贴上码头。

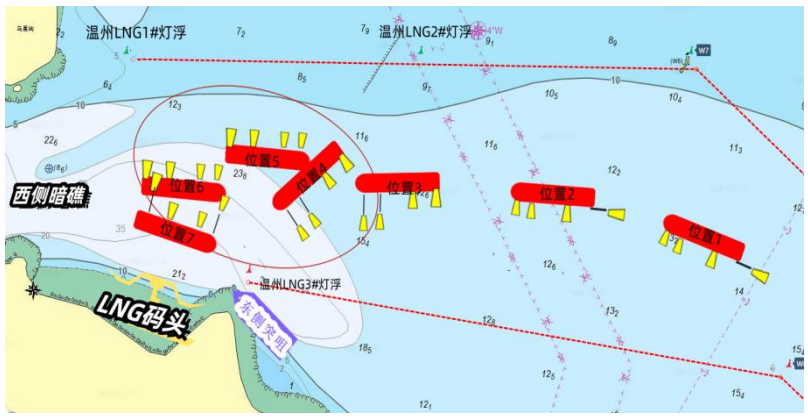


图 3 “雅锐”轮掉头靠泊示意图

5.2 “南十字星”（SOUTHERN CROSS）轮初涨掉头靠泊

5.2.1 船舶资料

表 2“南十字星”轮主要参素

船长(m)	船宽（m）	吃水(m)	载货量（t）
290	46.95	10.7	57817

5.2.2 潮汐资料

2023 年 10 月 12 日（农历八月廿八，中潮汛），黄大岙高潮时 0744，潮高 574cm；低潮潮时 1359，潮高 140cm。

5.2.3 航行和掉头靠泊

该轮计划 10 月 12 日 1500 时在黄大岙低平潮后初涨时段靠泊小门岛 LNG 码头，拟采用向左掉头右舷靠泊，拖轮系带方式同前：船首左前 2 艘，船尾左后 2 艘。当时实际风力偏东风 3～4 节。1200 引航员在温州外 1 号灯浮上船，整个航行过程为顶流，平均航行速度约 10 节，过 W3 灯浮后开始减速，到达 W6 灯浮航速控制在 7 节，到达 W8 灯浮开始带拖轮，航速控制在 5 节，先带船头船艉“温拖 16”、“温拖 17”拖轮，“温拖 2”到右侧船首，无带缆，“温拖 8”带左舷驾驶台前。图 4 是“南十字星”靠泊示意图。1408 时带好拖轮，船舶处于位置 1，航速 4 节，顶落潮流趟航。1422 时到达位置 2，航速 2 节，船头“温拖 16”开始垂直拉，“温拖 2”和船艉“温拖 17”垂直顶，利用拖轮开始掉头，1435 时，船舶航向 100 度左右，航速 0.5 节，至位置 3，基本完成掉头，此时开始涨潮，指挥“温拖 2”到左舷 2 舱顶位。由于掉头区设置在 LNG 码头的东北侧，掉好头后，船位易偏东，微速倒车，使船舶保持 0.5～1kn 的后退速度接近码头，在后退过程中，船艉外转，“温拖 17”、“温拖 18”都快车停，由于受倒车横向力影响，整个船位仍有外移，后退速度为 1 节，至位置 4，停车，船艉拖轮继续快车顶，船舶进车控制船速，至位置 5，利用前后拖轮顶，适时进车控制船舶前冲后缩；至位置 6 时，令前后拖轮缆绳得力准备拉，船中的拖轮则负责顶推。随着与码头距离不断接近，充分利用四艘拖轮来调整码头与船身的角度，以不超过 5cm/s 的横向速度贴拢码头。

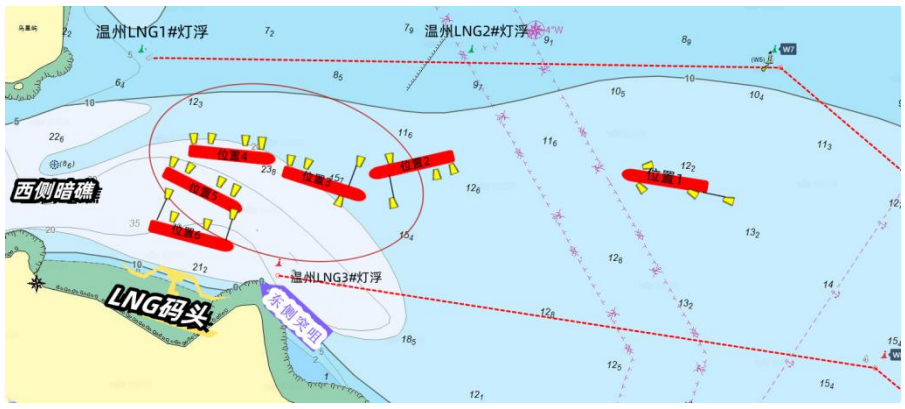


图 4“南十字星”轮掉头靠泊示意图（图的说明放在下面）

6 操纵要点分析

6.1 时间节点控制

大型 LNG 船舶从登轮点到码头全程 17 海里。靠初落，全程顺水进港，考虑到护航船队，航行速度可以控制在 12 节以下，从登轮点到开始带拖轮时间为 1.5 小时，趟航、掉头到贴上码头为 1 小时，全程按 2.5 小时控制。靠初涨，全程顶水进港，航行速度在 10 节左右，航行时间需增加 0.3 小时，全程需 2.8 小时，在黄大岙低潮后 30 分钟，回旋水域处才开始转流，船舶低达回旋水域时间不宜过早。

6.2 余速控制

大型 LNG 船舶掉头靠泊，控制余速是关键，靠初落时，船舶进港都是涨潮，流速能达到 2 节；靠初涨，进港时都是落潮，因此船速的控制需要根据涨落潮实际情况进行调整。一般而言，靠初落时船舶过了 W1 号灯浮就需要开始减速，靠初涨在 W3 号灯浮开始减速，在 W6 灯浮时（距泊位 3 海里）余速控制在 8 节以下，并解散护航编队，准备带拖轮。到 W8 灯浮时（距泊位 1.5 海里）余速控制在 6 节以内。在带好拖轮后，可以令船艉拖轮放缆平行拉（图 3 位置 2 所示），来控制大船余速，在到达 LNG 2 号灯浮附近开始掉头前，船舶余速控制在 2 节以内。在掉头过程中可适当使用倒车，控制船舶前冲。由于掉头区的位置特殊性，掉好头后，船舶需要后退入泊，后退速度不宜大于 1 节。

6.3 掉头时机及船位的控制

受西侧暗礁和北侧岛屿的影响，温州液化天然气（LNG）码头的回旋水域设在码头东侧，掉头靠泊需在东侧掉好头后，后退到泊位前方，然后入泊。过早掉头，后退距离过长，船位难控制；延迟掉头，离西侧暗礁距离过近，有触礁风险。同时，在入泊过程中受泊位东侧突咀的影响，船舶需要提前到达泊位正横外。因此，掉头的时机和船位的控制都非常重要。船位过 LNG 2 号灯浮后开始掉头，靠涨未时，受涨水流影响，掉头前船位应位于航道中心线；靠初涨，船舶进入回旋水域时，水流还是微落，船位控制在航道中心线偏右，掉好头后距泊位一般 500 米左右，在倒车前，航向要小于 95 度，且倒车过程中，受倒车横向力影响，要提前用船艉拖轮抑制，防止船舶右转，船艉冲向左侧浅滩。在船舶后退和入泊过程中，要时刻关注西侧暗礁和东侧突咀，利用船上雷达使船舶与两碍航物保持足够的安全距离。在入泊过程中，保持驾驶台的位置在西边第三缆桩与靠泊平台之间，利用 LNG 船舶的车舵来控制船舶的前冲后缩。

6.4 拖轮的使用

大型 LNG 船舶靠泊拖轮使用为 4 艘助泊和 1 艘应急拖轮，拖轮马力为两艘 5000 马力，三艘 4000 马力。船舶一定要提前带好拖轮，利用拖轮协助减速和掉头。建议到达 W8 灯浮之前带好拖轮，左舷船首、船艉带上 5000 马力拖轮，右舷船首可安排一艘 4000 马力拖轮，无需带缆，在掉头过程中协助掉头。在其他拖轮带好缆后，左舷驾驶台前的拖轮再过来就位，可自行带缆（大型 LNG 船舶中间拖轮位都有拖轮船员自己带缆的缆桩）。到达回旋水域之前，如速度过快时，可利用船艉拖轮放缆平行拉（图 4 位置 1 所示），控制船速；或者无舵效时，利用主机进车，船艉拖轮平行拉，保持船舶既有舵效，又能控制船速。在船舶到达回旋水域时，令船首左舷拖轮放缆垂直拉，船首右侧垂直顶，船艉左侧拖轮垂直顶，有助于尽快完成掉头。掉完头后，右侧拖轮回到左侧 2 号位（图 4 位置 4 所示）。船舶在后退过程中，要提前利用船艉二艘拖轮顶推，低消船舶倒车横向力。在入泊过程中，在距离泊位横距 200 米左右，令艏、艉二拖轮放缆处于垂直拉的位置（图 4 位置 6 所示），利用 4 艘拖轮的力差控制横移速度和靠泊角度。在掉头与后退过程中，另一艘应急拖轮可部署在西侧暗礁前的水域，起到临时警示的作用。

7 注意事项

1）温州港大型 LNG 船舶登轮点位于无遮蔽水域，常年涌浪较大，要控制登轮速度。利用拖轮接送时，登轮速度不宜超过 5 节。

2）外航道总宽度为 800 米，两侧设实体航标，其中航道东侧 360 米为深水航道，深水航道左侧设虚拟航标，进港船舶应计算好潮位。靠初涨时，船舶低潮进港，船舶需走在东侧深水航道。在 W1 灯浮附近，不管涨水还是落水，都有一股较强的横流，且航道左侧为园屿锚地，锚泊船较多，船舶航行此处时，引航员要配好流压差，且航速不宜过慢。

3）靠初涨时，回旋水域西侧暗礁水深不能满足大型 LNG 船舶的通航的要求，安排应急拖轮到暗礁东侧水域担任临时警示标志。

4）本码头的回旋水域设在码头东侧，掉头前要考虑到水流的影响；靠涨未时，船舶进入回旋水域还有涨水流，船舶左侧受流；靠初涨时，船舶进入回旋水域时，水流还是微落，船舶右侧受流，掉头前要根据水流情况控制好船位。掉好头后退过程中，受水流和倒车横向力的影响，要时刻关注船舶偏转，及时用拖轮进行抑制。

5) 码头东侧岸线突咀存在石质浅滩（85 高程下 6m），突咀伸出码头面约 45 米，最近处距停泊水域仅 10 米左右。在做引航计划时，根据船舶结构标示出驾驶台所对应码头位置，在靠泊过程中，在距码头 2 个船宽的位置之前应摆好船位，且需控制好前冲后缩，防止船舶在入泊过程中触礁。

6) 入泊过程中，要充分考虑风流情况，充分利用码头的靠泊仪，观察本船的靠泊角度与速度，在距码头 150 米后，应逐渐缩小与码头角度，一般不超过 10 度，在距码头一倍船宽时，横移速度应该保持在 10cm/s 以下。

8 结语

温州小门岛 LNG 码头处于岛礁区。受前后暗礁及潮汐限制，驾引人员在靠离该码头前对可能碰到的问题要有充分的准备。笔者通过 LNG 码头投产后的二次掉头靠泊分析和总结，旨在探讨大型 LNG 船舶掉头靠泊的安全合理性，为今后的常态化靠泊工作提供有益的参考。

参考文献

[1] 董方，液化码头天然气设计规范，中华人民共和国行业标准 2021
[2] 陈利忠，大型LNG船舶进靠宁波穿山码头的引航操纵[A]，航海技术，2023（6）
[3] 胡德水，广西铁山港液化天然气（LNG）码头船舶靠泊安全探讨，中国水运[A]，2021（2）

作者简介：陈志良，高级引航员，温州港引航站，13587873370，（E-mail）czl1216@163.com

屡次违章船舶治理的做法和思考

董曼莱

温州海事局执法督察处

摘 要：针对辖区船舶违法行为频发、多发，温州海事局通过数据分析、总结归类，提出对屡次违章船舶开展重点治理，通过压实前端航运管理公司、船舶实际控制人主体责任强化源头管理，到中端对船舶、船员从严从重监管强化过程管控，再到后端海事信用管理、信息共享共治强化协同治理，全面堵牢屡次违章船舶监管漏洞，以全要素、全链条监管加多主体、多部门协同实现屡次违章船舶综合性高效治理，取得一定成效。在评估总结基础上，提出强化违章动态清零、深化共享共治实践等思考。

关键词：屡次违章；船舶治理；共享共治；高水平安全

为保障水上人命、财产安全，营造诚信清正的水上交通安全环境，进一步督促船舶所有人、经营人或管理人及实际控制人提升船舶安全和防污染管理标准和能力，力求以高水平安全推进高质量发展，温州海事局针对辖区船舶违法行为频发、多发，提出对屡次违章高频违法船舶开展重点整治，在浙江海事局相关职能部门大力支持和指导下，辖区屡次违章船舶治理取得一定成效。

一、背景和思路

经过前期梳理，我们发现辖区部分船舶和公司在不足一年的时间内就有十余次违章，存在屡罚不改、屡改屡犯的现象，违章发生如此频繁，相对人是否整改到位？为何会屡罚不改、屡改屡犯？是否一定程度存在以罚代管的现象？引发了我们的深入思考。通过前期走访调研和系统数据分析，我们发现，屡次违章船舶往往存在以下问题：船况较差——这些船舶通常存在实际状况与持有的证书、文书不符或船舶未持有有效的证书文书；船员安全意识淡薄——船舶超载、未正常启闭 AIS、超航区等违章行为时常发生；公司管理严重缺位——单船年度平均违章 14.7 起，个别船舶甚至超过了 25

起，单船平均违章超过同期温州海事局辖区违章船舶平均违章数量 2.59 起 5 倍以上，这些船舶不仅自身存在严重的安全隐患，据统计，自 2019 年至 2021 年 3 月，温州辖区水上交通事故中有 4 起是屡次违章船舶及所属公司管理船舶造成的，其中 3 艘船舶沉没，一般等级以上事故 2 起（共 13 起），占比 15.38%，造成损失 262.95 万元（共 2590 万），占比 10.15%，5 人死亡或失踪（共 13 人），占比 38.46%。在温州辖区，“生松工”“新中源”“东海”“远航”系列等屡次违章船舶的存在还严重扰乱了航运市场秩序，催生部分原本守法营运的船舶在不良示范下减少安全投入，单船带病量增加明显，屡次违章船舶的不良示范给海事监管工作带来巨大压力。虽然对这类船舶违章查处的力度和处罚额度都很大，但整改效果不明显，屡次违章船舶仍在辖区继续活动、反复违章，不满足“管业务必须管安全”的行政执法要求，给海事执法人员造成一定的执法责任风险。

屡次违章船舶的长期存在势必影响辖区水上形势的本质安全，更加无法以高水平安全保障辖区的高质量发展，如何对屡次违章船舶开展治理成为摆在我们眼前不容忽视的问题，局领导高度重视，组织多部门共同研判，最终基于大量的数据分析，明确将 1 年内在温州辖区有 5 次以上违章处罚的船舶确定为“屡次违章船舶”并明确对屡次违章船舶开展全链条监管的治理思路，将高水平安全的理念贯穿屡次违章船舶治理的始终，通过压实前端航运管理公司、船舶实际控制人主体责任强化源头管理，到中端对船舶、船员从严从重监管强化过程管控，再到后端海事信用管理、信息共享共治强化协同治理，全面堵牢屡次违章船舶监管漏洞，以多主体监管加多部门协同实现屡次违章船舶综合性高效治理。

二、做法和成效

（一）主要做法

一是数据整合实现动态管控

以行政处罚数据为基础，定期梳理辖区屡次违章船舶，并借助各种业务系统+互联网，锁定屡次违章船舶的船籍港、所属公司和实际控制人等信息，每季度首月 10 日前在内网公布屡次违章船舶名单及相关信息（以下简称“屡违名单”）并在海上智控平台上对屡次违章船舶进行标注。局交管中心密切关注屡次违章船舶进出港口报告，并及时提醒辖区海事处值班室。各海事处值班室每日查询辖区屡违船舶动态并及时跟踪，按要求发布现场综合执法任务加强管控，实时开展局处联动，截至目前对目标船舶及公司共计发布定向指令 51 条，检查任务 613 条，对辖区航行的屡违船舶做到动态全掌握，安全风险总体可控。

二是精准打击避免以罚代管

对列入“屡违名单”的**船舶**在温州辖区实行“首到港必安检”并合理加大现场检查频次，即屡次违章船舶所在或首访辖区海事处对其实施全面安检，应查尽查、从严把关，发现缺陷符合滞留的一律予以滞留。据统计，屡次违章船舶单船平均缺陷数 7.4 个，滞留比为 8.1%，远高于辖区一般船舶安检单船缺陷平均数（5.6 个）、滞留比（3.2%），一定程度上也反映了屡次违章船舶确实船况较差，对其精准打击、加强监管确有必要，通过加强安检促使其改善船舶状况。

对在屡次违章船舶上任职的**船员**，对其违法行为均在裁量幅度内从重处罚，对不适任船员予以清退，对无证驾驶等性质严重、情节恶劣且符合条件的移送其他行政、司法机关处理。截至目前共计对屡次违章船舶相关船员立案 272 件，罚款计 287.1 万元，移送拘留 17 人次。一方面对此类船员违法行为进行严厉打击压缩违法空间，另一方面也增加屡次违章船舶招募不适任船员的成本，倒逼其聘用适任船员。

对屡次违章船舶中较为普遍存在的挂靠现象，防止挂靠公司“挂而不管”，在“屡违名单”公布一个月内，船舶监督处靶向指导屡次违章船舶**实际控制人**，督促其加强管理。约谈连续多次列入屡次违章船舶名单的“生松工”系列屡违船舶实际控制人，明确提出管理意见和标准，截至目前促使“生松工 128”“生松工 98”等系列船舶驶离温州辖区前往外省，“生松工 56”转卖，追根溯源实现风险闭环销号。

对屡次违章船舶**所属公司**加强监管以进一步压实主体责任。对屡次违章船舶所属的本地公司进行跟踪监督指导，截至目前温州海事局共对屡次违章船舶所属的 7 家本地公司走访检查 37 次、专题约谈 3 家次。屡违船舶艘次较多的温州市盛航船务有限公司因长期不掌握船舶动态、未切实履行管理人职责、安全体系运行存在重大问题而被吊销 DOC 证书。对洞头东海船务有限公司进行精准指导，推进该公司管理船舶单船违章数量由最初的一个屡违船舶周期内 60 多次降至仅违章 2 次。

对屡次违章船舶加强**信用管理**，强化协同。在评定诚信公司、诚信船舶、诚信船长时将屡次违章情况作为重要评价因素，在安排体系审核时优先安排屡次违章船舶作为代表船，视情开展附加审核。对 27 艘次申请**政务办理**的屡次违章船舶，限制其申请容缺受理、并联办理、告知承诺、证照分离和绿色通道等政务办理便民措施。对“东海 66”“宝森 5”等 2 艘申请参与水上水下施工作业的屡次违章船舶向其项目部发出《安全知情书》，对屡违船舶参与**施工的项目部**加大检查频次，推动项目部优先准入安全技术状况良好的船舶。被列入“屡违名单”的船舶的基本信息（如船名、船公司、船籍港等）发生变化的仍作为屡次违章船舶管理并将屡次违章船舶及其公司的行政处罚信息报送**信用温州**平台，纳入地方信用管理，让屡次违章船舶在温州辖区航行作业处处受制， 倒逼其切实加强自身安全管理，杜绝带病运营。

三是多维发力促成共享共治

在局处协同上下一体共同对屡次违章船舶实施精准打击加强监管的同时，温州海事局也在水上交通安全信息跨区域跨部门通报，力推信息互通、共享共治上做出有益探索。定期向温州交通运输部门通报温州籍屡次违章船舶信息，推动行业主管部门共同开展屡次违章船舶所属公司管理，实现温州本地公司所属船舶目前已全部脱离屡次违章船舶名单。将屡次违章船舶信息向 22 家非本港籍屡违船舶所属公司定向发送书面通报以及安全管理预警信息 42 条，提请加强安全管理。向 22 家船籍港海事管理机构发函通报相关屡违船舶信息，提请加强辖区公司安全管理开展情况的检查，强化企业管理。“宝森”系列屡违船舶被宁德海事局告知未脱离名单前禁止转卖。

（二）初步成效

在浙江海事局相关职能部门大力支持和指导下，温州海事局在精准打击屡次违章船舶方面先行先试，取得了一定的成效。浙江海上智控平台执法管理场景设计上线时也引入了屡次违章船舶的理念。自开展屡次违章船舶整治至今，温州海事局共开展了 11 期屡次违章船舶重点检查活动，涉及船舶 295 艘次（包括重复入围的屡次违章船舶），入围屡次违章船舶名单的船舶艘数整体呈现下行趋势，截至目前共有 115 艘船舶保持合法营运脱离名单，19 艘船舶在高压监管下转卖外省，1 艘船舶“顺行海 108”主动拆解，2 艘船舶注销登记。按照《温州海事局屡次违章船舶监督管理指南》屡违船舶选船标准，目前已无船舶和公司进入屡违名单，单一船舶屡次违章、高频违法的现象在温州辖区得到有效遏制，辖区水上安全形势持续稳定。

三、启发和意义

（一）关于违章动态清零的不断强化

在屡次违章船舶整治的过程中，我们对打击违法违章行为、提升辖区本质安全水平的认识也不断深化提升。

一是体现在屡次违章船舶的选定标准上。对于屡次违章船舶的选定从最初的 1 年内在温州辖区有超过 5 次违章处罚的标准随着治理的推进和效果的呈现不断动态调整，目前已调整为 1 年内在温州辖区有 4 次及以上违章处罚的选船标准，可以预见，随着屡次违章船舶的深入推进，这一标准还会不断调整直至动态清零。

二是体现在高频违法事项的动态清零上。我们关注到辖区除了存在屡次违章的船，也存在高频违法的事，为进一步实现高水平安全，我们对辖区阶段性高频违法事项进行梳理并按归口由相关业务部门分别提出动态清零的举措，局处共同发力整治高频违法事项，目前此项工作正在大力推进中亦取得了一些阶段性成果，以期杜绝高频违法事项在辖区屡禁不止。

三是体现在突出违法行为的动态清零上。在这个过程中，我们清晰地认识到，要想实现高水平安全、高质量发展，除了在“量”的维度上关注违法事项的动态清零，更要关注违法事项本身的性质，即对影响辖区本质安全的突出违法行为进行梳理并由各部门群策群力开展综合治理、动态清零。只有在“船”和“事”、“质”和“量”的维度共同发力，才能达到事半功倍的效果，维护辖区水上安全形势的持续稳定。

（二）关于共享共治实践的不断深化

屡次违章船舶治理是前期在温州辖区的局地试点，在这个过程中我们也在双违双跨、共享共治上做了一些有益尝试，为了做好下一步工作，我们认为还需在以下几个方面进行提升：

一是内部信息互通，尝试全面推广。充分认识屡次违章船舶对辖区造成的重大安全隐患以及对其开展精准打击进行根本性治理的必要性。在客观评估温州海事局前期屡次违章船舶治理工作的基础上，建议浙江海事局以“船舶+案发时间”为要素抓取系统数据，明确一年内同一艘船舶在不同时间有超过 X 次以上立案处罚（同一时间多个处罚案由按照 1 次计算）的认定为屡次违章船舶，X 根据浙江海事局（或者直属海事系统）近年的行政处罚数据和屡次违章船舶数确定。制定全省统一的屡次违章船舶监管工作指南，明确各单位、部门具体职责和对屡次违章船舶的相关监管举措，建立浙江辖区协同一体的屡次违章船舶管理机制，提升整个浙江辖区屡次违章船舶的监管合力。在运行成熟的基础上可考虑在长三角甚至更广范围推广。

二是外部共享共治，推动综合治理。在前期将屡次违章船舶信息通报属地行业主管部门和船籍港海事管理机构及所属公司基础上，考虑将屡次违章船舶相关情况的通报纳入信息处置类特色通报事项，以便跟踪跨部门跨区域的处置情况，不断推进水上交通安全信息共享共治。

三是紧抓船籍管理为本源，强化内外协同。在系统内，通过在浙江辖区形成监管合力加强浙江籍屡次违章船舶的治理，通过信息共享对外港籍但长期在本地辖区航行作业的屡次违章船舶与本港籍屡次违章船舶同频发力，实现船籍管理和辖区管理共同提升；在系统外，通过信息通报压实行业主管部门监管责任，辅以信用管理等手段，实现外部协同综合治理。

作者简介：董曼莱，中华人民共和国温州海事局执法督察处，浙江省温州市鹿城区海事路 8 号，0577-88150028，13857751100，215399467@qq.com。

甲板货船载运重大件导致驾驶台视域及桅灯布置不满足法规要求问题及对策

温州海事局船舶安检中心

摘　要：随着海上风电、水上桥梁等大型涉水工程项目不断得到开发建设，越来越多的货物呈现出大型化和重型化的发展趋势，相关设备具有质量大、体积大以及超长、超高等特点，本文结合日常监管中发现的相关问题，对甲板货船载运重大件可能产生的问题进行梳理并提出建议。

关键词：海上风电；涉水工程；重大件运输；船舶航行；驾驶台视域；桅灯布置

近年来，我国沿海陆续开建多个海上风电场，以单桩基础式风机为例，海上风电施工作业期间主要涉及运输的重大件设备普遍具有重量大、体积大、结构复杂、价值较高、运输危险性较大的特点，且货物多呈现不规则形状，在运输过程中可能发生移位、翻滚、倾倒，而货物与载具之间的相

对运动将进一步加剧载具的倾斜，严重的会导致货物落水，船舶倾覆，不仅造成巨大的经济损失，还会威胁人员的生命安全，这对船舶的安全营运带来了巨大的挑战。

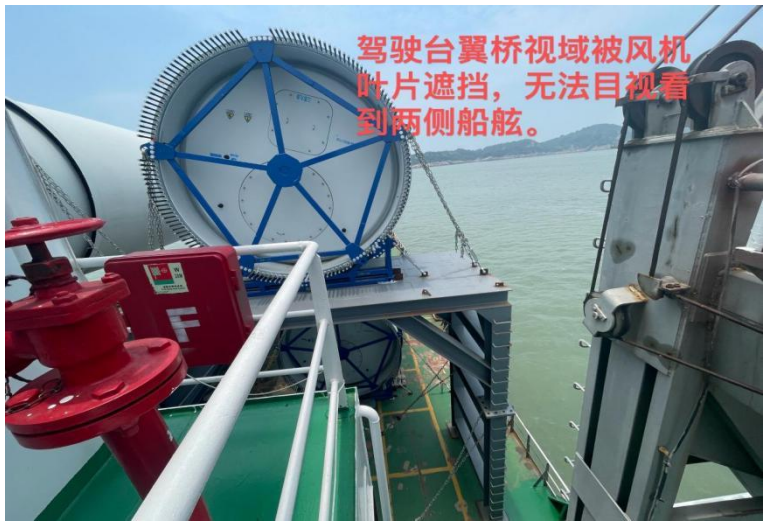
一、甲板货船载运重大件的现实需要

根据我国标准：“国际航运中凡单件重量超过 5t 或单件长度超过 12m 的货物，沿海运输中凡单件重量超过 3t 或单件长度超过 12m 的货物，长江和黑龙江干线港口凡单件重量超过 3t 或单件长度超过 10m 的货物均属重大件货物。”以单桩基础式风机为例，海上风电施工作业期间主要涉及运输的重大件设备主要有基础钢管桩、风机的塔筒、风机桨叶、风机机舱、机组配套升压设备（主要为升压站、导管架）由于上述设备具有质量大、体积大以及超长、超高等特点，均属于重大件货物，运输难度较大。

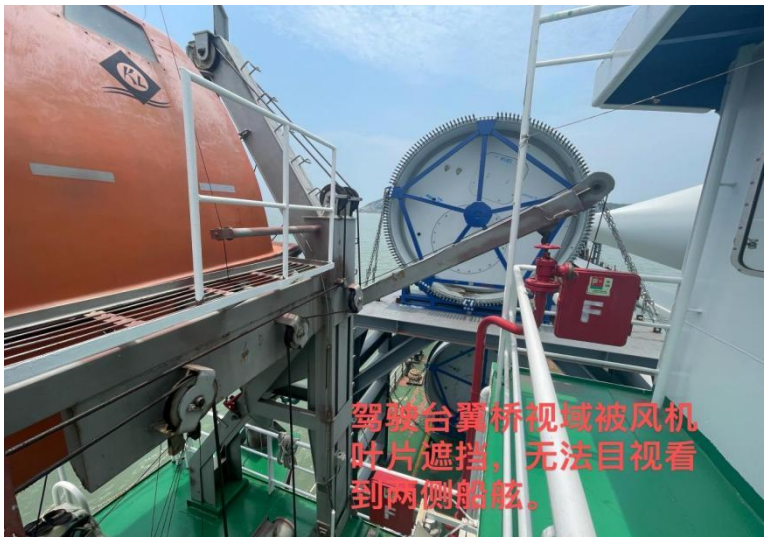
二、常见问题

（一）驾驶台视域不符合要求

2023 年 6 月 12 日，某海事机构在对风电重大件运输船开展入场安检时发现：该轮驾驶台左右翼桥部分视域被风机叶片遮挡，无法满足法规要求。如图所示：



驾驶台翼桥左舷后方视域被风机叶片遮挡，且无法目视看到船舷



驾驶台翼桥右舷后方视域被风机叶片遮挡，且无法目视看到船舷

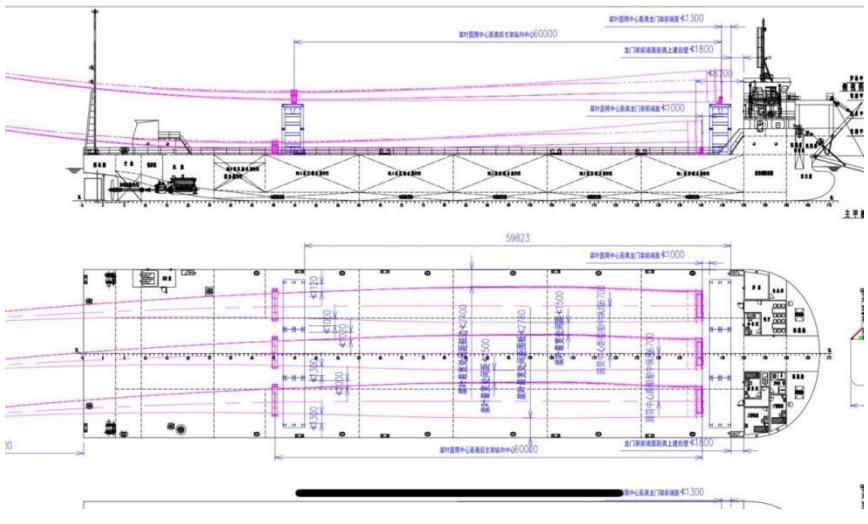
由此可见，甲板货船在载运风机桨叶、塔筒等大型构件时，船方为追求装载量最大化，通常选择将风机桨叶多层叠放或风力发电筒型构件等直立放置在甲板上，货物堆叠高度超过大部分船舶驾驶台高度，有些船舶还会将救生艇布置移至驾驶室两舷，导致严重影响驾驶室视域，即无法满足《国内航行海船法定检验技术规则》（2011）第 4 篇第五章第 2.2.1 之规定：1.从每一驾驶室翼桥所见的水平视域应延伸为一个至少为 225° 的扇面，即从船首另一侧至少 45° 经正前方，然后从正前方经 180° 船舶相同一舷的正尾方。2.船舷应从驾驶室翼桥上可见。

上述案例中，船方采取了前驾驶型甲板货船运输风电桨叶，虽然极大程度避免了驾驶台视域被遮挡，但因为船方装载了超长超宽的货物，导致驾驶台翼桥后方可视范围过窄，从而产生了较大的视域盲区，驾驶员在航行、靠离泊过程中的视觉瞭望受到一定限制，尽管有雷达、AIS 设备和船员辅助瞭望等措施，但驾驶员对船舶的航行、操纵等安全信息无法有效掌控，因此存在较大安全风险。

（二）对桅灯布置及通风筒、空气管等相关设备进行擅自改装

2023 年 6 月 12 日，海事部门在对某甲板货船（总吨 4378，主机功率 2206kw）开展安检时，发现：该轮后桅灯高度显著低于前桅灯，与该船《总布置图》不一致。经询问现场船员得知，为便于风机叶片装载上船，船方对该轮后桅杆进行了拆除，开航前未及时将后桅杆恢复原状。





实船后桅杆布置与总布置图不一致

关于后桅灯布置的法规要求，《国内航行海船法定检验技术规则》（2011）进行了明确的要求，该规则第 4 篇第 8 章 2.3.3 规定了后桅灯的安装：(1) 垂向位置:① 后桅灯应高于前桅灯至少 4.5m;② 前、后桅灯的垂向距离应使在一切正常吃水差的情况下，当从距离船首 1000m 的海面观看时，应能看出后桅灯在前桅灯的上方，并且分开。(2) 水平位置:① 后桅灯应装在船舶纵中剖面上;② 前、后桅灯的水平距离应不小于 1 / 2 船长，但不必大于 100m。

当前常见的大型构件如风电桨叶的长度接近 100m，部分大型构件宽度与最大船宽接近，而主甲板上后桅灯、通风筒、空气管等相关设备因位置、高度等要求，妨碍桨叶等大型构件的装运，由于风电重大件设备普遍超长超宽，为了保障驾驶台视野满足法定要求，一般选用前驾驶船舶运输，但是部分船舶为便于装卸货物，船方通常会未经船检部门的检验同意擅自将主甲板上的相关设备进行改装，更有甚者会将相关设备进行移除，导致与船舶《总布置图》不一致，此种行为严重影响船舶在夜间航行的航行安全，且不满足规范要求。

三、对策建议

（一）关注甲板货船为载运重大件而可能进行的擅自改装

鉴于风机叶片、塔筒等重大件货物装卸方式的特殊性（多数需要从船尾采用滚装方式上船），船方可能对机舱棚、CO2 间、主甲板空气管、通风筒、尾灯、桅灯、栏杆等进行拆卸移动改装，未在开航前恢复原状，上述隐患在货物装船前才有可能出现，且未经过船检部门认可，监管部门应结合总布置图进行深入检查，必要时可以查询船运装载布置图，进一步确认货物装载及系固是否符合相关规范要求。在日常监督检查中，执法人员还要督促船员做好船舶开航前的自查第一时间对擅自改变高度和结构的后桅杆予以恢复原状，保障船舶在运输过程中的航行安全。

（二）对 20 规则之前的载运重大件甲板货船适用“特别规定”予以追溯

从相关案例看出，船舶通常采取的号灯布置给载运重大件船舶日常营运带来的困扰显而易见，考虑到当前特定构造和用途船舶载运重大件货物的实际需要，目前《国内航行海船法定检验技术规则 2020》（简称“20 规则”）已对适用船舶作出了“等效措施”的特别规定（即海 20/4 篇/8 章/8.2.4，以下简称“特别规定”），但该规则只对 2020 年 8 月 1 日以后安放龙骨的船舶有效，因此建议在后续修改通报中对适用 20 规则前的船舶予以追溯，对 2020 年 8 月 1 日以前安放龙骨的重大件运输船做出考虑和安排，必要时对规则进行修改完善，从而满足当前船舶载运重大件的实际需求。

（三）对于专门用于载运重大件的甲板货船驾驶台视域给予替代布置考虑。

在“20 法规”第 4 篇船舶安全/第 5 章航行设备 /2.2 驾驶室视域/（10）对于非常规设计的船舶，经同意，应提供尽可能接近本条规定的可视范围的布置。参考上述做法，建议在后续修改通报中对对于专门用于载运重大件的甲板运输船做类似等效替代布置安排，增加以下文字内容：如对于专门用于载运重大件的甲板运输船（甲板货船）驾驶室视域被证明满足《国内航行海船法定检验技术规则》第 4 篇第 5 章第 5.2.2.1（2）关于驾驶室视域的要求是不切实际的，则经主管机关同意后，可以接受在尽可能符合规则关于驾驶室视域规定的基础上，在船首安装摄像视频监控装置且具有夜视和防水功能，以消除驾驶室可视范围的视线盲区。

（四）关注重大件运输船舶可能产生的作业风险

由于海上风电设备向大型化发展，风机叶片越来越大，目前已投入商业化应用的最大风机叶片已超 120 米，参与运输叶片的船舶一般船长约 110 米，叶片在运输过程中叶片尾部将延伸出船尾近 10 米的长度（个别船舶超过 20 米）。一是建议船方对超长部分特殊布置，从而降低船舶在夜间航行和会与过程中发生碰撞的危险。二是建议船方可对超出船身部分叶片进行信号设备的添加固定，同时安装两盏能在驾驶室控制的探照灯，每盏探照灯的功率可以照亮船舶尾部，尽可能显示船舶后部轮廓，帮助船舶在夜间航行过程中容易被其他船舶发现，同时在航行和靠离泊过程中加派 1 名瞭望人员，专门负责观察驾驶台翼桥后方海域情况。三是建议监管部门在日常安检和现场监督过程中对

上述措施是否落实到位予以关注，未经船检机构认可船方不得私自进行桅灯的改装。

参考文献

[1] 中华人民共和国中央人民政府.海上交通安全法
[2] 中华人民共和国海事局.船舶与海上设施法定检验规则
[3] 广东船检质量监督.大型构件运输船舶检查要点浅析

作者简介

温州海事局船舶安检中心，所属单位：温州海事局船舶监督处，通信地址：浙江省温州市鹿城区海事路 8 号 电话：13738316500 邮箱：148250546@qq.com

内河交叉航道安全通航对策研究

吴邦湖

温州市航海学会

摘 要：内河交叉航道是指内河水域中，两条或多条航道交叉形成的航道。由于内河交叉航道水域狭窄、水流湍急、船只密集等特点，通航安全风险较高，容易引发事故。随着我国内河水运业的不断发展，内河交叉航道通航安全问题日益凸显，如何保障内河交叉航道的安全通航已成为当前亟待解决的问题。本文旨在探讨内河交叉航道安全通航对策，通过分析内河交叉航道的特性、安全通航的重要性、现状分析及对策措施等方面，提出有效的解决方案，为内河交叉航道通航安全提供参考。

关键词：内河；交叉航道；通航安全；对策

一、内河交叉航道水流特性

内河交叉航道是指内河水道中两条航道相交交汇的部分，在该区域内，船舶需要进行转向和调整航向。通常情况下，内河交叉航道的宽度较窄、水流湍急、存在一定的交通流量和航向交叉。其特点主要有以下几个方面：

1、内河交叉航道的航道宽度通常较窄。由于内河交叉航道通常位于河道弯曲处，船只需要进行频繁的变向和调整。在航道狭窄的情况下，船舶驾驶员需要精准地掌握船舶的位置和速度，充分考虑船舶漂移量，做出及时准确的决策，以避免碰撞和其他安全事故的发生。

2、内河交叉航道的水流湍急，水深水位变化较大。由于内河交叉航道位于河道的拐弯处，水流速度变化频繁，水深水位也会因为河道拐弯而发生变化。船舶驾驶员需要具备一定的水文知识，能够适应不同的水流和水位条件，确保船只在水流湍急的情况下安全通航。

3、内河交叉航道的交通流量大，船只密度高。由于内河交叉航道是多条航道交叉的地方，船只流量较大，船只之间的距离较近。因此，船舶驾驶员需要高度关注周围船只的位置和速度，并做好相应的航行调整和协调，以避免发生碰撞和其他安全事故。

4、内河交叉航道还受到气象条件的影响。例如强风、暴雨、大雾等恶劣气象条件都会对航行安全带来不利影响。在这些情况下，船舶驾驶员需要根据实际情况及时调整航行方向和速度，确保船只安全通航。

二、内河交叉航道事故统计及原因分析

1、内河交叉航道事故统计

内河交叉航道事故统计

时间	事发水域	肇事船只	初步原因鉴定

2015 年 9 月 8 日	湛江琼州 海峡北水道 1#灯浮 东北方约 10 海里处	“圣油 227”轮、“粤湛渔运 10096”轮	了望疏忽，缺少安全责任培训，未采用安全航速
2015 年 11 月 4 日	汕尾遮浪角东南约 12 海里海域	“安盛 22”轮、“闽狮渔 06256”轮	了望不当、没有及时采取避碰措施、两船航道交叉
2022 年 2 月 19 日	小湘沙水上加油站对开水域	“达运 838”船“桂桂平货 8963”船	了望不当，未使用安全航速，未有效避让
2022 年 11 月 3 日	广州港进港主航道大虎水道东侧	“华泰山”轮“兴泓达 8”轮	未主动避让顺航道航行船舶、疏忽了望、未使用安全航速

船舶碰撞事故原因有三项主要原因，分别是船舶在航行到复杂水域后，没有进行安全合规的了望；船舶缺乏应有的安全管理；在面对紧张局面时，没有足够且合理的应急措施。

2、事故原因分析

（1）船员专业素养不足，了望疏忽或不当

上述案例中多项事故的主要原因都是由于船员在航行到交叉水域这种复杂危险航道以后，没有保持良好正规的瞭望，导致出现了难以挽回的紧迫局面，造成了碰撞事故的发生。

（2）未能按时合规地完成船舶安全管理

多数事故中的涉事船公司没有完善的安全管理制度以及健全的安全管理机构进行管理和监督，导致了在事故发生之前没有意识到需要做安全预警，没有足够的安全管理能力和危险防范知识，缺乏了整体组织对于安全事故的协调部署应对能力。

（3）不能采取正确的避碰手段

应急处理措施的不足严重影响了在交叉航道中航行的安全性，不能在有限的时间里做出正确的应急处理措施。

三、内河交叉航道安全通航的对策措施

1、提高船员专业素养

随着技术的发展，船舶的电航仪器越来越多，也越来越先进，了望也变得越来越轻松，但随着航道内船舶密度的增加，了望要求也越来越高。了望的频度、方式、方法决定了望的效果，只有通过规范的了望，驾驶员才能作出准确、合理的判断，及时调整或改变避让措施，达到安全航行的目的。在导致船舶发生碰撞危险的诸多因素中，值班驾驶员未正确瞭望往往是引发事故的主要原因。

内河交叉航道是一个非常复杂的航行区域，此区域的船舶航行，不仅需要驾驶员自觉遵守相关航行规定，更需要驾驶员具有一定的责任心。

2、建立安全管理体系

内河交叉航道通航安全管理体系的建立是确保通航安全的关键措施之一，包括制定完善的通航安全管理制度、建立通航安全管理机构、提高通航安全管理水平等方面。具体措施如下：

（1）制定完善的通航安全管理制度：内河交叉航道通航安全管理制度是保障通航安全的基础。针对内河交叉航道通航安全的特点，应根据实际情况制定符合本地实际情况的通航安全管理制度。通航安全管理制度应包括通航安全管理制度、通航安全教育制度、通航安全监督检查制度等。通航安全管理制度应涵盖船舶管理、港口管理、航道管理、交通管理、应急管理等各方面，具体规定管理机构、职责分工、管理程序、管理办法等，以实现通航安全管理的规范化和制度化，确保通航安全。

（2）建立通航安全管理机构：在各级政府和相关部门中设立专门的通航安全管理机构，负责通航安全的监督、管理和应急处理等工作。该机构应具有较强的组织协调能力、应急处置能力和专业知识，由专业人员组成，可以实现通航安全管理机构的规范化和科学化。通航安全管理机构的职责包括组织、指导和协调通航安全管理工作，指导和监督通航安全管理规章制度的实施，开展通航安全管理和技术支持工作，组织通航安全事故的调查处理和通航安全应急救援等工作，确保内河交叉航道通航安全的全面管理和保障。

（3）提高通航安全管理水平：为提高内河交叉航道通航安全管理水平，需要加强通航安全培训，培训内容应包括通航安全管理制度、通航安全规范、船舶驾驶技能、应急救援等方面。通过培训，可以提高管理人员和船舶驾驶员的通航安全意识和技能水平，有效预防和应对通航安全事故。此外，还可以组织相关人员参加通航安全知识竞赛、技能比赛等活动，激发工作热情，提高通航安全管理

水平。

（4）加强通航安全技术支持：加强通航安全技术支持是内河交叉航道通航安全管理体系建立的重要措施。运用现代先进技术手段，对内河交叉航道通航安全进行全程监控和预警，能够有效地识别通航安全隐患和风险点，提高通航安全保障的能力。

1）船舶自动识别系统（AIS）是一种基于卫星导航技术的系统，可以实时追踪和监控船舶的位置、速度、航向等信息，提供船舶交通情况的全面信息。通过 AIS 系统的使用，管理人员可以及时了解内河交叉航道通航情况，掌握通航安全状况，及时采取措施应对通航安全隐患。

2）雷达监测系统是一种监测船舶运动状态的技术，可以实时监测船舶的位置、速度、方向等运动信息，提供船舶交通情况的全面监测。通过雷达监测系统的使用，可以实现对内河交叉航道通航的实时监测和控制，提高通航安全保障的能力。

（5）培养高素质管理人员，提升内河航道管理队伍素质

为有效提升内河航道管理水平，需强化内河航道管理人员培训，有效提升内河航道管理队伍的综合素质。因此，航道部门应该充分认识到管理人员综合素质提升的重要性，积极采取多元化的实践培训方式，充分突出内河航道管理人员的专业性。首先，将内河航道部门内的所有管理人员作为培训对象，让管理人员能够快速准确的找到出浅航段和干旱航道，并及时采取应急式的管理措施，以此来强化内河航道管理的效率；其次，注重培训航标的管理。在内河航道的管理过程中，航标管理是非常重要的组成部分，其主要涉及到大量技术改造，所以还需要强化航道管 理人员的实践训练，有效提升内河航道管理的实效性。

此外，应加强通航安全应急救援力量建设，培训通航安全应急救援人员，提高应急处理能力和水平。通过定期的应急演练，不断完善应急响应机制和流程，提高通航事故的应急处理效率和水平。这样可以确保通航事故得到及时、有效的处理，保障内河交叉航道通航安全。

3、完善应急处置措施

为应对内河交叉航道通航安全事故，建立健全的应急处置措施是非常必要的。以下是一些可行的对策：

（1）建立通航安全应急预案：建立通航安全应急预案是至关重要的一步。应急预案需要充分考虑通航安全风险，明确应急响应程序、人员配备、物资储备等内容，以确保应急处置的快速和高效。在制定应急预案的过程中，需要考虑不同的应急情况和应急措施，确保预案能够覆盖不同的情况。

（2）建立通航安全应急救援队伍：建立专业的通航安全应急救援队伍也是应急处置措施的重要组成部分。应急救援队伍需要具备丰富的通航安全应急处理经验和技能，能够在通航事故发生后迅速展开救援和处置工作。通航安全应急救援队伍可以分为船舶救援队、水上救援队、医疗救援队等，针对不同的应急情况采取相应的救援措施，确保应急处置的全面和高效。同时，应急救援队伍的建立还需要配备先进的救援设备和器材，提高救援的科技含量和效率。

（3）建立通航安全信息发布机制：建立通航安全信息发布机制是为了及时、准确地向船舶驾驶员和相关单位发布通航安全信息，帮助他们制定正确的通航计划和决策，减少通航事故发生。通航安全信息发布机制可以通过多种途径实现信息的发布，包括广播、短信、电子邮件等方式，确保信息的及时性、准确性和可靠性。

在建立通航安全信息发布机制时，需要制定相关的管理办法和标准，包括信息发布的内容、发布的途径、发布的时间、发布的频率等方面的规定。应当建立信息发布的责任制，明确发布信息的主体单位和责任人，确保信息发布及时、准确。另外，还应当建立信息反馈机制，及时了解船舶驾驶员和相关单位对通航安全信息发布的反馈情况，对反馈情况进行分析和处理，不断改进通航安全信息发布机制的质量和效率。通过建立通航安全信息发布机制，可以使船舶驾驶员和相关单位充分了解通航安全状况，增强他们的安全意识和应急响应能力，有助于预防和减少通航事故的发生。

（4）开展通航安全应急演练：定期开展通航安全应急演练是提高通航安全应急处置能力的重要举措。应急演练可以通过真实模拟通航事故的场景和情况，检验通航安全应急预案的可行性和实效性，让通航管理人员和救援人员在实践中熟悉应急响应程序和流程，提高应急处置能力和效率。

通航安全应急演练应针对不同的通航事故场景和类型进行组织和实施，例如船舶碰撞、船舶搁浅、船舶起火等。演练应涉及多个环节，包括应急响应程序、人员配备、应急物资调配、救援方案制定、现场处置等。演练中应模拟真实情况，加强实战演练，提高救援人员的应急处置技能和能力。

定期开展通航安全应急演练可以让通航管理机构和救援队伍在平时就能够熟悉应急响应程序和流程，快速反应、有效应对通航安全事故。同时，演练还可以发现应急预案中存在的问题和不足，及时进行改进和完善，提高通航安全管理和应急处置的水平。

（5）完善应急物资保障体系：针对内河交叉航道通航安全应急处置的需要，建立应急物资保障体系是非常重要的一环。该体系包括建立应急物资储备中心，及时采购和储备通航安全应急所需的物资等。应急物资储备中心是应急物资保障的核心机构，其可以根据通航安全应急需要，及时采购和储备应急救援器材、医疗物资、防护用品等，确保通航安全应急处置所需物资的及时供应和使用。同时，应急物资保障体系也要注重物资保养、更新、替换等方面的工作，确保应急物资始终处于良好状态，保障通航安全应急处置的能力。

四、结论

内河交叉航道通航安全管理面临着多方面的挑战和困难，如管理机构不规范、通航安全不到位、通航信息接收不及时、通航保障设施不完善、通航安全管理水平不高以及部分船舶驾驶员安全意识不足等问题。为了提高内河交叉航道通航的安全性，应采取一系列对策措施，如建立完善的通航安全管理制度、建立通航安全管理机构、提高通航安全管理水平、加强通航安全技术支持以及完善通航安全应急预案等。同时，应注重应急救援队伍建设，加强应急物资保障，完善通航安全信息发布机制，提高通航安全应急处置的能力和效率，为内河交叉航道通航的安全通航提供有力保障。

参考文献

[1] 吴易甲. 交叉航道安全通航对策研究[D].浙江海洋大学,2017.
[2] 甘浪雄,张怀志,卢天赋等.基于熵权法的水上交通安全因素[J].中国航海,2021,44(02):53-58.
[3] 曹传水. 营运港口通航航道交叉段疏浚施工方法的研究[J]. 珠江水运, 2022(20):25-27.
[4] 周文超.内河航道管理的策略探究[J].交通建设与管理,2019,No.472(05):100.
[5] 吴易甲，艾万政.内河航道T形交汇处安全通航措施[J].水运管理,2017,39(01):20-23.DOI:10.13340/j.jsm.2017.01.007.

作者简介：吴邦湖，1994年9月11日，浙江温州平阳，浙江海洋大学，助理工程师，温州市鹿城区诚远大厦1207室，17858801168，963781099@qq.com

海上施工船舶配员及船员持证适应性研究

路玉波 杨一丹 房照伟

温州海事局 鳌江海事处

摘 要:随着大量海上风电、核电、桥梁施工等海上重大设施工程建设，海上施工船舶数量大幅增加，有动力海上施工船舶、非自航船舶等不同种类船舶配员和船员持证存在差异性，部分海上施工船舶配员和船员持证无法满足船舶安全管理要求，存在较大的安全风险，本文以温州辖区为例，对温州辖区海上施工船舶配员和船员持证情况和存在问题进行分析，并对如何完善海上施工船舶配员及船员持证进行探讨，促进涉水工程施工船舶管理安全有序。

关键词：海上施工船舶；船舶配员；船员持证

近年来，浙江着力推进清洁能源示范省建设，加快能源清洁化进程，在《浙江省能源发展“十四五”规划》指出要实施“风光倍增”工程，到 2025 年，全省光伏装机达到 2762 万千瓦。着力打造百万千瓦级海上风电基地，到 2025 年，全省风电装机达到 641 万千瓦以上，其中海上风电 500 万千瓦以上。随着大量海上风电、光伏发电、核电等海上重点施工项目的建设，大量海上施工船、交通运维船、供油船等海上施工相关船舶进场作业，前期，由于各海上施工项目对海上施工船舶管理水平参差不齐，部分海上施工船舶存在船舶配员不足、船上人员持证不符合要求等现象，存在着较大的安全风险。2021 年 12 月 15 日，交通运输部海事局发布了《中华人民共和国海上设施工作人员

海上交通安全技能培训管理办法》，为提高海上设施工作人员专业技能提供了培训依据。7 月 2 日，“福景 001”起重船在广东阳江 No.2 大型船舶候潮防台锚地锚泊防台期间，走锚触碰海上风电场风机桩后断裂沉没，船上 4 人获救，25 人死亡，1 人失踪，事故发生后，各地海事等主管部门加大了对海上风电施工船舶的监管力度，出台了一系列的监管举措，取得了明显的成效，但海上施工船舶配员和船员持证情况还存在一些问题，本文通过现场走访、书面调研等方式梳理辖区海上施工船舶配员和船员持证的实际情况，分析海上施工船舶配员和船员持证适应性存在的问题和原因，针对性提出解决途径和建议，进一步规范海上施工船舶配员和船员持证，为辖区重大涉水工程安全建设发挥海事积极作用。

一、海上施工船舶配员和船员持证情况（以温州辖区为例）

（一）温州辖区海上施工项目概括

根据《浙江省海上风电场工程规划报告（2021-2035 年）》，浙江沿海省管区规划海上风电场 18 个，总装机容量 850 万千瓦，其中温州沿海规划海上风电场 9 个，规划装机总容量 400 万千瓦，截至 2024 年 7 月，温州沿海已建成海上风电场 3 个，总装机容量 110 千瓦；另外中广核三澳核电一期阶段性节点工程项目已顺利完工，乐清 1#滩涂 270MW 渔光互补项目正在施工中，苍南深远海海上风电、苍南 3 号风电、苍南 2 号二期海上风电项目等已开展地址勘察，后续将陆续进入施工。据统计，自 2021 年至 2024 年 7 月底，温州海事局辖区共办理各项水工许可 159 个，其中涉及海上风电项目 21 个，核电施工项目 4 个，光伏发电项目 1 个；目前已完工水工项目 127 个，活动水工 32 个，许可船舶 86 艘，其中无动力船舶（平台）4 艘，随着海上水工项目的发展，将有越来越多的海上施工船舶参与施工。

（二）海上施工船舶配员情况

1. 海上施工船舶配员要求

海上施工船舶的配员对于保障海上施工安全至关重要，根据《中华人民共和国船舶最低安全配员规则》第二条明确该规则适用除军用船舶、渔船、体育运动船艇以及非营业的游艇外的中国籍的机动船舶的船员配备和管理，同时也指出配员规则所要求的船舶安全配员标准是船舶配备船员的最低要求，并不免除船舶所有人为保证船舶安全航行和作业增加必要船员的责任。因此海上施工机动船舶应按照规则的要求配备足以保证船舶安全的合格船员。从事海上施工的还有不具备航行动力的非自航船舶，辖区常见的非自航海上施工船舶一般包括挖泥船、打桩船、起重船等，由于配员规则不适用于非自航船舶，该类船舶上的最低安全配员无明确规定。另外海上施工船舶船上人数不能超过救生设备限额。

2. 海上施工实际配员情况

2024 年 7 月对温州辖区 50 余艘进场海上施工船舶配员情况调研发现，各施工船舶能按照船舶最低安全配员要求配备船员；而对于非自航船舶一般由船方自行配备，部分船舶仅配备了水手或者机工适任证书，部分人员仅持有不参加航行值班的适任证书或海上设施工作人员海上交通安全技能培训合格证明。

（三）海上施工船舶船员持证情况

1. 海上施工船舶船员持证要求

有动力施工船舶船员应持有合格有效的相应职务适任证书。不参与航行和轮机值班的船员，需持有不参加航行和轮机值班船员适任证书。非自航船舶船员应按照《中华人民共和国海上非自航船舶船员考试、发证管理办法》要求执行，其船长、驾驶员、轮机长、轮机员以及驳船驾长应持相应职务的适任证书；其他船员应持有不参加航行和轮机值班船员适任证书。海上设施上的人员应根据《中华人民共和国海上设施工作人员海上交通安全技能培训管理办法》应接受相应的海上交通安全技能培训并持有《海上设施工作人员海上交通安全技能培训合格证明》，持有海船基本安全培训合格证和相关专业技能适任培训合格证的，免予相应的海上交通安全技能培训。

2. 海上施工船舶船员持证情况

根据调查发现辖区有动力施工船舶船员按照船舶最低安全配员要求配备船员；非自航船舶上船员配备因缺乏标准，部分船舶参照机动船舶配备了船长、驾驶员等，部分船舶为降低成本，仅配备了值班水手和值班机工，其他船上工作人员仅持有不参加航行值班的适任证书。以参与海上风电施工的两艘非自航船舶为例，“XXX306”在船人员共 25 人，其中船员 12 人，施工人员 13 人，12 名船员中三管轮 1 人、水手 1 人、值班机工 2 人、其他船员 8 人；“XXX308”在船人员共 31 人，其中船员 14 人，施工人员 17 人，14 名船员中船长 1 人、二副 1 人、轮机长 1 人、二管轮 1 人、机工 4 人、水手 4 人，其他 2 人。两艘类型相同的船舶，船上人员持证情况不同。

二、海上施工船舶配员和船员持证适应性存在问题

（一）缺少非自航船舶配员标准

虽然已出台《中华人民共和国海上非自航船舶船员考试、发证管理办法》，但是因为缺少非自航船舶强制性最低安全配员标准导致非自航船舶配员不统一，个别船东为压缩成本，部分船员仅持有不参加航行或轮机值班的适任证书，该类船员存在关键设备操作不熟练，维修保养无人执行，救生消防和防污染演习无法有效开展等情况，存在较大的安全风险。

（二）部分船舶配员不足

部分海上施工船舶为了降低成本，减少船员数量，导致实际配员低于《船舶最低安全配员证书》上的要求。在现场检查中发现，部分交通船、拖轮、起重船等未考虑船舶最低安全配员证书中船舶连续航行时间的限制，超过规定的连续航行时间后未按照配员规则增加相应船员，导致出现船舶配员不足的情况发生。

（三）存在海上施工船舶船上人员无证

无证人员不具备在船工作应有的应急求生和个人安全能力，无法保证在发生紧急情况时可以确保自身和他人的安全。同时，由于无证人员信息无法通过船舶进出港报告系统报备，导致人员动态无法准确掌握，给安全监管造成极大隐患。此外，搭乘未持证的工作人员，也可能造成船上实际人数超过救生设施和船员舱室承载上限的隐患，导致应急能力不足，不利于保障船舶安全生产。在海事部门检查中发现，部分驳船、挖泥船、锚艇、交通艇、打桩船等存在人员在船舶上工作未持有适任证书的问题。

（四）海上施工船员持证与施工船舶实际工作需要不匹配

目前船员持有的证书持有的普通货船的适任证书，部分船员缺少针对海上施工船舶特殊作业需求的针对性培训；同时部分非自航船舶船上船员仅持有值班水手、值班机工或者不参加航行值班的适合证书，该类船员自身工作能力一般，对船舶防污染、船舶文书记载、海上施工作业、船舶避碰中与其他船舶的通信和信号灯显示等业务知识和技能缺乏，难以保障非自航船舶航行和作业安全。

三、海上施工船舶配员和船员持证适应性的建议

（一）建立非自航船舶配员标准

结合非自航船舶的种类、吨位、作业类型、船员值班等因素，建立与《中华人民共和国海上非自航船舶船员考试、发证管理办法》相匹配的非自航船舶最低安全配员标准，在满足最低安全配员标准的前提下船舶所有人应根据船舶安全航行和施工作业需要增加必要的船员。

（二）建立海上施工船舶配员和船员持证全过程监管机制

海上施工船舶进场施工前核查船舶配员和船上人员持证情况，严把海上施工船舶准入关，对船舶配员和船员持证不符合要求的船舶严禁进场施工；施工作业期间加强现场监管和远程核查力度，开展水工现场巡航时加大对施工船舶船舶配员和船员持证情况的核查频次，对以往易发生配员不足的交通运维船舶、警戒船等实施开航前远程核查和现场不定期检查，确保船舶施工期间船舶航行和作业安全。

（三）明确海上施工船舶船员持证要求

明确“值班船员”“非值班船员”“在船舶上工作且承担具体船舶管理职责的工作人员”“从事海上施工的非船员身份作业人员”和“参与海上施工作业的管理人员、运维人员等工作人员”的具体

培训、持证要求。目前浙江海事局已编制的《海上风电海事安全监管工作指南》（征求意见稿）中明确船员应当持有符合《中华人民共和国船员条例》所要求的相应证书；海上风电作业人员应当参加海上交通安全技能培训并取得相关培训证明；临时性出海人员出海前应当接受安全教育，通过阅读资料、观看视频等方式掌握必要的安全和救生知识。建议参考海上风电施工船舶监管要求，明确其他海上施工船舶船员持证要求。

（四）完善施工船舶船员培训和考核体系

针对不同类型的海上施工船舶，船东应对施工船舶船员开展施工船舶特殊操作、通航安全保障措施、施工水域水文、气象特点、防污染措施等内容开展针对性培训；对于起重船、安装平台等非自航船舶、设施上履行航行、停泊和作业安全的人员，加强人员避碰、信号、通信、消防、救生等专业技能和作业水域通航环境等方面内容开展培训。同时针对海上施工新技术新设备的应用，船员培训机构和海事部门应结合施工作业实际需求，及时丰富完善施工船舶船员培训和考核内容。通过开展针对性内容培训和考核，促进船员的实际操作能力和业务技能与海上施工船舶航行和作业要求相匹配。

四、结语

海上施工船舶配员和船员持证的适应性是保障船舶安全运营和施工作业顺利进行的关键因素。针对当前存在的问题，需要政府主管部门、施工和建设单位、施工船舶和船员等多方面共同努力进行解决，通过建立非自航船舶配员标准、明确海上施工船舶船员持证要求，建立海上施工船舶配员和船员持证全过程监管机制、完善施工船舶船员培训和考核体系等措施进一步提高海上施工船舶的配员水平和船员持证适应性，进一步促进海上涉水工程的健康发展。

参考文献

[1] 房照伟.《海上风电施工平台人员配备研究》
[2] 郑斌松.《保有动力非自航船舶的安全隐患分析及海事监管》
[3] 李晨光.《非自航工程船舶船员配备管理研究》
[4] 王士明.《关于加强风电海上交通安全管理的对策建议》

作者简介：路玉波，温州鳌江海事处，温州市平阳县鳌江镇疏港大道，联系电话 18858827862，电子邮箱 393624090@qq.com。

海事没收船舶法律依据探究

刘杨
温州海事局，浙江 温州 325000

摘 要：行政没收是指行政机关通过行政处罚手段将行政相对人所有的财产依法、无偿转移至国家所有的行为，是行政机关维护社会秩序的必要手段之一，具有惩处、警示和预防严重违法行为的作用。海事没收全国案例极少，探索并推进海事没收船舶法律法规转化运用，是海事部门与时俱进的鲜明体现，更是水上交通安全治理能力现代化的必然要求。本文通过梳理海事没收船舶处罚的法律法规、相关情况，分析当前实务中存在的问题，提出具体实施的对策建议。

关键词：海事管理机构；没收处罚；非法财物处置

一、海事没收船舶处罚的法律依据

现有法律、行政法规中，涉及海事没收船舶的主要有三类：

一是海上的船舶没收，依据的是《海上交通安全法》第九十五条和《海上海事行政处罚规定》第九条的规定，对未持有任何有效船舶证书的具有三种情形之一的存在严重安全隐患的船舶可以依法予以没收。三种情形分别为处于航行、作业状态，已达强制报废年限；经船舶检验机构评估，船舶结构、稳性、强度等低于强制性标准和技术规范，且经督促在三个月内未整改到位的；从事客运或者危险货物运输的。是否“达强制报废年限”可以依据《老旧运输船舶管理规定》认定；“从事客运或者危险货物运输的”，应当对客运情况进行取证，或对运输货物危险特性进行鉴定。

二是内河的船舶没收，依据的是《内河交通安全管理条例》第六十三条和六十四条的规定，包括两种：应当报废的船舶在内河航行或者作业的；未持有合格的检验证书、登记证书或必要航行资料擅自航行或者作业且情节严重的。后者按照字面意思是或者关系，只要“检验证书”“登记证书”“必要的航行资料”三者之一未持有即可。广东省高级人民法院（2019）粤行终 208 号林闻华、陈文英和汕头海事局交通运输行政管理一案二审行政判决认为“根据《内河交通安全管理条例》第六十四条的规定，只要存在船舶未持有合格的检验证书、登记证书或者船舶未持有必要的航行资料等任一违法情况，即可适用该条款”。《内河交通安全管理条例释义》中对“情节严重”释义为“造成严重后果，如造成重大交通事故、污染水域事故，或在海事管理机构作出暂扣船舶、浮动设施后，仍继续航行或者作业”。即有两种情形，一是海事管理机构责令停止航行或者作业，船舶拒不停止依旧航行或者作业，造成重大交通事故、污染水域事故的；二是海事管理机构责令停止航行或者作业，船舶拒不停止依旧航行或者作业，海事管理机构对其实施行政强制扣押，船舶仍继续航行或者作业的。

三是“三无”船舶的没收，依据的是《国务院对清理取缔“三无”船舶通告的批复》（国函〔1994〕111 号），包括三种：非法建造、改装的船舶；停靠在港口的“三无”船舶；海上航行、停泊的“三无”船舶。“非法建造、改装的船舶”实际包含在“三无”船舶中，它对应海关总署、公安部、交通运输部、农业农村部、中国海警局五部门联合印发的《“三无”船舶联合认定办法》（署缉发〔2021〕88 号）第九条“三无”船舶认定情形的第四项和第六项。“三无”船舶认定可以依据《“三无”船舶联合认定办法》，由县级以上地方人民政府成立联合认定小组，对船舶进行资料审核、船舶勘验和数据比对，经过集体讨论后形成船舶联合鉴定报告，作为依法处置船舶的依据。

以上三类海事没收船舶的法律依据，第一类和第二类的区别在于船舶航行、作业的水域，两者是反对关系。第一类和第二类与第三类存在一定的重合，属于交叉关系。

二、国函〔1994〕111 号的效力

《国务院对清理取缔“三无”船舶通告的批复》（国函〔1994〕111 号）是 1994 年国务院对农业部、公安部、交通部、国家工商行政管理局、海关总署多部门制定通告的批复，其中涉及海事没收船舶，但目前为止未有海事管理机构依据此文件实施没收，其性质和法律效力的争议一直不断。就司法判例来说，有行政法规之说，如三亚市城郊人民法院（2011）城行初字第 115 号叶世清与海南省公安边防总队海警第二支队公安行政处罚一案一审行政判决认为“根据国务院《关于清理、取缔“三无”船舶的通告》第一条.....的规定，被告作为公安机关的重要组成部分和海上执法的主要力量，依据该法规的授权，对第三人陈建文作出没收‘闽福州货 1667’号船的行政处罚，是其法定职责，行政处罚主体资格适格”；又如广西壮族自治区高级人民法院（2018）桂行终 457 号周良华与北海市公安边防支队治安管理没收处罚一案二审行政判决认为“国函〔1994〕111 号批复是农业部、公安部、交通部、国家工商行政管理局、海关总署等五部门共同起草，提交国务院审议通过，发布于 1994 年第 26 期《中华人民共和国国务院公报》上，具有普遍性约束力的规范性文件，法律位阶上应以行政法规对待”。

在《立法法》颁布实施之前，行政法规的制定程序由 1987 年 4 月 21 日国务院批准、国务院办公厅发布的《行政法规制定程序暂行条例》规定。该条例第十五条规定“经国务院常务会议审议通过或者经国务院总理审定的行政法规，由国务院发布，或者由国务院批准、国务院主管部门发布”，因此国务院发布的国函〔1994〕111 号具有行政法规的性质。虽然在《立法法》颁布实施以后，国务院于 2001 年 11 月 16 日公布了《行政法规制定程序条例》，废止了《行政法规制定程序暂行条例》，但并不能否定已制定文件的法律效力。2004 年 5 月 18 日最高人民法院发布的《关于审理行政案件适用法律规范问题的座谈会纪要》中亦明确，“考虑建国后我国立法程序的沿革情况，现行有效的行政法规有以下三种类型：.....二是立法法施行以前，按照当时有效的行政法规制定程序，经国务院批准、由国务院部门公布的行政法规。.....”同时，1997 年 5 月 27 日国务院发布《国务院办公厅关于执行国办发〔1993〕55 号和国函〔1996〕69 号文件有关问题的复函》（国办函〔1997〕33 号）中明确，国

办发〔1993〕55 号和国函〔1996〕69 号文件是经国务院批准发布的，具有行政法规效力，可以作为行政机关实施行政处罚的依据。而国函〔1996〕69 号与国函〔1994〕111 号具有相同性质，因此国函〔1994〕111 号应当具有行政法规效力。根据《行政处罚法》第十一条第一款的规定，“行政法规可以设定除限制人身自由以外的行政处罚”，国函〔1994〕111 号有权设定没收处罚。

经查阅数份裁判文书来看，在针对公安边防、渔业、海警的行政案件中，大部分法院均对该文件的有效性予以支持，认为国务院赋予了行政机关执法权力。虽然 1995 年 1 月 4 日交通部印发的《交通部关于实施清理、取缔“三无”船舶通告有关问题的通知》已被废止，但在国函〔1994〕111 号至今没有被废止，依旧被多部门作为行使行政权力的法定依据，且获得司法机关支持的情况下，海事管理机构可以尝试依据此法规实施“三无”船舶的没收。

三、当前海事没收船舶实务中存在的问题

（一）处罚对象确定较复杂

行政法上的没收的范围，按照《行政诉讼法》《行政处罚法》的说法是“违法所得”“非法财物”。按照我国行政法学界的分类，没收的范围有三类：违法所得；从事违法行为的工具、物品；违禁品[1]。显然，海事船舶没收属于对违法行为人从事违法行为的工具的没收，属于没收非法财物。需要明确的一点是，船舶本身不具有非法性，是因为其被用于从事违法行为，才被认定为非法财物。没收船舶是对私有财产权的限制，船舶价值往往不菲，海事没收处罚对象又为船舶所有人，因此对没收对象应谨慎认定，即船舶所有人从事违法行为的工具。一方面，违法工具是违反行政管理行为人“直接用于”实施违法行政管理行为的工具，而非“间接用于”。另一方面，违法工具是违反行政管理行为人“本人所有”的工具，而非他人所有的工具，行为人本人对所没收的工具具有合法所有权，不含有其租借、偷或抢来的从属于第三人的工具[2]。

在实际执法中，船舶权属情况往往很复杂，如：取得所有权但未依法登记的实际所有；经买卖或多次转卖，未办理变更登记导致权证不符的；因经营需要将部分份额登记在航运企业名下，实际拥有船舶控制权进行挂靠的；所有人不明的等，需要海事管理机构认真判定。此外，对于违法行为人非船舶所有人的情形，是否可以参照《刑法》中共同犯罪理念，对有充分证据证明明知他人实施违法行为而租借船舶的所有人进行没收处罚，没有明确规定。但若不没收，不能查清借出者是否善意，则会使有心之人利用这一点，故意使用他人渔具和渔船以逃避没收带来的损失[3]。

（二）持有证书范围不明确

船舶没收三类法律依据中都涉及船舶证书，但各规定的外延并不明确，使得实际操作存在麻烦。《海上交通安全法》第九条第一款规定“证书、文书的清单由国家海事管理机构制定并公布”，《中华人民共和国海事局关于发布海船应持证书、文书清单的公告》（中国海事局公告 2021 年第 5 号）公布了中国籍海船应取得的证书、文书，因此在没有其他新规定的情况下，可以依照该清单判断。该清单中不包含所有权证书，但实践中对持有所有权证书的船舶是否可以没收存在争议。《海上海事行政处罚规定》第九条第三款规定，没收的船舶应未持有任何有效的船舶证书。《内河交通安全管理条例》第六十四条根据字面理解和司法判例，检验证书、登记证书、必要的航行资料只需要未持有其一即可。《“三无”船舶联合认定办法》第九条第一、二、五、六项中，均有“船舶证书”，但具体范围、全部还是任一未持有、是否包含所有权证书等均无明确规定。

“情节严重”无具体规定

虽然《内河交通安全管理条例释义》对《内河交通安全管理条例》第六十四条“情节严重”进行了解释，但其毕竟非规范性文件，缺乏法律效力。不过，该释义有海事司法判例的支持，在林闻华、陈文英和汕头海事局交通运输行政管理一案中，广州海事法院（2018）粤 72 行初 7 号一审和广东省高级人民法院（2019）粤行终 208 号二审行政判决中，均对汕头海事局认定涉案船舶违法行为情节严重予以了支持，而该轮违法行为情形与释义中的“海事管理机构作出暂扣船舶、浮动设施后，仍继续航行或者作业”一致。

评估机构资质的现实情况

《海上海事行政处罚规定》第九条第四款第一项规定“经船舶检验机构评估……”，具有评估资质的船舶检验机构为中国国家船舶技术检验机构即中国船级社（CCS），而目前中国船级社评估业务均由其所属的“中国船级社实业有限公司”（CCSI）具体实施，从狭义来说 CCSI 并非船舶检验机构，这就导致评估工作实际与法律规范规定之间出现是否匹配的现实问题。当然，从整体看 CCSI 是全国唯一从事国内外船舶评估业务的专业单位，评估人员亦持有合法有效的验船师证书，在鉴定程序并无违法，评估结论明确、完整的前提下，在没有相反证据推翻评估资质的情况下，采纳该报告的

评估结论作为处罚依据，并无不妥，评估报告应具有证明效力。

（三）具体实施细则缺失

狭义的没收船舶即没收处罚，而广义的没收船舶作为一种行政权力实际上具有综合性的特点，是多个行政行为的结合，如责令停止航行或者作业、强制扣押、罚没财物管理等。现有海事法律法规主要是设定了没收权，对于如何执行没收、管理罚没财物等，规定较为原则、内容少且散落在各处，如《行政强制法》《行政处罚法》《拍卖法》《交通运输行政执法程序规定》《罚没财物管理办法》《海事行政处罚实施细则》《浙江海事局关于海事行政处罚若干问题的实施意见》等。《罚没财物管理办法》是财政部制定的我国第一份针对罚没财物管理的综合性规范性文件，但其内容具有综合性，海事罚没财物管理缺乏具体操作规范，如处罚决定后如何没收、船舶由谁保管、如何设置保管场地、保管措施应达到何种要求、拍卖条件如何确定等。总体来说，海事部门缺乏一部全面性、系统性、操作性、程序性和专业性兼具的法律法规。

船舶没收难度大、成本高

没收船舶环节多，流程复杂，无具体操作规范，现实困难多。一是涉及业务面广，除去扣押、处罚等，还可能涉及船载货物、人员的处置，船舶拆解、防污、先行处置等，专业性要求高。二是耗时长，期间可能涉及鉴定、评估、公告、拍卖、拆解等，而船舶一直处于停航状态，机器设备长期不使用，无人管护，容易导致机械性能下降，造成资产贬值。三是保管场地要求高，既要适合大宗船舶存放，又要安全性佳，如配备安保人员或视频监控，确保防盗、防台、防汛等，耗费大量人力物力。四是经费保障困难，涉及船舶价值鉴定、状况评估、公告送达、保管、拖移、委托拍卖等费用，远高于普通罚没财物的保管。五是没收处置方案有待明确，《行政处罚法》第七十四条第一款规定，除应当予以销毁的物品外，没收的非法财物必须公开拍卖或者按照国家有关规定处理。没收船舶未持有有效证书，具有严重安全隐患，不具备适航性，不符合航行法规的要求。但其是否是违禁品，禁止流通，应当予以拆解销毁，缺乏认定和执行的标准和依据[4]。六是适用普通程序，无简化流程，执法成本高。

四、海事船舶没收的意见和建议

一是明确处罚对象认定标准。对权证不符和挂靠的情况，根据船舶物权登记对抗主义，应当将实际所有人作为处罚对象，对实际所有人权属的认定则应排除其他一切合理怀疑。在叶世清与海南省公安边防总队海警第二支队公安行政处罚一案再审中，最高法院裁定认为在无相反证据证明该船舶实际所有人为他人的情况下，仍以登记所有人进行处罚程序不合法。对于所有人不明的，可以向法院申请认定财产无主，根据认领结果再行处置。对于违法行为人非船舶所有人的情形，建议在查清事实的基础上，对明知他人实施违法行为而租借船舶的所有人实施没收处罚。

二是统一没收标准，修订裁量基准。现有海事船舶没收主要依据是一个法律，两个行政法规，三者制定的目的其实殊途同归。三亚市中级人民法院（2011）三亚行终字第 15 号叶世清与海南省公安边防总队海警第二支队公安行政处罚一案二审行政判决认为“《中华人民共和国海上交通安全法》调整的对象是沿海水域航行、停泊和作业的船舶设施及人员和海上交通管理事宜，并不排斥国务院《通告》为打击违法犯罪活动、维护海上正常秩序而对‘三无’、非法建造、改装船舶设定行政管理权”，判决书中“国务院《通告》”指的就是国函〔1994〕111 号。因此，不必明确区分三者之间的差异，只要船舶符合三者的规定之一，即能实施没收处罚。同时，应当对船舶证书的定义或范围、“情节严重”、评估机构等进行统一或细化，以确保海事没收的合法性。

三是制定操作规范，建立执法保障机制。制定海事没收船舶从事前、事中到事后的具体实施细则或者操作规程，指导和规范海事管理机构，便于执法人员实际执行。同时应当明确是否可以突破现有普通程序处罚的限制，适用简易程序，或按照《罚没财物管理办法》第十四条的规定，对符合特定情形的船舶，经权利人同意或者申请，并经执法机关负责人批准后，实施先行处置。同时，加强经费、人员保障，明确相关先期费用是否可以在船舶处置收入中扣除，确保没收顺利实施。

参考文献

[1] 刘运毛.论行政法上的没收——行政权和财产权相对化的产物[J].公法研究,2005(1):136-192.
[2] 李瑞卿.行政处罚法之没收非法财物制度研究[D].大连:大连海洋大学,2023.
[3] 史梦圆.论渔业法之没收处罚的适用[D].大连:大连海洋大学,2021.
[4] 黄晓丽.《海上交通安全法》框架下没收船舶处置困境研究[J].中国海事 2024,(3):39-41.

作者简介：刘杨，温州海事局，温州市鹿城区海事路 8 号，电话 15558690251，电子邮箱 779165607@qq.com

浅谈减少浙江沿海商渔船碰撞事故的防范措施

黄友标[1] 陈定进[2]

（1.龙港市经济发展局；2.温州进兴船务有限公司）

摘 要： 本文通过对 2020—2024 年浙江沿海 17 起公开的商渔船碰撞事故案例进行深入分析，总结了商渔船碰撞事故的发生规律，包括事故发生的时间、地点、原因等方面的特点。商渔船碰撞事故的发生与多种因素有关，包括瞭望疏忽、未保持安全航速、未履行避让义务、违反规定等。结合以上总结的规律我们（从人、船、环境）方面提出了一系列针对性的防范措施，为（旨在）减少商渔船碰撞事故的发生，应加强瞭望和预警、确保安全航速、严格履行避让义务、遵守规定加强监管、提高船员素质和技能、加强部门协作以及加强宣传教育。

关键词： 商渔船碰撞；事故规律；防范措施

一、引言

商渔船碰撞事故是一种常见且严重的水上交通事故，不仅会造成船上人员伤亡和财产损失，还会对海上环境造成可怕污染。近年来，随着海洋经济的蓬勃发展，海上运输和渔业生产活动日益频繁，商渔船碰撞事故时有发生，给海上交通安全带来了严重威胁。因此，研究商渔船碰撞事故的发生规律，采取有效的防范措施，对于保障海上交通安全、保障渔业生产安全、防止海洋污染具有重要意义。

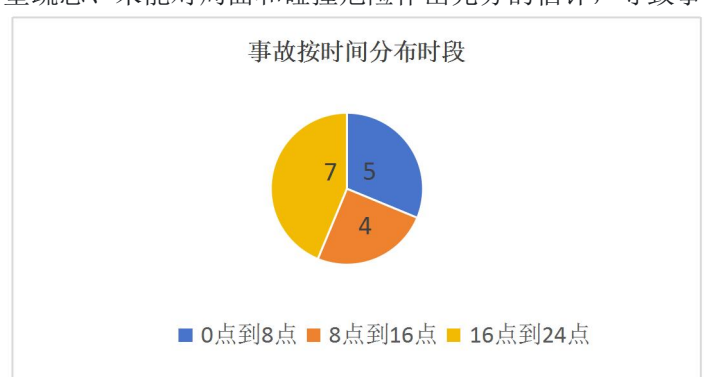
二、浙江沿海海上环境客观情况

（一）浙江沿海海区为商船传统习惯航路与渔业船舶作业区域重叠区，如中国沿海传统的南北航线、中日韩航线以及进出洋山等港口的商船习惯航路存在重叠、交叉。随着社会经济活动的日趋发达，未来船舶通航密度势必加大。

（二）沿岸各地持续加大海上风电项目投资，大量消耗海域资源，这是过去未有的因素，也加剧了海上活动的复杂性。

三、商渔船碰撞事故发生规律

（一）事故发生时间，商渔船碰撞事故相对多发在夜间和凌晨。夜间和凌晨视野不佳，船员容易疲劳等因素引发瞭望疏忽、未能对局面和碰撞危险作出充分的估计，导致事故发生。



（二）事故发生时能见度，17 起事故案例中，除了 2021.4 月 2 日“AL GHUWAIRIYA”轮与“浙

普渔 30087”船碰撞事故之外，其它 16 起事故均是在能见度良好的时候发生。

（三）事故发生地点，商渔船碰撞事故多发生在沿海渔场边缘、公共航路、港口进出水道等水域，这些水域通航密度大，船舶交通流复杂，容易发生碰撞事故。

四、商渔船碰撞事故原因分析

（一）主观因素

1、船员安全意识薄弱：商渔船船员缺乏安全意识，部分船员对《1972 年国际海上避碰规则》不了解或不遵守，存在诸多航行安全隐患，如疏忽瞭望、未采用安全航速、未保持正规瞭望、未履行避碰义务等。

其中疏忽瞭望是引起商渔船碰撞事故最大因素。船员在航行过程中，未使用视觉、听觉等与当时环境和情况相符的一切有效手段来保持正规瞭望，对局面和碰撞风险作出充分的估计，导致未能及时发现其他船舶，从而引发碰撞事故。

未保持安全航速：部分船舶在通航环境复杂的情况下，未充分考虑当时航经区域的通航密度，未用安全航速行驶，以便能采取适当而有效的避碰行动，并能在适合当时环境和情况的距离以内把船停住，从而增加了碰撞事故的发生风险。

2、船员素质差：商渔船船员文化程度相对过去有一定程度的下降，部分船员缺乏普通话或英语表达能力，通讯能力差。商船船员在渔区航行的操作技能需要培训，安全意识有待进一步提高。

3、船舶设备问题：部分渔船号灯号型显示不规范、助导航设备不足或不能正确使用。商船的辅助导航设备和船况虽然远远优于渔船，但也存在信息综合利用不足等问题。

4、通讯不协调 ：商船和渔船使用的 VHF 制式或频道不一致，语言不熟悉，导致双方在碰撞危险形成后无法建立相应的联系。根据相关论文数据显示，2008 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日 11 年间发生在浙江沿海水域商渔船碰撞事故调查报告的 227 起事故中，发生碰撞前无 VHF 联系的 204 件，约占 90%；商船呼叫但渔船无应答的 21 件，约占 9%，双方 VHF 有过呼叫但未建立有效联系的 1 件，约占 0.5%；仅有 1 件事发前双方曾建立 VHF 联系，约占 0.5%。即，绝大多数商渔船碰撞事故发生前未进行有效的 VHF 沟通。本次分析的 17 起事故中，商渔船发生碰撞前均未建立相应的联系。

5、违规操作：商渔船的驾驶人员未能按《国际海上避碰规则》及早采取避让行动，一些船舶作为让路船，未及早采取大幅度避让行动，宽裕地让清他船；而直航船在发现紧迫危险时，未采取最有助于避碰的行动，导致碰撞事故的发生。

6、应急能力差：商渔船的船员在船舶处于紧迫局面或紧迫危险时，会无所适从，不知怎么操作，或采取了不符合当时情况下的不正确的操纵。

7、违反规定存在内河船舶超航区进入海上航行、配员不足、无证船员上船服务、船舶关闭 AIS 设备逃避监管等违反规定的行为；部分渔船超过核定作业场所捕捞作业、船舶进出港报告不满足要求、布设大量违规的渔网 AIS 网位仪等，这些行为都增加了事故发生的隐患。

（二）客观因素

1、监督管理涉及部门比较复杂，商、渔船安全主管机关分别是交通运输部海事管理机构和农业农村部渔业执法部门，双方已经建立了不少合作机制，但在各自监管领域侧重点不同，资源情报信息共享程度不高，需要进一步加强融合合作。

2、管理部门管理资源不足与辖区海域面积过大形成矛盾，虽然主管机关已尽心尽力，但商渔船分布广，信息化手段短缺，对渔船在海上的动态管理缺乏有效手段，商渔船的防碰撞预警提醒还停留在研究阶段，距离实践应用还需多方努力。

3、公司安全管理问题，商船公司的“体系管理”相关文件中缺乏船舶经过渔区时防碰撞注意事项等相关内容或建立了相关制度缺乏执行监控力度；渔船多以协会等形式存在，企业主体责任落实不到位，船员稳定性差，缺乏像商船管理中对船员聘用、考核等相关机制，难以对船员长效管理。

五、渔船避碰商船的安全措施

（一）作业水域选择。

渔船要避免在沿海航路附近和定线制水域从事捕捞作业，在国家统一划定的渔场区域内捕渔时，也应注意控制渔场内船舶密度，尽可能给过往商船留出足够的通行水域。

（二） 航行值班

1.应保证驾驶台始终有一名及以上具有一定的综合应变能力，会正确使用雷达、AIS 等助航仪器以及能进行高频通信沟通联系的值班人员。可使用探照灯提醒驶近的商船。

2.正确显示号灯号型以表明本船的作业性质和渔具的范围，必要时，可使用探照灯提醒驶近的商船。

3.保持正规瞭望，如发现商船未采取明显的避让措施时，应尽早使用声号等方式通知对方。

4.合理安排值班人员，杜绝疲劳驾驶。值班期间避免喝酒或饮用含酒精类饮料。

5.一旦渔船完成捕捞作业，应立即视自己为一艘普通的商船，以遵守各项规则与他船进行避让。

6.避让原则

从事捕鱼中的渔船，操纵性能受到渔具的限制，根据规则的要求，应尽可能配合商船采取最有利于避碰的行动。

7. 号灯号型和通信、导航设备的使用

1）严格按规则要求配备并显示准确的号灯号型。各类渔船除显示规定的号灯外，可以开亮工作灯或探照灯，但要避免影响他船对本船动态的判断。

2）开启雷达，并注意观测周围情况。

3）按章鸣放声响灯光信号，当对商船行动有任何怀疑时，应通过鸣放号笛的方式提醒他船注意。

六、商船驾驶员航行务必注意事项。

（一）航路选择

1.尽可能优先使用定线制和推荐的沿海航路。

2.尽可能地全面分析本航次航线特点并制定航线，避开商渔船碰撞高发、易发及多发区，减少与渔船相遇的机会。休渔期刚过后，将会有大批渔船出海捕捞，商船需要根据本船条件，及时调整航线。

3.在制定航线时，船长与驾驶员都要充分了解渔船的特点和作业方式，知晓渔民的通常做法及渔民的操船与避让方式，遇到渔船时主动避让，立足“早、大、宽、清” 。

（二）航行值班

1.船长应全面客观了解本船驾驶员的个人业务能力，当船舶经过渔场、渔区、事故高发、易发、多发水域、复杂水域、狭水道航行、能见度受限等应主动上驾驶台监航或亲自操作。

2.始终保持正规瞭望。当通过能见度不良、狭水道、港口附近、渔区等通航密度区还应增加瞭望人员（包括安排了头人员），在对渔船密切关注时，还应注意尽早判别区分渔船作业类型，采取合理的避让措施及早避让渔船及其渔具，保持足够安全距离，避免渔船为护其渔具而近距离突然改变航向航速导致的紧迫局面。

（三）避让原则

商船避让渔船应立足自身，主动采取避让措施，果断采取大幅度的避让行动，并细心核查避让行动的有效性。在采取避让行动时，应遵循“早、大、宽、清”的基本原则。

（四） 通信和助导航设备的使用

1.开启两台雷达，调整并保持雷达工况良好，一台置于 6 海里量程，主要用于远距离观测，提前认清周围环境，对附近航行船舶进行雷达标绘跟踪；一台置于 1.5/3 海里，交替变换雷达量程，主要用于近距离观测，重点识别渔船、渔网及灯浮的识别判断。

2.加强瞭望观测，利用一切手段正确判定渔船、渔网、渔浮及灯浮

3.加强和附近船舶的无线电联系，尝试和渔船进行直接的避让沟通同时观察附近水域的其他船舶的航行情况，尽早联系，协调避让行动，注意播报航行警告，并与 VTS 保持联系。

4.按章显示号灯号型，以便渔船判断本船的船型、船长等信息。当对渔船行动有任何怀疑时，

还应通过鸣放号笛的方式提醒渔船注意。

七、商渔船碰撞事故防范措施

（一）明晰商渔船安全监管各主管方的责任

1、完善商渔船避碰主管机关监管体系化：明确涉及商渔船的监管主管机关、监管水域划分和监管对象划分，加强对商渔船及船员的监管，规范船员的培训、考试、发证及证书的再有效考核，以现代化信息手段提高船员的安全意识。

2、完善商渔船公司安全管理体系化：进一步完善商船公司安全管理体系，落实“定岗联船”管理制度，强化商船在体系管理端防碰撞的执行力度；引导渔船编组作业，积极引导设备厂家开发渔业人员乐于接受的信息化终端使之乐于使用，探索渔业船舶管理的体系化。

3、把好船员履职能力关：主管机关要引导和强化商渔船船员的安全意识，不定期邀请商渔船的船长、船员面对面交流，汇编商渔船事故、险情、典型违法案件等，开展安全生产公益性宣传教育。商渔船所有人或者经营人应加强对所聘用船员的安全意识和应急能力方面的教育，在船员的岗前培训过程中增加商船途径渔区的避让方面的培训，在应急演习中增加商渔船船舶碰撞前应急反应演练。商渔船船长平时应加强对驾驶台值班人员的安全意识、应急能力及业务水平培养和教育，合理安排驾驶台值班人员。

（二）建立商渔船防碰撞预警联系渠道

1、建立商渔船防碰撞预警监控机制：对渔船的出航、作业进行监控预警，相关管理机构充分利用 VTS、AIS、GIS、VHF、CCTV 等信息化技术，加强对航道的监视，及时针对商渔船的违规行为进行预警通报，发布警告信息，引导船舶遵章航行。结合市场上存在的船舶终端监控平台等设备，植入预警功能，完善预警监控机制。

2、建立联合警示教育机制：研究基于已识别商渔船碰撞事故主要风险源，汇编商渔船事故、险情、典型违法案件，联合开展警示教育，进一步提升商渔船船员安全航行作业意识，建立相关管理机构、地方政府、航运和渔业企业的相互交流机制，定期组织安排人员互相讲授商渔船安全航行知识，研究推动商渔船碰撞事故应急预案，定期编制发布商渔船防碰撞指导手册。

（三）建立渔业生产和商船航运安全会商机制

1、建立共管共享机制：研究加强政府.部门协作机制，建立信息通报共享、监管互认、执法互助的工作机制，建立健全综合执法平台，形成商渔船齐抓共管格局。定期开展联合执法，对航道及其周边水域的通航秩序、养殖捕捞、助航标志、警示标识、隔离设施等进行巡查，发现问题现场协调解决，建立整治航道水域联防联控机制。

2、引入定线制管理模式，推动分道通航建设：进行科学的顶层设计，科学规范渔船作业区，推进完善商船航路，避免与商船航路重叠、交叉。规范商渔船航行遭遇时的行为导则，禁止或限制渔船在商船航路中作业，降低商渔船频繁交会形成的风险，强化商渔船碍航行为的法律治理。

3、以科技手段进行管理：研究推进安装现代化的设施设备，利用现代智能通讯导航科技手段，与渔船保持全程通信。如综合运用北斗系统、海事通信系统、AIS 终端、电子海图和智能船舶终端等多种智能化技术，实现渔船定位与自动发布位置、碰撞预警一键呼、轨迹回放、图像传输、手机查询等功能，主管机关、渔业协会和渔船公司对渔船航行作业行为实施全程监控。利用物联网技术在渔船的监测以及大数据等方面与海事物联网互相融合，及时处理商渔船碰撞、恶劣天气等异常情况，大幅度提高渔船遇险时的获救率，带动整个渔业安全生产的发展。

（四）建立商船途径渔区作业区避让协调机制

1、航线设计：商船的船长接到航次指令后，召集全体驾驶人员拟定计划航线，仔细查询相关的航海图书资料，了解航线所经水域涉及的渔船和渔船密集区，培训驾驶人员熟悉渔船作业方式，并在海图上提前标出渔船作业区域，警示值班人员绕行。对于可能经过渔区的水域，在海图和其他航次计划资料上标明注意事项，如保持安全距离、避免进入渔区。途径水域如果有交通管制水道，严格按推荐的航道安全航行，并提前咨询渔船习惯航路。

2、进入渔业作业区前的准备工作：商船在进入渔区前，应提前了解渔船习惯航路，在渔区中事先画出商船计划航线。提前将 VHF 调到最近的船舶交管中心，及时接收海事安全广播和航行警报。召开由轮机长参加的驾驶团队会议，确保驾驶台各个助航设备和船舶动力、推进装置等各项设备稳定运行。商船应保持高度戒备，及时开启雷达，注意守听 VHF，必要时加派瞭头和船长上驾驶台亲自指挥操纵船舶。了解本航次装载情况下的操纵特性、本船的瞭望盲区、检查手操舵和应急舵的工作状况、号笛、操纵号灯、手提白昼信号灯的状态。充分利用雷达和视觉、听觉等多种方式加强瞭望。航行中调整雷达有效状态，经常调整雷达量程，多用雷达远距离量程观测航线前方是否存在密集渔船区，如发现，积极绕航加以避让。在雾中应加强雷达瞭望，即使雷达上没有发现渔船，也应按章鸣放雾号。航行时，驾驶台值班人员应注意观察渔船的作业动态。

3、避让原则：发现与渔船构成“碰撞危险”，多方走动，换角度瞭望，仔细观察渔船动态、是否存在渔浮渔网，并正确判断作业方式，采取相应避让措施。尽可能通过 VHF、灯光、声号等一切有效手段与渔船取得联系，协调避让措施；正确判断渔船作业方式，确定从渔船的船头还是船尾通过，考虑到渔网在水下的长度，始终与渔船保持安全距离；对于海面上发现的渔浮、小旗等漂浮目标，驾驶人员应谨慎对待，正确识别目标，保持安全距离通过。

八、结束语

商渔船碰撞事故防范工作，是一个系统性工作，各部门和企业应深化沟通与合作，整合现有资源，努力挖掘主客观因素，重点提高驾驶员的防范意识，建设安全可靠的通航环境，为我们建设海洋强国尽一份力。

参考文献：

[1] 杨志成.浙江沿海水域商渔船碰撞事故发生规律及商船防范措施[J]中国海事，2020，(12)：20-23+44
[2] 吴杰.中国沿海渔船现状及防范商渔船碰撞探讨[J]珠江水运，2024，(5)：86-89
[3] 李光照，曾昆. 商渔船碰撞防范要点[J]. 珠江水运，2021，(02)：36.
[4] 徐善雷，周文涛. 浅析商船与渔船碰撞事故特点及对策措施[J]. 航海，2017，(05)：43-45

作者简介：

黄友标：龙港市经济发展局，从事港航方面工作四十年，有港口、运管、航道、港航监督、船舶检验等方面一线工作经历，原苍南、永嘉港航管理局局长。13906778348，邮箱：13906778348@126.com

陈定进：温州进兴船务有限公司总经理，从事航运船舶管理多年，有丰富的航运管理经验，现公司在龙港市华百广场梅园阁 5 楼 505 室，13566139197.邮箱：128167@163.com

内河船员任职资历审查机制优化研究

詹文文

温州海事局

摘　要：本研究以内河船员任职资历审查机制为研究对象，旨在揭示其存在的问题与不足，并提出相应的优化策略。通过深入分析内河船员任职资历审查机制现状，发现该机制存在审查流程繁琐、审查做法不一、资历验证较难等主要问题。这些问题不仅影响了审查的效率和准确性，也制约了内河航运业的健康发展。针对这些问题，本研究提出了建立健全审核人员培训教育机制和沟通交流平台、提升船员资历相关系统信息准确度和可信度、提供资历不足船

员更多补救措施和更低救济门槛等优化策略。这些策略的实施有望有效提高内河船员任职资历审查的效率和准确性，保障内河航运的安全和顺畅，同时杜绝资历造假等不规范行为。本研究对于完善内河船员任职资历审查机制、推动内河航运业健康发展具有重要的现实意义和应用价值。

关键词：杜绝造假；差异做法；优化系统；流程统一

一、引言

（一） 研究背景

随着内河航运业的稳步发展，内河船员作为航运安全的重要保障力量，其船舶驾驶和操纵技术对于水上安全航运显得尤为重要。然而，内河船员任职资历审查作为船员证书再有效发证时海事管理机构能够验证船员对于船舶驾驶和操纵技术情况的唯一手段，其审查机制仍存在诸多问题，如标准不一、流程繁琐、信息共享不畅等，加上船员船公司船中介为了经营利益在申报阶段还会针对审核人员无法到现场核实的漏洞进行服务簿资历填报造假的违法行为，制约了内河航运业的健康发展。因此，考虑对内河船员任职资历审查机制进行优化研究，具有重要的现实意义和应用价值。

（二）研究意义

本研究旨在通过对比沿海船员和内河船员任职资历审查机制之间区别的深入分析，发现内河船员任职资历审查机制存在的问题和不足，并提出相应的优化策略，这不仅有助于提高内河船员任职资历审查的效率和准确性，还有助于保障内河航运的安全和顺畅。杜绝资历造假等不规范提交虚假材料的违法行为。同时，本研究也希望为相关部门制定更加科学合理的船员管理政策提供参考依据。

二、内河船员资历审查现状分析

（一）审查机制概述

目前，内河船员适任证书再有效发证主要由管辖区海事局政务中心负责实施，其审查内容主要包括船员的年龄、健康状况、水上服务资历、专业技能培训等方面，主要依据《中华人民共和国内河船舶船员适任考试和发证规则》、《内河船舶船员特殊培训合格证签发管理办法》、《浙江海事局内河小型船舶船员适任考试和发证办法》等法律法规，其中船员在适任证书有效期内的水上任职资历是审查的重中之重。

（二）审查流程梳理

内河船员任职资历审查流程一般包括以下几个方面：一是查看服务簿任职资历记载是否存在明显的逻辑矛盾、有否涂改痕迹等。二是比对任职资历是否与其持有适任证书的等级、航区、职务等相匹配。三是核验任职资历是否与船舶进出港报告动态或船员管理系统任解职信息基本相符。四是对于任职内河小型船舶并持有限制类适任证书的船员，还会审查其服务簿是否由负责其任职客渡船签证的海事管理机构的签注或渡口所在地乡（镇）人民政府出具的资历证明。在实际操作中，针对不同的具体情况，为了验证任职资历的真实性，各地海事管理机构可能还会“一事一办”要求提供不同证明资历真实存在的材料，但因海事要求额外提交材料、与各部门间验证材料真实性需要一定时间，导致个别相对人对海事审查流程存在繁琐、耗时等负面评价。

（三）存在的问题与不足

为更深入了解辖区内河船员任职资历审查机制存在的问题与不足，政务中心面向船舶公司、内河船员等发放《内河船员任职资历审查机制优化研究问卷调查表》40 余份，共收回 35 份。经过梳理分析，发现当前内河船员任职资历审查机制存在的问题主要包括以下几个方面：一是审查流程繁琐，2021 年中华人民共和国海事局下发《关于公布第一批在线办理海事电子证照及更便利船员证书办理举措的公告》明确海船船员培训合格证书及适任证书等可无纸化远程办理，2024 年上线“海事通”APP 更是将海船船员证书申报推入“掌上办”新阶段，然而内河船员的证书签发到现在仍采取现场提交申请材料的方式，对于偏远地区的船员来说，办理证书来往路程长、时间成本较大，如果材料没有一次带齐，更是麻烦。二是审查做法不一，各地海事管理机构对个别具体问题的审查标准

解读以及资历验证方式存在差异，如部分内河船舶安排船员两班倒或三班倒，期间船员也会自主换班，个别船员中间可能存在较长时间不在船，其资历认定是否承认为连续资历、是否需要补充材料均由管理区海事机构各自会商决定，目前仍未有法律法规或文件明确，导致存在差异做法。三是资历验证较难，部分内河船舶因船上人员年龄大、文化程度低，对于船舶进出港报告制度认识不清楚、执行不到位，导致存在服务簿填写漏填、错填，船舶进出港报告执行不到位的情况，此外多份《问卷调查表》也体现船员认为任职资历审查机制不够透明，不知道如何验证其资历真伪。而审核人员对内河船员开展资历审查时也仅能凭借服务簿记录的信息，无法像海船船员一样多系统比对验证资历真实性和有效性，对伪造虚假资历存在较大漏洞。

三、内河船员资历审查机制优化策略

（一）建立健全审核人员培训教育机制和沟通交流平台

一是提高船员审核审批人员的专业素质和服务水平。目前船员证书发证岗位人员流动较大，各分支局之间习惯做法各不相同，仅仅下发文件靠审核人员自主学习解读，容易产生分歧。对于新到岗人员的培训应统一标准与“教材”，通过完整、系统的培训学习，从进入岗位初期就建立良好的审核习惯，同时保证个人审核审批做法与规范标准保持一致性。二是搭建审核审批人员的定期沟通交流空间。通过定期的线上论坛会议，尽可能覆盖疑难问题进行有效沟通，既能始终保持规则和流程统一，消除不一致做法，减少群众的误解，又能间接开展业务监督评估，及时掌握全辖区内河船员证书申报动态，确保内河船员任职资历审查工作高效透明、协调运作。

（二）提升船员资历相关系统信息准确度和可信度

一是优化系统提高内部校正准确性。参考目前已经上线运行的海船船员证书无纸化申报系统，能自动对照审核事项校对的程序，希望将先进的信息化技术手段，如人工智能、大数据等，同步应用到内河船舶船员证书申报系统流程中，提高内河船员任职资历审查工作的自动化和智能化水平。如一步到位，在中国海事局官网“一网通办”子网站增设提供内河船员证书申请无纸化远程申请选项（目前仅设置该功能窗口，并未明确实际应用），方便偏远地区船员远程办证，则更能提升群众办证体验。二是进一步优化船员任解职管理系统。目前内河船员服务簿及任解职大部分由公司或船舶全权管理，不清楚自己资历产生的实际操作流程细节。建议明确由船员本人操作任解职动作，增加如船员人脸识别、指纹识别等认证程序，增强任解职信息的准确度和可信度，为后续任职资历审查的多系统验证打好基础。也通过增强船员本人参与度，降低其对于内河船员任职资历审查机制的不透明感觉。三是强化船舶进出港报告中人员在船信息核实工作。一线执法部门应认识到船员任职资历审核是船员证书发放的重要环节，船员在船的真实操作技术能力是直接关系到辖区水上航行安全的重要因素，在常规上船检查中加强船员实际在船情况与海事系统的多环节验证，包括航行日志记载、值班排班等情况，防范船员证书挂靠行为，共同推动内河船员任职资历审查机制的优化和完善。

（三）提供资历不足船员更多补救措施和更低救济门槛

一是升级内河船员任职资历验证手段。对水上资历形式审查过程发现存疑需进一步验证的情况，增加任解职港口所在地海事处实地验证步骤，个别条件允许的情况下可上船验证船员是否真实在船，共同打击船员任职资历造假等违法行为。但对查明确实因船员个人不会操作或者船舶公司操作错误而导致资历填报不规范、资历不足的情况，可通过提供必要佐证材料进行补救，体现海事执法有温度。

二是灵活应用现有信用信息体系结果管理。如将信用等级与发证时间、证书有效期进行挂钩，加强船员对申报证书时提交真实任职资历的重视度。对于经审核发现船员上报的任职资历存在虚假资历情况的，对其所在公司或船舶的船员管理工作进行评估，严肃辖区船员管理工作，从源头防范资历造假问题。

三是提供简洁版本培训考试模式代替资历要求。在保证培训考试项目足够覆盖及验证船员基本船舶操作技能的前提下，尽可能减少部分不必要的考试项目和考试时间，便利部分没有资历的船员重新培训考试。

四、结论与展望

本研究通过对内河船员任职资历审查机制的现状分析，发现其存在的问题和不足，并提出了相应的优化策略。研究认为，制定统一的内河船员任职资历审查标准和流程规范、加强信息共享和监管合作、优化审查机制和提升技术水平等措施，可以有效提高内河船员任职资历审查的效率和准确性，保障内河航运的安全和顺畅。

未来，本研究将进一步关注内河船员任职资历审查机制的实施效果，并针对实践中出现的新问题和新挑战进行深入研究。同时，本研究还将加强与其他地区海事管理机构的交流与合作，借鉴先进的船员管理经验和技术手段，共同推动内河船员任职资历审查机制的优化和完善。此外，本研究还将关注船员职业发展和培训教育等方面的问题，为内河船员队伍的建设和发展提供更加全面的支持。

作者简介：詹文文，温州海事局，通讯地址：浙江省温州市鹿城区江滨街道海事路 8 号
电话：15958777005 电子邮箱：599164454@qq.com

温州北麂岛雷达站国产化雷达和 VTS 系统应用实践

姜保松
温州海事局指挥中心

摘　要：温州船舶交管中心自 2012 年运行以来，所属的四个沿海雷达站一直使用由丹麦进口的 TERMA 磁控管雷达和瑞典萨博（Saab)集团研制的 VTS 系统，随着社会经济发展，温州水上安全形势日益严峻，私人游艇、海钓船、休闲渔船、LNG 船、海上风电、沿海大桥、核电等新业态不断涌现，VTS 中心面临的监管对象日趋复杂化多样化，在用的原 VTS 监管系统和雷达由于设备陈旧，系统功能更新慢，定制化程度低，难以满足现阶段海事监管需要。经上级批准，2022 年温州船舶交管中心在北麂岛雷达站引入由中船重工鹏力科技集团自主生产研发的全国产海事全固态雷达和 VTS 系统，本文通过文献研究法、比较分析法和统计分析法等方法对国外进口雷达、系统和国产化雷达及 VTS 系统进行应用对比和功能及优缺点进行了分析。经实践应用来看，该项目的引入有效提升了交管中心的感知探测能力和工作效率，并降低了雷达的运维成本。

关键词：国产化；雷达；VTS 系统

1. 绪论

1.1 实践背景

船舶交通管理系统作为水上交通领域的关键基础设施，在减少船舶交通事故，提高船舶交通效率，防止水域环境污染等方面发挥着至关重要的作用。我国自上世纪八十年代开始建设第一套 VTS 系统，发展至今规模已占世界三分之一，但是长期以来，VTS 系统建设依赖国外产品[1]，VTS 系统中的大量涉水数据难以保证安全控制，直接影响到国家信息安全，此外国外厂商的产品普遍不能满足我国海事用户定制化需求，难以与海事、港口、航运业务系统等有效集成，并且产品价格高，售后服务不及时。

温州船舶交管中心自 2012 年正式投入运行以来，一直使用的由丹麦进口的 TERMA 雷达并接入瑞

典的萨博（Saab)集团研制的 VTS 系统，随着海上监管环境日趋复杂化和海事监管服务不断向纵深发展，该雷达和 VTS 系统难以满足新型海事 VTS 监管要求，在交通运输部实施“陆海空天”大交管战略和浙江海事局打造“走在前列”的蓝色铁军的背景下，经上级部门的批准，温州船舶交管中心主动作为，于 2022 年成功在温州北麂岛雷达站接入中船重工鹏力科技集团自主生产研发的国产化海事全固态雷达和 VTS 系统。实践证明，该型国产化雷达和 VTS 系统的使用有效提升了温州船舶交管中心的工作效率和监管服务水平，有力推动了温州海事监管与航海保障一体化融合发展，建立具有温州特色的新型“陆海空天”感知探测手段，开启了温州海事系统国产 VTS 国产化应用新局面，也为全国海事系统实施 VTS 和雷达国产化打造了“样板”。

1.2 国产系统

本文提到的国产 VTS 系统和雷达是由中船重工八院下属的全资子公司中船鹏力科技集团自主研发生产，该企业依托第八研究院在军工行业中对海监视雷达和海军作战指控系统的技术实力，通过军民融合技术转化，定制开发面向海事系统的全国产雷达和 VTS 系统。该企业作为国际 IALA 组织 VTS 专业的唯一中国工业会员，长期参与制定国际船舶交通管理行业标准，同时积极参与《船舶交通管理系统》《X 波段多普勒天气雷达》等国家标准的制定。目前在全国各 VTS 已开展国产化应用的中心中，鹏力开发的 VTS 系统（PRIDE)市场占比达 70%。另外该企业面向海事自主研发的恒星系列雷达—XFR3225 是使用于船舶交通管理及海岸监视服务的国产化高性能岸基监视雷达（18 英寸），雷达采用固态全向参脉冲压缩体质和先进的频率分集与时间分集技术，搭配双收发机的 UP-MAST 组成具备卓越的目标探测能力和极高的空间分辨能力[2]。保障在恶劣环境下同样拥有最佳特性。满足国际航标协会（IALA）G1111、GB/T 39277-2020《船舶交通管理系统》等标准要求。

2. 北麂岛雷达站基本情况

2.1 北麂岛雷达站自然环境

温州北麂岛位于浙江省东海沿海海面上，距离最近的温州瑞安市区 37 海里，是瑞安市北麂乡政府所在地，北麂岛周边海域宽广，天然水深条件好，周边自然水深均在 20 米以上；该岛东西两侧分别为浙江沿海船舶公共航路的东航路和西航路，距离外航路也不足 20 海里，该岛周边也是进出温州港区的重要水域。北麂岛雷达站则位于北麂岛东平山上，位置 27° 37′ 43.6″/121° 12′ 24.8″，地面海拔高度 171.8 米，地面建筑高度 43 米，建筑顶端的雷达天线周边视野开阔，无遮挡。该雷达站是温州海事走向深远海、建立远程海事感知探测能力的重要基点之一。

2.2 北麂岛雷达站通航环境

北麂岛雷达站覆盖北麂岛周边约 30 海里范围水域，该水域船舶交通流密集，各方向航行船舶众多，是温州沿海重要的船舶通航水域。

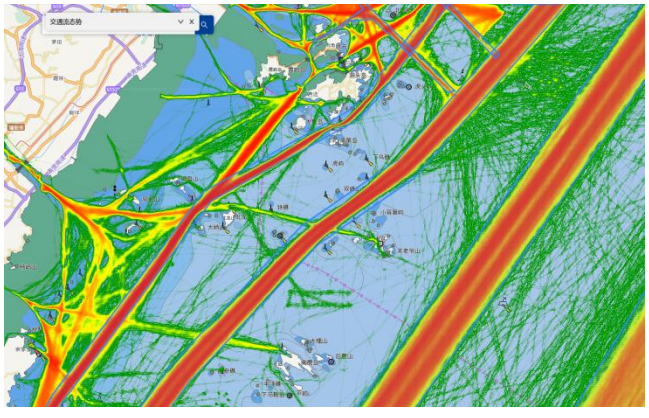


图 2-2 温州北麂岛雷达站周边交通流态势图

2.2.1 交通流方向

一是南北方向看，浙江沿海三纵公共航路外航路、东航路、西航路（另有沿岸小型船舶习惯航路）穿越其中，南北向船舶日均交通流量 260-300 艘左右，其中 3000 总吨以上船舶约占比 70%以上，

且该雷达站西南侧约 5 海里以南为温州 VTS 南报告区。

二是东西方向看，该水域为进出温州飞云江口、瓯江南口、鳌江口、洞头峡等港区的重要区域，涉及船舶数量多，航线交叉复杂，交通态势严峻。

2.2.2 航经船舶种类

一是渔船众多，雷达覆盖区内有温州沿海主要的渔船渔港和渔船传统作业区，在捕鱼季节，该水域有成百上千条渔船航行作业，海上渔业活动频繁；

二是沿海客运航线贯穿其中，覆盖区内有四条浙江沿海重要的客运航线，其中南麂岛为国家 4A 级景区，南麂客运航线在旅游旺季日均发送旅客量三至四千人；

三是危险品船和大型电煤运输船较多，覆盖区内有 3000 级飞云江滨海油库码头和 35000 吨级苍南华润电厂码头，码头作业频繁，吞吐量大；四是覆盖水域近岸方向为 500 总吨级小型货船活跃区域。

2.2.3 海上风电场

温州沿海共有 7 个海上风电场（含在建），规划场址总面积 315 平方公里，规划总装机容量为 250 万千瓦，规划场址离岸直线距离约 14-71 公里，水深约 11-38 米。其中苍南华能 1、2、3（在建）、4 号海上风电场和瑞安 1 号风电场（在建）在北麂岛雷达有效覆盖范围内，风电场为新业态海事监管重要场景，该水域航经船舶较多，也是渔船、休闲海钓船、小型游艇等活跃区域。

3. 北麂岛雷达站 TERMA 雷达及 VTS 系统使用情况

3.1 TERMA 雷达使用情况

温州船舶交管中心自 2012 成立且投入运营以来，一直使用 TERMA 磁控管雷达，在运行初期，该型雷达基本能够满足日常值班需要，但随着海事监管服务不断发展，对设备和技术的要求也不断提高，TERMA 在使用过程中逐渐暴露出多方面的问题和短板，难以满足新型海事发展的需要。

一是雷目标的发现概率不稳定，针对小型休闲渔船、游艇以及海上风电场风机等场景物标的扫测及跟踪不稳定；

二是雷达探测距离较小，一般有效覆盖水域范围约 20 海里以内；

三是雷达在距离上分辨力上较低，如在风机群中往来船只，无法直接测量船舶和风机相对距离；

四是雷达设备运维成本较高，原使用的 TERMA 雷达为磁控管型雷达，需经常性采购更换磁控管，增加现场维修频率，且设备维护需要萨博香港代理公司远程或派技术人员入关巡检，维护困难且人工费用昂贵。

3.2 萨博（Saab） VTS 系统使用情况

温州交管中心自 2012 年接入使用萨博的 VTS 系统，并在值班室开设 4 个萨博系统值班台，多年使用以来，该系统功能上基本能够满足交管值班需要，系统稳定型较好，但存在以下几个方面问题：

一是该系统架构于 LINUX 操作系统，且操作界面全英文设置，对于广大值班人员操作使用不友好；

二是该系统更新慢，功能不突出，不能就覆盖区内的海上安全形势变化在系统设置和显示上及时更新调整；

三是日常维护困难，该 VTS 系统、雷达设备需由萨博集团负责运维，日常只能远程技术维护，如有解决不了的问题再安排人员入境到雷达站现场检修，期间等候期长，问题无法快速解决，另外现场检修等人工费用较高。

4. 国产化雷达使用情况

4.1 基本情况

温州船舶交管中心于 2022 年 6 月在北麂岛雷达站更换使用鹏力国产化雷达，运行两年以来，雷达运行平稳，系统指标及各项功能能够满足新形势下值班和执法监管的需要。其中与原进口 TERMA 雷达相比，新型全固态海事雷达在探测精度、分辨能力、作用距离、小目标探测能力、机动目标的检测能力等方面，有显著的优势[4]。而且使用寿命更长，维护成本更低。此外国产化雷达系统还开

发出具有杂波抑制、全自动目标标绘、航行安全预警和避碰辅助决策等新技术，显著提高了 VTS 监管服务水平。

4.2 国产化雷达特点

4.2.1 探测性能指标优异



图 4.2 北鹿岛国产化雷达回波效果

目前国产 VTS 雷达（鹏力）性能参数指标已达到并部分超越了 TERMA 等国际主流产品，可以充分满足系统监管需求，相关参数对标如下：

表 4-2 TERMA 雷达与国产（鹏力）雷达运行参数

参数类别	国际主流产品 （TERMA 5102）	国产 VTS 雷达 （以浙江海事局所使用 XFR3224/3225 为例）
工作频率	9.0-9.2 GHz、9.25-9.5GHz	9.0-9.5GHz
发射功率	50W	≥100W
噪声系数	2.5dB	2.1dB
瞬时动态	--	82dB
动态范围	140dB	140dB
灵敏度	-130dBm	-130dBm
AD 采样	14bit@400MHz	14bit@500MHz
最大脉压比	1500：1	1665：1
峰值副瓣比	-60dBP	-67dBP
扇区数/扇区角分辨力	16 个/1°	16 个/0.37°

国产化 VTS 雷达与以往常用的 TERMA 2001 磁控管雷达相比，从可见的探测性能上来看有着较大的提升：

一是目标的发现概率，厂家表征的时间分集和频率分集技术应用等效果显著提升[3]；

二是从交管可见远端目标覆盖范围更广，整体回波质量更强；在 2022 年 12 月组织进行了北鹿岛现场跑船测试中，国产化 VTS 雷达对海巡艇（海巡 0766，40 米级，相对于 10 ㎡ RCS 目标）的最远有效探测距离达到了 12.93 海里，距离分辨力和方位分辨力分别做到了 18m 和 0.483°，较以往使用的进口 TERMA2000 系列雷达有着较大的性能提升约。

三是国产化 VTS 雷达在距离上分辨力有着显著提升，特别是在风机群中，可以清晰分辨风机群中的往来船只，可直接测量船舶和风机相对距离，进一步强化海上施工安全和风电场景海事安全监

管。

4.2.2 设备安装运行便捷和维护成本低廉

目前温州北麂岛雷达站使用的为新型全固态 VTS 雷达，其使用的固态发射机技术使得装备可靠性进一步提升，对雷达的巡检频次也大幅降低，从目前稳定的运行状态来看，基本可以满足年度的免维护指标；该型雷达整体支持全户外安装，不再需要塔上机房，一定程度上减小了施工难度和成本；同时所使用的固态雷达收发机，不存在易损易耗件，不再需要定期的更换磁控管，技术风险和运维成本也得到相应的降低。

4.3 使用中出现的问题

在接入国产化雷达运行初期，也遇到了一些新的问题，比如值班台显示经过处理的雷达回波时，前期存在与进口 TERMA2001 雷达不兼容的等情况，具体表现为当国产雷达回波处理的较好时，进口雷达的回波普遍向某一偏移，当进口雷达的回波显示正常时，鹏力雷达的回波很微弱等不良状况。

5. 国产化 VTS 系统使用情况

5.1 基本情况

温州船舶交管中心于 2022 年 6 月同步接入国产化 VTS 系统，并成功链入国产化雷达系统，实现全国产化雷达-VTS 系统深度融合。目前在值班室值班员台，已实现双系统运行，以国产系统为主，进口系统参照辅助值班模式。国产 VTS 系统在综合能力方面展现出了较好的性能，包括可靠性、通用性、可扩展性、可维护性及联网能力。系统能够稳定运行，支持多种应用场景，并且在技术迭代、兼容性与数据交换服务上满足国际标准，如 IALA 的规范。

5.2 国产化 VTS 系统特点

5.2.1 业务贴合度高

国产 VTS 系统可以更好地适应水上监管的需求，定制化程度更高。可以根据不同地理环境、港口特点、船型的实际情况进行适配和优化。在温州 VTS 系统应用实践过程中，厂商根据值班需求定向开发了船舶智能标签、重点船舶精准识别、重点行为精准判断、违法行为精准监管、应急力量集中展示等新功能，并与浙江海上智控平台形成了无缝对接，建立“雷达+AIS+CCTV”水域感知覆盖模式，通过“全息画像+安全码”助力海上动态全管控，“空管式”服务实现交通流组织更高效，“岸基协同+船船互通”支撑商渔船防碰撞预警更有效、“科学定位+辅助决策”助力应急响应处置更迅速，“红黄绿”码助推疫情防控更精准，“预约式管理+精准组织”提升锚地综合利用率，“智能调度+全方位感知”等多形式定制化服务场景功能。

5.2.2 技术更加先进

国内科研人力丰富，国产 VTS 系统技术升级迭代速度明显快于国外产品。可以根据海事监管需要及时采纳国内外先进的信息技术、通讯技术、电子设备等进行技术创新。如采用自适应雷达视频压缩技术，解决传统压缩算法无法压缩不同环境的雷达数据问题，调整动态压缩算法，节约网络传输带宽；多型雷达实时无损接入并提升压缩效率，多个水域统一航迹融合，非合作船舶目标编号唯一化管理，便于事故回放和事故排查；雷达视频的新型分层异步渲染[5]，在多个雷达视频实时渲染显示的情况下，不影响用户界面交互的流畅性；基于目标行为规则的统一计算服务，实现了对目标异常行为的实时监测和告警；实现了基于区域杂波图的间接反射假回波消除方法，可动态消除间接反射造成的雷达假回波，提高了系统雷达回波的置信度。

5.2.3 建设维护成本低

进口 VTS 系统的价格昂贵，而国产 VTS 系统可以有效降低使用和运维成本。国产 VTS 系统消耗人力资源和采用的材料、零部件和组件的价格相对较低，生产成本也较低。

5.2.4 服务保障及时

国产厂商有专业团队进行系统巡检与系统维护，如升级海图、问题排查、系统监测，异常处理等。针对 VTS 中心开展一对一售后跟踪服务，问题解决快速及时，且不存在语言沟通障碍，高效保障日常监管。国产 VTS 系统在国内生产，备品备件时效快，售后服务更为便捷。

5.2.4 数据保护强

进口 VTS 系统可能存在数据泄漏的风险，而国产 VTS 系统可以采用更严格的数据保护措施，避免数据泄露风险。

5.2.5 数据协同共享

VTS 系统本身也是一个强大的数据采集系统，数据资源可以根据工作需要，和其它系统互联互通，打通 VTS 与数据中心壁垒，与国外 VTS 系统形成“信息孤岛”形成鲜明对比。

一是丰富 VTS 基础数据，实现船舶档案、船员数量、货物情况、港口公司数据、海事监管类数据等与系统融合贯通及展示，

二是拓展业务数据，如进出港报告数据、口岸查验数据、危险品审批数据、拖带许可数据、现场监督数据、FSC\PSC 数据、重点跟踪船舶数据、协查滞留等数据业务数据标签展示。

三是国产化 VTS 系统已实现多数据源集成展示，一站式浏览船舶所有动态监管信息，提高值班效率。

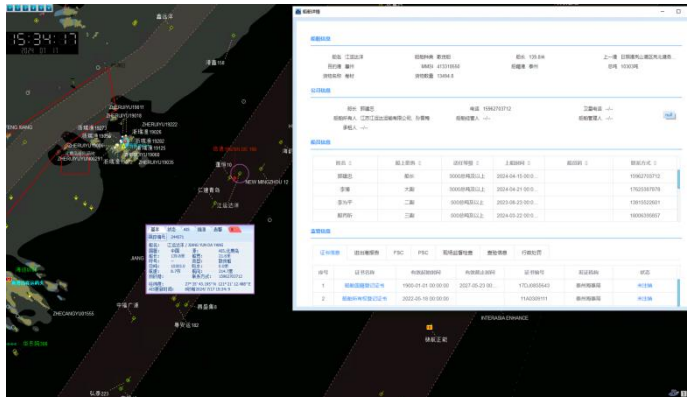


图 5.2 国产 VTS 与海事业务深度集成

另外国产化雷达和 VTS 系统目前已经成功的向浙江海上智控平台输出经过处理的雷达信号，输出数据包括目标经纬度、当前移动速度和方向、船首向等，还包括了未被识别为移动目标的雷达回波，同时也实现了移动目标在不同雷达站覆盖范围之间移动时的 ID 连续传递，满足了智控平台对雷达回波数据的需求。

5.3 使用中出现的问题

接入国产化 VTS 系统使用以来，使用过程中也暴露出一些新的问题，比如在使用过程中前后发现 AIS 信号和雷达信号不融合、船舶报告线无矢量区分、雷达信号断电后不能自动重启、多雷达覆盖区扫测物标信号分离等一系列使用和功能问题，经交管中心与鹏力厂商反馈，鹏力也迅速响应，积极拿出了解决方案，并安排专人到现场跟踪后续处置效果。

6. 结语与展望

本文从北麂岛雷达站环境、原进口 TERMA 雷达及 VTS 系统的使用情况、引入的国产化雷达和 VTS 系统的使用情况，并对两套雷达和 VTS 系统在技术参数、性能指标、使用等多方面进行了对比。国产化雷达和 VTS 系统的接入对外显著提升了温州 VTS 的监管服务水平，对内在日常运维和设备管理上也减轻了值班人员的工作压力，是贯彻落实全要素水上“大交管”建设，进一步提升辖区船舶动态管控和安全保障质效的重要根基。

但引入新型国产化雷达和 VTS 系统，对原有的工作模式可能带来冲击和矛盾，要注重解决新旧系统使用过渡期间的系统和值班使用的磨合问题，国内对海事 VTS 系统和雷达的发展起步晚于西方国家，在一些技术和经验上可能会存在不足及短板，在全国海事装备国产化的进行中，需要 VTS 业内人士和国产厂商共同努力，不断升级优化国产化雷达和 VTS 系统的功能和硬件设备，构建全国产新型海事感知覆盖网络。

参考文献

[1] 王善明.海事科技发展战略与决策管理研究[M].北京佳通大学出版社，2019

[2] 王雪娇 蔡子颖等.能见度激光雷达在天津港海事交通服务中的应用研究[J].海洋预报，2023·40·第二期（110-119）

[3] 刘伟伟.X 波段全固态天气雷达降水探测能力的研究[J]，气象与环境，2019（10）：199.

[4] 姜新培 刘培松 乔益丽.国产 VTS 固态雷达测试应用与研究[J].中国海事,2023.第七期(25-27)

[5] 郑宝东 刘鹏 吕新立.推进 VTS 国产的应用实践及分析研究.中国海事，2024.第五期（35-37）

作者简介：姜保松，温州海事局指挥中心，浙江省温州市鹿城区海事路 8 号，电话 13676744006/0577-88150075,邮箱:jiang_bs@163.com

温州市海上搜救应急能力提升研究

姜继成

温州海事局

摘　要：本文聚焦于加强温州市海上搜救应急能力建设这一议题，深入探讨了其必要性、现状及存在的问题，并提出了一系列针对性的策略和建议。通过完善组织管理体系、强化应急搜救人员培养、持续提升技术装备保障、营造良好海上应急搜救氛围等措施，旨在提高温州市海上搜救应急能力，保障海上生命财产安全。

关键词：

一、引言

随着建设世界一流强港金南翼提升温州“全省第三极”功能实施方案的印发，海洋在温州经济和社会发展中的角色也越来越重要，与此同时，海上各类险情和事故也时有发生。海上搜救作为保障海上安全的关键环节，其应急能力的建设至关重要。随着温州海上水工项目建设、海岛旅游、休闲海钓等海洋活动的日益频繁和复杂，进一步加强温州海上搜救应急能力建设已成为当务之急，也是实现以港兴城、港城融合，加快建设更具活力的“千年商港、幸福温州”、做大做强“全省第三极”现实需要。

二、海上搜救应急能力建设的必要性

（一）保障海上生命安全。影响海上安全的因素是多方面的，如恶劣的天气条件、船舶设备故障、人为操作失误、火灾、碰撞等。这些因素可能会导致严重的后果，往往伴随着巨大的生命威胁，及时有效的搜救行动能够最大程度地减少人员伤亡，保障海上生命安全。如：2022 年 10 月 14 日台州籍渔船“浙岭渔运 30058”在距温州北麂岛以东约 10 海里处突发火灾，温州市海上搜救中心应急救助措施妥当，指挥救助及时，12 名人员获救。在人民群众生命安全面前，必须不断增强海上搜救应急能力，包括完善的救援机制、严格的安全规章制度、相匹配的救助能力。同时，船员和乘客们也要增强安全意识，掌握必要的自救技能。各方应共同努力，确保每一个在海上的生命都能得到最大程度的保护，让海洋成为安全的航行之地。

（二）保护海洋环境。船舶碰撞、沉没、港口和船舶工作人员操作失误等都有可能导致溢油，造成海上环境污染。及时有效的应对措施能防止海洋污染扩散，保护海洋生态环境。在当今时代，增强海上应急能力是一项极其重要的任务，它不仅关乎着海上作业的安全，更与保护海洋环境紧密

相连。任何一次海洋环境污染都可能对其造成不可挽回的损害。因此，要不断加强海上搜救应急能力建设，提高应对各种突发情况的能力，确保在紧急事件发生时能够迅速、有效地进行处置。同时，加强对海洋环境的监测和保护，防止生态破坏。

（三）维护海洋权益。加强海上搜救应急能力是维护海上主权的关键之举，也是维护国家海上主权的重要基石，其重要性不言而喻。在维护海上主权方面，它更是发挥着至关重要的作用。当国家的海上权益受到威胁时，我们需要有能力及时应对各种挑战，保护我们的海洋领土和资源。而这一切都离不开坚实的搜救应急能力作为支撑，同时，这一能力也是彰显国家综合实力的重要标志。一个具备强大搜救应急能力的国家，能够在国际舞台上展现出高度的责任感和使命感，赢得广泛的尊重和认可。

三、温州市海上搜救应急能力建设的现状

（一）应急体系逐步完善。2002 年温州市温州市海上搜救中心挂牌成立，统一协调和指挥搜救行动，2013 年制定《温州市海上突发公共事件应急预案》及配套的操作手册，明确各部门在搜救工作中的职责，确保分工明确、协同高效；2021 年温州市海上溢油应急中心挂牌成立，《温州市船舶污染事故应急预案》编制实施，溢油应急指挥体系和应急处置联动机制持续完善。深入贯彻落实《中华人民共和国海上交通安全法》《浙江省人民政府关于加强水上搜救工作通知》等要求，乐清市、瑞安市、洞头区及苍南县挂牌成立水上搜救中心，沿海县（市、区）专门的海上搜救指挥中心设立，应急管理程序、应急处置流程不断完善。

（二）应急联动机制有效运行。海事、农业农村、东海救温州基地、海警、气象、海洋预报站等搜救中心成员单位在市海上搜救中心办公室的指挥协调下建立密切的联动机制。海事与东海救、航空管制等部门共同建立应急航空救援“秒批”机制，明确与海上伤病人员航空救援转医绿色通道，保障东海救助局救助直升机飞行审批快速运行与海上伤病人员快速转医；与气象、东海救、航标等部门建立气象联盟；与中国移动建立移动通信优先定位机制，遇险人员定位查询机制有效运行。走访温州市农业农村局、温州海警局、东海救温州救助基地等温州市海上搜救中心成员单位，共商海上搜救协作机制，确保指挥协调顺畅，形成搜救合力。

（三）社会应急力量建设有序开展。每年开展海上搜救志愿者应急救助培训，主动为洞头猎豹、洞头溢香、苍南县黄金海岸、等水上搜救志愿者队伍提供专业指导并组织定期开展应急演练，2021 年至今为社会救助力量、长期从事海上救助工作的志愿者等申获并发放中国海上搜救奖励 62 万元、浙江省海上搜救中心搜救奖励 16.5 万元，发放温州市海上搜救奖励 60 万元，并申报浙江省海上搜救中心年度搜救先进单位及先进个人称号，大力扶持搜救志愿者队伍发展；为“浙龙港渔 05668”、“浙玉渔 82085”船申请到 IMO 海上特别勇敢奖表彰。

（四）应急实战能力不断增强。定期组织开展综合应急演练，指导辖区船舶、公司、码头等对象在客运码头、危化品码头、桥区等水域开展消防、救生、清污等各类应急演练，提高抢险救助能力。2021 年至今，先后组织开展 2021 年温州辖区无预案海上风电场防台救生综合演练、“温州海事局 2022 年度船舶溢油应急演习”“2023 年保安全 迎亚运温州港区水上应急救援综合演习”“2024 年温州重点涉水工程综合应急演习”等共计 90 余次消防、救生、清污等重要演习活动，提升抢险救援能力。演习情况多次在 12395 微信公众号发布。同时结合防灾减灾日、应急演练周等活动，开展防台桌面推演，普及防汛防台知识，增强防灾避险意识，提升抢险救援能力。

（五）海上搜救技术装备不断更新升级。完成 8 座 AIS 基站、3 座 VHF 基站补点建设，新增 39 处 CCTV 监控点位，在 9 艘海巡艇上安装 CCTV 监控和北斗终端等通信设备，为 2 艘海巡艇安装卫星电话，搜救感知和通信硬件基础明显加强；浙江海上智控平台“浙海救”场景有效运行，辅助海上搜救决策，应急处置更加智能、高效；海事无人机建设的加速推进改革，实现应急处置全过程快速反馈、全域覆盖。

四、温州市海上搜救应急能力建设存在的问题

（一）指挥协调体系有待进一步完善。除商船外，海上船舶遇险时往往向属地公安、渔政、海警

等单位报警，再经核实后转至搜救中心，报警信息流转时间较长，无法第一时间组织大范围救援行动。

（二）技术装备水平有待提高。温州水域有 1 架专业救助直升机常年驻扎温州龙湾机场，有力保障温州海上人命安全。但该直升机续航能力有限，不具备夜航资质，无法满足 24 小时全天救助工作，且该直升机停放机库无法保障台风天气时直升机的安全停放。

（三）应急搜救人员素质参差不齐。部分应急搜救值班人员缺乏系统的应急知识培训；民间水上搜救志愿者队伍专业性不足，虽长期从事救援工作，对辖区海域环境较为熟悉，但救助能力有限，尤其缺乏水下作业、潜水探摸等相关技能。

（四）中远距离通信感知能力有限。温州水域 VHF 基站分布在鹿西、北麂岛、平阳咀等位置，有效作用距离约 25 海里，且温州市海上搜救指挥协调部门无 M/HF 通讯设施，在日常海上无线电通话中尚可满足需要，但在中远距离无线电通讯时无法与船舶进行沟通，影响救助效能。

五、加强海上搜救应急能力建设的策略和建议

（一）完善组织管理体系。推动沿海县市区水上搜救中心全覆盖，建立完善的信息共享平台，及时传递搜救相关信息。加强与相关部门和单位的沟通协调，深化涉水单位部门信息互通共享，由搜救中心统一接收报警并协调和指挥搜救行动，明确各部门在搜救工作中的职责，确保分工明确、协同高效。

（二）强化应急搜救人员培养。制定系统的培训计划，举办应急知识培训班，对公约、法规、航海知识、医疗急救等方面开展授课，积极争取海上搜救协调信息员培训班名额，提高应急搜救人员综合素质；定期举办温州市海上搜救技能比武，促进应急搜救人员技能提升；借助东海救温州基地平台及应急演练等，对志愿者进行培训及训练，覆盖海上搜救机制、近礁救援、潜水等课程，确保志愿者队伍得到全面系统的救助技能提升。

（三）持续提升技术装备保障。加大海上应急搜救资金投入，提升技术能力，更新先进的搜救设备，如大功率的搜救专用 VHF、M/F 卫星定位系统、固定翼飞机等；落实溢油应急设备库常态化更新、维保专业资金；引进有夜航飞行资质的海上专业应急人才队伍，提高队伍整体素质；建立技术装备维护、更新和升级机制，确保设备始终处于良好状态。

（四）营造良好海上应急搜救氛围。抓好海上搜救文化建设，组织开展 12395 报警电话宣传，普及海上险情预防、避险、自救和互救知识，提高公众应对海上突发公共事件的意识和能力；培树海上搜救先进典型，奖励表彰在搜救工作中做出突出贡献的社会力量和志愿者队伍，激发从业人员及社会各界参与海上搜救的积极性和荣誉感，形成全社会关心、支持、参与海上搜救的良好氛围。

作者简介：姜继成，温州海事局，手机：15258067520　地址：浙江省温州市鹿城区海事路 8 号，邮箱：287387418@qq.com。

船用 C 型 LNG 燃料罐鞍座结构温度场数值仿真及分析

温小飞，贾天戈

浙江海洋大学 船舶与海运学院，浙江 舟山 316022

摘　要：近年来，液化天然气（Liquefied Natural Gas，LNG）这种清洁能源受到了广泛的欢迎，其中，鞍座是 LNG 燃料罐多物理场复合负荷的关键承载结构。本文应用热传导基础理论及方法，建立了鞍座结构传热及温度场仿真的几何模型，进一步在 ANSYS Workbench 仿真平台进行了有限元模型构建、网格划分及仿真计算，仿真结果表明:鞍座结构温度场温度梯度变化明显，鞍座区域受外部低温环境影响较大。鞍座底板的温度较低，但整体分布相对均匀，层压木在传热过程中起到了重要作用，显著影响了鞍座区域的温度分布。

关键词：C 型 LNG 燃料罐；鞍座；温度场；有限元计算

天然气是一种主要由甲烷（CH_4 ）组成的气体能源，广泛用于发电、工业生产和交通运输等领域。天然气在标准大气压（101.3 千帕）下的沸点为-161.52℃，这使其在常温下呈气态存在。在常压下，当天然气被冷却至液态时，天然气的体积缩小约 600 倍，便于储存和运输，这也是天然气在能源市场上广受欢迎的原因之一。为了响应国际海事组织（ IMO ）关于船舶氮氧化物和硫氧化物排放的严格规定，采用液化天然气（ LNG ）作为燃料已成为一种有利于减排和节省成本的趋势。用于储存和运输的 C 型罐属于一种半冷半压式的独立储罐，能够在-163℃的低温条件下进行运输，并且能够承受一定的压力。由 9%镍钢焊接制成的 C 型罐具有工艺简单、成本低廉和安全性高的优点。用于存放液体的货罐通过鞍座支撑，并通过层压木连接至船体结构。由此，罐体、鞍座、层压木和船体结构之间会形成温度梯度，导致热应力的产生，并改变低温条件下材料的特性。Liu Jinfeng 等人对搭载 Type-B LNG 燃料舱的集装箱船货物舱温度分布进行了研究，详细研究了保温材料的热传导性能以及不同类型液体货物对结构温度分布的影响，提供了 Type-B LNG 燃料舱温度分布研究的新见解和实验验证。刘敏等通过有限元分析对一艘 21 万吨散货船 LNG 燃料罐鞍座温度场的模拟结果，评估了鞍座及其相关甲板结构的安全性，并提出了结构优化建议，以提高鞍座设计的安全性和可靠性。董国忠深入研究了独立 C 型罐 LNG 运输船鞍座结构的温度分布情况。这一研究成果对于 LNG 船的设计、生产以及检验环节具有重大的实用价值，有助于显著增强船舶的安全性。邱吉廷及其团队针对双燃料油轮的 LNG C 型储罐鞍座区域，在不同外界温度条件下的温度场进行了详细研究。通过整合鞍座的结构强度评估，他们筛选出了适宜用于船体构造的材料。大量学者对 C 型 LNG 燃料罐鞍座区域的温度场进行了研究。为此，本文以某工程项目中的鞍座设计条件为例，运用有限元计算软件 ANSYS 对鞍座及其周围船体结构的温度场进行了分析。

1 基本原理

物体中任意位置处的温度不仅取决于该点的空间位置，还随着时间的变化而变化。具体来说，温度 T 是空间位置坐标 (x, y, z) 和时间 t 的函数，在三维空间中的每一个点，其温度会随着时间的推移和传导过程的进行而动态变化。因此温度场可以用数学表达式表示为：

$$T = T(x, y, z, t) \tag{1-1}$$

温度在某一时间点的空间分布被称为温度场，温度场提供了物体在某一时刻下各个位置的温度分布情况，能够帮助我们理解热量如何在物体内部传递。如图 1 所示，温度场中温度相等的点构成的表面被称为等温面。在物理和工程应用中，等温面可以帮助确定热传导方向和分析热流路径。不在同一等温面上的两点温度值则不同，从而可能引发热量的流动。温度梯度是指在垂直于等温面的

方向上温度随距离的变化率。温度梯度不仅揭示了热量传递的方向，也提供了关于热流强度的关键信息，在热分析和设计中具有重要的应用价值。

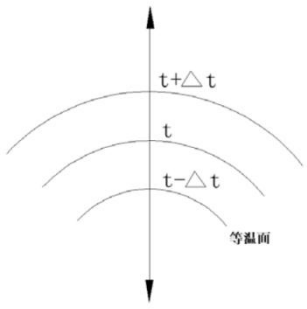


图 1 温度梯度矢量示意图

如式(1-1)所示，温度随时间的变化而变化，被称为非稳定性温度场。而当温度不随着时间的改变而改变时，被称为稳定温度场。在稳定温度场中，温度只是位置坐标的一个函数，数学表达式为：

$$T = T(x, y, z) \qquad (\frac{\partial T}{\partial t} = 0) \tag{1-2}$$

如公式(1-2)所示，当温度随三个坐标参数变化时，被称为三维温度场；当温度只随两个坐标变化时，被称为二维温度场，即：

$$T = (x, y), (\frac{\partial T}{\partial t} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0) \tag{1-3}$$

通常，温度梯度定义为相邻等温面之间的温差与它们垂直距离的比值的极限，即：

$$\Delta T = n_0 \frac{\partial T}{\partial n} \tag{1-4}$$

温度上升的方向是温度梯度矢量的正方向，各方向的分量表示温度变化率在这些方向上的投影，即：

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial T}{\partial n}\cos(n, x) \\ \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{\partial T}{\partial n}\cos(n, y) \\ \frac{\partial T}{\partial z} &= \frac{\partial T}{\partial n}\cos(n, z) \end{aligned} \tag{1-5}$$

热通量是指单位时间内通过单位面积的热量传递率，通常用于描述热能在材料或空间中的流动。热通量的大小和方向可以反映热量传递的速度和方向，是热传导、对流和辐射过程中非常重要的参数。热通量的表达式为：

$$q = - n_0 \frac{dQ}{dt}\frac{1}{S} \tag{1-6}$$

式(1-6)中，t—时间，单位 s，S—面积，单位 m^2。

温度梯度增加时，热通量也会增加，两者成正比，但方向相反，即：

$$q = - \lambda \Delta T \tag{1-7}$$

式中 λ 为导热系数，单位 W/(m*K)。由公式(1-4)、(1-6)、(1-7)三式可得到

$$\lambda = \frac{dQ}{dt} / \frac{\partial T}{\partial n}\frac{1}{S} \tag{1-8}$$

由此可知热通量 q 的大小为：

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \tag{1-9}$$

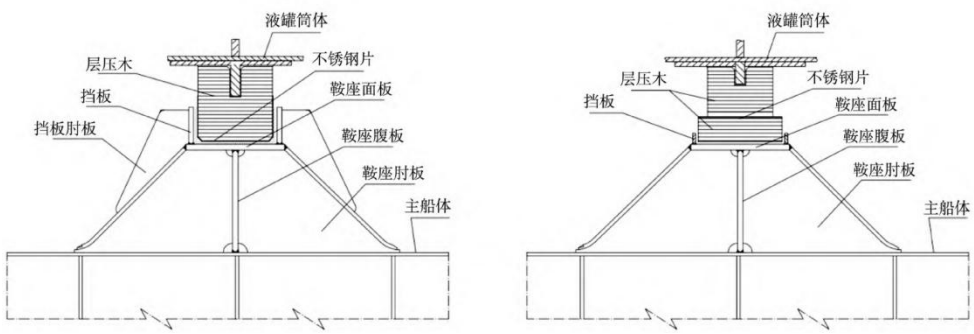
热通量在 x, y, z 轴上的分量分别为：

$$q_x = -\lambda\frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -\lambda\frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -\lambda\frac{\partial T}{\partial z} \tag{1-10}$$

当任意选取坐标轴时，在任意方向上的热通量分量，等于导热系数与该方向上温度递减率的乘积。

2 几何模型

燃料罐通过鞍座与船体结构相连。鞍座通常分为固定鞍座和滑动鞍座两种类型，其主要构件包括鞍座面板、腹板、挡板、鞍座肘板和挡板肘板等。固定鞍座通常用于承受燃料罐在船舶运行过程中产生的所有静态和动态载荷，而滑动鞍座则允许燃料罐在一定程度上的热胀冷缩，以减少结构应力。此外，为了有效地分散压力并减少由于温度变化引起的变形，在鞍座支架上方铺设了一定厚度的层压木。这个层压木不仅提供了良好的支撑作用，还通过其隔热性能有效地减少了罐体与船体之间的温度传导。固定鞍座和滑动鞍座在结构形式和功能上存在根本差异，固定鞍座用于在平面内稳固地固定液货罐，在固定鞍座处，层压木作为关键的支撑材料，其与液罐筒体、不锈钢片以及鞍座面板之间的空隙被环氧树脂胶泥填充。环氧树脂胶泥不仅起到粘接作用，还在一定程度上缓冲了载荷的传递，增强了整体结构的稳定性。对于滑动鞍座，层压木被设计为上下两层，其中上层层压木与液罐筒体之间的间隙、以及下层层压木与鞍座面板之间的空隙同样使用环氧树脂胶泥进行填充。上下层层压木通过不锈钢片接触连接，这种设计允许一定的滑动位移，以应对热胀冷缩等环境因素引起的结构变化。在实际操作中，层压木与不锈钢片之间可能会发生轻微的滑移，这种滑移在一定程度上有助于释放应力，防止结构损坏。鞍座的结构形式如图 2 所示。在本论文中，结合某工程项目的鞍座设计条件，为减少计算量，建立了滑动端鞍座的局部模型，滑动端鞍座局部模型如图 3 所示。



(a)固定鞍座　　(b)滑动鞍座

图 2 鞍座结构形式

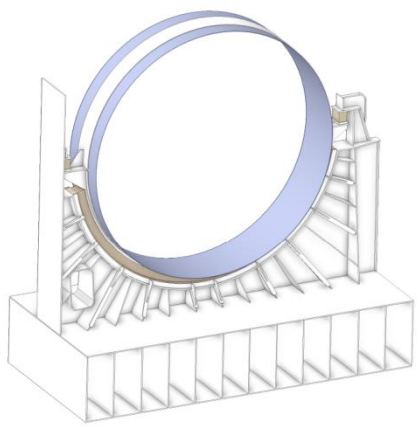


图 3 滑动端鞍座局部模型

3 有限元计算

3.1 有限元模型

本文采用了 ANSYS 有限元软件，针对船舶局部鞍座结构建立了三维有限元模型，以进行热分析。X 轴定义为沿船舶的纵向，从船艉到船艏为正；Y 轴定义为沿船舶的横向，向左舷方向为正；Z 轴定义为沿船舶的垂向，从基线向上方向为正。本文采用了 ANSYS 中的 SOLID70 热固体单元对模型进行了网格划分，SOLID70 单元是一种用于三维导热分析的八节点立方单元，能够有效模拟导热问题中的温度场。共生成了 54,886 个单元和 1,228,577 个节点。有限元模型和局部模型如图 4 所示。

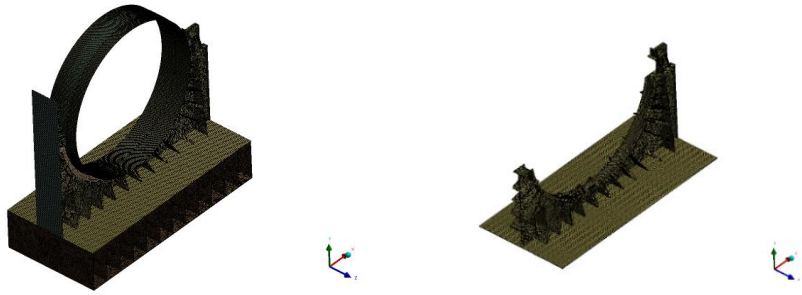


图 4　LNG 燃料罐有限元模型及局部放大图

3.2 材料热学性能

该鞍座位于船舶的甲板之上，其设计和材料选择充分考虑了承载要求和环境条件。鞍座的底板、侧板及舱底板均采用普通钢建造，普通钢在海洋环境下具有良好的耐久性能和强度。然而，为了满足极低温环境下的特殊要求，鞍座中位于甲板之上的部分采用 X7Ni9 钢建造。X7Ni9 钢是一种具有优异低温韧性和抗低温脆性的高性能合金钢，特别适合于需要在低温下保持良好机械性能的结构部件。环氧树脂胶泥通常被用作粘合和隔热材料。为了简化模型和计算过程，本文不考虑层压木与液罐筒体、不锈钢片与鞍座面板之间环氧树脂胶泥的传热效应。鞍座与燃料罐之间通过层压木进行隔离，这不仅为两者提供了结构支撑，还具有一定的隔热作用，确保燃料罐在低温环境下的稳定性。各材料的热学性能如表 1 所示。

表 1 材料热学性能

热属性	普钢	X7Ni9		压木			
	20℃	20℃	-196℃	+60℃	+30℃	-30℃	-196℃
密度（kg/m^3）	7850	7890		1350-1400			
比热容（J/kg·℃）	460	460		2400			
热导率（W/m/·℃）	50	16		0.25	0.24	0.21	0.15

3.3 边界条件

船舶的制冷和压力调节等系统高效运作，各结构的温度波动相对较小，这有助于减少热应力的产生，避免材料疲劳和潜在的结构损坏。设备主体、支撑系统以及附属结构的温度分布因此保持相对稳定。因此，C 型罐的温度场可以视为稳态温度场[9]。当系统内存在温度差时，热量就会发生传递，而在固体中，热导是热量传递的主要方式。从微观角度看，热能的传递是通过物体内部大量分子之间的热运动和相互碰撞实现的。在鞍座的热分析中，热量的传递方式主要包括热导、自然对流和热辐射[10]。本文的研究重点在于分析容器内部结构之间的导热效应，因此，简化了各结构之间的辐射换热及外界与容器结构之间的对流换热。这种简化处理有助于专注研究导热过程的影响，避

免复杂的辐射和对流换热对研究结果的干扰。现对稳态温度场分析的边界条件设置做如下规定：

边界条件设置均为壁面条件，如图 5 所示。内罐体的内表面保持均匀的-163℃低温，不考虑环境空气与鞍座之间的对流换热。内罐体的内表面设置为静态的-163℃，施加于 A 面；侧板设置为 5℃的环境温度，施加于 B 面；舱底板设置为 0℃的海水温度，施加于 C 面。

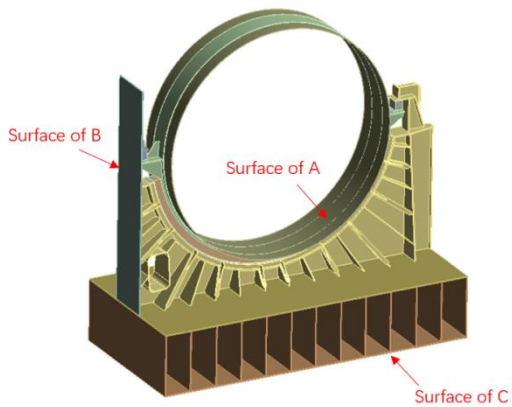


图 5　温度边界条件

4 计算结果及分析

将上述边界条件和温度载荷应用于模型后，计算获得模型的温度场分布云图，如图 6~图 10 所示。

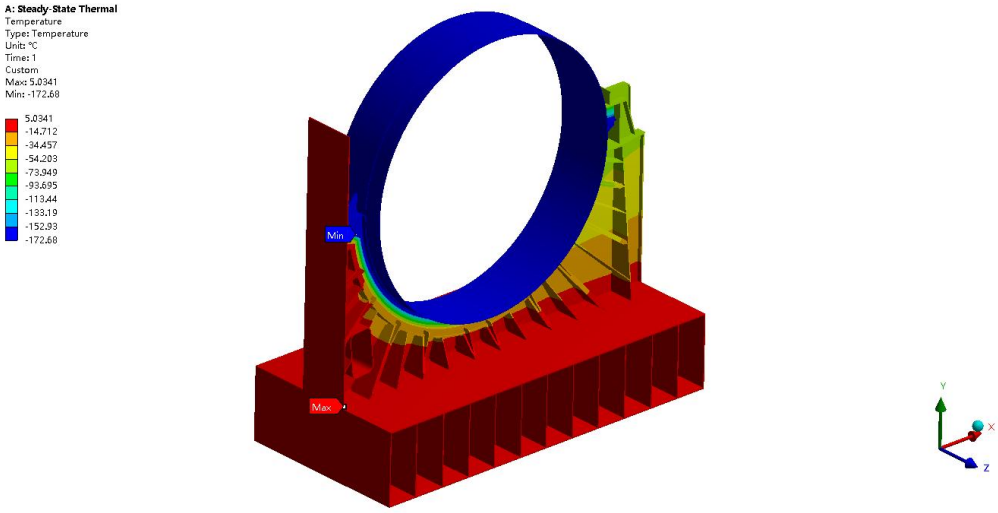


图 6 整体模型温度分布

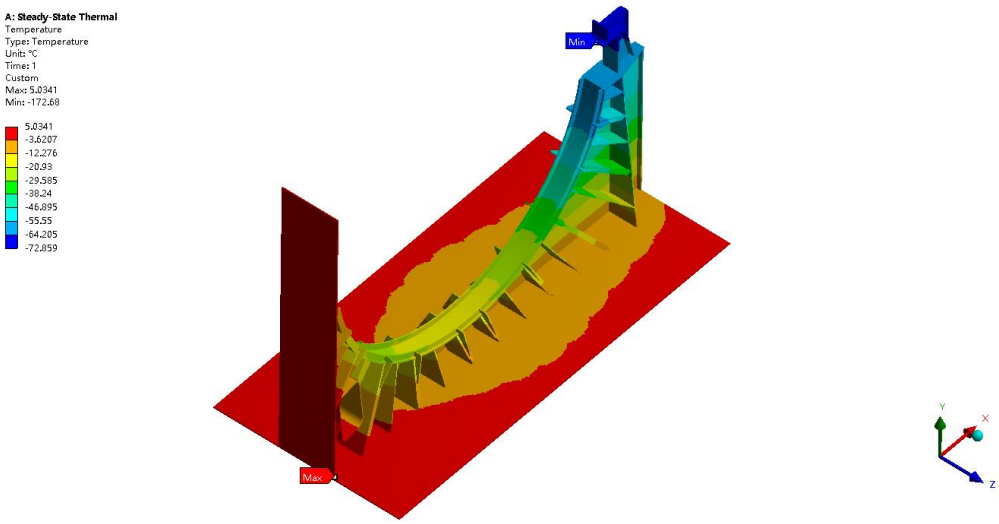


图 7 鞍座温度分布

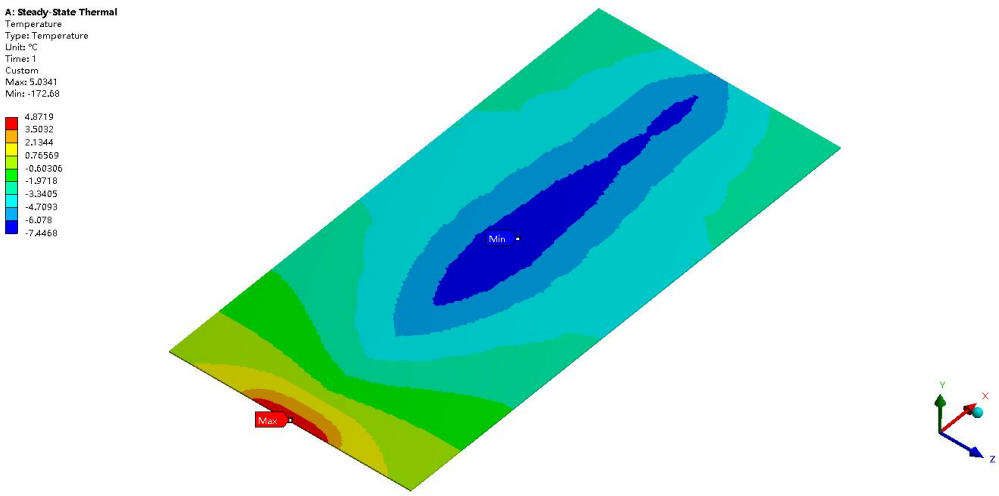


图 8 鞍座底板温度分布

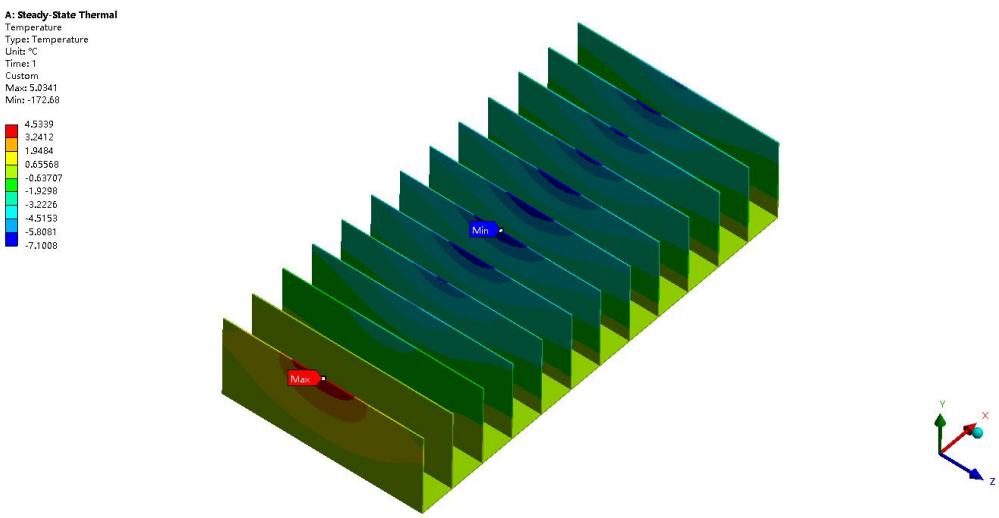


图 9 舱底温度分布

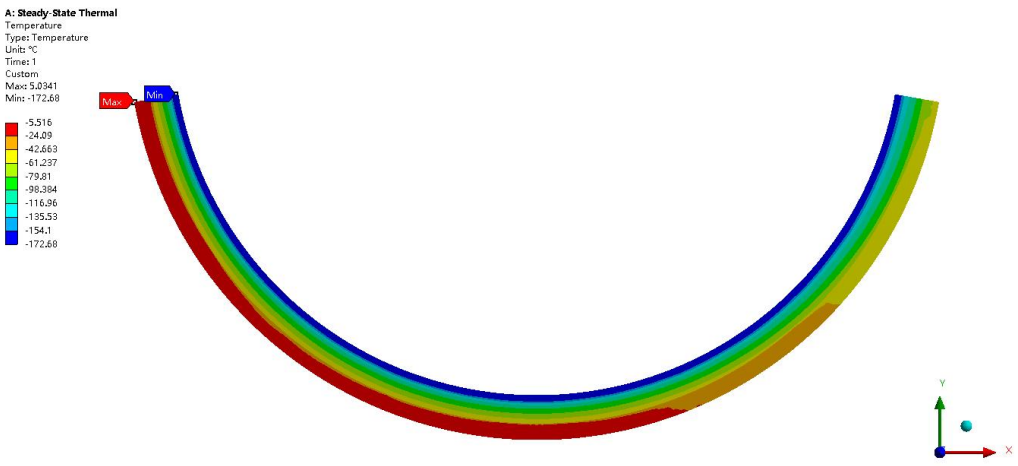


图 10 层压木温度分布

通过数值模拟和仿真计算得出，在主船体鞍座结构中，鞍座与上甲板船体接触的部分温度相对较低，最低温度可达到 -7.447° C。此过程中，层压木材的温度梯度变化明显，说明层压木起到了重要的隔热屏障作用。船体结构温度随着与支撑结构距离的增加而迅速上升，最终达到环境温度。鞍座腹板与筋板之间的温差较小，沿腹板竖直方向自上而下温度逐渐升高，鞍座底板的温度较低，整体温度分布相对均匀，但局部温度略高。这是由于该区域靠近侧板，受外部环境温度影响较大所致。鞍座附近结构的详细温度场计算结果如表 2 所示。

表 2 鞍座温度场计算结果

部件	Max./℃	Min./℃
鞍座	5.034	-72.859
鞍座底板	4.872	-7.447
舱底	4.534	-7.10
压木层	-5.516	-172.68

5 结语

本文通过 ANSYS Workbench 平台对某工程项目中的 C 型 LNG 燃料罐鞍座区域进行了温度场的计算与分析。鞍座作为燃料罐的主要支撑结构，其温度变化直接关系到整个燃料罐的安全性和可靠性，鞍座底板和舱底板作为支撑结构的一部分，其温度分布决定了整体结构的热应力状态，层压木作为一种隔热材料，其温度分布对于减缓热传导、保护下层结构具有重要意义。通过计算分析得出，在正常工况下，主要的传热路径为层压木至压木支架，其底部温度约为-19.419℃，这表明层压木在传热过程中起到了重要作用，显著影响了鞍座区域的温度分布。可进一步优化层压木及其他隔热材料的设计和选用，以提高其隔热性能，进一步减缓热传导，降低结构热应力，确保鞍座区域的温度稳定性。尽管 LNG 的低温会导致鞍座区域温度降低，但这一温降幅度较为有限，最低温度约为-7.4468℃。这意味着 LNG 燃料对船体整体温度的影响不大，鞍座甲板及其周围结构能够保持在相对安全的温度范围内。基于温度场的分布规律，建议优化鞍座和其支撑结构的设计，特别是在鞍座腹板和筋板的连接区域，确保这些区域的温度分布更加均匀，减少局部温度差异对结构安全性的影响，为船舶设计工程师提供了关键的参考数据，将有助于优化 C 型 LNG 燃料罐鞍座区域的设计和制造过程，确保其在实际工况下的安全性和可靠性。

参考文献

[1].Min Luo, Xin Wang, Xin Jin, Bin Yan,Three-dimensional sloshing in a scaled membrane LNG tank under combined roll and pitch excitations,Ocean Engineering,Volume 211,2020.

[2]. Nader, R., A., 2019. Environmental and cost-effectiveness comparison of dual fuel propulsion options for emissions reduction onboard LNG carriers. Brodogradnja.
[3]. Tuswan, T., Sari, D.P., Muttaqie, T., Prabowo, A.R., Soetardjo, M., Murwantono, T.T., Utina, R., & Yuniati, Y. (2023). Representative application of LNG-fuelled ships: a critical overview on potential ghg emission reductions and economic benefits. Brodogradnja.
[4]. Liu, J., Feng, G., Wang, J., Wu, T., Xu, C., & Yang, K. (2024). Research on temperature distribution in container ship with Type-B LNG fuel tank based on CFD and analytical method. Brodogradnja.
[5]. 刘敏,于博,张卓.21 万吨散货船 LNG 燃料罐鞍座安全性能评估[J].船舶职业教育,2023,11(03):50-52.DOI:10.16850/j.cnki.21-1590/g4.2023.03.016.
[6]. 董国忠.独立 C 型罐 LNG 运输船载荷及鞍座结构强度分析[D].江苏科技大学,2023.DOI:10.27171/d.cnki.ghdcc.2023.000531.
[7]. 邱吉廷,乔薛峰,吴兆年.双燃料油船 LNG C 型舱鞍座区域温度场分析[J].舰船科学技术,2022,44(17):12-16.
[8]. 张洪信.有限元基础理论与 ANSYS 18.0 应用.北京:机械工业出版社.2018.
[9]. 李敏.中小型 LNG 船 C 型独立液货舱温度场及应力场分析[D].华南理工大学,2013.
[10]. 房全国,岳明,杨铁桦,等.基于 Workbench 的鞍座温度场计算及选材建议[J].化工设计,2022,32(01):38-41+1-2.DOI:10.15910/j.cnki.1007-6247.2022.01.007.

作者简介：温小飞，男，1977 年 12 月出生，浙江丽水人，中共党员，副教授，工学博士，硕士研究生导师，轮机工程（船机修造方向）专业负责人，浙江海洋大学-海骊达船舶清洁能源技术与装备研究院副院长。联系电话：13735018281，通讯地址:浙江省舟山市定海区长峙岛海大南路 1 号船舶动力装置实验室。Email：wenxiaofei@zjou.edu.cn

基于“虚拟航海”的 VLCC 应急锚位合理性分析

李子强[1]，汪益兵[1]，谢广伟[2]，施传鸿[3]

（1.浙江国际海运职业技术学院，舟山 316021；2.舟山引航站，舟山 316000 ；
3.中化兴中石油转运（舟山）有限公司，舟山 316022）

摘　要：通过对应急锚位水域通航环境分析，运用“虚拟航海”技术对30万吨级VLCC应急锚位进行不同通航环境参数影响下的锚泊试验，分析在不同风、流、浪等环境因素影响下船舶锚泊状况及走锚情况，对应急锚位水域的选址、水深条件、底质条件和规模等合理性进行论证，并提出合理的锚泊建议和安全保障措施。

关键词：虚拟航海；VLCC；应急锚位；宁波舟山港

宁波舟山港地处我国大陆海岸线中部，位于“丝绸之路经济带”与“21 世纪海上丝绸之路”的交汇点，港阔水深、40 万吨级以上的巨轮可候潮进出，是国内最大的铁矿石中转基地和原油转运基地。岙山作业区作为我国重要的国家战略石油储备基地及原油、成品油中转储运基地，已建成 30 万吨级、25 万吨级、15 万吨级、10 万吨级、5 万吨级、1 万吨级等油品装卸泊位多个。随着中国（浙江）自贸试验区的建设，进港靠泊作业的 VLCC 越来越多。现阶段由于码头附近水域缺少 VLCC 专用的应急锚位，满载 VLCC 需要在虾峙门口外油船锚地待泊后，根据码头泊位作业情况采取由虾峙门航

道驶入码头前沿水域后直接靠泊的方式进港作业。但由于受潮位时间段、虾峙门航道管制、恶劣天气（大风、大雾）等因素的影响，经常导致来港作业的 30 万吨级油轮不能及时靠泊作业。一方面影响公司码头作业效率，给客户造成一定的经济损失；另一方面大型油轮如遇险情，附近没有应急锚泊位置供船舶使用，给港口安全带来了一定的隐患。因此，迫切需要在该水域建设 VLCC 的应急锚位。为保障应急锚位能够满足超大型油轮安全锚泊需要，对拟建应急锚位进行合理性论证是极其必要的。

“虚拟航海”是随着虚拟现实技术与计算机技术发展而快速发展起来的，通过虚拟仿真技术构建码头、航道三维视景、水域电子海图、船舶操纵模型等，并模拟水文、气象、海浪等条件，利用船舶操纵模拟器仿真驾引船舶航行、靠泊操纵等。将“虚拟航海”技术用于工程项目论证已较为普遍，但应用于锚泊相关研究则相对较少[1]。因此，依托实际工程项目，采用“虚拟航海”仿真试验定量分析方法对应急锚位合理性进行科学论证，并提出相应对策具有一定的实际应用价值。

1.应急锚位工程概况

岙山应急锚位选址建设位置位于舟山本岛南面峙头洋及附近海域，毗邻马峙锚地，锚位点位置（29° 55′ 04″ N,122° 11′ 26″ E），见图 1 所示。应急锚位东侧为沈家门进港航道（万邦永跃船厂航道宽度优化后），南侧为普陀山至白峰客运航线，西南侧为宁波舟山港核心港区深水航路船舶定线制，西北侧为长峙至六横大岙客运航线，见图 2 所示。



图1 岙山应急锚位地理位置

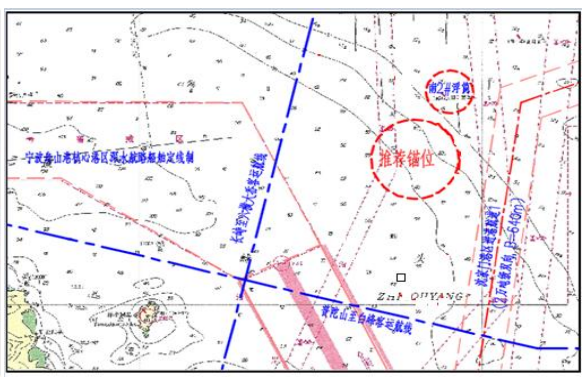


图2 岙山应急锚位布置方案

2.通航环境分析

2.1 风况

本地区属季风性气候，夏季盛行偏南风，冬季盛行偏北风。常风向为偏 NW 向；NW～NNW 向频率占 36.3%，强风向为 WNW 向，SSW 向出现频率最低，而且平均风速和最大风速亦最小。就年内月季分布而言，本区 12 月的平均风速最大，5、6 月份的平均风速最小。

表 1 岙山站风速、风向统计表

风向 / 项目	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
最大风速(m/s)	7.0	6.3	6.0	12.0	10.7	10.0	12.3	13.0
平均风速(m/s)	2.2	2.3	2.5	2.9	3.3	3.8	5.2	5.3
频率(%)	6.6	3.2	5.0	7.2	9.2	4.0	10.8	4.3
风向 / 项目	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
最大风速(m/s)	8.7	4.7	10.7	7.3	12.7	17.3	15.0	11.7
平均风速(m/s)	3.4	1.8	2.4	2.7	4.0	5.4	4.3	3.5
频率(%)	1.1	0.4	0.9	1.1	4.7	11.0	13.7	11.6

2.2 潮流

1.测点布置

共布置 2 个测点的定点水文测站和一处临时潮位站，各测站布设位置详见图 3 所示。



测站	实际观测站位（WGS-84 坐标）		观测项目	水深
	B	L		
W1	29°54'52.594"N	122°11'22.915"E	潮流、含沙量、悬移质、底质、温度、盐度	约 56.8m
W2	29°55'34.751"N	122°10'50.316"E		约 63.4m
临时潮位站	29°56'53.220"N	122°09'32.160"E	潮位	-

图3 各测站布设位置示意图

2.测点最大流速

表 2 大、中、小潮期间各测站最大流速、流向统计表（cm/s；°）

潮汛	站号	涨落	表层		0.2H		0.4H		0.6H		0.8H		底层		垂线平均	
			流速	流向	流速	流向	流速	流向	流速	流向	流速	流向	流速	流向	流速	流
大潮	W1	涨潮	86	306	106	307	112	314	116	305	114	296	99	291	99	319
		落潮	113	125	137	129	121	132	118	133	91	147	70	141	108	132
	W2	涨潮	90	302	99	320	115	317	119	300	117	302	95	307	104	298
		落潮	114	104	126	109	111	109	99	119	89	122	68	129	97	114
中潮	W1	涨潮	55	301	70	326	89	306	90	299	92	294	68	294	72	303
		落潮	82	126	100	132	98	135	80	140	72	147	51	151	81	136
	W2	涨潮	54	295	84	316	93	301	96	315	91	303	61	272	78	311
		落潮	95	103	123	111	107	113	98	121	88	121	57	127	96	115
小潮	W1	涨潮	63	314	70	313	73	323	65	333	62	319	53	320	64	320
		落潮	71	103	77	136	80	137	73	142	67	138	58	140	70	135
	W2	涨潮	54	307	70	317	71	280	89	319	71	311	52	298	66	313
		落潮	91	105	91	125	83	114	77	114	69	133	58	126	75	123

从实测最大流速来看，测区两个测站的涨、落潮最大流速分布与涨、落潮平均流速分布基本一致。大潮汛时，W1、W2 测站垂线平均的最大涨潮流速分别为 99cm/s、104cm/s，最大落潮流速分别为 108cm/s、97cm/s；中潮汛时，W1、W2 测站垂线平均的最大涨潮流速分别为 72cm/s、78cm/s，最大落潮流速分别为 81cm/s、96cm/s；小潮汛时，W1、W2 测站垂线平均的最大涨潮流速分别为 64cm/s、66cm/s，最大落潮流速分别为 70cm/s、75cm/s。

从实测最大流速对应流向来看，测区两个测站的涨、落潮流流向在大、中、小潮潮汛期间基本一致。W1 测站大、中、小潮垂线平均的最大涨潮流流速对应流向分别为 319°、303°、320°，最大落潮流流速对应流向分别为 132°、136°、135°；W2 测站大、中、小潮垂线平均的最大涨潮流流速对应流向分别为 298°、311°、313°，最大落潮流流速对应流向分别为 114°、115°、123°[2]。

2.3 船舶交通流

为了解岙山应急锚位工程附近的 AIS 船舶流量，以 7 天为周期分析统计交通流情况。应急锚位及附近水域一周的 AIS 航迹如图 4 所示。通过分析应急锚位及附近水域的交通流船舶航迹可知，应急锚位及附近水域的交通流主要有经虾峙门航道、条帚门水道、佛渡水道、螺头水道以及进出沈家门、岙山的船舶轨迹，其中，进出螺头水道、沈家门航迹的船舶交通密度较大，应急锚位及附近水域的交通密度相对较小。

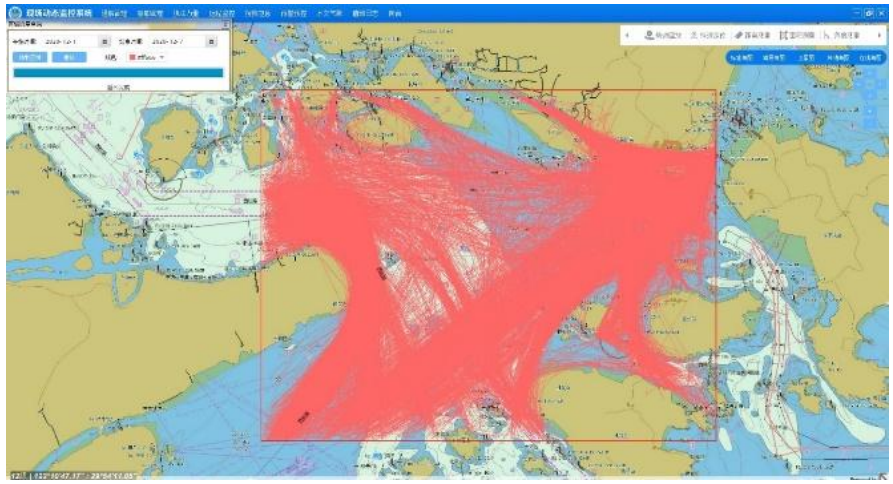


图4 应急锚位及附近水域的交通流船舶航迹

3. 基于“虚拟航海”的应急锚位合理性分析

根据应急锚位设计方案及气象水文资料，通过建立锚位水域的电子海图、通航环境仿真模型、试验船舶模型，运用大型船舶操纵模拟器进行船舶抛锚操纵仿真模拟试验。试验工况选取设计船型和不利水流、风力条件，根据模拟试验取得的相关数据进行分析，以论证该应急锚位设置的合理性。

3.1 电子海图开发

根据相关海图资料，构建了应急锚位附近海域电子海图，如图5所示。

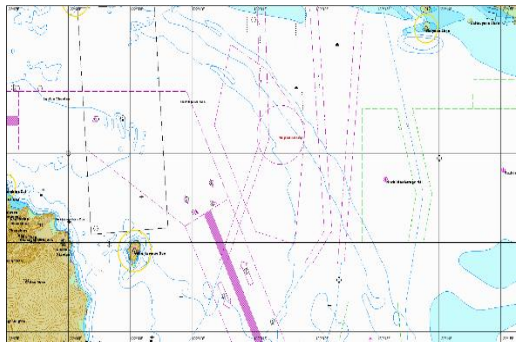


图5 应急锚地附近电子海图

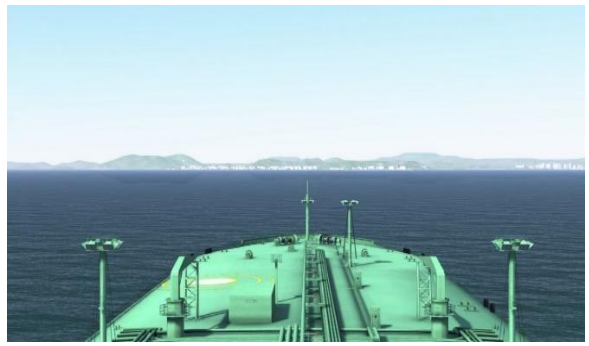


图6 锚位水域附近三维视景图

3.2 水域三维视景图

根据工程水域周边实际环境，构建了应急锚位附近海域三维视景图，如图6所示。

3.3 船舶锚泊试验工况设计

根据锚位水域通航自然环境要素分析，对30万吨级油轮锚泊模拟试验进行了工况设计。选取NW、SE两个风向及对应的8级风力强度作为试验风要素；波浪方向同风向一致，对应波高分别为0.2m、0.2m和0.7m；选取大潮流工况，因推荐锚位距W1测流点较近，因此潮流流速及流向根据W1测流点的实测数据进行设置，其中大潮流流向及流速取值为：涨潮流流速约为1.06m/s，流向307°，落潮流流速约为1.37m/s，流向129°。

交通流设置，分别设置三条交通流：

（1）岙山至六横交通流；

（2）普陀山至白峰交通流；

（3）沈家门进港交通流。

通过对以上不同环境要素进行组合，不同工况下试验方案见表 3。

表 3 大潮流条件下船舶进出锚位工况设置

编	风	潮流	试验	备注

号	风向	风级（蒲氏）	涨/落	流速（m/s）	流向（°）	船型	
1	NW	8	涨	1.06	307	满载 30 万吨级 VLCC	进港航道至锚位
2		8	涨	1.06	307		岙山泊位至锚位
3		8	落	1.37	129		进港航道至锚位
4		8	落	1.37	129		岙山泊位至锚位
5	NW	8	涨	1.06	307		锚位至岙山泊位
6		8	落	1.37	129		锚位至岙山泊位
7	SE	8	涨	1.06	307		进港航道至锚位
8		8	涨	1.06	307		岙山泊位至锚位
9		8	落	1.37	129		进港航道至锚位
10		8	落	1.37	129		岙山泊位至锚位
11	SE	8	涨	1.06	307		锚位至岙山泊位
12		8	落	1.37	129		锚位至岙山泊位

3.4 船舶锚泊试验及分析

为分析船舶抛锚过程中锚链受力以及船舶运动情况，统计每组试验的锚链受力情况、船速变化、船首向变化等试验数据随时间变化情况并进行分析；截取试验船型进入锚地过程的航迹线、抛锚过程船舶位置图并进行分析。

1.进港航道至锚位

以大潮涨潮流、西北风8级工况下试验工况为例，锚泊试验起始位置分为虾峙门进港航道，自起始点航行至锚地中心位置航程约3nmile，初始航速5.6kn，初始航向332°。航行过程船舶基本处于停车淌航状态，部分试验因风流影响采取短暂进车以保证舵效。试验均采取抛单锚泊。

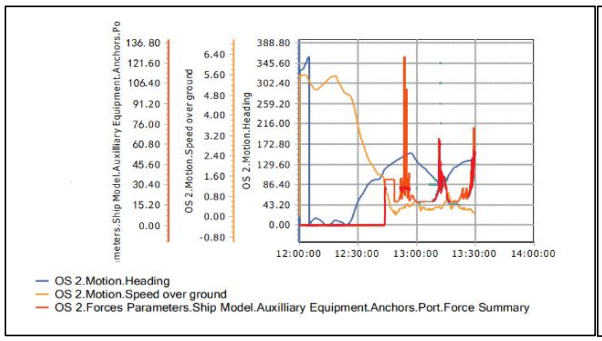


图 7 船舶参数变化及锚链受力变化

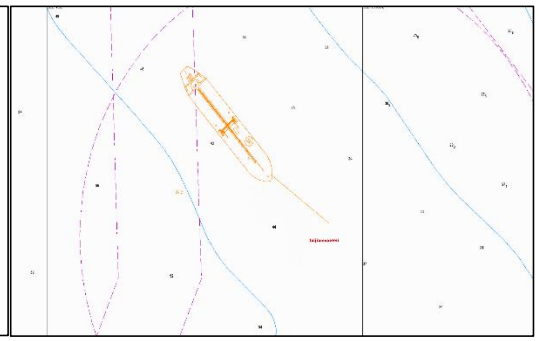


图 8 船舶抛锚状态图

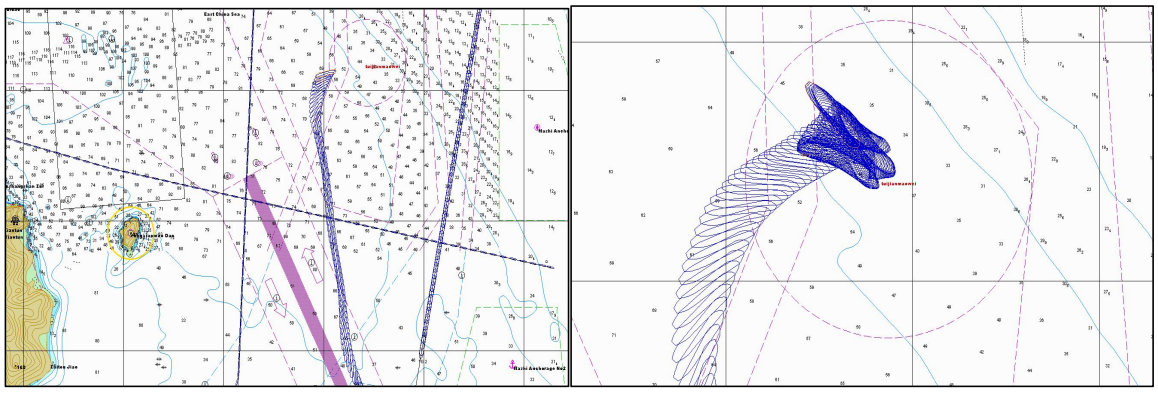


图 9 大潮涨潮流、西北风 8 级工况下船舶航迹图

试验船舶到达锚位边界时航速2.1kn，船首向135；航行至锚位中心位置时速度降至0，船首向133。根据此时船舶运动状态，采取单锚泊抛锚方法抛左锚。送链过程中船舶处于微移（接近停止）状态，必要时使用车、舵控制船舶姿态及速度，直至船舶停稳，左锚受力稳定。试验结束时，船首向132；左锚出链7.0节，受力128吨。

2.岙山泊位至锚位

以大潮落潮流、西北风8级试验工况为例，锚泊试验起始位置分为岙山泊位，自起始点航行至锚地中心位置，初始航速5.6kn，初始航向116°。航行过程船舶基本处于停车淌航状态，部分试验因风流影响采取短暂进车以保证舵效。试验均采取抛单锚泊。

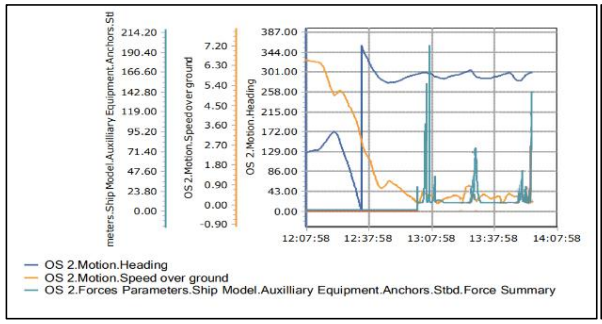


图 10 船舶参数变化及锚链受力变化

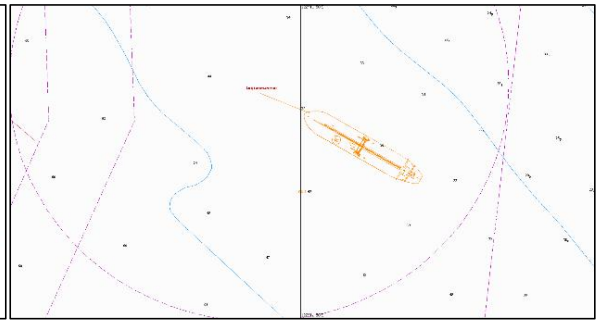


图 11 船舶抛锚状态图

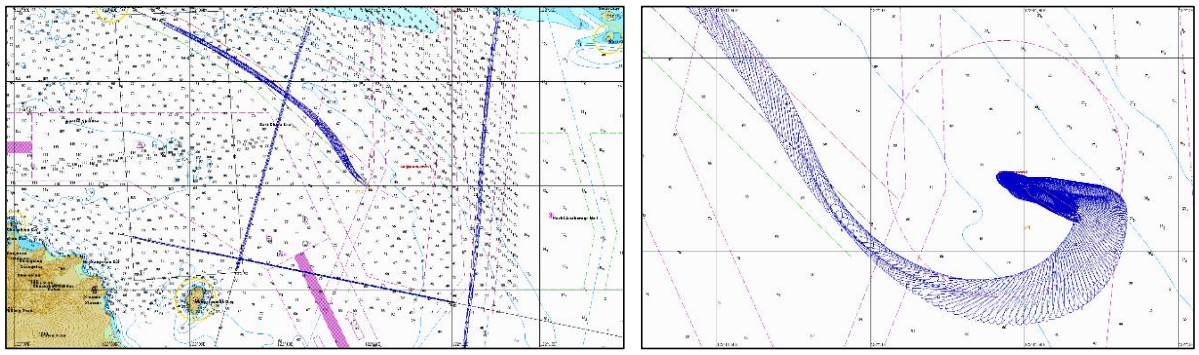


图 12 大潮落潮流、西北风 8 级工况下船舶航迹图

试验船舶到达锚位边界时航速2.3kn，船首向307；航行至锚位中心位置时速度降至0，船首向308。根据此时船舶运动状态，采取单锚泊抛锚方法抛右锚。送链过程中船舶处于微移（接近停止）状态，必要时使用车、舵控制船舶姿态及速度，直至船舶停稳，右锚受力稳定。试验结束时，船首向309；右锚出链7.0节，受力131吨。

3.5 安全锚泊建议与保障措施

通过对设计船型在不利水流、风力条件组合下若干试验工况，进行大量的模拟试验并对试验数据分析，对应急锚位的设置合理性进行科学论证，并提出安全锚泊建议与保障措施如下：

1.经过对 30 万吨级 VLCC 在给定工况下试验进行综合分析与论证，应急锚位选址合理；设计尺度、工程水域的地质条件等要素符合相关规范的要求，在试验给定工况条件下，各设计要素能满足试验船型的进出锚地及应急锚泊的安全操作要求。

2.试验表明设计船型在 8 级风、大潮涨落潮时均能顺利进入锚位和完成抛锚。船舶由虾峙门进港航道进入推荐锚位时需要大角度转向，在进入锚位期间对于船速和航向的把握十分重要，停车淌航期间船速较小时舵效差，必要时可短暂进车以保持舵效，保证船舶顺利到达预定抛锚位置。

3.通过船舶进出应急锚位模拟试验，发现试验船舶在进出锚位水域时，可能会与顺进出港航路航行的船舶存在交叉相遇局面，对船舶造成一定不便。且拟建应急锚位投入使用后，增加该水域的通航复杂度，容易造成碰撞事故。

建议进出应急锚位的船舶在航道及其附近水域航行时应加强瞭望，谨慎驾驶，与航道内的船舶

保持密切联系，对存在的各种局面作出准确的判断。根据《国际海上避碰规则》的有关规定进行避让，并听从调度的指挥。

4.由于规划应急锚地水域没有较好的遮蔽物阻挡，在大风浪及台风等恶劣天气条件下，锚泊船舶受风浪影响较大可能发生走锚事故，进而酿成碰撞或搁浅等严重事故。

建议船舶进出锚地时应当充分掌握气象水文资料及天气状况，遇有大雾和大风等恶劣天气时，应随时观察本船的锚位变化，防止船舶走锚。如发现走锚，应及早采取有效措施，防止走锚酿成事故。

5.试验船舶在抛锚过程中要根据当时具体情况决定用左右锚。本试验各工况下风流交角均较大，而 30 万吨级满载油轮干舷低，受风面积相对较小，因此采取顶流抛锚方式：

进入锚地前调整船位，使船舶处于顶流或接近顶流状态，接近锚地中心位置时余速降为 0，待船舶有退速时开始锚，倒车后退松链约 2 节后进车并向未抛锚舷操舵，期间控制已抛锚链长为预定长度的 0.5-1 倍，船舶进速控制在 0.3kn 左右。随后船舶在风流作用下后退，船体出现偏转时及时用舵并可短暂进车以确保船舶姿态，继续松链至预定长度，并使船舶停妥。

6.船舶在抛锚后倒车后退时，因出链长度短可能出现走锚现象，此时应及时进车或适当松链，以确保抛锚点位置不发生较大偏离，出链长度可根据当时风流及船舶载况等因素综合确定，保证足够的抓地力。

7.通过对应急锚地水域抛锚作业试验及分析，船舶在进出锚地水域时，会与宁波港和沈家门客船习惯航路航行的船舶存在交叉相遇局面，因此进出锚地水域的船舶应注意与过往船舶间的避让，同时在锚地进行抛起锚作业的船舶及航行的船舶应注意与周围船舶的避让；尤其在能见度不良和大风浪的恶劣天气条件下，在锚地进行抛起锚作业的船舶及航行船舶的驾驶员更应谨慎操作船舶，以防发生事故。船舶在进行抛起锚作业过程中，应根据当时的环境情况选择适当的抛起锚方法，并注意风、流对抛起锚操作的影响。

4.结束语

规划建设 30 万吨级 VLCC 应急锚位，符合省市功能区划的相关要求，是推动以油品为核心的国际大宗商品贸易的需要，同时也是岙山作业区各企业业务发展的需要[3]。通过对应急锚位水域的合理性（包括选址、水深条件、底质条件和规模等）进行论证分析，发现应急临时锚位设置满足相关规范、标准的安全要求，满足代表船型船舶的锚泊需求，与附近通航环境适应性较好。项目运营后能进一步推动自由贸易试验区、舟山市乃至浙江省的经济发展。

参考文献：

[1]柳良伟,周丽丽等.虚拟仿真试验在锚地调整方案论证中的应用[J].浙江交通职业技术学院学报，2024，(2) 7-11.

[2]黄河水文勘察测绘局.岙山临时应急锚地水文勘察项目水文泥沙分析报告[R].2020.

[3]李子强,施传鸿等. 岙山作业区 VLCC 应急临时锚位选址考虑因素和建议[J].交通节能与环保，2022，(1) 24-26,41.

作者简介：

李子强，浙江国际海运职业技术学院，副教授，主要从事交通信息工程、水上交通环境与安全保障研究；通信地址：浙江省舟山市临城海天大道 268 号，李子强（电话：18969257066），邮箱：408187256@qq.com

汪益兵，浙江国际海运职业技术学院，教授，主要从事航海技术、水上交通环境与安全保障研究；

谢广伟，舟山引航站，高级引航员，主要从事船舶安全驾引技术研究；

施传鸿，中化兴中石油转运（舟山）有限公司，经理。

《航海气象》知识点理解方法探析

艾万政，毛超进，张洪刚，王家宏

（浙江海洋大学 船舶与海运学院，浙江 舟山 316022）

摘 要：《航海气象》课程对于海上船舶安全至关重要。然而，许多航海船员由于缺乏气象学基础知识，对其应用理解较为薄弱，通常依靠死记硬背通过海事局评估考试。因此，探索灵活且高效的理解方法对于船员扎实掌握这门课程的理论至关重要。此文运用实例验证的研究方法，提出了针对这门理论的案例学习法、类比学习法、总结学习法、图形学习法等。研究结果表明，科学应用这些方法不仅有助于更好地记忆和应用气象知识点，还对船员考证和实际海上操作具有显著的启发作用。本文的创新点在于将传统教学方法与实际案例相结合，提高了知识点的易懂性和记忆效果，显著提升了船员考证通过率和海上实际应用能力。

关键词：航海气象；学习方法；类比法；图形法

1 引言

《航海气象》课程是航海类专业的一门专业核心考证课程之一，直接关系到海上安全[1]。在原三副《航海学》考试中，该知识点占比超过 30%；在大副和船长《航海学》考试中，占比更是达到50%以上，甚至高达 70%[2-4]。该知识点掌握的好坏，直接影响到海上船舶的安全运行[5-8]。例如，无法正确解读气象图或不了解台风动态，可能导致船舶遭遇台风袭击，造成严重后果。我国地处西北太平洋，常年受到季风、台风、大雾等恶劣天气的影响，因此，作为一名合格的海员，掌握航海气象知识是必不可少的[9]。由于大部分海员文化层次较低，气象知识基础薄弱，他们在学习《航海气象》课程时普遍感到困难，难以深刻理解和运用气象图分析[10]。目前国内大部分教师在《航海气象》教学中仍然采用照本宣科的传统授课模式，导致海员听不懂，学不会，考不过[11,12]。鉴于此，此文基于作者多年航海经验和研究生学术背景，总结了《航海气象》知识点的有效理解方法。

2 课程学习难点分析

《航海气象》课程中，难以理解且易遗忘的知识点主要包括以下几个方面：

2.1 高压和低压

高压和低压的概念贯穿整个《航海气象》课程。高压也称为反气旋，低压称为气旋。从压力角度来看是高压和低压，从流场角度来看是反气旋和气旋，二者本质相同但称呼不同。课程内容中，冷高压、副热带高压、锋面气旋和热带气旋均是学习和考证的重点，锋面气旋还涉及到气团和锋等基础知识。

2.2 天气与下垫面的关系

很多船员误认为太阳出来是先把空气加热，然后空气再加热地表，甚至有些老师也有这种误解。实际上，天气与下垫面密切相关，太阳通过辐射等方式先加热下垫面，下垫面再通过热辐射等方式加热空气，导致气温升高。因此，下垫面是决定天气的关键性因素。与下垫面相关的知识点还有：冷气团、暖气团、季风等。

2.3 锋面气旋

锋面气旋是一种常见的天气系统，通常出现在冷、暖空气团的交界处。在其生成、发展和消亡过程过程中，通常会伴随一系列天气现象，如降水、风、气压变化、云层变化和能见度变化。由于锋面前后天气特性不同，船员经常感到混乱，在海上难以快速判断船舶通过锋面气旋时的天气变化。根据现有数据判断船舶航行过程中锋面气旋对天气的影响更是考证的重难点。

2.4 热带气旋

热带气旋是指在热带海洋上空形成的强大气旋系统，其形成通常伴随着强烈的风暴和大量的降水。在航海实际中，常通过观察云和涌、船上的真风向和风速来判断气旋中心的位置，从而判断危

险半圆和可航半圆，选择合适的避台路径。理解和掌握这些知识特性对于保护生命和财产安全具有重要意义。

3 课程学习方法设计

3.1 案例学习法

学习最好贴近生活、贴近实际。结合生活案例，可以将复杂的知识点变得通俗易懂且印象深刻。例如，将“下垫面是决定天气的关键因素”这一复杂内容与“火炉旁边吃西瓜”这一沙漠地区生活案例相联系。我国西北地区的沙漠地区，尽管纬度高，但它的下垫面是沙漠，白天太阳一出来，沙子受热迅速升温，气温可高达 40 度以上。夜晚太阳下山，沙子迅速降温，气温可下降到零下十几度。在西北地区生长的西瓜，由于生产环境下垫面是沙地，昼夜温差大，西瓜甜，同时也会出现“火炉旁边吃西瓜”的现象。通过这种例子，可以通俗易懂地理解“下垫面是决定天气的关键因素”这一问题。还可以进行生活类比，例如井水冬天温暖、夏天凉爽，因为井水的下垫面是水，水具有较好的比热容（吸热能力），且水具有流动性，水的温度比陆地均匀，不会骤冷骤热。再如，为什么湖北黄石和舟山的气温有差异，尽管二者均处在长江沿线，纬度相近，但冬天黄石比舟山冷 1 到 2 度，夏天黄石比舟山热 1 到 2 度，这是因为舟山的气温受到海洋的调节，而黄石则没有这种调节。通过以上类比，更容易理解下垫面对天气的影响。

3.2 类比学习法

类比学习法形象生动，往往能达到意想不到的效果。例如，逆温天气现象船员较难理解，可以将其类比为罩子（罩住大地），结果是阻挡上下层气流的交换，阻挡气流交换，导致稳定性天气。其典型特征是雾、层云、毛毛雨。通过将逆温类比成罩子，比专业名词更让人印象深刻，易于记住。再如，可以将气温高时天气不稳定，而气温低时天气相对稳定类比为食物，在夏天气温高时食物容易变坏，而气温低时食物不易变坏。通过这种类比，更容易记住气层稳定与气温的关系。这也解释了为什么夏天容易出现剧烈极端天气，而冬天相对较少。

3.3 总结学习法

总结得出的结论，可以朗朗上口、便于记忆。例如，教材中关于气温的年较差和日较差有很多描述，通过翻阅教材学习，往往容易遗忘，但可以将其总结为“一般较冷的地方、较冷的季节气温的年较差大，一般较热的地方、较热的季节气温的日较差大”。为了说明这一问题，还可以用 3.1 章节的案例学习法举例。如北京和广州比较，北京夏天最热时不比广州气温低，但冬天北京最低气温可达零下十几度，而广州最冷也有零上十几度。通过这个例证，就容易记住这个总结。通过刷一些海事局公开卷如“渤海、黄海、南海哪里气温年较差大”、“春夏秋冬哪个季节气温年较差大” 等题目，可以加深印象，记忆更深刻。

又如，船舶通过锋面气旋天气变化是考证的重点，可以总结为“无论南北半球，只要观测到风顺时针转，表明船舶通过锋面气旋的底部”。教材中讲的是“只要观测到风顺时针转，在北半球船通过锋面气旋低纬一侧，南半球通过锋面气旋高纬一侧”。显然，教材中的总结不便于记忆。为了便于理解，可以绘制图 1 进行说明。同样，图解法也可以针对热带气旋得出结论：无论南北半球，只要观测到风顺时针转，表明船舶处在热带气旋的右半圆。教材中并没有这样总结。

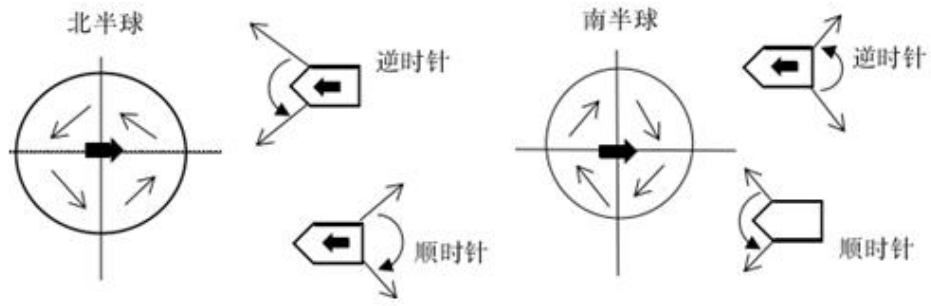


图 1　船舶通过锋面气旋天气

3.4 推理学习法

推理出的结论，既易于理解，又便于记忆。推理学习法常能达到意想不到的效果。例如，学习冷暖气团特性时，可以按照以下步骤推导，而非死记硬背。例如①，冷气团下垫面相对温暖（下垫面是决定天气的关键性因子），所以变性快（暖环境下易变性），其结果是气层不稳，导致阵性大风和降雨；由于下垫面温暖，气温日较差大（上文讲过，在热的环境下，气温日较差大）。同理②暖气团特性也可按此说明。

①冷气团→下垫面暖→变性快→气层不稳定→伴积状云→多阵性大风、阵性降水→气温日变化（日较差）大。

②暖气团→下垫面冷→变性慢→气层稳定→伴层状云 St→多雾、毛毛雨→气温日较差小。

又如，教材中锋面与雾章节提到“锋面附近的暖气团的水滴落入冷气团通过蒸发而形成的雾”，很多船员困惑为何锋面附近暖气团的水滴不在暖气团蒸发而要落入冷气团蒸发？（很多船员认为暖气团的温度高更好蒸发）。如果学会稍微推理：所谓的冷暖气团是相对于下垫面来衡量的，冷气团的下垫面相对温暖，更易蒸发水滴。这一推理令船员恍然大悟，印象深刻。

再如，学习海陆风和山谷风时，可推理：白天太阳出，海洋的下垫面是海水，受热慢，陆地受热快，大陆空气热膨胀快，高压在海而低压在陆，一般风是从高压的海洋吹响低压的陆地，称之为海风。陆风、山风、谷风亦可如此解释（如图 2 所示）。

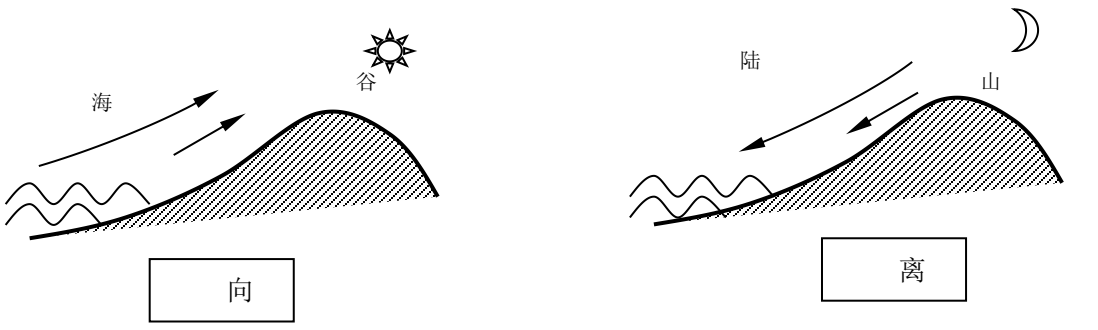


图 2 山谷风和海陆风

还有一个知识点：高压和低压最里面的那条闭合等压线的压力是多少。对于这个问题，通过死记硬背学习的船员是完全不会的，甚至一些大副还不一定完全掌握。这个问题通过简单的数学推理即可解决。关键在于“找余数”。国外气象图等压线间隔为 4 百帕，国内为 2.5 百帕。只要将中心气压压力除以 4 或 2.5，找出余数，加减即可得出最里面一条闭合等压线的压力。如国外天气图上，高压中心的压力是 1025 百帕，1025/4 余 1，则最里面闭合等压线的压力为 1025-1=1024（若是低压，加余数得最里面闭合等压线压力。高压越到外边压力越小，低压越到外边压力越大）。

3.5 图形学习法

图形学习法包括推论式图形、总结式图形和理解式图形。

（1）推论式图形

推论式图形适用于理解热带气旋。课本热带气旋章节中提到“背风而立，北半球热带气旋在左前 45～90° 方位。 南半球热带气旋在右前 45～90° 方位；当风力 6 级在 45° 左右，8 级风时热带气旋在 67.5° 左右，十级风以上热带气旋在 90° 左右”，但很多船员并不会实际运用。

例如，海事局公开题“北太平洋上东行船受到 8 级 NNW 风影响，根据风压关系，判断其气旋方位”。推论式图解法如下：①第一步：画风线（如图 3 中的 A 图）；②第二步：8 级风即将风线逆转 67.5° 得压力线（如图 3 中的 B 图），因此本题答案：气旋高压中心在船尾。通过该例题，可以将热带气旋解题方法总结为：北半球，通过气旋方位求解风向，将压力线按风力顺转一定度数得风线（风力 6 级在 45° 左右，8 级风时热带气旋在 67.5° 左右，十级风以上热带气旋在 90° 左右）；通过风向求解气旋方位，在考虑摩擦时，将风线逆转一定度数得压力线。

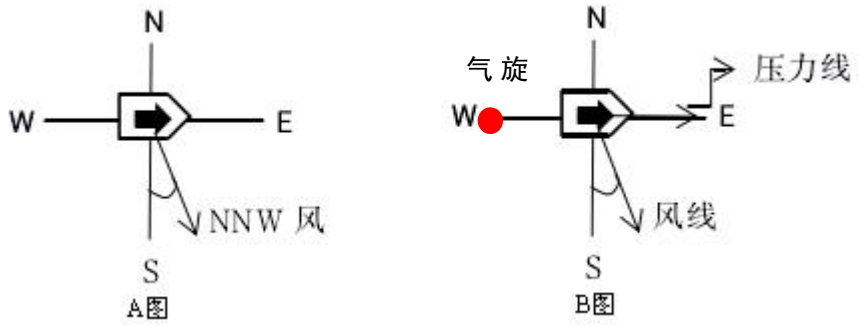


图 3　热带气旋图解（根据风向判断气旋方位）

此外，在船实际航行时，通过观察其地面传真图可判断某地风向。例如，船舶在日本海域航行时，若要判断某地方的风向，可通过地面分析图画出压力线（垂直于等压线，由高压指向低压），再将压力线顺时针旋转 67.5 度得出该地的风向。

（2）总结式图形

总结式图形有助于船员记忆知识点。如图 4 是典型的北半球冷暖锋附近的风向示意图。针对此图，本人曾发表过一篇教改论文[13]，提出过判断锋面附近风向的八字方针，即“锋后垂直（锋后的风向垂直于锋面），锋前远离（平行于锋面并远离赤道）”。利用这一结论，可以解决很多问题。例如例题“在渤海某轮船自东向西穿越暖锋，通常风向为？（A. S～SW 转 N～NW、B. S～SW 转 E～SE、C. E～SE 转 S～SW、D. N～NW 转 E～SE）”通过图 5 可以看出，船舶在暖锋前是 SE 风，暖锋后是 SW 风，因此本题答案应选 C。

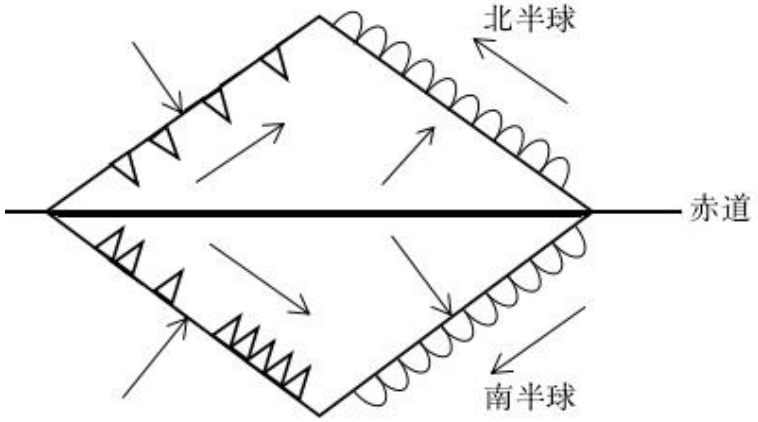


图 4　锋面附近的风

又如，在总结锋面气旋天气时，可通过图 5 提出“三防”，即“暖锋前防雨及锋面雾、暖区防平流雾、冷锋后防风”，有助于记忆锋面气旋天气特征。

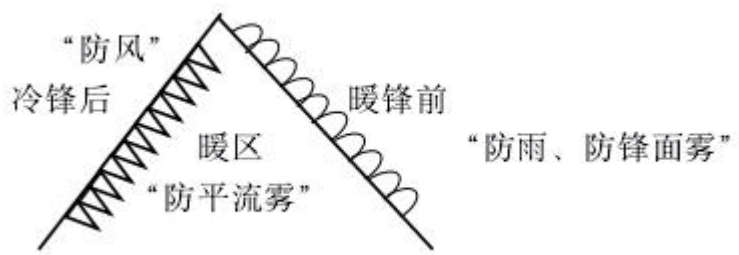


图 5 锋面气旋天气

再如图 6，可对北半球反气旋（高压）天气做一个总结。一般反气旋越到外面风越大，而气旋则相反。反气旋的中心多是稳定型天气，常为晴朗微风有雾。学习冷高压和副高在北半球的天气特性时，可结合图 6 说明（南半球气流运动方向相反，但中间天气类似），冷高压中心干冷，副高压中心闷热。

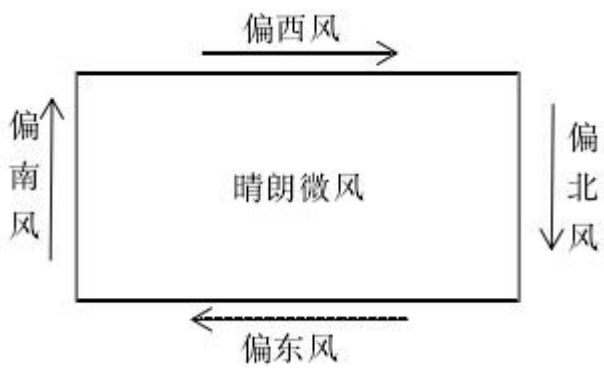


图 6　北半球反气旋天气

（3）理解式图形

理解式图形，可以更好的理解课程内容，且会加深印象。例如教材中在讲避台时讲到“北半球，船舶在危险半圆（右半圆），右首顶风驶离，在可航半圆（左半圆），右尾受风驶离”，如何理解这句话，可以通过图 7 来加强理解。在海上一般最危险的态势是船舶与台风相向而行。为了考虑安全，就应该考虑这种最坏的态势。如图 7 所示，若船在左半圆，最佳的逃跑路线是沿着 A 逃跑，β 风对船舶的影响是右尾受风（多考虑后半象限风的影响）；如果船舶在右半圆，最佳的逃跑路线是 B，风 α 对船舶的影响是右首顶风（多考虑后半象限风的影响）。用同样的方法，也可举一反三掌握南半球船舶避台方法。

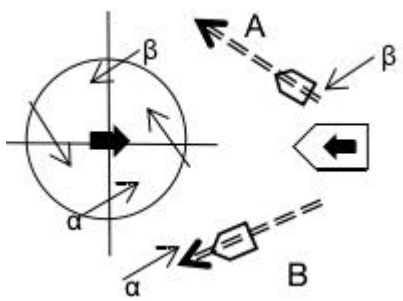


图 7　北半球船舶避台示意图

4 结语

《航海气象》课程内容丰富，对确保航海安全至关重要。因此，有必要学习好《航海气象》这门课程。此文通过不断钻研课程知识点，结合航海实际经验，针对不同知识点特性，巧妙设计各种学习方法，如案例学习法、类比学习法、总结学习法、图形学习法等，这些方法可以大大提高学习效果和效率，提高了船员的知识理解能力，有助于其通过适任考试和海上实际操作。

参考文献

[1] 王艳玲. 航海气象新大纲试题分析与教学要点[J],航海教育研究, 2008(2):46-47.
[2] 田华,傅吉尧,李保平.围绕理解的混合式教学设计与实践——以“航海气象保障”课程为例[J].教育教学论坛,2023,(29):105-108.
[3]杨亚新,夏剑东.基于 SPOC 的《航海气象》课程混合式教学研究与实践[J].中国教育信息化,2020,(04):56-60.
[4] 王艳玲.高职院校航海气象实验与实践教学改革研究[J],考试周刊, 2011(1):18-19.

[5] 胡德生. 提高航海航海气象教学效果的思考[J],武汉航海, 2012(6):1-4.
[6] 孙林波, 陈强. 高职航海气象与海洋学教学中学生应用能力的培养[J],航海教育研究, 2013(1):58-60.
[7] 杨亚新. 航海气象课程体系改革与立体化教材建设[J],职业技术教育, 2009(26):17-20.
[8] 王军, 李邵喜. 航海气象信息图形可视化研究[J],黑龙江交通科技, 2012(2):105-106.
[9] 杨亚新. 融英语于航海气象教学的尝试[J],航海教育研究, 2001(3):41-42.
[10] 王艳玲. 谈航海气象兴趣教学与适任考试结合[J],天津航海, 2008(2):75-77.
[11] 杨亚新, 朱谦阳. 航海气象与海洋学多媒体教学课件的设计和开发[J],航海教育研究, 2001(2):86-89.
[12] 赵健，赵璐，王新建. 中外航海教育模式对比分析与借鉴[J]，航海教育研究,2017(1) : 41-45.
[13]朱鹏飞,艾万政,刘虎,等.“图形+动画”教学法在“航海气象”课程中的应用[J].航海教育研究,2019,36(01):75-78.

作者简介：艾万政，教授，15257070064，浙江海洋大学，aiwanzheng@126.com

到港船舶质量控制公共服务平台（VQC）的设计与实践

沈培璐[1]，王本龙[1]，冯凯[1]，夏静驰[1]，王捷[2]

（1.中安惟新（舟山）技术有限公司，浙江 舟山 316021；2.浙江海洋大学船舶与海运学院，浙江 舟山 316021）

摘 要：船舶在到港靠离泊、装卸货作业过程中，由于船舶管理、船员素质以及设施设备等主客观因素，易引发码头剐蹭、装卸货作业过失和船舶机械设备故障等安全生产事故。为预防此类事故发生，提高船舶到港后的安全管理水平，本文基于 TQC 导则和海事安全管理经验，提出了一种标准化到港船舶 VQC 评级赋分技术，旨在实现对到港船舶安全靠离泊、装卸货作业中的各层次因素及综合质量表现的量化和可视化呈现。该技术为船舶经营企业、船舶租赁企业、货主企业、码头企业等船舶物流关联方提供了信息化、易操作、可靠的船舶管理选船依据和服务平台，从而有效提升了到港船舶的安全生产水平及整体管理效率。

关键词：质量管控；到港船舶；评级赋分；信息平台；应用实践

1 引言

船舶安全生产不仅关乎着船员的生命安全，也直接影响着货物的运输质量以及港口运营的效率与声誉。船员作为船舶运营的直接执行者，其专业技能、安全意识及应急反应能力直接影响到船舶操作的安全性和效率。而船舶自身的技术状况、设备维护水平及合规性则是保障船舶营运安全的基础。由于船舶在靠离泊、装卸货等关键作业环节中面临着许多不可预测的风险和挑战[1][2]，一旦出现船员和船舶环节的疏漏，极易导致船舶和港口安全事故的发生，给船东、货主及港口管理方带来不可估量的损失[3]。

因此，通过标准化到港船舶 VQC 评级赋分技术分析研究，创新性地设计到港船舶质量控制公共服务平台（Vessel Quality Control, VQC），通过平台科学、客观、全面的评估技术和标准化的评

级赋分模型构建[4]，解决船员和船舶因素制约船舶安全生产的重要瓶颈，实现对船舶的综合质量进行精准把脉。在研究过程中，不仅考虑了船舶自身的硬件条件和技术水平，如船体结构、设备状况、维护保养记录等，还融合了海事监管机构的检查结果，确保了评估的权威性和公信力。同时，行业自律检查以及码头船长作为一线操作人员的反馈也被纳入评估范畴，使得评估结果更加贴近实际，更具参考价值。

2 设计理念及功能需求

为实现船舶综合安全素质信息数据能够分析准、分享快、联动强的要求，到港船舶质量控制公共服务平台设计理念为：

2.1 船舶信息体系化，管理标准一体化

构建从船舶基本信息到生产信息的整套功能体系，采用功能自定义框架，实现对船舶综合安全素质信息的精准分析、快速分享和强大联动，推动船舶管理的标准化。

2.2 依托赋能赋分，实现动态监管

构建评分赋分计算模型，基于船舶自身状况、海事监管信息、船岸作业界面不安全因素以及行业自律组织检查结果等四个维度，对到港船舶进行全面综合评判，科学呈现船舶风险分值，为船舶经营和租赁企业、货主和港口等各类管理主体提供强有力的数据支持。

2.3 互联要素标准，促进产业闭环

打破传统的信息壁垒，联合岸基码头企业、海事主管部门、航运企业及行业专家，提升到港船舶生产过程中的质量信息感知，提质升级船舶“新航迹”，通过完善的安全管理联动机制，降低船舶安全生产的风险。

2.4 智能数据可视，打造智慧大脑

实现基于“全局一张图”构想，构建船舶综合素质可视化驾驶舱，实时展示各类关键风险和船舶状况，为船舶经营和租赁企业、货主企业、港口和海事主管部门等主体提供决策支持，助力船舶综合安全素质管理的全面提升。

3 总体设计

3.1 整体框架设计

平台功能以业务逻辑、用户操作的适应性出发，从关键信息查看、问卷评分操作、预警信息辅助至基础功能设置自上而下排列，包括：评级赋分、船舶评级、问卷管理、预警提醒、法律/规则、TQC 导则、智慧数据窗口、综合评价指数、库管理、基础设置等部分。

平台整体采用 PG 微服务架构，可自定义开发字段、对象、报表、工作流，可灵活设置用户的使用权限和对象数据安全性访问，支持所有对象数据的导入导出、数据批量删除和转移。此外，标准的 API 能够与任何企业应用程序或系统集成，用灵活的微服务架构下标准 Web Service 方式，不存在任何破坏性和技术依赖。

平台在技术能力上，通过应用 Mysql 数据库、Vue3.0 框架和 Java 后端开发，保障平台能够在多种浏览器上稳定运行，解决需求提升、维护维保、存储检索响应慢的问题，提升用户对平台的体验度和获得感[5]。

3.2 平台网络结构

在网络结构方面，采用 PG 微服务架构，平台部署在云服务器上，用户通过本地的 Web 网页登录即可进行数据处理访问和业务处理，如图 1 所示。服务器由数据备份服务器、数据库服务器、应用服务器组成，用户访问通过 API Gateway 进行。

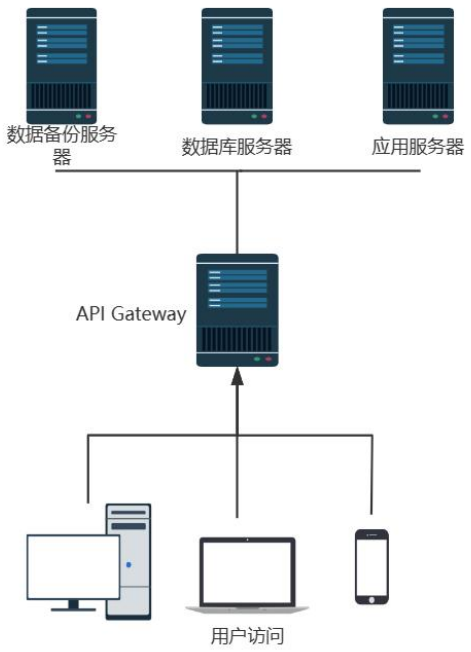


图 1 系统网络结构图

4 到港船舶质量控制公共服务平台功能开发和实践

以多方联动、结果共享为功能建设理念，以标准化评级赋分模型为基础，形成航运企业船舶数据自主建立、自评入池、入池赋分的前置性功能使用，满足一艘船舶一条基础分值的需求。平台功能共分为：评级赋分、船舶评级、问卷管理、预警提醒、法律/法规、TQC 导则、库管理、智慧数据窗口、综合评价指数等 9 大部分。

4.1 评级赋分

评级赋分通过模型构建予以落实，评级赋分结果以四大要素问卷结果赋予系数累计而成，如图 2 所示，主要包含：船舶自身状况要素、海事监管结果要素、行业自律检查要素、码头船长检查要素四方面，其中船舶自身状态要素和行业自律检查要素占据综合赋分结果各 20%，海事监管结果要素和码头船长检查要素占据综合赋分结果各 30%。

评分项	当前权重	
	分项总分	分项占比
船舶自身状况因素	100	20%
海事监管结果因素	120	30%
行业自律检查结果因素	100	20%
码头船长检查结果因素	100	30%

综合生成

综合星级	
五星	90-106
四星	80-89
三星	70-79
二星	60-69
一星	0-59

图 2 评级赋分星级模型图

此功能主要进行船舶综合星级分数查看，是结果导向的呈现功能。如图 3 所示，平台可详细查看四大要素检查分数、检查项及扣分情况；还有历史评分记录、检查整改记录、重点提醒记录等，满足船舶关联用户在一个功能里面可查看所有与船舶所关联的信息。



图 3 船舶评级赋分展示图

在此功能中还下设了 3 个子功能项目，具体功能描述如表 1 所示。

表 1 评级赋分模块子功能描述

功能模块	用途说明
企业赋分列表	以码头企业作为统计要素，系统支持用户选择任意码头，呈现该码头下所评分的船舶综合星级情况。
船舶赋分列表	以船舶作为统计要素，系统支持用户选择任意船舶，呈现该船舶各码头下的综合星级情况。
黑名单列表	系统自动将 2 星级船舶纳入至黑名单列表中，便于用户查看历史性 2 星级船舶情况。

4.2 船舶评级

船舶评级是船方、码头方、专家方进行检查评分的操作功能[6]。船舶自身状态要素和海事监管结果要素作为自评内容，由航运端自主发起，海事端、码头端具备核实检查功能，解决航运端为提高综合赋分谎报、瞒报、瞎报的违规行为操作；码头船长检查要素由码头端自主发起检查，平台支持各码头分数各存的优劣性差异；行业自律检查要素可由航运端和码头端自主发起，最终由专家进行检查评分。主体流程图如图 4 所示。

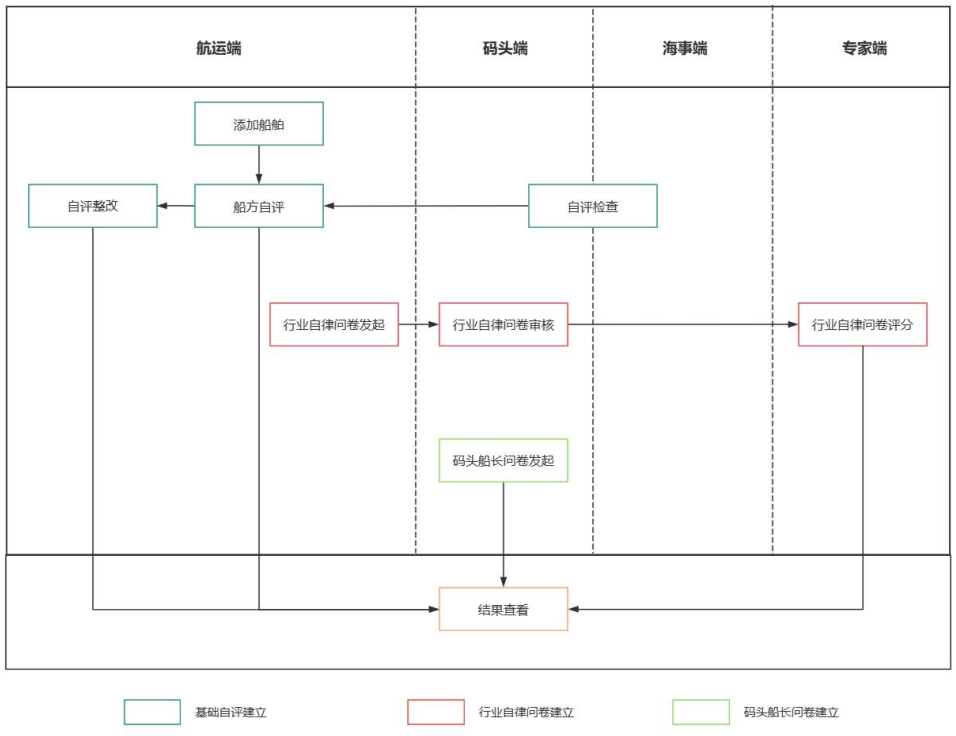


图 4 评级赋分流程图

4.3 问卷管理

问卷管理包含船舶自身状况、海事监管结果、行业自律检查结果、码头船长检查结果四大要素的评分问卷模版[7]，支持具有权限的用户自定义编辑检查项、分值等内容，便于检查问卷灵活应用。问卷呈现内容如图 5 所示。

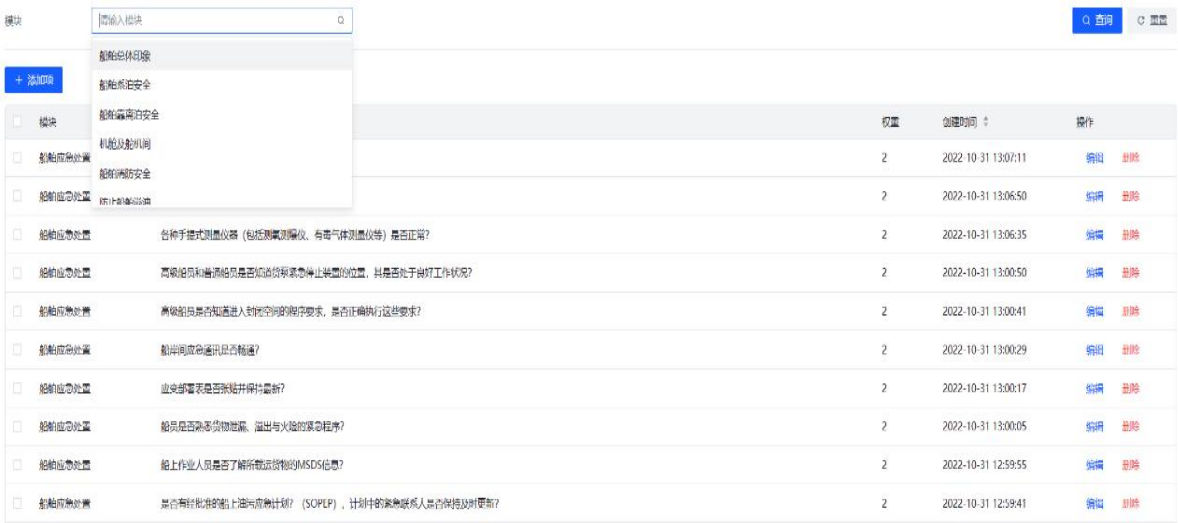


图 5 问卷管理模块展示图

在此功能中还下设了 4 个子功能项目，具体功能描述如表 2 所示。

表 2 问卷管理模块子功能描述

功能模块	用途说明
船舶自身状况	船舶自身状况问卷包含油船、化学品船、散货船三大船型问卷，支持更多种船型问卷添加，实现问卷评分的客观性、科学性、统一性。

海事监管结果	支持权限用户对问卷中的影响因素、赋分标准项、赋分标准值、分值进行维护。
行业自律检查	支持权限用户对问卷中的影响因素、内容及说明、权重分值进行维护。
码头船长检查	该功能以码头企业进行数据分离，实现一码头一数据库独立运行模式，以 100 分为总分进行计算，不受检查项数量的增加或减少影响。

4.4 预警提醒

预警提醒以预警提醒方式，将重要信息推送至各用户端，实现重要信息能够互通共享。由于行业自律检查结果要素和码头船长检查结果要素分值具有时效性，船方、码头方、专家方、海事方需

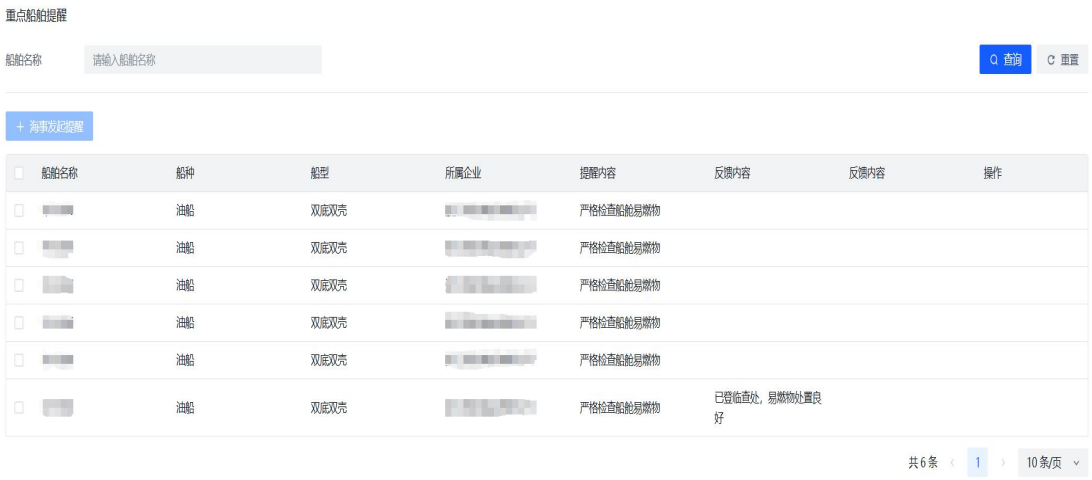


图 6 重点船舶提醒模块展示图

要及时掌握分数变化，保障船舶正常生产经营。重点船舶提醒功能内容如图 6 所示。

在此功能中还下设了 2 个子功能项目，具体功能描述如表 3 所示。

表 3 预警提醒模块子功能描述

功能模块	用途说明
公告信息提醒	具备海事用户对码头企业、航运企业进行重要公告信息发送，以流程为手段，实现公告发送、接受处理、得到反馈的信息闭环。
分数失效提醒	系统以行业自律检查结果要素和码头船长检查结果要素检查时间进行计算，分别以 3 个月和 6 个月作为提醒节点，将船舶名称、检查主体、检查时间等相关字段推送给受检方和检查方，便于进行二次检查。

4.5 法律/法规

法律/法规通过公告栏方式介绍重要规章和制度，如图 7 所示，船舶方可通过该功能页面接收海事及相关管理单位最新的涉及航运安全制度等内容、查看各抵港码头涉及安全靠离泊及安全生产要求。



图 7 法律/法规管理模块展示图

在此功能中还下设了 2 个子功能项目，具体功能描述如表 4 所示。

表 4 法律/法规模块子功能描述

功能模块	用途说明
海事法律法规	该模块承载海事局、海事处对外发布的法律法规，重点显示发布方、发布时间，便于用户了解掌握各区域法律法规的适用性，提前做好相应措施。
码头船长规则	考虑到各码头企业对外的靠离泊、装卸货作业要求的不一致性，系统支持各码头企业发布本单位的规章制度，航运企业可通过切换码头企业，查看各码头的相关要求。

4.6 TQC 导则

TQC 导则是行业自律检查结果要素的简称，TQC 导则构建油船、化学品船、散货船三大船舶类型质量安全提升指南[8]，详细划分船舶总体印象、船舶靠离泊安全、船舶系泊安全、机舱及舵机间、船舶消防安全、防止船舶溢油、船舶应急处置七大要素，指导船方标准化安全生产，实现船舶高质量发展。TQC 导则功能内容如图 8 所示。



图 8 TQC 导则模块展示图

4.7 库管理

库管理实现系统的基础数据管理功能，包含船舶库、航运企业库、码头企业库、专家库，便于平台用户搜索了解联系。

在此功能中还下设了 4 个子功能项目，具体功能描述如表 5 所示。

表 5 库管理模块子功能描述

功能模块	用途说明
船舶库	船舶库是航运企业建立船舶基础信息的操作模块，是进行船舶自评的前置模块，具体包含中英文名称、船长、船宽、船型、载重吨、经营企业、联系方式、建造时间、检验机构、安全代表等信息。
航运企业库	航运企业库是航运用户账号增设关联的前置模块，包含企业中英文名称、联系人、联系电话，由系统管理员账号进行维护。
码头企业库	码头企业库与航运企业库功能保持一致，支持关键信息筛选查询。
专家库	通过用户账号类型进行筛选取数，自动建立专家数据库，航运海事、航运企业了解行业自律检查结果问卷的可执行人信息。

4.8 智慧数据窗口

智慧数据窗口通过“一张图”方式实现，如图 9 所示，系统自动将业务关键数据进行解析统计，实现各类用户能够直观掌握当前系统运行状况、码头企业使用状况、船舶综合素质状况、主要扣分项情况等维度信息，为海事执法、码头监管、船舶提升提供重要数据支撑。



图 9 智慧数据窗口展示图

4.9 综合评价指数

综合评价指数以可视化方式呈现船舶四大要素检查结果情况，如图 10 所示，显示方式内嵌船舶码头综合星级赋分、自评要素及格率、码头船长检查结果问卷和行业自律检查结果问卷评分轨迹、检查结果综合扣分项等统计看板[9]，航运企业可直观了解船舶综合素质情况，提升问题改造质量。

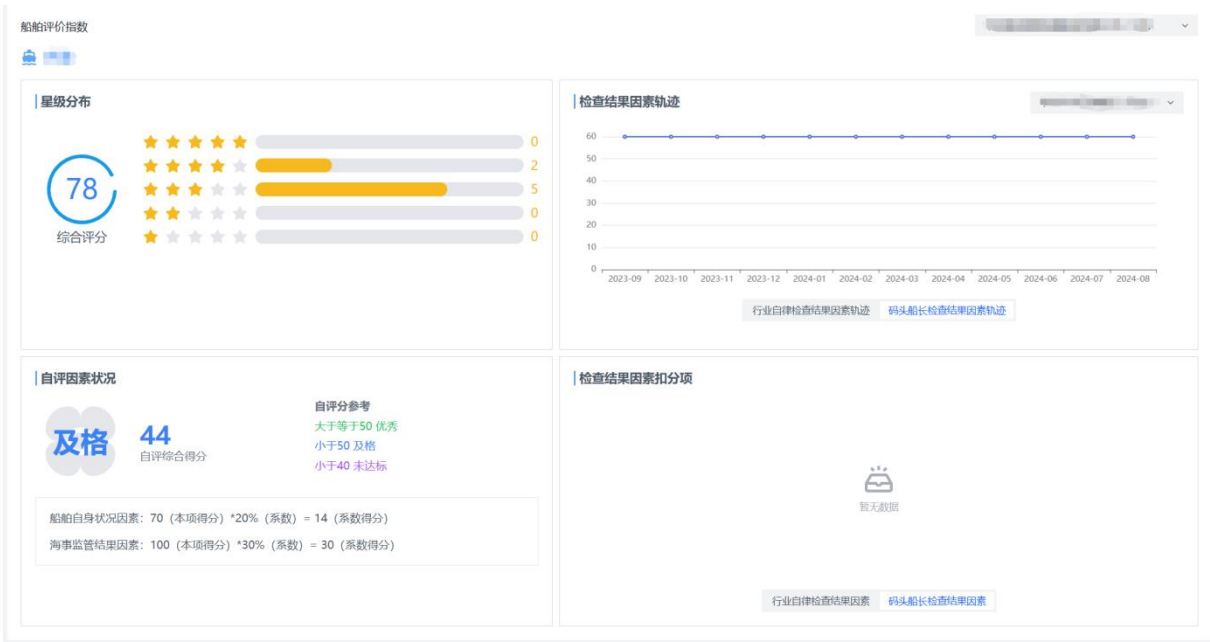


图 10 综合评价指数模块展示图

5 平台应用实践

在近百位行业资深专家团队的精心指导与技术支持下，平台通过精准的数据分析与科学的评估体系，为 785 家国有及民营船舶运营公司提供了权威、公正的星级赋分服务，这一覆盖范围已广泛扩展至浙江、福建、江苏、上海、广东等沿海及内河航运发达省份，形成了全国性的示范效应。VQC 成功上线并稳健运行，其影响力与成效持续扩大，不仅深化了船舶安全管理的内涵，还显著优化了港口作业的整体生态。目前，通过浙江省内 15 家大中型港口企业使用，已实现对 1326 艘船舶的全面安全星级评分。

5.1 在船舶适航安全性方面

平台通过严格的星级评分机制，激励航运企业加大对船舶维护的投入，改善船舶技术状况，确保船舶始终处于良好的适航状态。这不仅降低了船舶在航行过程中发生故障或事故的风险，还增强了船舶应对突发情况的能力，保障了船员、货物及海洋环境的安全。

5.2 在提升靠港效率方面

平台通过综合评估船舶的航行状态、维护记录及历史表现，为港口调度提供了可靠依据，有效缩短了船舶等待时间，加速了船舶周转速度，如某大型油化码头有泊位 5 个，船舶靠泊从原来 10 个航次增加至 15 个航次。同时，平台还促进了港口与船舶之间的信息共享，使得双方能够提前准备，协同作业，进一步提升了靠港作业的效率与流畅度。

5.3 在安全生产作业方面

平台通过促进船舶、货主与码头企业之间的紧密合作，实现了作业流程的标准化与高效化。船舶在获得高星级评分后，往往能够优先获得优质的码头泊位和作业资源，从而提高了作业效率与服务质量。同时，平台还通过数据分析，为船舶运营公司提供了个性化的安全优化建议，帮助其改进作业流程，降低运营成本，提升市场竞争力。

综上所述，VQC 在提升靠港效率、增强船舶适航安全性及优化作业生产等方面均取得了显著成效。它不仅为船舶运营公司、监管部门和码头企业提供了强有力的管理支持，还推动了整个航运业的转型升级与可持续发展。

6 结束语

VQC 通过统一的船舶安全标准管理、动态的风险等级共享及实时的诚信记录跟踪，显著提升了到港船舶的安全管理水平和港口码头的运行效率，同时，也增强了客户货主的作业安全感。平台的

成功应用为航运业高质量发展提供了坚实保障，也为进一步推进智能航运发展奠定了坚实基础。

参考文献

[1] 柯荣勇.船舶安全管理现状分析及对策探讨[J].中国航务周刊.2024（20）：54-56
[2] 凌浩.自主船舶靠离泊作业风险分析与预警方法研究[D].江苏科技大学.2024
[3] 蒋夕良.从海事监管角度谈船舶安全营运管理[J].航海.2023（05）：41-45
[4] 陈丽,李坤龙,甄心晨.楼宇经济视角下商务楼宇星级评价体系建设研究——以杭州市余杭区为例[J].商业经济.2023（07）：39-41+55
[5] 李立红.基于虚拟现实交互技术的船舶数字化服务平台设计[J].舰船科学技术.2024,46（11）：182-185
[6] 宋解平.基于 PSC 检查结果的船舶事故原因研究[D].大连海事大学.2018
[7] 英起波.船舶安全检查质量综合评价体系研究[D].大连海事大学.2014
[8] 海言.港口国监督首发中国权威声音——中国海事局主导制定《船舶能效规则港口国监督检查导则》[J].中国海事.2015（06）：56-57
[9] 徐宏伟,葛沛.大数据技术在船舶智能化中的应用[J].江苏船舶.2020,37(06)：1-3，5

作者简介：

沈培璐，男，中安惟新（舟山）技术有限公司，高级工程师，13655809925，shenpeilu@csafety.cn
王本龙，男，中安惟新（舟山）技术有限公司，工程师，13910586367，wangbenlong@csafety.cn
冯凯，男，中安惟新（舟山）技术有限公司，工程师，17350023315，fengkai@csafety.cn
夏静驰，男，中安惟新（舟山）技术有限公司，17705807977，xiajingchi@csafety.cn
王捷，男，浙江海洋大学船舶与海运学院，教授，13906808518，wangj@zjou.edu.cn

扩展卡尔曼滤波算法在智能船舶多源罗经信号融合中的应用研究

贾爱鹏 吴晓红

（浙江国际海运职业技术学院 浙江舟山 316021）

[摘 要]本研究针对智能船舶导航系统中的多源罗经信号融合问题进行了深入分析，采用扩展卡尔曼滤波（EKF）算法来整合卫星罗经、光纤罗经和电罗经的数据，实现对船舶航向的精准估计。通过对融合前后的航向数据进行误差分析，结果显示融合后的平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE）均有显著降低，证明了 EKF 算法在提升航向精度和系统鲁棒性方面的有效性。此外，通过时间序列分析，展示了融合技术在抑制数据波动和提高导航稳定性方面的显著优势。本文的研究不仅为智能船舶的导航提供了可靠的技术支持，也对其他领域如无人驾驶和航空导航系统的技术发展具有重要启示。

[关键词]扩展卡尔曼滤波算法;罗经;船首向;精度

1 引言

随着智能船舶技术的快速发展，船舶导航系统的精度和可靠性成为提高航行安全和效率的关键因素。传统的导航系统在面对复杂海洋环境时可能会受到多种因素的干扰，而多源罗经信号融合技术能够有效提升导航的精度和鲁棒性。通过综合利用卫星罗经、光纤罗经和电罗经的优点，不同类

型罗经的信号特性相互补充，形成了具有更高精度和稳定性的智能导航系统。这一技术的应用不仅满足了智能船舶的导航需求，也为海事行业的智能化转型提供了重要支撑。当前，数据融合技术在多源信息处理中的广泛应用为船舶导航系统的设计和优化提供了丰富的经验和方法支持。通过研究和实现多源罗经信号的有效融合，能够进一步推动船舶导航系统的智能化发展，提高船舶的自主航行能力。

2 文献综述

在智能船舶导航系统中，多源罗经信号融合技术是提升导航精度和可靠性的关键所在。不同罗经系统各具优势，卫星罗经通过全球导航卫星系统提供高精度位置和航向信息，适合在开放海域使用[1]。光纤罗经利用光纤陀螺仪测量角速度，具备高精度和抗电磁干扰能力，常用于需要精确惯性导航的场景[2]。电罗经通过旋转陀螺仪保持真北指向，提供稳定可靠的航向信息，适合在多变的海洋环境中作为传统的导航工具 [3]。

唐浩然等人的研究证明了多源数据融合在燃气管道高后果区识别中的有效性[4]，表明这种方法可以提高系统的精度和可靠性。这种技术为智能船舶的多源信号融合提供了理论支持和应用实例。

梁鑫等人提出了基于多源数据融合的城市洪涝模拟高分辨率地形构建方法[5] 。通过整合多种地形数据和水文信息，该研究提高了洪涝风险预测的准确性，为智能船舶在复杂海况下的导航提供了数据处理的技术支持。

钱俊楠等人通过研究扩展卡尔曼滤波（EKF）在农机路径跟踪中的应用[6]，证明了 EKF 在处理多源传感器数据时的有效性 。这一研究结果为智能船舶的多源罗经信号融合提供了实践依据，EKF 能够实时优化传感器数据，提高船舶导航系统的精度和动态响应能力。

通过上述研究可以看出，多源数据融合技术在提高智能船舶导航精度、增强系统稳定性及优化数据处理方面具有重要作用。这为未来智能船舶的自动化导航和复杂环境下的应用奠定了技术基础。

3. 方法与技术

3.1 数据采集

本研究的数据采集于宁波舟山港的典型海域，利用卫星罗经、光纤罗经和机械罗经三种设备，以确保在不同航行条件下获得高质量的导航数据。数据采集涵盖了从平静水面到中等波浪条件的各种海况，确保其在不同环境下的稳定性和精确性。

光纤罗经利用高精度的光纤陀螺仪测量船舶的角速度和航向角。设备经过专业校准，以降低环境因素对测量精度的影响。卫星罗经数据采集过程中，卫星罗经安装在船舶的最佳位置，以获得清晰的卫星信号，并设置每秒采集一次，以捕捉船舶的微小航向变化。机械罗经采用传统的陀螺罗经，为船舶提供可靠的航向信息。经过静态条件下的校准，机械罗经在动态航行中也能保持稳定的方向指示。数据采集覆盖了不同的海洋环境，以验证机械罗经在实际操作中的性能。

所有罗经设备的数据通过标准化接口（NMEA 0183/2000）实时传输到中央处理系统，并安全存储于数据库中，以备后续分析。数据监控系统不断监测数据流，识别并标记任何异常值，确保输入数据的完整性和准确性。通过这种系统化的数据采集策略，本研究为多源罗经信号的融合提供了可靠的数据基础，助力智能船舶导航系统精度和可靠性的提升。

3.2 数据预处理

在多源罗经信号融合研究中，数据预处理是确保后续分析和信号融合准确性的重要步骤。数据预处理主要包括数据清洗、数据对齐和数据标准化，具体如下：

3.2.1 数据清洗

数据清洗的目的是识别并处理数据集中的异常值和缺失值，以提高数据的整体质量和可靠性。

异常值检测：使用统计方法检测异常值。采用 3 σ 原则，即判断某个数据点是否偏离其所在数据集的均值超过 3 倍标准差。对于航向数据H_i，异常值的识别公式如下：

$$|H_i - \bar{H}| > 3\sigma_H$$

其中，$\bar{H}$为航向数据的平均值，σ_H为航向数据的标准差。

缺失值处理： 使用线性插值法来填补缺失值，确保时间序列数据的连续性。线性插值公式为：

$$H_{\text{interp}} = H_{\text{prev}} + \frac{H_{\text{next}} - H_{\text{prev}}}{t_{\text{next}} - t_{\text{prev}}} \times \left(t_{\text{interp}} - t_{\text{prev}}\right)$$

其中，H_{interp} 为插值点的航向数据，H_{prev} 和H_{next} 分别为插值点前后的数据，t为相应的时间戳。

3.2.2 数据对齐

为了保证不同罗经数据在融合时的有效性，需要确保各个传感器的数据在时间上同步。使用线性插值法对时间戳进行时间对齐，将各传感器数据统一到相同的时间基准。设定一个统一的时间步长Δt，对各数据源进行插值，以生成同步数据序列。

3.2.3 数据标准化

为了消除不同数据源之间的量纲差异，通常对数据进行标准化处理。

标准化公式： 对于每一个数据源X_i ，进行标准化处理的公式为：

$$X_{\text{norm}} = \frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X}$$

其中，μ_X和σ_X分别为数据的均值和标准差。

通过以上数据预处理步骤，确保多源罗经数据在进行信号融合前的质量和一致性，为后续的分析和结果提供可靠的基础。

3.3 多源信号融合

在本研究中，扩展卡尔曼滤波（EKF）被选作多源信号融合的核心算法。EKF 以其在非线性系统中处理多源传感器数据的能力而著称，能够为船舶导航提供精确的状态估计。以下是 EKF 算法的具体实现步骤：

3.3.1 状态与观测模型定义

状态方程：船舶的状态由向量$\boldsymbol{x_k}$表示，包括航向、速度和位置等信息。状态方程用于描述系统的动态演变，其公式为：

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1}$$

其中，$\boldsymbol{f}$表示状态转移函数，$\boldsymbol{u_{k-1}}$ 为控制输入，$\boldsymbol{w_{k-1}}$ 为过程噪声。

观测方程：各种罗经提供的观测数据用向量$\boldsymbol{z_k}$表示，观测方程则用于连接状态与观测，其公式为：

$$z_k = h(x_k) + v_k$$

其中，$\boldsymbol{h}$为观测函数，$\boldsymbol{v_k}$ 为测量噪声。

3.3.2 EKF 的滤波过程

初始化：确定初始状态向量$\boldsymbol{x_0}$和协方差矩阵$\boldsymbol{x_0}$，根据初始传感器读数和航行条件进行初始化。

状态预测公式为：

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} = f(\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}, \boldsymbol{u_{k-1}})$$

协方差预测公式为：

$$P_{k|k-1} = \boldsymbol{F_{k-1}} \boldsymbol{P_{k-1|k-1}} \boldsymbol{F_{k-1}^T} + \boldsymbol{Q_{k-1}}$$

其中，$\boldsymbol{F_{k-1}}$ 为状态转移矩阵的雅可比矩阵，$\boldsymbol{Q_{k-1}}$ 为过程噪声协方差矩阵。

3.3.3 更新步骤

卡尔曼增益计算公式：

$$K_k = P_{k|\boldsymbol{k-1}} H_k^T \ (\boldsymbol{H_k} P_{k|\boldsymbol{k-1}} H_k^T + R_k)^{\boldsymbol{-1}}$$

其中，H_k为观测矩阵的雅可比矩阵，R_k为测量噪声协方差矩阵。

状态更新公式：

$$\hat{x}_{k|\boldsymbol{k}} = \hat{x}_{k|\boldsymbol{k-1}} + K_k \ (Z_k - h(\hat{x}_{k|\boldsymbol{k-1}}))$$

协方差更新公式：

$$P_{k|k=}(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K_k H_k}) \boldsymbol{P_{k|k-1}}$$

其中， $\boldsymbol{I}$为单位矩阵。

4. 结果与分析

4.1 误差分析

在多源罗经信号融合的研究中，误差分析是验证融合算法有效性的重要手段。本研究中，我们采用扩展卡尔曼滤波（EKF）算法对卫星罗经、光纤罗经和机械罗经的数据进行融合，并通过计算平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE）来量化融合效果。

MAE 是航向估计误差的平均绝对值，表示估计值与参考值之间的平均偏差。MAE 提供了一个直接的误差度量，表示平均情况下，估计值偏离实际值的程度。公式为：

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\widehat{H_i} - H_i\right|$$

H_i是第i次的实际航向（或参考值），$\widehat{H_i}$是第 i次的估计航向，N 是数据点的数量。

RMSE 是航向估计误差的平方均值的平方根，反映了估计值与参考值之间的平均平方偏差。RMSE 对大误差更加敏感，因为误差被平方，因此对于检测大偏差更为有效。公式为：

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\widehat{H_i} - H_i\right)^2}$$

其中，$\widehat{H_i}$为 EKF 估计的航向，H_i 为原始航向，N 是数据点的数量。

表 1 多源罗经信号融合前后误差对比

罗经类型	融合前 MAE（°）	融合前 RMSE（°）	融合后 MAE（°）	融合后 RMSE（°）
卫星罗经	0.25	0.35	0.19	0.24
光纤罗经	0.30	0.40	0.19	0.24
机械罗经	0.35	0.45	0.19	0.24

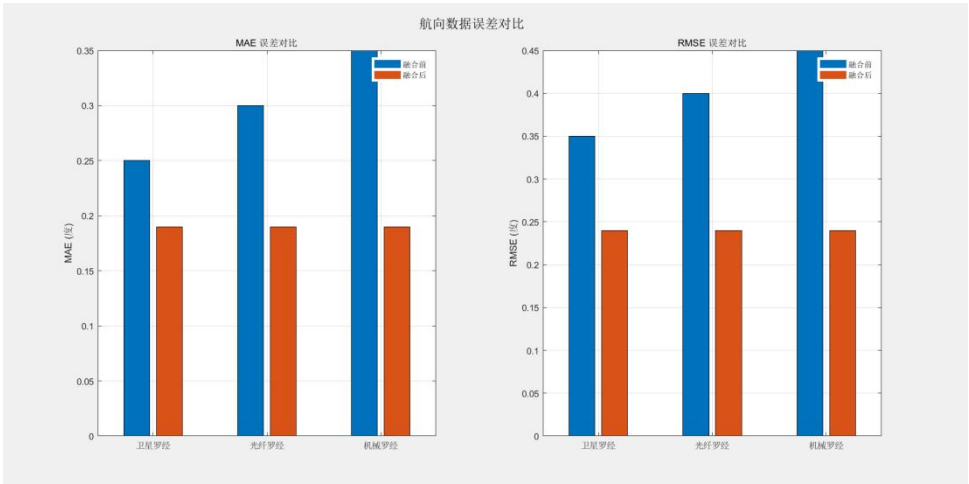


图 1 多源罗经信号融合前后误差比较图

由表 1 和图可见，误差指标分析结果表明，EKF 融合显著降低了所有罗经系统的误差，尤其是在机械罗经中，误差改善最为明显。卫星罗经在融合后 MAE 和 RMSE 分别降低至 0.19° 和 0.24°，显示出对环境噪声的良好抑制效果。光纤罗经尽管本身精度较高，但通过多源融合，误差进一步降低，增强了系统的鲁棒性。机械罗经作为传统导航工具，通过多源融合，其误差大幅减少，验证了 EKF 算法在处理高噪声数据中的有效性。

整体来看，EKF 算法通过对多源罗经信号的融合，大幅提高了船舶航向估计的精度和稳定性，为智能船舶导航提供了更可靠的技术支持。这一研究结果不仅验证了 EKF 在信号融合中的有效性，也为未来在复杂海洋环境中应用多源导航技术提供了实用的参考依据。

4.2 不同海况对误差的影响

在智能船舶的导航精度研究中，不同海况下的罗经误差对比极为关键。本节分析了静水、轻风浪以及中等风浪三种海洋条件下，卫星罗经、光纤罗经和机械罗经的误差表现。通过绘制平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE）的对比折线图（如图 2 所示），我们可以直观地看到各种海况对导航设备误差的影响。

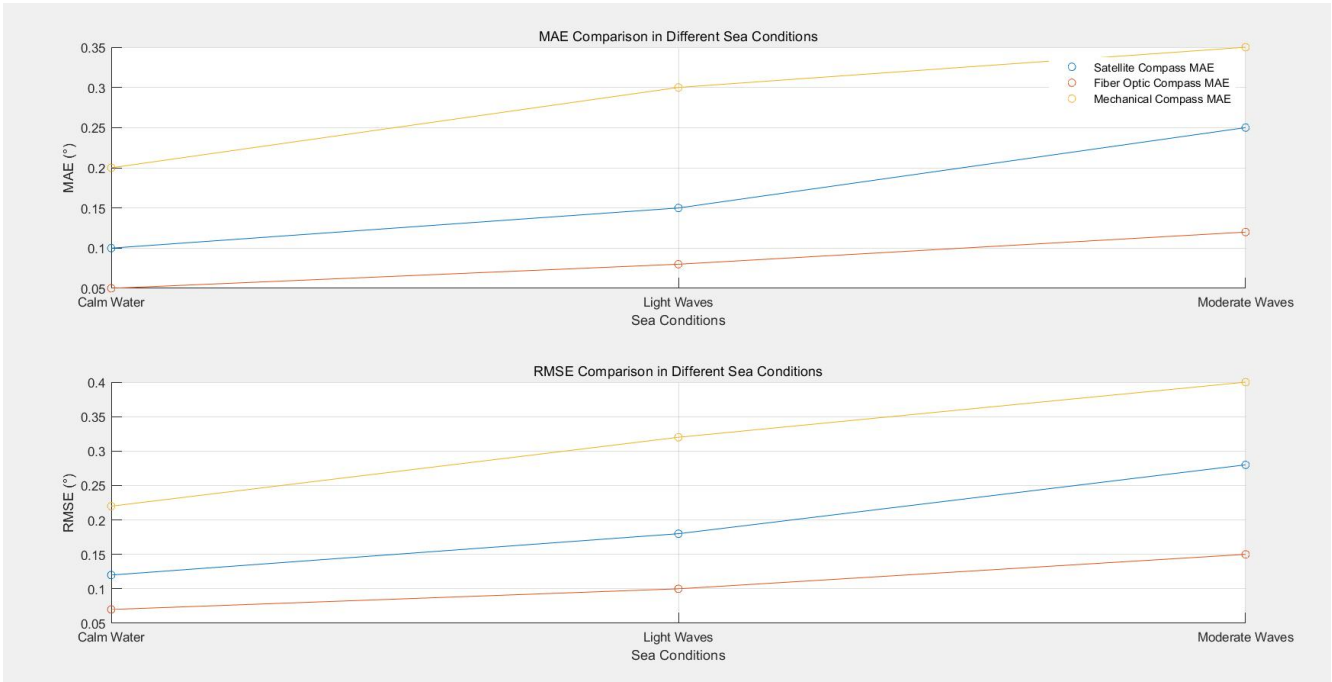


图 2 不同海况下罗经误差比较图

在静水条件下，所有类型的罗经误差较低，其中光纤罗经的误差最小，显示了其在稳定环境中的优异性能。然而，随着海况变化到轻风浪和中等风浪，所有罗经的误差均显著增加。特别是机械罗经，在中等风浪条件下，其误差增加最为显著，这可能是由于机械罗经对海况变化的敏感度较高。

此外，光纤罗经即使在较差的海洋条件下也展现了较低的误差增长，表明它具备较强的环境适应能力。对于卫星罗经而言，虽然误差增长幅度适中，但其在所有海况下的性能仍稳定，说明卫星罗经能在不同海况下保持一定的导航精度。

这些结果强调了在设计和实施智能船舶导航系统时，必须考虑到海况对罗经性能的影响，以确保航行安全。通过对不同海况下误差的深入分析，可以更好地理解各类型罗经在复杂环境中的应用潜力及其限制。

4.3 时间序列分析：原始数据与 EKF 融合后航向数据对比

在本研究中，为了直观展示扩展卡尔曼滤波（EKF）融合效果对智能船舶航向数据的改善，制作时间序列对比图，如图 3 所示。该图表对比了融合前后航向数据的变化，显示了 EKF 融合技术在稳定航向估计中的效果。

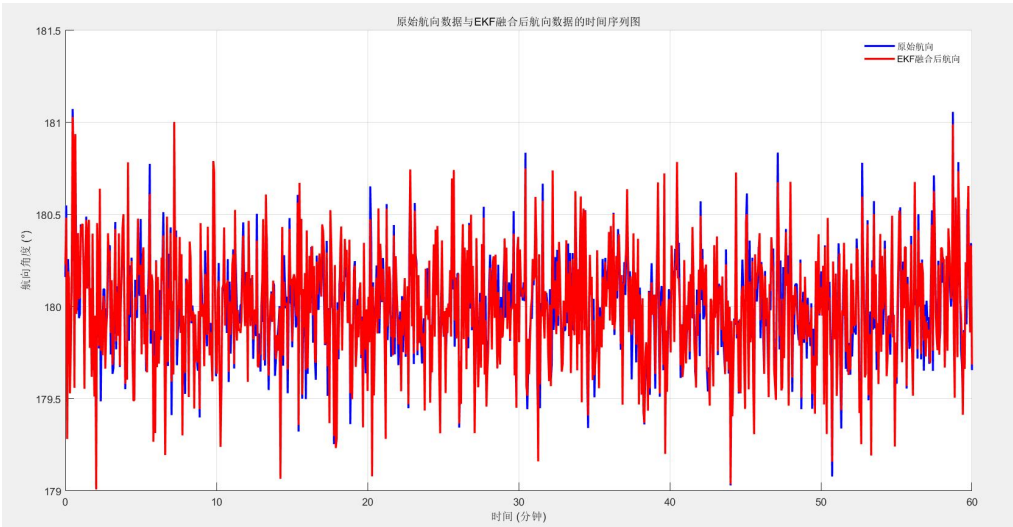


图 3 时间序列对比图解析

图 3 展示了融合前后的航向数据波动情况。红色线表示 EKF 融合后的数据，蓝色线表示原始航向数据。从图中可以观察到，原始数据显示出较大的波动性，这些波动可能源自传感器噪声、环境

干扰或系统误差。相比之下，EKF 融合后的数据显著平滑，波动幅度减小，表明融合处理有效地抑制了噪声和减少了随机误差。

5 结论

本研究通过实施扩展卡尔曼滤波（EKF）技术，成功实现了智能船舶中多源罗经信号的有效融合，显著提升了航向估计的精度和系统的鲁棒性。融合后的误差分析显示，所有罗经系统的平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE）均得到了显著降低，尤其是在机械罗经中，误差降低最为明显，这证明了多源信号融合技术在降低噪声和提高导航精度方面的有效性。

此外，本研究还探讨了不同海况对罗经性能的影响，结果表明，即便在较差的海洋条件下，多源融合技术仍能有效保持导航系统的精度，强调了在复杂环境中应用多源导航技术的重要性和可行性。

尽管这些成果在智能船舶导航领域具有显著的实际和理论价值，但研究仍需继续优化。未来工作将关注算法在不同导航场景下的适应性，以及如何进一步整合更多类型的传感器数据，以提高航向估计的准确性和系统的适应性。希望这些研究能够为全球航海安全和智能化船舶技术的发展做出贡献。

参考文献

[1] 陈汝军,孟政. 卫星罗经组成原理探讨 [J]. 广州航海高等专科学校学报, 2006, (02): 23-25.
[2] 卞鸿巍,马恒,王荣颖,等. 国内船用光纤陀螺罗经最新技术发展 [J]. 海军工程大学学报, 2021, 33 (03): 1-7.
[3] 李赞. 从三种新型罗经的比较中看商船用陀螺罗经发展趋势 [J]. 中国远洋海运, 2022, (01): 78-81.
[4] 唐浩然,熊俊楠,雍志玮,等. 多源数据融合的燃气管道高后果区识别与分级方法 [J/OL]. 油气储运, 1-9.
[5] 梁鑫,侯精明,王添,等. 基于多源数据融合的城市洪涝模拟高分辨率地形构建方法 [J/OL]. 水利水电科技进展, 1-13.
[6] 钱俊楠,冯桑,利航,等. 基于扩展卡尔曼滤波的农机路径跟踪控制算法研究 [J]. 中国农机化学报, 2024, 45 (07)。

作者简介：贾爱鹏，男，1985.9，浙江国际海运职业技术学院，讲师，研究方向为船舶通信导航，地址：浙江省舟山市海天大道 268 号，电话：18969255383，电子邮件：396827018@qq.com.

恶劣天气下渔船航行危险评价系统研究

毛超进，艾万政，刘琪，王家宏

（浙江海洋大学，船舶与海运学院，浙江 舟山，316022）

摘　要：浙江省的沿海地区与东海紧密相连，其作为中国最重要的渔业海域之一，拥有丰富的海洋渔业资源，包括各类鱼类、虾类、贝类等。随着这几年国家对东海渔场的修复保护，渔业资源日益丰富，渔船数量日趋增加。然后，受恶劣天气等因素影响，渔船易发生安全事故，对人民群众的生命财产安全造成了极大的损害，研究台风等恶劣天气下渔船安全具有重要意义。本文主要从自然条件、航线条件、船舶条件和船员条件四个重要船舶安全影响因素出发，明确各因素的隶属函数，构建台风天气下航行渔船风险度综合评价系统；并基于 MATLAB 平台的 FIS 提出台风天气下渔船航行风险度综合评价模型并通过较危险台风天气下基本位于同一海域的三艘不同渔船为算例验证其合理性，以期为台风天气下不同航行渔船风险度定量分析提供参考，也为航行渔船风险度分析的计算机辅助实现提供方法。

关键词：渔船避台；风险度；隶属函数；FIS

0 前言

浙江地处中国东南沿海地区，其内许多河流、湖泊和山脉，又位于位于东海和台湾海峡之间，处在太平洋西北太平洋暖池路径上，极易受到台风的影响。而其丰富的水域资源也带来了多样的海洋资源，渔业在浙江的经济中扮演着重要的角色，浙江省被称为“渔业大省”。随着浙江渔业的不断发展，渔船数量日趋增多，渔业作业日趋频繁，如何在台风等恶劣天气下保证渔船安全成为了众多学者关注和研究的重要课题。

文献[1]提出在“履职尽责，失职追责”的国家安全生产新形势下，船舶防台要适应新形势的变化，树立远离台风中心、重在于防的原则，结合时代发展的需要，妥善做好船舶防台工作。这对船舶海上安全航行具有一定的指导意义。文献[2]以港航工程建设项目为依据，又以经历过的 15 个台风经验进行总结，分析了台风对船舶安全性有一定的影响，从而提出一系列船舶防台安全措施和船舶防台应急预案的应用，但没有充分考虑船舶在台风期航行的实时风险性。文献[3]为了降低人为因素干扰，通过应用层次分析法和模糊综合评判法计算渔港防灾系数、渔港脆弱度等安全指数，为量化评估渔港防台风等级提供一定支持。文献[4]提出基于台风网格强度数据和动态路径规划算法，开展船舶航行海区的风险区划评估，建立不同代价系数的风险地图，可以为船舶台风期航行提供更加安全和有效的避台优化方案。文献[5]提出通过了解各避风港锚地的避台等级以及地形走向、地理环境、气候极值的情况下，指导渔船就近进入安全的避风港锚地，可以更好的做好渔船避台决策气象服务。文献[6-7]通过对防台水域、天气、航线、船舶性质进行分析，针对台前、台中、台后快速恢复生产提出防台措施和建议，并且研究表明选择正确的防台水域和防台方法将决定防台工作的成败，因此船舶需始终坚持“及早进入防台锚地选择可靠锚位”原则，但还需要结合实际进行风险评价。文献[8]通过采用了 FVCOM 浪-潮-流耦合模型，对霞关渔港防台风等级进行评估，根据结果对渔船航行、停泊安全问题提出防台建议，但没有进一步提出针对台风天气下渔船安全航行的有效模型。

通过上述研究可知各位专家学者对保障渔船安全的研究有很多，但是很少有人结合具体实际对台风天气下航行渔船的风险度做出实时定量评价，而这种具有时效性的风险评价对渔船有效规避风险在紧急情况下做出正确决策具有关键作用。

本文根据风险分析理论,结合模糊综合评定数学模型,提出一种对台风天气下航行船舶危险度进行定量估算的模型。运用 MATLAB 平台，将 FIS 的模糊推理功能与 simulink 相结合，建立台风天气下航行渔船风险度综合评价模型，通过改变参数就可以方便地求得在台风影响过程中，某个时间点下渔船的风险度。该模型的建立不仅可以对不同渔船所面临的风险进行定量评估还可以为台风天气下航行渔船风险度分析的计算机辅助实现提供方法。

1 风险综合评价系统的构建

通过文献[9]、文献[10]和文献[11]的查询，对台风天气下航行渔船安全构成较大威胁的因素包括自然条件、航线条件、船舶条件和船员条件四方面。其中，自然条件中的关键因子有气压下降量(A1)、渔船与台风距离(A2)、风力(A3)、风向(A4)和浪高(A5)；航线条件中的关键因子有累积转向角度(B1)、交通密度(B2)和助航条件(B3)；船舶条件中的关键因子有渔船旋回性(C1)、渔船追随性(C2)、船龄(C3)和装载情况(C4)；船员因素中的关键因子有工作经验(D1)、专业技术水平(D2)、应急操纵能力(D3)和工作态度(D4)。

将上述因子进行分类，构建双输入单输出的模糊评价子系统，最终形成风险综合评价系统如图 1 所示，其中，W、T、S、U 分别表示上一级的评价结果。

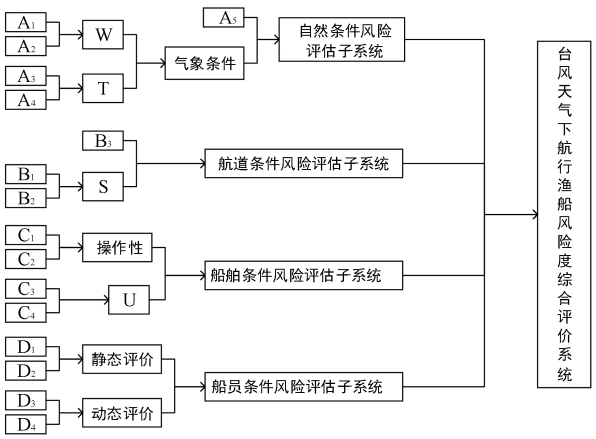


图 1 台风天气下航行渔船风险度综合评价系统

Fig.1 Comprehensive evaluation system for the risk degree of fishing boats sailing in typhoon weather

2 风险评价系统中各因子隶属函数的确定

台风天气下航行渔船风险度综合评价系统中各因子的论域均为连续变量且定义在实数集上，采用模糊分布的常用图式法中的梯形和广义钟形确定各因子隶属函数。这里重点阐述与台风天气下特定环境关系密切的因子的隶属函数的确定。

2.1 气压下降量(A1)隶属函数

用“较危险”、“危险”和“很危险”三个模糊集合表示其隶属。在气旋接近过程中，一般认为当气压下降超过 1hPa/h 时，即应引起高度重视；当气压下降量超过 2hPa/h 以上时，即应根据情况改向避开。因此，可以定义论域[1，2.75]，气压下降量为 1hPa/h 时对“较危险”和“危险”两个模糊子集的隶属度均为 0.5，1hPa/h 为“危险”和“很危险”两个子集的临界值，采用四分法确定分布梯形各参数，其隶属函数曲线如图 2 所示。

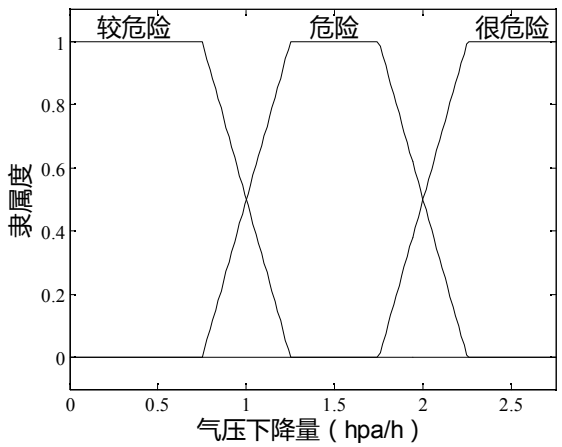


图 2 气压下降量(A_1)隶属函数曲线

Fig.2 Pressure drop amount (A1) membership function curve

2.2 渔船与台风距离（A2）隶属函数

台风水平范围分为 4 个区：外围区：半径 270—500 n mile，风力 6 级以下；强风区：半径 100—270 n mile，风力 6—7 级；涡旋区：半径 50—160 n mile，风力 8—12 级以上；眼区：直径 5—16 n mile。用“较危险”、“危险”和“很危险”三个模糊集合表示渔船与台风距离的风险度隶属，定义论域[0，500]。在避台规则中迫不得已时船舶也要距台风 100 n mile，因此小于 100 n mile 则完全隶属很危险模糊子集；定义进入强风区即 300 n mile 就完全隶属危险子集；涡旋区半径 160

n mile 对较危险和危险两个模糊集合的隶属度均为 0.5；270 n mile 对危险和很危险两个模糊集合的隶属度均为 0.5，据此可作隶属函数曲线如图 3 所示。

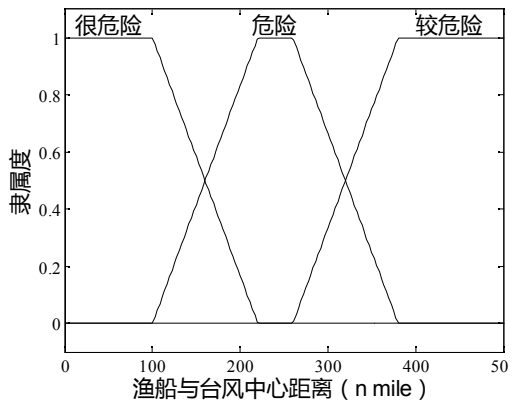


图 3 渔船与台风距离（A2）隶属函数曲线

Fig.3 Function curve of the distance between fishing boat and typhoon (A2)

2.3 装载情况(C4)隶属函数

2005 年 5~6 月辽宁省长海县海域发生的三起渔业运输船舶沉没事故，均存在超载浮载现象。辽庄渔运某号船装载渔货约 70 吨，辽普渔某号船装载 60 多吨，辽长渔运某号船装载 100 多吨。而它们的实际舱容只能装 30 吨~40 吨。利用实际载货量和核定载货量的比值能够恰当地反应渔船装载渔货情况。从数据可以看出，渔船超载严重时实际载货量为核定载货量的 2~3 倍，以[0，3]为论域划分“较危险”、“危险”和“很危险”三个模糊集合，比值为 1 时为超载的临界值，对较危险和危险两个子集的隶属度均为 0.5，方便起见将区间长度四等分得到其隶属函数曲线如图 4 所示。

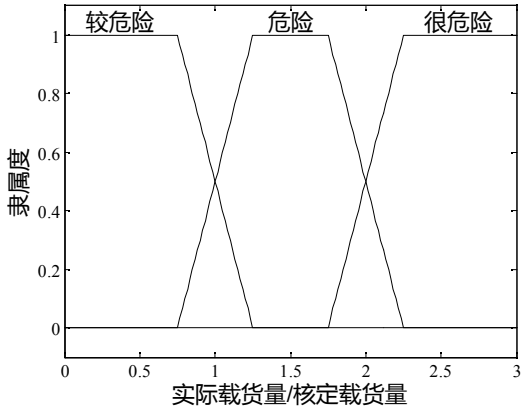


图 4 装载情况(C4)隶属函数

Fig.4 Loading status (C4) membership function

2.4 船员条件风险评估子系统隶属函数

近年来在船舶安全管理中普遍认为高达 80%的事故是由人为因素引起的，对船员专业技术水平、工作态度、工作经验和应急操纵能力采用便于区分的 5 分制打分法进行评价。论域为[0，5]，采用广义钟形图形表示其隶属度，隶属函数曲线如图 5 所示。

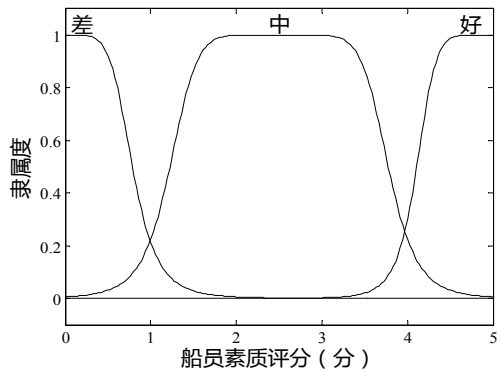


图 5 船员条件隶属函数

Fig.5 Crew conditional membership function

3 台风天气下航行渔船风险度综合评价模型

按照图 1 构建好的风险评价模型，利用 MATLAB 软件中的 Mamdani 型模糊推理系统，得到台风天气下航行渔船的风险综合评价结果。

（1）输入变量为风险评价系统中的各因子，定义输出变量的语言值为“危险度低”、“危险度较低”、“危险度一般”、“危险度较高”和“危险度很高”，用分明的三角形表示，如图 6 所示。各种模糊运算方法如下：

AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

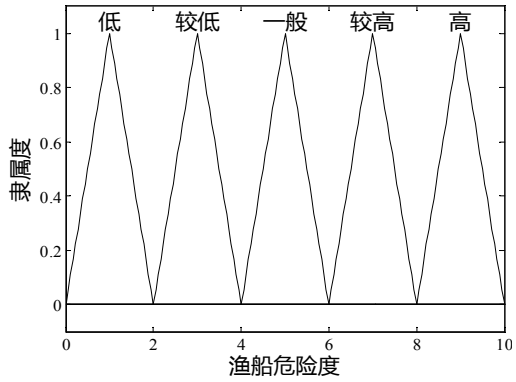


图 6 渔船危险度隶属曲线

Fig.6 Fishing boat risk affiliation curve

（2）根据相关统计数据和经验确定模糊规则，现将 W 子系统的 9 条规则给出，其中 input1 为气压下降量；input2 为渔船与台风距离；output1 为 W 子系统风险度评价值。输出的 W 子系统风险度评价曲线如图 7 所示。

- 1. If (input1 is 较危险) and (input2 is 很危险) then (output1 is 高)
- 2. If (input1 is 较危险) and (input2 is 危险) then (output1 is 较高)
- 3. If (input1 is 较危险) and (input2 is 较危险) then (output1 is 一般)
- 4. If (input1 is 危险) and (input2 is 很危险) then (output1 is 高)
- 5. If (input1 is 危险) and (input2 is 危险) then (output1 is 较高)
- 6. If (input1 is 危险) and (input2 is 较危险) then (output1 is 一般)
- 7. If (input1 is 很危险) and (input2 is 较危险) then (output1 is 很危险)

- 8. If (input1 is 很危险) and (input2 is 危险) then (output1 is 较危险)
- 9. If (input1 is 很危险) and (input2 is 较危险) then (output1 is 一般)

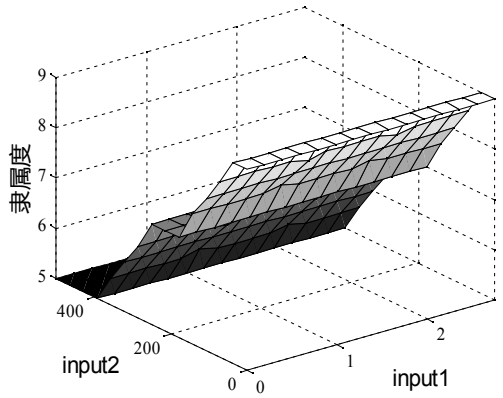


图 7 W 子系统风险度评价曲线

Fig.7 W subsystem risk assessment curve

（3）上一级评价子系统的结果都作为下一级评价子系统的输入值，在进行下一级评价时需要将上一级隶属函数的边界模糊化，如图 8 所示，四个子系统进行综合评价时，由于已经进行了解模糊计算，因此取平均值即为最终风险度评价值。将建好的模型保存，即可得到台风天气下航行渔船的风险综合评价模型。

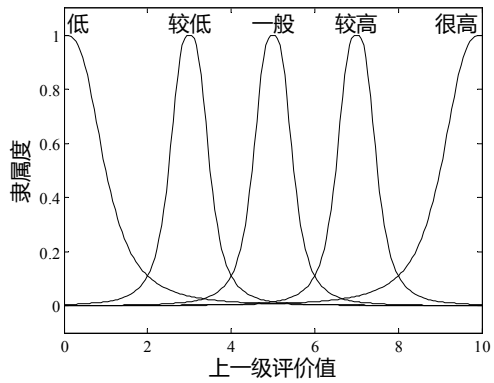


图 8 子系统风险隶属函数曲线

Fig.8 Subsystem risk membership function curve

（4）基于台风天气下航行渔船的风险综合评价模型通过 simulink 建立模糊控制器模型如图 9 所示，即可对任意天气情况下的渔船风险度进行定量评价。

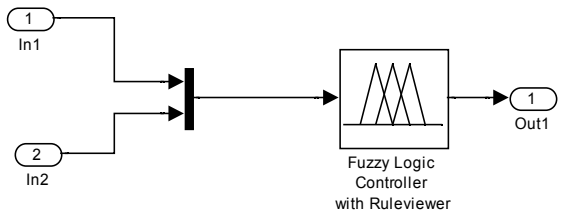


图 9 台风天气下渔船风险度模糊控制模型

Fig.9 Fuzzy control model of fishing boat risk in typhoon weather

4 模型验证

以较危险台风天气下基本位于同一海域的三艘不同渔船为例，采用控制变量法对模型的合理性进行验证，相关参数及其所求得的风险度如表 1 所示。

表 1 危险台风天气下渔船风险度表

Tab.1 Risk table of fishing boats in dangerous typhoon weather

	渔船 1	渔船 2	渔船 3
综合风险度	4.53	6.16	5.46
A1	0.04	0.03	0.1
A2	380	390	300
A3	5	4	7
A4	60	58	63
A5	2.2	2.1	2.3
自然条件风险度	6.66	6.27	6.97
B1	75	80	87
B2	2.3	3.4	3.1
B3	63%	71%	80%
航道条件风险度	3.24	4.86	4.97
C1	2.2	2.6	2.1
C2	2.7	2.3	2.5
C3	10	5	7
C4	1.1	2.4	0.7
船舶条件风险度	6.5	6.69	4.92
D1	4.7	2.1	2.1
D2	4.3	2.7	3
D3	4.1	1.3	2.7
D4	3.9	1.5	4.7
船员条件风险度	1.73	6,83	4.97

分析如下：

在台风天气影响下，三艘渔船均处于较危险的自然环境之中，由于处于同一海域，航道条件的危险度也基本一致。

（1）渔船 1 船龄较大船况较差，而且存在略微超载的情况，就船舶安全性来讲较为危险，但是所配船员整体素质高，应急操纵能力强，在台风天气下能够按照规定进行了望，使得渔船 1 的综合危险度有所下降，渔船航行较为安全；

（2）渔船 2 的船龄小船况好，但是超载极其严重，船员整体素质差，导致渔船航行危险度较高；

（3）渔船 3 的船龄船况一般，船员虽然相对缺乏经验但是态度良好，因此渔船航行的危险程度也能保持在一般的状态下，可以较为安全的航行。

通过以上算例分析，该台风天气下航行渔船风险度评价模型所得结果与航行经验一致，符合心理预期，能够较为合理地对台风天气下航行渔船的危险性做出评价。

5 结语

本文基于 FIS 提出了台风天气下航行渔船的风险度定量评价模型，可以对渔船的航行风险进行实时评价；利用 simulink 建立风险评估模型，在实际中只需要输入少量参数就能够快速地得出风险评价值，应用方便；可以作为基础模型为台风天气下渔船风险评价的计算机辅助实现提供支持。

同时该系统模型还要很多不完善之处。在渔船密度隶属函数确定方面，由于缺少数据，其合理性还有待验证；在进行子系统综合评价时未能考虑权重系数的分配；所取算例较少未能充分验证；在因子较多时 FIS 模型计算复杂效果不好；根据所求出的风险度，添加辅助决策系统可以使本模型功能更加完善。

参 考 文 献

[1] 陈森亮.新形势下大型船舶防台安全探讨[J].天津航海,2023,(04):8-9+19.
CHEN S L. Discussion on the safety of large shipsagainst typhoon under new situation [J]. Tianjin Navigation, 2023, (04): 8-9+19. (in Chinese)
[2] 路晓明.港航工程船舶防台安全实践与探讨[J].珠江水运,2022,(18):55-57.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2022.18.007.
Lu X M. Practice and discussion on the safety of harbour and navigation engineering ships against typhoon [J]. Pearl River Water Transport, 2022, (18): 55-57.DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy. 2022.18.007. (in Chinese)
[3] 黄福鑫.大连市渔港防御台风风险等级评估[J].黑龙江水利科技,2023,51(02):146-149.DOI:10.14122/j.cnki.hskj.2023.02.028.
Huang F X. Assessment of the risk level of defence against typhoons in fishing ports in Dalian [J]. Heilongjiang Water Conservancy Technology, 2023, 51 (02): 146-149.DOI: 10.14122/j.cnki. hskj. 2023.02-028. (in Chinese)
[4] 靳卫卫，肖强，罗教彬等.台风期船舶航行海区风险评估和避台规划[J].中国水运,2022,(06):30-32.
Jin W W, Xiao Q, Luo J B, et al. Risk assessment of sea area for ship navigation and typhoon avoidance planning during typhoon [J]. China Water Transport, 2022, (06): 30-32. (in Chinese)
[5] 何彩芬,徐彬,金靓等.宁波渔船避风港锚地风力特征分析及决策服务思考[J].中国水运(下半月),2017,17(10):116-118.
He C F, Xu B, Jin L, et al. Analysis of wind characterisation and decision-making service thinking of anchorage of Ningbo fishing vessel typhoon shelter [J]. China Water Transport (Second Half of the Month), 2017, 17 (10): 116-118. (in Chinese)
[6] 朱润资.琼州海峡客滚船舶防台对策研究[J].珠江水运,2021,(24):112-114.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2021.24.042.
Zhu R Z. Research on typhoon prevention measures for passenger and roll off ships in the Qiongzhou Strait [J]. Pearl River Water Transport, 2021, (24): 112-114.DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy. 2021.24.042. (in Chinese)
[7] 吴灿平，王亚郁，钟三新.惠州海港船舶防台存在问题和对策研究[J].珠江水运,2018,(23):107-110.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2018.23.052.
WU C P, WANG Y Y, ZHONG S X. Research on the problems and countermeasures of ship typhoon prevention in Huizhou harbour[J]. Pearl River Water Transport,2018,(23):107-110.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy. 2018.23.052. (in Chinese)
[8] 韩小燕,梁连松,董宇佳等.渔港防台风等级评估研究——以霞关一级渔港为例[J].海洋开发与管理,2020,37(05):57-62.DOI:10.20016/j.cnki.hykfygl.2020.05.012.
HAN X Y, LIANG L S, DONG Y J et al. Study on the assessment of typhoon protection level of fishing harbours - A case study of Xiaguan first-class fishing harbour[J]. Ocean Development and Management, 2020, 37(05):57-62.DOI:10.20016/j.cnki.hykfygl. 2020.05.012. (in Chinese)

[9] 王军,朱芍颐,王冠卓等.气象不确定下的船舶避台路径优化[J].大连海事大学学报,2021,47(02):56-62+70.
WANG J, ZHU S Y, WANG G Z et al. Optimisation of ship avoidance routes under meteorological uncertainty [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(02): 56-62+70. (in Chinese)
[10] Yingxian H, Xueyan D, Yanan Z, et al. T_GRASP: Optimization Algorithm of Ship Avoiding Typhoon Route[J]. Nanjing University of InformationScience Technology, Nanjing, 210044, China, 2023, 4(2): 85-95.
[11] Wenjun S, Yingni L, Hanbao C. Research on the mooring arrangement of a small ship against typhoon in harbor [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 621(1): 012080-.

作者简介：毛超进，硕士研究生，18868002483,浙江海洋大学，859723926@qq.com。
通信作者：艾万政，教授，15257070064，浙江海洋大学，aiwanzheng@126.com

船载液氢储罐热力学特性的数值仿真研究

江真珍，吴文锋*，刘冲，邓炎，沈禹禄
浙江海洋大学，浙江 舟山，316022

摘 要：当前，氢能因具有能量密度高、使用无污染等优势，成为我国实现碳达峰、碳中和目标的有力抓手。其中，液氢以其理想的质量储氢密度和体积储氢密度，成为了氢大规模储存或长距离运输的最优形式。然而，由于液氢储存温度极低，即使采取了保温措施，外界热量仍会传递到储罐内部，导致液氢沸腾和热分层现象。特别是在海上运输时，长时间的热泄露，给液氢的安全储运带来隐患。本文通过数值模拟的方法分析了外部热泄漏对低温液氢储罐内热力学行为的影响，包括储罐内流体的温度场、流场和气相空间压力变化情况。研究结果表明，在储罐顶部由于大量的热量积累，形成了高温区，并且靠近储罐碟形封头的区域由于受到顶部和封头热量的共同影响，形成了明显的自然对流，这对储罐气相区的换热具有促进作用，加强了热分层的形成。本文的研究为液氢储运系统的优化提供了理论基础和技术支持，对确保液氢的安全储运具有重要意义。

关键词:海上运输;液氢储罐;热泄露;温度分层

0 前言

随着氢能作为清洁能源在全球范围内的迅速发展，液氢储运技术的研究变得尤为重要。液氢以其高能量密度和零排放的特点，成为未来能源发展的重要方向。由于液氢储存温度极低，尽管采取了保温措施，外界热量仍会传递到储罐内部，导致液氢沸腾和热分层现象。大量液氢蒸发会导致储罐内压力迅速上升，并在流经阀门时产生气蚀现象。特别是海上长时间运输时，热量不断积累，给液氢的安全储运带来隐患。因此，研究漏热作用下低温液氢储罐的热力学特性，对于确保液氢的安全储运具有重要意义。长时间的漏热作用更加符合海上运输过程中的实际情况，对于预测液氢储罐日蒸发率具有重要意义。

自然对流在储罐内的形成是由于外部热量的渗入，使得被加热的液体向上移动并在蒸汽和液体

区域的顶部积聚，同时热能向下传递，形成液体的热分层现象。对静态液氢储罐内流体的分层行为，已有许多学者进行了广泛的研究。例如，Kanazawa[1]等人通过实验研究了高 Rayleigh 数的自然对流传热，以考察不同漏热位置对流体流动的影响。Li[2]等人通过实验研究了低温储罐真空条件下的热分层现象，结果表明保温失效丧失会导致严重的流体热分层，并且当低温储罐发生保温失效时，内部流场会发生剧烈的变化。Belmedani[3]等人对液氮罐对低温储罐侧壁界面热边界层中的传热现象进行了实验研究。

目前与液氢的相关实验数据较少，大多数研究集中于提出和开发理论模型来预测压力增长过程并预测储罐中液氢的热行为。Oh[4]等人通过数值模拟研究了液态氢储罐在不同热流密度和真空压力下的蒸发特性，发现随着真空压力的降低，蒸发速率显著增加，影响了储罐的绝热性能，特别是在低真空压力下热传导增强的情况下。Liu[4]等人研究了绝热层设计对液态氢储罐的热传导和蒸发率的影响，发现通过优化蒸气冷却屏障（VCS）的设计，可以显著减少热量传递，从而降低液态氢的蒸发损失，这对于氢气的储存和运输至关重要。Wang[6]等人使用改进的热多区模型研究了液态氢储罐的自增压过程，发现蒸汽温度和界面质量传输速率是影响增压速率的关键因素，此外，热泄漏和初始过热度也对增压过程有显著影响。 Lv[7]等人通过数值模拟分析了在晃动条件下，带有隔板的大型液态氢储罐的热力学行为，发现隔板能有效抑制液氢波动，但同时作为“热桥”加速了储罐内的增压和蒸发速率。晃动幅度、频率以及储存压力也显著影响了储罐的热力学特性。 Huerta and Vesovic[8]使用 CFD 建模研究了低温液体在储罐中的等压蒸发，开发了一个新模型，将热量分别引入气相和液相，能够准确预测蒸汽流动的动态、相间热传递以及蒸发速率，为改善低温储罐的设计和操作提供了有价值的见解。Shirai[9]等人研究了液态氢在垂直加热管内的传热特性，涵盖了从无沸腾到膜态沸腾的不同流动状态，发现随着热生成率的增加，传热系数上升，尽管质量流量有所减少。研究结果被用来开发一个预测液氢传热特性的模型，并与实验数据验证，表现出良好的一致性。

综上所述，低温储罐热行为已经在实验、理论分析和数值模拟中得到了广泛研究。然而，针对保温措施良好的储罐在持续漏热作用下的热力学特性的数值仿真研究仍然十分必要，这对预测储罐增压速率以及日蒸发率的预测具有重要意义。本研究将通过数值模拟方法，系统分析外部热泄漏对低温液氢储罐内热力学行为的影响，为优化液氢储运系统提供理论基础和技术支持，并为液氢储罐蒸发率的预测提供依据。为完成氢的气-液两相流的模拟，首先将流体视为密度与能量均随温度变化的粘性可压缩流体，并根据质量守恒、动量守恒、能量守恒构建控制方程，再通过流体体积法（VOF）构建体积因子输运方程实现自由液面的捕捉。对于湍流模型，选取传热计算结果较好的两方程模式标准 k− ε 湍流模型实现湍流现象的描述。储罐持续发生的漏热将导致液氢温度上升，当温度超过当前储罐工作压力对应的临界温度时，液氢蒸发为气态氢。分析了漏热对储罐内流体温度分布和压力的影响。本研究对深入了解液氢储罐的热物理过程具有重要意义，为液氢储罐在海上运输时的长时间储存提供理论依据。

1 数值模型建立

1.1 基本控制方程组

在液氢储罐内部，流体流动较为复杂，可以利用质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒律对流体体积微元分别建立连续性方程、动量方程和能量方程的微分形式进行描述。方程求解后可以获得包括流体速度、压力、 温度在内的参数关系式。

(1)连续性方程

对于具有连续性的流体来说，流体质点是处于连续状态且无缝隙占满流动的空间， 流体的质量保持守恒，控制体内部流体的变化量等于从控制体表面流入或者流出的流体的质量，所有的流动问题都满足质量守恒定律：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\sum_{i=1}^{3}\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=S_m \qquad (1)$$

式中 ρ ——流体密度（kg/m3）；t——时间（s）； v——控制体速度（m/s）；Sm——质量源项（kg/(m3 • s)）。

(2)动量方程

液氢储罐内气液两相流体的动量的时间变化率等于作用于系统上的外力的总和：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v)+\nabla\cdot(\rho vv)=-\nabla P+\nabla\cdot\{(\mu+\mu_t)[\nabla v+(\nabla v)^T]\}+\rho g+F_{VOL} \quad (2)$$

式中 P ——控制体压力（Pa）； μ——流体的动力粘度系数（Pa • s）； μ_t——流体的涡流粘度系数（Pa • s）； g——重力加速度（m/s2）； F_{VOL}——体积力。

(3)能量方程

液氢储罐气液两相微元体中能量的变化量等于进出微元体热量差与体积力对为微元体所做功之和：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\nabla\cdot[v(\rho E+P)]=\nabla\cdot(K\nabla T)+S_h \quad (3)$$

E——能量项（W/m3）； K ——流体的导热系数（W/(m • K)）； Sh——能量源项

本文将上述基本控制方程中的源项均通过用户自定义函数（UDF）引入模型，并作用与整个计算域。

1.2 湍流模型

湍流是一种空间上不规则、时间上无秩序的非线性流体运动。低温环境下的湍流十分复杂，想要准确模拟液氢储罐在晃荡激励下的复杂流场需要选取合适的湍流模型。Realizablek-ε模型考虑了流体流动的各项异性问题、湍流漩涡和近壁区域的处理，在模拟弯曲壁面流动时不会出现失真问题，结合本文研究的储罐特点和弯曲壁面的问题，选用 Realizablek-ε模型作为湍流模型。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\nabla\cdot(\rho v\varepsilon)=\nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_e}\right)\nabla\varepsilon\right]+\rho C_1 S\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{v\varepsilon}}-C_{1x}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\epsilon}G_b+S_c \quad (4)$$

公式中，$C_1=max\left[0.43,\frac{\eta}{\eta+5}\right]$，$\eta=S\frac{k}{e}$，$S=\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$。

1.3 两相流模型

本文选用流体体积法来捕捉流体的运动。VOF 是一种描述系统内各种流体体积分数来模拟一种及以上互不相溶流体的方法。该方法通过引入一个值为 1 或 0 的函数来表示单个控制体内某种流体的体积分数，其中 0 表示控制体内不含有该流体，1 则表示流体布满控制体内部。

$$\alpha_l+\alpha_v=1 \quad (5)$$

其中，α_l和α_v指的是液体和气体的体积分数

1.4 物理模型的建立

本文使用液氢中科富海设计制作的 30L 液氢存储充装测试平台作为仿真对象。储罐的简图如图 1 所示，该储罐为卧式储罐，由一个高度为 480mm，直径为 270mm 的圆柱体，以及高度为 65mm 的碟形封头组成。由于本研究主要关注漏热对储罐内部的影响，因此简化了储罐的结构，忽略了储罐连接件以及加注管等与本研究无直接联系的部分，储罐保温层结构等也被忽略，对于热边界条件将在后续详细说明。为尽可能详细了解储罐内部温度场的分布，在储罐气相区设置了 9 个监测点，在液相区设置了 1 个监测点。图 1 显示了传感器的位置。

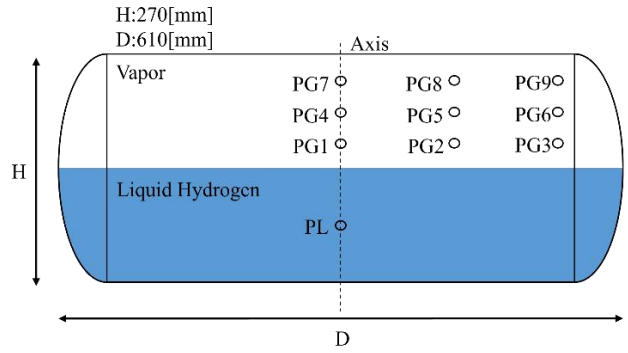


图 1 低温液氢储罐

1.5 模型验证

为验证模型的可靠性，在储罐中使用液氮进行了静态自加压试验，并将压力增长曲线与数值模拟结果进行了比较。如图 2 所示，模拟结果与实验数据的偏差一般在 10% 以内，模拟得到的压力曲线与实验结果比较吻合。

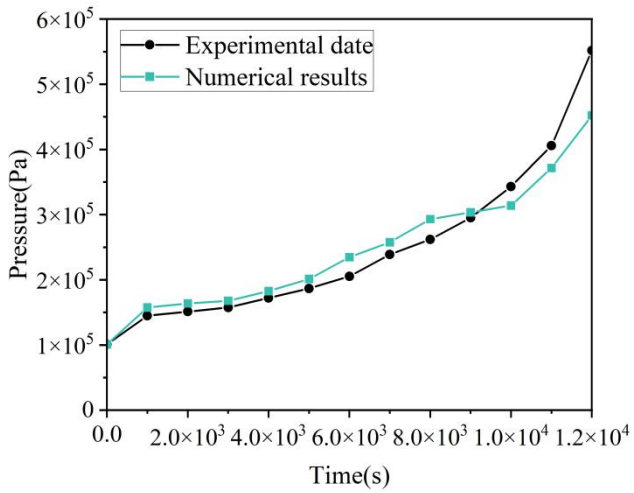


图 2 液氮模拟结果与实验数据的比较

1.6 边界条件与初始化

由于储罐保温结构复杂，本文通过热传导和对流复合传热公式计算出储罐的传热系数。

$$\frac{1}{U}=\frac{1}{h_1}+\frac{x}{k}+\frac{1}{h_2} \quad (6)$$

其中，h_1 为外壁与空气之间的对流换热系数，k 为保温层的导热系数，h_2 为液氢与内罐壁之间的对流换热系数。初始压力设为 0.1MPa，初始温度为当前压力下液氢的饱和温度 20.43K。 储罐初始装载率为 50%，剩余空间充满气态氢。

2 数值实现

根据所建立的物理模型，利用 Fluent Meshing 软件对液氢储罐计算域进行非结构性网格划分。考虑到热量进入液氢储罐后，在壁面产生较大的温度梯度，故在靠近壁面的网格进行加密处理。同时考虑到气液两相的蒸发作用，故在气液界面处同样进行细化处理。利用 VOF 方法处理液氢储罐气液两相问题，主相为液相，第二相为气相。物性参数数据，如质量、饱和温度、饱和压力等来自物性查询软件 REFPROP v10.0。不同温度下的物性参数如表 1 所示。通过对不同温度下的物性参数进行多项式拟合，将得到的多项式输入到求解器中作为计算依据。

表 1 不同温度下气态氢的物性参数

Temperature (K)	Cp (J/kg·k)	Therm.Cond. (W/m·k)	Viscosity (Pa·s)
21	11.818	0.017887	1.0359e-6
25	11.138	0.020755	1.2662e-6
29	10.869	0.023632	1.4748e-6
33	10.719	0.026460	1.6700e-6
37	10.624	0.029225	1.8552e-6
41	10.559	0.031923	2.0321e-6
45	10.516	0.034558	2.2020e-6
49	10.488	0.037136	2.3659e-6
53	10.476	0.039663	2.5244e-6

对于液体的密度采用 Boussinesq 假设近似处理，气体密度采用理想气体模型。本文采用瞬态计算，计算方法选择压力-速度耦合计算。SIMPLE 方法用于耦合压力场和速度场，并加强连续性，采用二阶迎风格式对动量和能量的离散格式进行处理，对于湍流动能和湍流耗散率，采用一阶迎风格式。计算时间步长为 0.05s，将质量和动量的残差值设置为 10-3，而能量残差值设置为 10-6。

3 结果与讨论

由于液氢在不同压力下的饱和温度不同，发生相变的温度不同，所以本文对于饱和温度的处理和前文提到的物性参数的处理类似，采用了多项式拟合的方法得到不同压力下的液氢饱和温度函数。本文初始压力为 0.1MPa，气态氢温度为初始压力下对应的饱和温度 20.43K，液态氢温度为 20.40K。

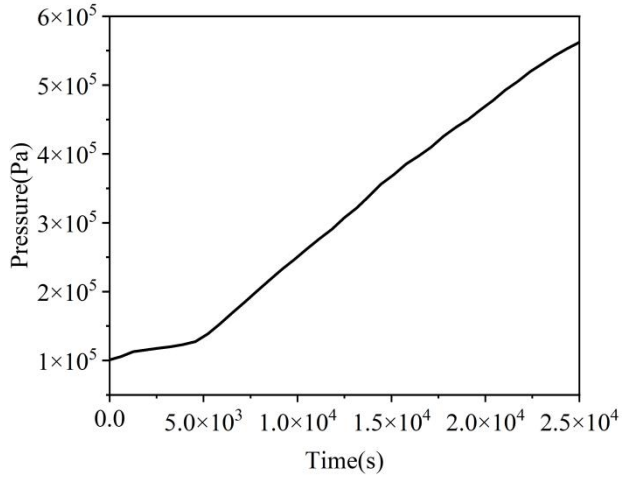
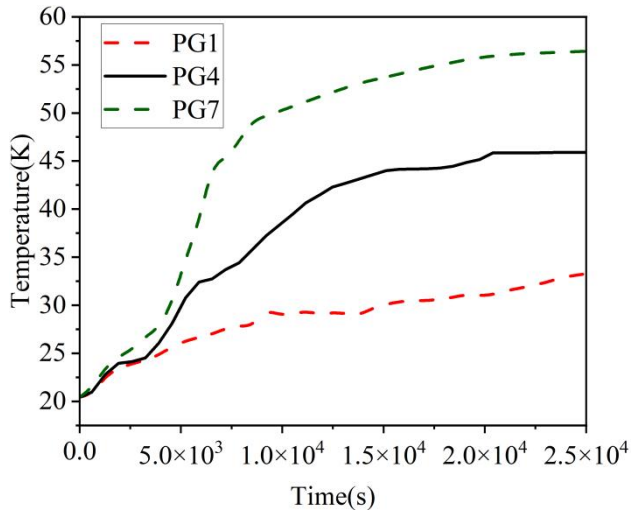
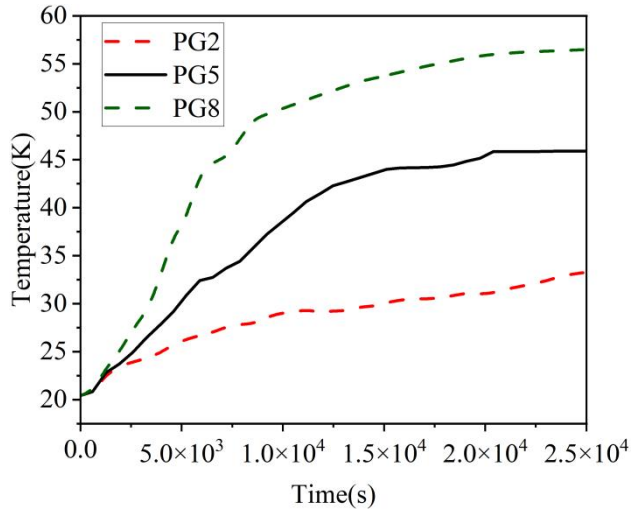


图 3 气相空间压力随时间变化

仿真计算时，在储罐对称轴上，位于气相空间的中点设置了压力监测点，获取的气相空间压力数据如图 2 所示。可以看出，随着漏热的进行，导致液态氢出现蒸发效应，进而导致压力上升。在初始阶段，液氢储罐内压力上升缓慢，这是因为开始时液态氢处于过冷阶段，进入液氢的热量都用来使液氢升温，而且气液交界面的温差仅为 0.002K，此时液氢仅存在细微的蒸发现象。当液氢温度加热到饱和温度时，此时液氢的界面处甚至出现沸腾现象，加强和气相空间的换热，导致压力快速升高。

为监测气相区温度的变化，本文在气相空间设置了 9 个监测点，相关温度分布如图 3 所示。通过理论计算将储罐漏热简化为单位面积上的热通量作为边界条件加载到储罐罐壁，根据储罐对称的结构，在仿真计算中将储罐中轴线设置为对称边界条件，使得数值计算在不影响计算结果的情况下减小计算量，加快计算速度。





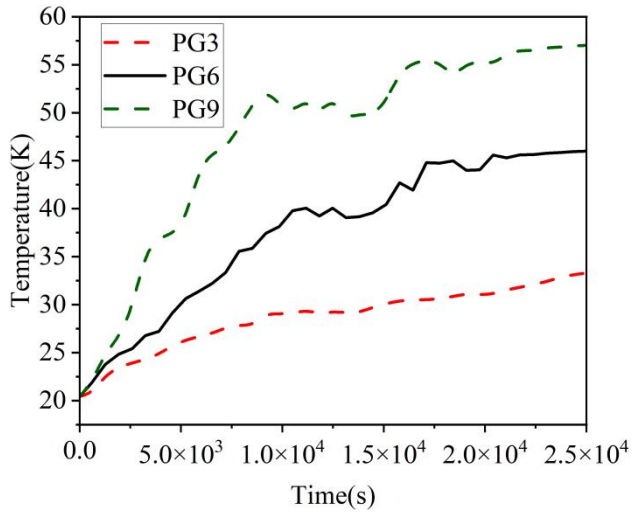


图 3 气相监测点温度变化

从图 3 可以看出处于同一垂线的监测点存在明显的温度差异。监测点 PG1，PG4，PG7 位于储罐中间，受到两侧的热流影响较小，故温度上升的幅度相对于其余垂直分布的监测点较小。对于监测点 PG4，PG7，出现热分层的时间存在差异，监测点 PG7 在 2500s 时就出现了可观测的热分层现象，温差相对于监测点 PG4 达到了 1.217K，而此时对于监测点 PG1，在仿真进行到 10000s 时温度从

29.555K 下降到了 28.987K，这是由于气液界面出现了核态沸腾现象，波动的液氢对该点的冷却作用。

对于监测点 PG2，PG5，PG8，这 3 个监测点的温度变化趋势与 PG1，PG4，PG7 相似，可以解释为，此处受到罐壁附近形成的热对流而产生的热浮力影响较小，故而整体温度上升趋势和监测点 PG1，PG4，PG7 类似。可以看到探测点 PG2 在整个计算过程中并未出现温度下降的情况，这可以说明在仿真过程中，并没有出现明显的沸腾现象。与监测点 PG4，PG7 不同的是，监测点 PG5，PG8 在 1920s 时就出现了明显的温度差异，此时相对于监测点 PG5，PG8 的温度达到了 24.917K。

对于监测点 PG3，PG6，PG9，由于这 3 个监测点比较靠近罐壁，在热量的输入作用下和罐壁处自然对流的影响，受到热浮力的驱动，热量被带到储罐顶部并聚集，监测点 PG9 测到了储罐中的最高温度 57.004K 。类似的，受到热对流的影响，监测点 PG6 和 PG9 在热分层的发展过程中温度产生了明显的波动。从图中可以明显的看到，监测点 PG6，PG9 出现热分层的时间早于之前分析的几个探测点，这是由于该位置的探测点除了受到储罐顶部的加热，还受到了储罐侧面封头加载的热量的影响。基于以上分析，可以得出结论，在靠近储罐封头位置受到漏热的影响最大，温度变化有明显的波动，并且升温幅度最大。

综合对比以上监测点的结果可以获得储罐气相区整体的温度分布情况，储罐顶部由于大量的热量积累，在储罐顶部形成了高温区。热量从顶部开始向下传递，越靠近储罐顶部获得的热量也越多，较早出现热分层。此外，由于靠近气液界面，监测点 PG1，出现了温度下降的情况，可以推测在气液界面附近可能会有更多的温度波动。

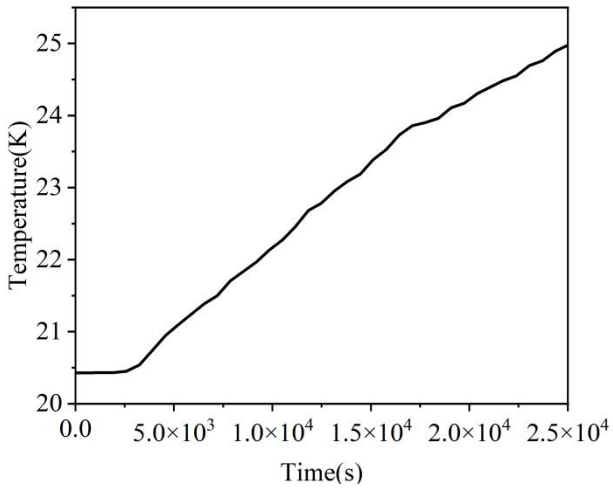


图 4 液相监测点温度变化

由于液氢气化潜热达到了 448760J/kg，而本次数值仿真单位时间加载的热量远远小于液氢的气化潜热，在仿真的过程中液氢整体的温度不会发生很大变化，所以在液相区设置监测点时只对储罐液相区的中间位置的温度数据进行了记录。图 4 显示了液相区监测点测得的温度数据。温度整体呈现上升的趋势，到仿真结束时达到 24.980K 的最高温度。对于仿真前期，液态氢温度上升较慢，可能的原因是，此时气相区还没有形成明显的热分层，从气相区传递到液相区的热量较少，此时对于液相区温升的主要贡献来自于加载到底部的热量。随着气相区热分层的不断发展，液相区的温度也逐渐升高，另外由于压力的不断升高，氢的饱和温度也在不断升高， 因此液态氢可以在超过 20.43K 时仍不发生气化。根据以上分析可以看出，液氢在储罐中不仅受到来自罐壁的热量，气相区也在不停的向其输送热量，随着热分层的发展，由气相区向下输送热量的效率也越高。

4 结论

本研究通过数值模拟深入探讨了漏热作用下低温液氢储罐的热力学特性，揭示了储罐内热量传递和液氢沸腾的关键机制。研究结果表明，外部热量的持续渗入会导致储罐内流体的显著温度分层，储罐顶部形成高温区，并且靠近储罐碟形封头位置的区域受到了顶部和封头热量的共同影响，形成了明显的自然对流。这种对流增强了气相区的换热过程，加速了液氢的蒸发和压力上升。

随着漏热的进行，液氢在储罐内经历了从缓慢蒸发到气液界面的沸腾现象。数值模拟显示，在储罐顶部和侧壁附近区域的温度上升最快，并出现了明显的温度梯度和压力变化。研究还表明，不同位置的监测点显示出热分层发展的不同阶段和特征，靠近储罐顶部和封头的区域热量积累最为明显，温度波动也最大。

此外，研究发现液氢储罐的保温性能和储罐内的流体动量、能量传递密切相关。使用合理的保温材料和优化的结构设计，可以显著减缓储罐内部的热量积累，降低蒸发率，从而提高液氢的储存稳定性和安全性。

这些发现对于理解液氢储运过程中的热力学行为具有重要意义，特别是在长时间海上运输的情境下。本研究结果为液氢储罐的设计和操作提供了理论基础和技术支持，有助于提高液氢储运的安全性和效率。未来的工作可以进一步探讨不同保温材料和技术对热量传递的影响，优化储罐结构以更有效地控制内部热力学变化。同时，通过实验验证和改进数值模型，可以更准确地预测液氢储罐在不同运输条件下的热力学行为，为液氢的大规模应用提供更可靠的技术保障。

参考文献

[1] Kanazawa T., Kudo K., Kuroda A., Tsui N. (2004) Experimental study on heat and fluid flow in LNG tank heated from the bottom and the sidewalls. Heat Transfer,33(7):417-30.

[2] Li X., Xie G., Wang R. (2010) Experimental and numerical investigations of fluid flow and heat transfer in a cryogenic tank at loss of vacuum. Heat and mass transfer,46:395-404.

[3] Belmedani M., Belgacem A., Rebiai R. (2008) Analysis of natural convection in liquid nitrogen under storage conditions. Journal of Applied Sciences,8(14):2544-52.

[4] Oh S.J., Kwon J., Jeon K.S., Yoon J.H. (2024) A numerical analysis study on the characteristics of evaporation in liquid hydrogen tank with vacuum layer according to changes in heat flux and vacuum pressure. International Journal of Hydrogen Energy,50:542-57.

[5] Liu Y., Zhou P., Jeong B., Wang H. (2023) Design and optimization of a type-C tank for liquid hydrogen marine transport. international journal of hydrogen energy,48(89):34885-96.

[6] Wang H., Wang B., Pan Q., Wu Y., Jiang L., Wang Z., et al. (2022) Modeling and thermodynamic analysis of thermal performance in self-pressurized liquid hydrogen tanks. International Journal of Hydrogen Energy,47(71):30530-45.

[7] Lv H., Chen L., Zhang Z., Chen S., Hou Y. (2024) Numerical study on thermodynamic characteristics of large-scale liquid hydrogen tank with baffles under sloshing conditions. International Journal of Hydrogen Energy,57:562-74.

[8] Huerta F., Vesovic V. (2021) CFD modelling of the isobaric evaporation of cryogenic liquids in storage tanks. International Journal of Heat and Mass Transfer,176:121419.

[9] Shirai Y., Shiotsu M., Matsumoto T., Kobayashi H., Naruo Y., Nonaka S., et al. (2021) Heat transfer characteristics of liquid hydrogen flowing inside of a vertical heated pipe under quasi-stationary heat input. Cryogenics,113:103230.

作者简介：江真珍（1999-），女，汉族，浙江温州人，硕士研究生，主要研究：交通运输专业交通安全与环境方向。Tel: 15057769736, Email: jiangzhenzhen@zjou.edu.cn

基金项目：2024 年度舟山市重大产业科技攻关项目 2024C03009

通讯作者：吴文锋，副教授，13868238146，wuwf@zjou.edu.cn

基于 ORB-SLAM3 的水下机器人定位方法研究

颜金龙，应泽光，侯舟波，徐鹏

（浙江国际海运职业技术学院，舟山，316021）

摘　要：针对恶劣的水下环境（光照、水流、浑浊度）可能导致机器人难以获得高质量的图像信息用于视觉 SLAM，从而影响定位精度的问题，本文采用图像增强算法来改善图像的对比度和清晰度，再导入 ORB-SLAM3 算法进行位姿估计。实验结果表明：CLAHE 算法比 HE、gamma 修正和 MSR 能够更有效地提高水下图像的对比度、增加图像信息，并有助于特征点匹配；ORB-SLAM3 在水下 SLAM 中表现良好，ORB-SLAM3+CLAHE 的改进算法能够有效提高系统的定位精度和鲁棒性；当 CLAHE 的参数 ClipLimit 设置在 0.01~0.03 范围内时，改进算法在 Harbor 场景中表现较好。

关键词：水下机器人；图像增强；ORB-SLAM3；CLAHE

引言

水下机器人作为一种先进的智能化海洋装备，其在海洋资源勘探与开发、深海探测与海洋研究、水下考古与文化遗产保护等领域有着广泛的应用。由于水下环境容易导致 GPS 无线电信号的衰减和失效、惯性导航方法误差累积增大等问题，要想精确定位机器人在水中的位置并完成导航任务较为困难。

SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）技术在水下的应用研究是当前机器人领域的研究热点。2017 年，Hashemi 等人，利用惯性测量单元（IMU）、多普勒速度计程仪（DVL）、深度传感器和地球磁场图，结合离散扩散卡尔曼滤波器开发的导航算法有效降低了漂移误差[1]；2000 年，Williams 等人通过安装在机器人上的声呐对水下环境进行扫描，并提取地图点特征，实现水下地图构建和机器人定位[2]；2021 年，Vargas 等人提出了一种利用声学、惯性和深度传感器的水下环境视觉 SLAM 方法，实验表明该方法在受控、非受控和现场环境中都具有更高的鲁棒性[3]。

相较于声呐、多普勒计程仪（DVL）等传感设备，基于视觉传感器的 SLAM 方案具有布置简单、成本低、鲁棒性好等优点。目前常用的 SLAM 算法主要针对陆地或空中环境开发，水下的光线条件复杂多变，低光照、散射等现象会导致图像质量下降，水中的悬浮物、生物活动等干扰因素增加了特征匹配的难度，从而导致定位误差的增大。

针对以上问题，本文采用图像增强算法对数据集图像进行预处理，提高图像的对比度和清晰度，再用 ORB-SLAM3 算法来实现水下机器人实时定位和地图构建，实验证明该方案能有效提高 SLAM 系统的定位精度。

1 水下视觉 SLAM 框架

在众多视觉 SLAM 算法中，ORB-SLAM3 以其高效、精准的性能在视觉 SLAM 领域脱颖而出。本文基于 ORB-SLAM3 算法来实现水下机器人的定位、地图构建等功能，算法框架主要包括跟踪、局部地图构建和回环检测三个线程[4]，如图 1 所示。

跟踪线程负责在图像中提取 ORB（Oriented FAST and Rotated BRIEF）特征点，通过特征匹配获取运动信息，并使用光束法平差（Bundle Ajustment）计算姿势，再利用关键帧的共视图和局部地图进行相机位姿的进一步优化，并决定是否插入新的关键帧。

局部地图构建线程负责插入新的关键帧，剔除冗余的地图点，并在共视图中为新关键帧中的特征点搜索新的对应关系点来创建新地图点，再用局部 BA 重新优化相机当前位姿周围的局部地图，最后剔除多余的关键帧。

回环检测线程负责在每个新关键帧中搜索是否出现回环，如果检测到循回环，通过计算相似变换（Sim3/SE3）得到回环中累积的漂移量，并利用光束法平差对回环两边进行对齐、合并重复点等操作，最后执行全局 BA 和地图更新。

相比于 ORB-SLAM 之前版本，ORB-SLAM3 新增了 ATLAS 地图集，它构建了一个独特的 DBoW2 关键帧数据库，可以对多个不相连的地图进行管理，地图集中仅有一个地图处于激活状态，其余均处于未激活状态。所有地图均可参与重新定位、回环检测和地图合并等，从而进一步提升了地图构建和定位精度。

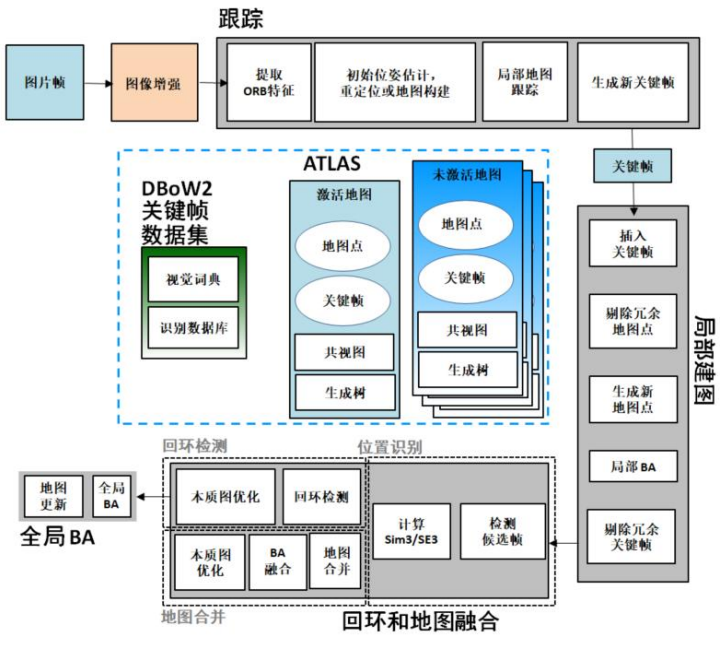


图 1 基于 ORB-SLAM3 的算法框架

2 图像增强算法

由于光线在水中传播时存在严重的衰减和散射现象，导致水下机器人采集到的图像质量较差，普遍存在对比度低、纹理信息缺失等问题。因此，在图形传入 ORB-SLAM3 之前采用图像增强算法进行优化，提高图像的对比度和细节信息。

直方图均衡化（Histogram Equalization，HE）是一种经典的水下图像增强方法，它可以将图像直方图从狭窄的单峰直方图转换为均匀分布直方图[5]。

假设水下图像为 $\{x\}$，N 表示图像的像素点数目，n_i 表示灰度 i 出现的次数，这样图像中灰度为 i 的像素的出现概率是：

$$p_x(i) = \frac{n_i}{N}, O \le i < L \tag{1}$$

L 是图像的灰度数（通常为 256），$p_x(i)$ 实际上就是归一化后的图像直方图，。

把对应于 p_x 的累积分布函数，定义为:

$$CDF_x(i) = \sum_{j=0}^{i} p_x(j) \tag{2}$$

再将累计概率映射到新的灰度级上，从而实现灰度级的重新分配，映射函数的计算公式如下:

$$S_i = (L-1)CDF_x(i) = \frac{L-1}{N}\sum_{j=0}^{i} n_i \tag{3}$$

由于水下环境昏暗、水体浑浊，相机采集的图像模糊不清，其直方图的灰度分布比较集中。通过直方图均衡化处理后图像的灰度级被均匀拉开，清晰度有所提高，如图 2 所示。但是，处理后的图像右侧出现高亮区域，细节信息丢失，这是由于直方图均衡化后图像的灰度级减少所导致的对比度不自然地过分增强。

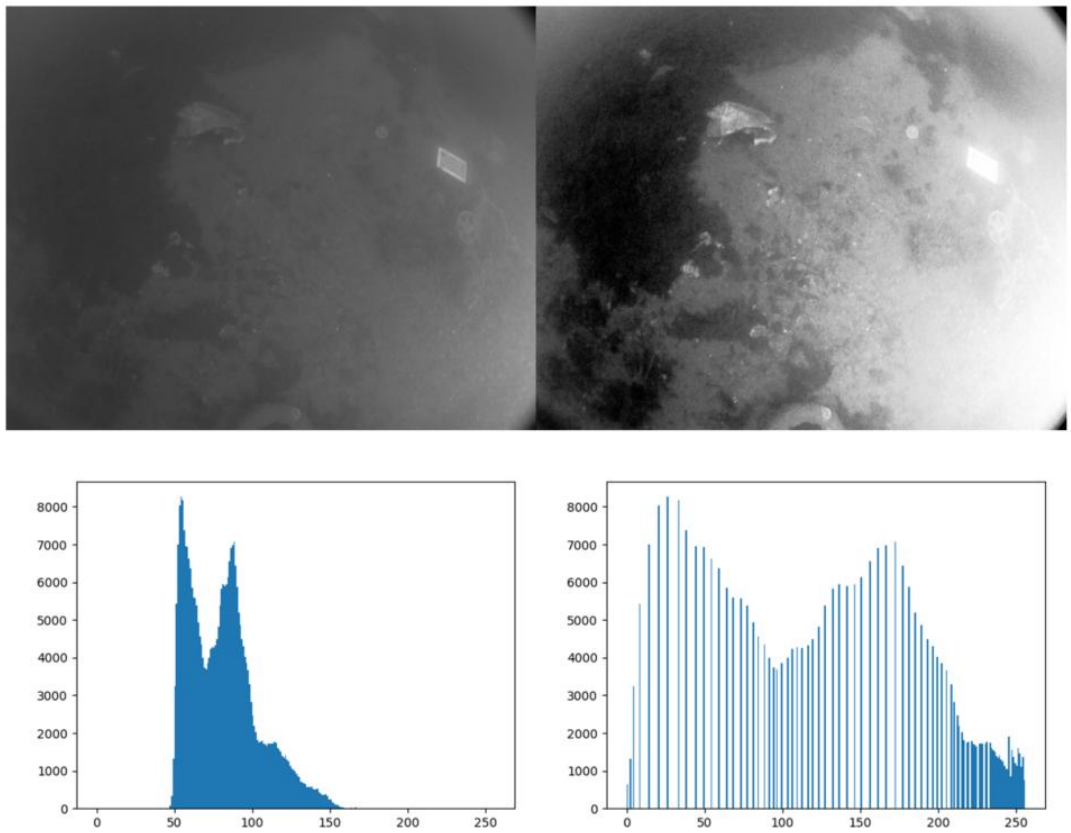


图 2　直方图均衡化前后对比图

自适应直方图均衡化（Adaptive histogram equalization，AHE）将图像分为多个小区域，通过计算局部直方图并重新分布亮度来改变图像的对比度，由于是对图像的局部区域进行处理，AHE 能够根据不同区域的特性进行自适应调整，避免了全局均衡化可能带来的过度增强或失真问题，它适用于提高局部对比度和增强图像每个区域的边缘清晰度[6]。对于低对比度区域，它的局部直方图非常集中，AHE 处理可能会导致噪声被放大。

限制对比度自适应直方图均衡化（Contrast Limited AHE，CLAHE）综合了对比度限制方法和自适应直方图均衡化，对直方图中超过设定阈值的灰度级进行裁剪限制，从而使映射的结果变得平缓，避免过度增强噪声点，使图像不仅具有良好的局部对比度，还能保持较好的整体细节和连续性，如图 3，4 所示。

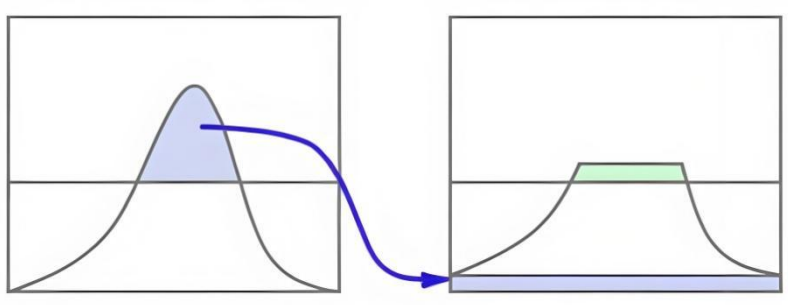


图 3 限制对比度自适应直方图均衡化（Contrast Limited AHE）

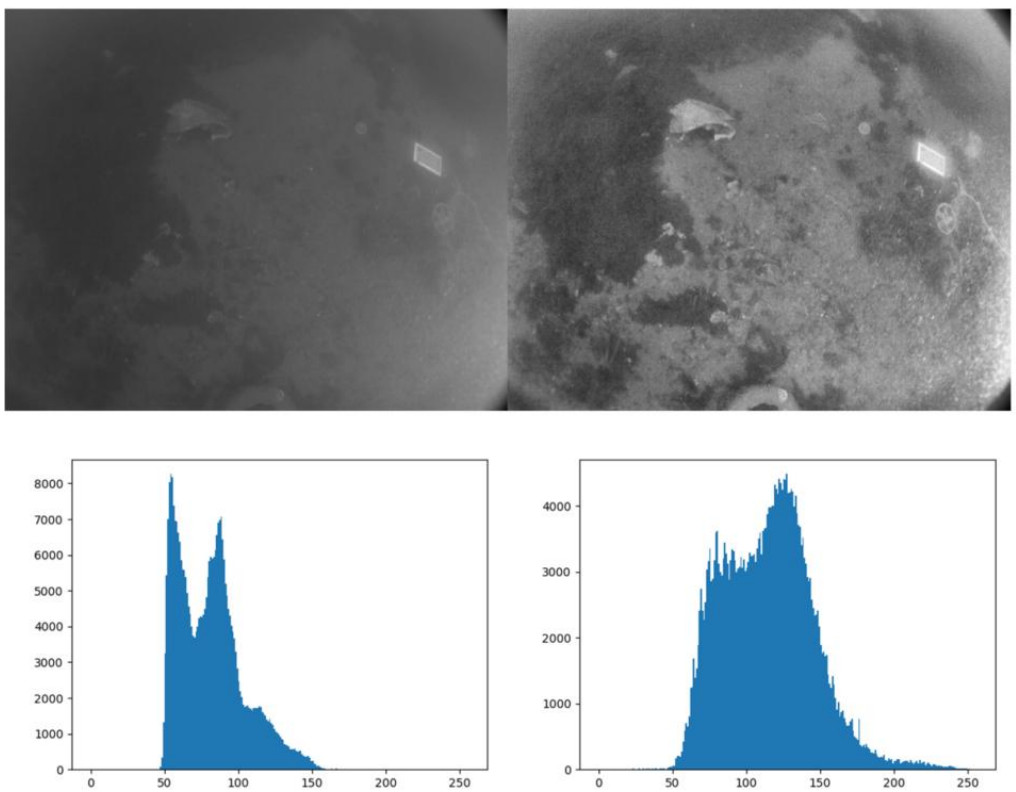
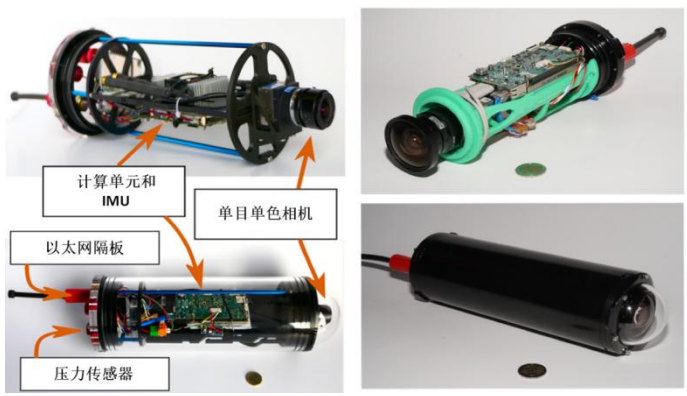


图 4 CLAHE 处理前后对比图

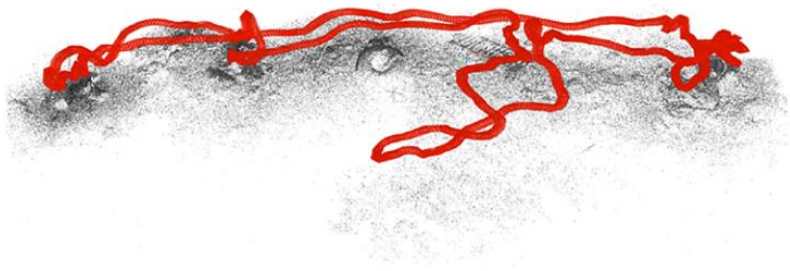
3 实验结果与分析

3.1 公开数据集选择

实验选用 AQUALOC 数据集对算法进行水下 SLAM 性能测试。该数据集的采集工作由远程操作水下机器人（ROV）完成，机器人配备了单目单色相机、低成本惯性测量单元（IMU）、压力传感器以及计算单元，均安装在密封外壳中,如图 5 所示。数据集包含三个不同场景，分别是较浅水域的港口（Harbor）、270 米水深考古遗址（First archeological site）和 380 米水深考古遗址（Second archeological site）[7]。多个传感器的测量结果由计算单元同步记录，根据所有采集的数据创建 17 个序列，以 ROS 包的形式和原始数据形式提供。对于每个序列，还使用 SFM 库进行离线轨迹计算，以便作为基准与 SLAM 计算结果进行比对。



（a）



（b）

图 5 AQUALOC 数据集：(a)ROV 结构 (b)Harbor#02 序列轨迹

3.2 图像增强算法对比

为了筛选出最适用于水下图像算法，分别对 HE、CLAHE、gamma 修正、多尺度 Retinex（MSR）四种常用的图像增强算法进行对比。如图 6 所示，从数据集的 Harbor 场景的#02 序列中挑选 4 张具有代表性的图片进行对比实验。其中，图片 1 水体较为清澈，童车、金属板等沉积物清晰可见；图片 2 亮度降低，海床上的沙石和海草具有较丰富的纹理信息；图片 3 水体浑浊，能见度低，两侧亮度不均匀；图片 4 亮度最小，对比度最低。

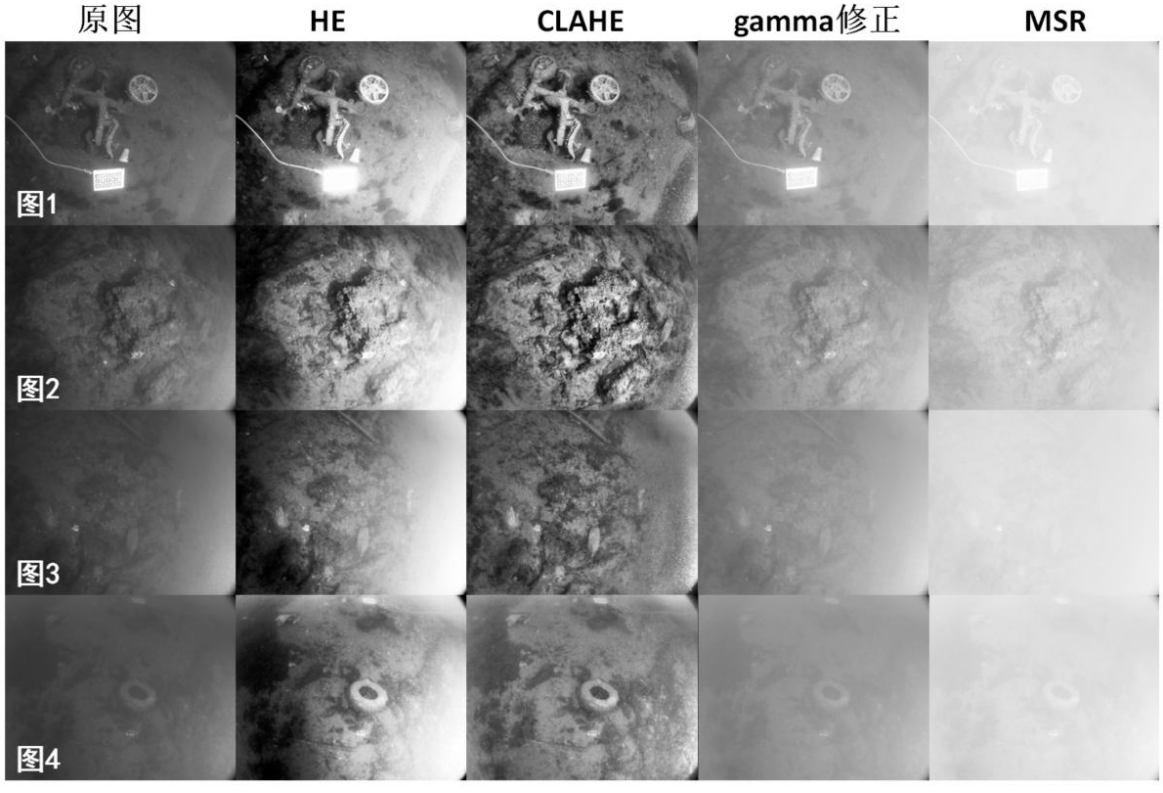


图 6 不同算法图形增强结果对比

根据图 6、图 7 的对比结果可知，经 CLAHE 算法处理的水下图像对比度均匀、直方图连续合理，有效提高了画面质量。HE 算法虽然能提高对比度和亮度，但是它是对整幅图的所有像素都进行变换，会导致部分信息丢失，比如图片 1 中的金属板、图片 2 右侧的高亮区域，从直方图也能看出，直方图均衡化后四张图的高光区和阴影区均有较多像素分布，这些像素将很难用于后续的特征点提取和匹配。gamma 修正和 MSR 两种算法的效果类似，它们提高了图形的整体亮度，使直方图整体向右移

动，但是并未对分布范围做均衡化处理，MSR 算法处理后高峰更加集中，图像呈现发白的现象。

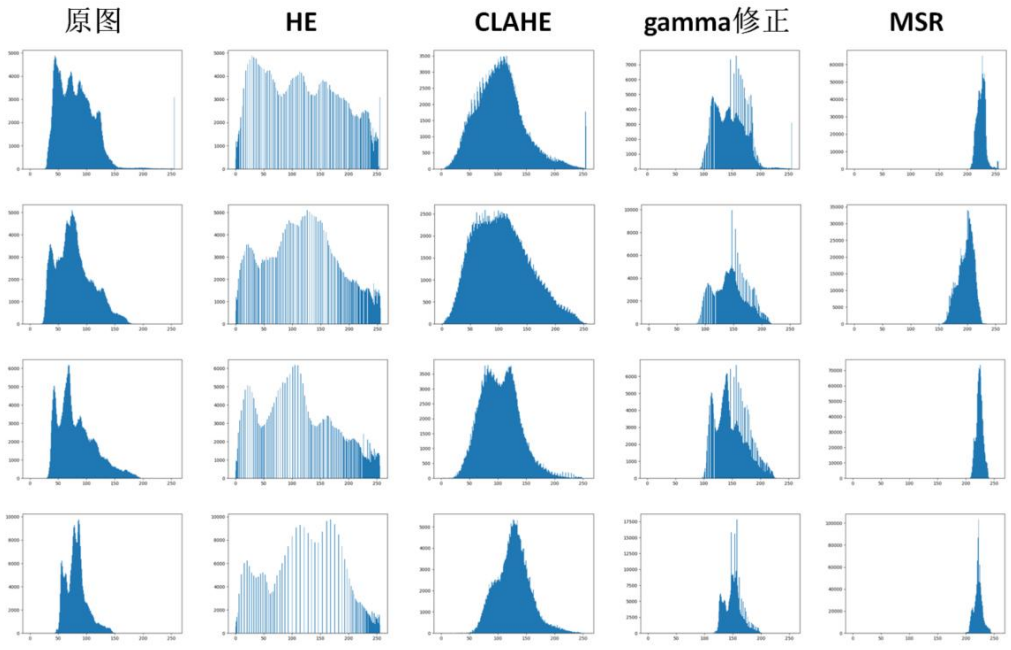


图 7 不同算法直方图对比

表 1 列出了各图像的信息熵值，信息熵越大，表示图像包含的信息量也越大。gamma 修正和 MSR 的信息熵均低于原图，这反映出这两种算法对水下图像的增强能力是有限的；HE 算法处理后的图片信息熵最大，CLAHE 算法可以通过调节对比度限制（ClipLimit）和块大小（BlockSize）来控制信息熵增幅。

表 1 不同算法信息熵对比

序号	原图	HE	CLAHE	gamma 修正	MSR
图 1	5.349	**6.333**	5.420	5.129	4.844
图 2	5.017	**5.783**	5.340	4.742	5.767
图 3	4.289	**5.202**	4.728	3.944	4.594
图 4	3.650	**5.375**	4.800	3.374	4.822

表 2 所示为增强后的图片相对于原图的峰值信噪比（PSNR），PSNR 值越高，图像质量越好，失真越小。HE 算法的峰值信噪比小于 CLAHE，说明 HE 算法在提高图像对比度的同时也放大了噪声，CLAHE 能更好地在提高对比度和保留原图信息两者之间达到平衡。此外，从特征匹配结果来看，CLAHE 更有利于 ORB 特征点的提取，特征点的误匹配也更少，有助于机器人的准确定位，如图 8 所示。因此，在后续的实验中，为 ORB-SLAM3 的跟踪线程添加图像增强模块，并选择 CLAHE 作为该模块算法对输入图像进行预处理。

表 2 不同算法 PSNR 对比

序号	HE	CLAHE	gamma 修正	MSR
图 1	11.945	**17.240**	11.471	4.911
图 2	11.764	**15.396**	11.468	6.556
图 3	12.161	**18.624**	11.500	4.960
图 4	10.755	**14.369**	11.270	5.190

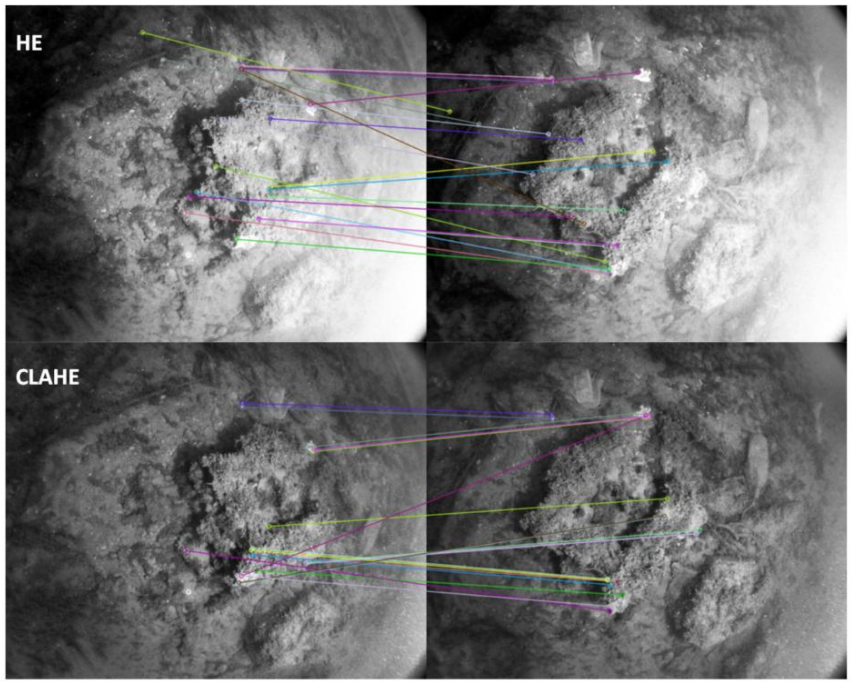


图 8 ORB 特征点匹配对比

3.3 水下 SLAM 实验

从 AQUALOC 数据集的 Harbor 场景选取#01、#03、#05 序列作为测试对象，分别对改进算法的水下 SLAM 效果、CLAHE 参数对定位精度的影响进行对比实验，并利用 EVO 工具分析实验结果。

图 9 所示为两种算法的关键帧位姿轨迹对比，从图中可以看出，ORB-SLAM3 在水下环境也有不错的表现，尤其在 Harbor#01 序列中。由于 ROV 的运动轨迹平缓，两算法均能较好的完成实时定位和地图构建，运动轨迹与 groundtruth 高度重合。而在 Harbor#03 序列中，当机器人运动到轨迹右侧位置时多次大幅度转向，导致 ORB-SLAM3 的定位误差增大，甚至可能出现跟踪丢失的情况，如图 10 所示。ORB-SLAM3+CLAHE 的改进算法在频繁转向时的定位精度较原算法有所提升，但由于误差累计，在接近终点位置时逐渐偏离目标位置。

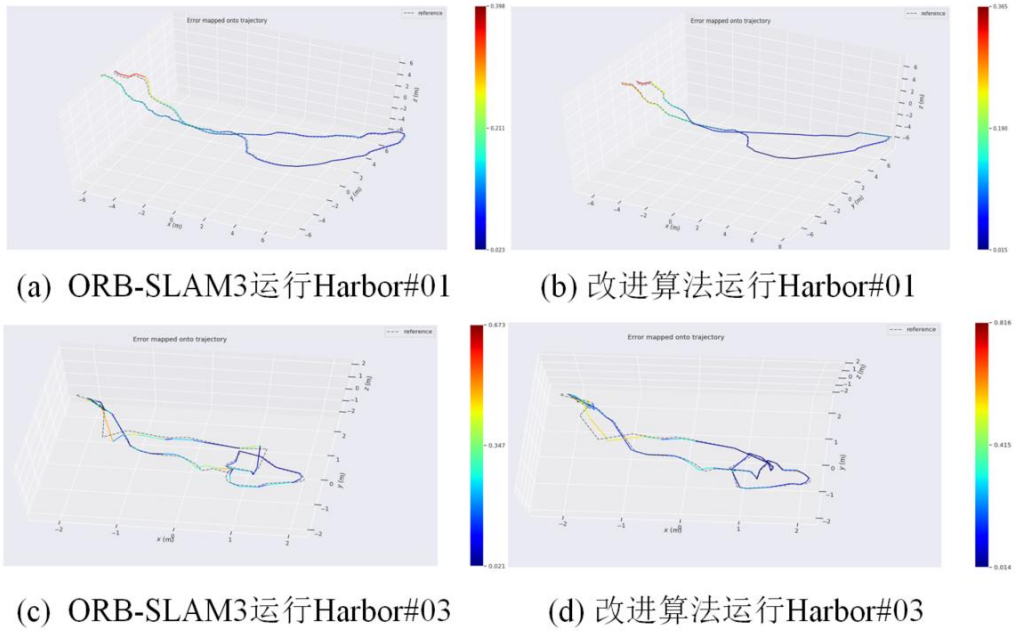


图 9 关键帧位姿轨迹对比

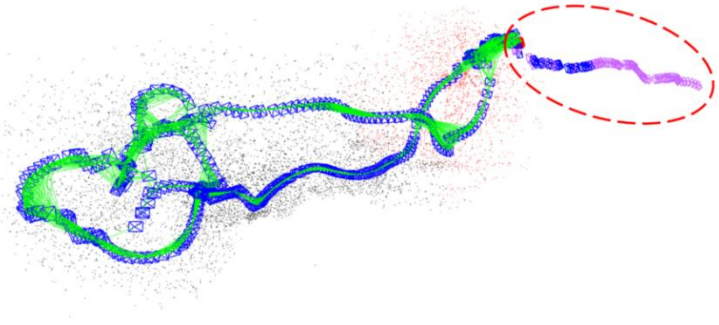


图 10 ORB-SLAM3 跟踪丢失

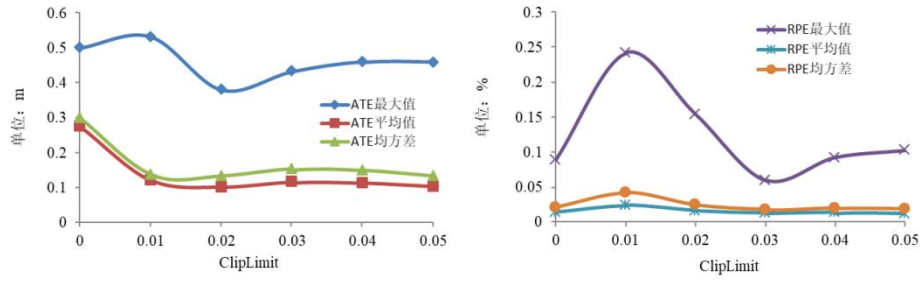
为从量化指标上来表达改进算法的精度表现，将估计轨迹与 groundtruth 比较，分别计算绝对轨迹误差（Absolute Trajectory Error，ATE）和相对位姿误差（Relative Pose Error ，RPE）。绝对位姿误差用于比较估计轨迹和参考轨迹的旋转和平移误差，并计算整个轨迹的统计数据，适用于测试轨迹的全局一致性。相对位姿误差用于比较运动的增量，可以给出局部精度，例如 SLAM 系统每米的平移或者旋转漂移量。

表 3 对 ATE 最大值、ATE 平均值、ATE 均方差、RPE 最大值、RPE 平均值、RPE 均方差 6 项指标进行对比，并对较小值加粗显示，表中 OS3 表示 ORB-SLAM3 算法，OSC 表示 ORB-SLAM3+CLAHE 算法。通过数据可以看出，改进算法的误差总体比原算法要小，其中 RPE 最大值、平均值、均方差平均比 ORB-SLAM3 低 8.20%、18.41%和 14.05%。

表 3　SLAM 误差对比（ATE 单位：m，RPE 单位：%）

数据集	ATE 最大值		ATE 平均值		ATE 均方差		RPE 最大值		RPE 平均值		RPE 均方差	
序列	OS3	OSC	OS3	OSC	OS3	OSC	OS3	OSC	OS3	OSC	OS3	OSC
Harbor	0.50	**0.43**	0.27	**0.11**	0.30	**0.15**	0.08	**0.06**	0.01	**0.01**	0.02	**0.01**
#01	0	**3**	6	**6**	0	**4**	9	**0**	4	**3**	1	**8**
Harbor	0.80	**0.75**	**0.20**	0.20	0.26	**0.25**	**1.68**	1.97	0.48	**0.40**	0.61	**0.54**
#03	6	**3**	**3**	3	0	**7**	**1**	1	1	**3**	4	**7**
Harbor	0.18	**0.11**	0.06	**0.03**	0.75	**0.03**	0.17	**0.09**	0.02	**0.00**	0.03	**0.01**
#05	1	**2**	8	**5**	9	**4**	7	**0**	1	**5**	4	**0**

以上实验表明，图像增强算法对水下 SLAM 的精度提高是有帮助的，而图像增强的效果与所使用算法的参数是密切相关的。调节对比度限制（ClipLimit）是 CLAHE 算法的一个重要参数，用于控制对比度的阈值，取值范围为 0~1，阈值越高，图像的对比度越高，产生的噪声信号也越多。图 11 所示为 Harbor#01 序列中，不同 ClipLimit 值对 ATE 和 RPE 的影响，其中 ClipLimit 等于 0 时，代表不使用 CLAHE 算法。通过曲线可以看出，随着阈值的增大，所有值均呈现先降低后升高的趋势，其中最大值对阈值的变化较敏感，ClipLimit 在 0.02~0.03 范围内对#01 序列的 SLAM 误差最小。通过其他序列数据集实验也能得到类似结论，当 CLAHE 算法用于水下 SLAM 时，ClipLimit 的值一般设在 0.01~0.03 范围内，得到的定位精度相对较高。



（a）ATE 数据对比　　（b）RPE 数据对比

图 11 ClipLimit 对误差的影响对比

4 总结

由于光照、水流、浑浊度等问题，机器人在水下往往难以获得高质量（高对比度、高清晰度）的图像信息用于视觉 SLAM，从而影响其定位精度，降低工作效率。本文将 ORB-SLAM3 算法与图像增强算法相结合应用于水下场景。通过实验对比分析证明，ORB-SLAM3 算法在水下环境中也有不错表现；CLAHE 算法能有效提高水下图像的对比度、增加图像信息，同时也有助于特征匹配；ORB-SLAM3+CLAHE 的改进算法比原算法具有更高的定位精度和鲁棒性；对于浅水域的 Harbor 场景，调节对比度限制（ClipLimit）设置在 0.01~0.03 范围内定位效果最佳，可为后续其他数据集相关研究提供参考。

参考文献：

[1] Hashemi, M.; Karmozdi, A.; Naderi, A.; Salarieh, H. Development of an integrated navigation algorithm based on IMU, depth, DVL sensors and earth magnetic field map. Modares Mech. Eng. 2017, 16, 235–243

[2] Williams, S.B.; Newman, P.; Dissanayake, G.; Durrant-Whyte, H. Autonomous underwater simultaneous localisation and map building. In Proceedings of the Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065), San Francisco, CA, USA, 24–28 April 2000; Volume 2, pp. 1793–1798.

[3] Vargas, E.; Scona, R.; Willners, J.S.; Luczynski, T.; Cao, Y.; Wang, S.; Petillot, Y.R. Robust underwater visual SLAM fusing acoustic sensing. In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Xi'an, China, 30 May–5 June 2021; pp. 2140–2146

[4] Campos, C., Elvira, R., Rodriguez, J. J. G., M. Montiel, J. M., & D. Tardos, J. (2021). ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual–Inertial, and Multimap SLAM. IEEE Transactions on Robotics, 37(6), 1874–1890

[5] Garg R, Mittal B, Garg S. Histogram equalization techniques for image enhancement[J]. Int. J. Electron. Commun. Technol, 2011, 2(1): 107-111

[6] Zuiderveld, K. (1994). Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (pp. 474–485). Elsevier.

[7] Ferrera, M., Creuze, V., Moras, J., & Trouvé-Peloux, P. (2019). AQUALOC: An underwater dataset for visual–inertial–pressure localization. The International Journal of Robotics Research, 38(14), 1549–1559.

作者简介：颜金龙（1988-），男，浙江舟山人，讲师，专业负责人，手机号：17757897213
邮箱:708842407@qq.com

不同进水温度对水润滑轴承水膜特性的影响

王帅帅[1]，朱发新*[1]，滕宪斌[2]，董良雄[2]

（1.浙江海洋大学 船运学院，浙江 舟山 316022；2.广州航海学院 轮机工程学院，广东 广州 510725）

摘 要：基于实验室小型水下推进器水润滑轴承参数，利用 DyRoBeS 软件分析了不同进水温度对水润滑轴承水膜特性的影响，其中主要分析了在不同进水温度下水润滑轴承的最小水膜厚度、最大水膜压力、偏心率、刚度和阻尼的变化情况，得到的研究规律可以有效指导水下推进器的水润滑轴承设计，能全面提升水下推进器的性能、可靠性和寿命，从而提高水下航行器的运行效率，获得显著的经济效益。

关键词：水下推进器；水润滑轴承；水膜特性；进水温度

1 引言

近些年来，世界各国都在加速对海洋资源的研究和开发。但是，海底情况非常复杂，想要更好地探测海洋资源，需要更加先进的探测工具，许多国家在开发海洋资源的同时，也在不断提升海洋探测技术，并加快研制的步伐，开发出了一些先进的水下航行器。水下推进器作为水下航行器的关键部件，在航行器的速度、效率、噪声等性能方面起着重要的作用。研制出高性能、稳定性好的水下推进器可以为水下航行器获取深海景象资料和海底矿石等近距离材料奠定基础[1-3]。轴承系统作为水下推进器核心部件，其稳定运行对水下推进器在海底正常工作至关重要，此外水下推进器大多采用传统的油润滑轴承系统，润滑油的泄露会严重污染海洋环境，特别是对深海稀有资源及生物的影响十分巨大，如果采用水润滑轴承可以大大降低对海洋环境的污染，但如何提高其稳定性值得去研究。其中水润滑轴承水膜在轴承系统中扮演重要角色，是决定轴承系统稳定运行关键因素之一。水下推进器常常需要下潜到海底进行工作，而随着下潜的深度不断增加，将导致水润滑轴承的进水温度不断降低，这将对水润滑轴承水膜特性产生影响，因此有必要对不同进水温度下水润滑轴承水膜特性进行分析[4-6]。

2 流体动压润滑理论及雷诺方程

2.1 流体动压润滑理论

流体动压润滑理论是研究水润滑轴承的基础之一。它描述了当两个固体表面之间存在楔形间隙并产生相对运动时，润滑剂的粘性会在固体表面间形成一个流体膜，产生压力，从而减少摩擦并保护表面[7]。这一理论的关键要素包括：

（1）两个固体表面之间存在楔形间隙，为动压效应的形成提供条件；

（2）润滑剂必须具备足够的粘度，以确保其能够附着在固体表面上；

（3）两个表面的相对运动速度必须足够，以确保润滑剂能够由间隙的大端向小端流动。流体动压润滑常见的形成原理如图 1 所示。

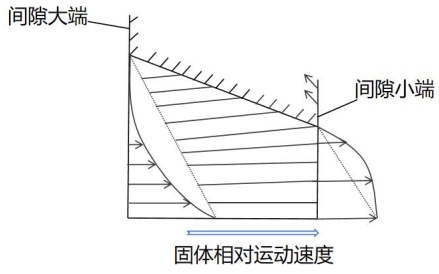


图 1 流体动压润滑原理图

上下两个表面之间存在楔形间隙，间隙内充满水，由于水具有粘性，会附着在表面上，并随着表面

的运动而流动。当上下两表面产生相对运动时，水会从间隙的大端向小端流动。由于水不可压缩，为了维持流量平衡，两端间隙的水流速度分布如图所示，大间隙处速度呈内凹曲线，小间隙处速度呈外凸曲线。根据速度分布曲线，可知楔形间隙内必然产生流体压力 P，其值大于入口和出口处的压力 Pa，这就是动压形成的基本原理。对于滑动轴承，如图 2 所示。

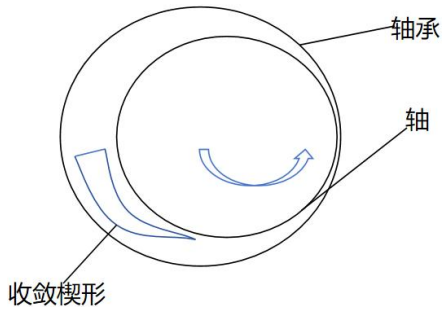


图 2 轴承动压润滑原理图

当轴承受到外部载荷时，会引起一定程度的偏心。随着转轴自身的旋转，轴颈与轴承之间产生相对运动，导致轴颈表面和轴承之间形成收敛间隙，形成楔形水膜，从而产生流体动压以支撑轴承[8-10]。

2.2 雷诺方程

对于不可以压缩的稳态径向滑动轴承的润滑问题，其中在二维极坐标系中二维极坐标系中的雷诺方程可以简化为：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial z}(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial z})=6U\frac{\partial h}{\partial x} \qquad (1)$$

式中：h 为水膜的厚度；p 为水膜的压力； η 为润滑剂的动力黏度；∅表示周向角度；z 表示轴向坐标。如果忽略润滑剂的动力黏度 η 和密度 p 随压力的变化，并且对方程进行量纲化，取 $c=R-r$，$\lambda=z/(0.5L)$，$H=(h/c)$，$P=p/p_0$，则量纲化化的雷诺方程为：

$$\frac{\partial}{\partial\phi}(H^3\frac{\partial P}{\partial\phi})+(\frac{D}{L})^2\frac{\partial}{\partial\lambda}(H^3\frac{\partial P}{\partial\lambda})=3\frac{\partial H}{\partial\phi} \qquad (2)$$

式中：r 为轴颈半径；R 为轴承半径；D 为轴承直径；L 为轴承长度。

3 水润滑轴承水膜特性仿真模拟与分析

3.1 水润滑轴承的建模

利用 DyRoBeS 软件中的 BePerf 模块对水润滑轴承进行建模，DyRoBeS 主要用于转子动力学特性分析与轴承参数设计分析的专业软件。本文采用的水润滑轴承模型的轴承结构参数基于实验室小型水下推进器，实验室小型水下推进器如图 3 所示，水润滑轴承具体结构参数如表 1 所示，通过 DyRoBeS-Beperf 建立的水润滑轴承物理模型如图 4 所示。

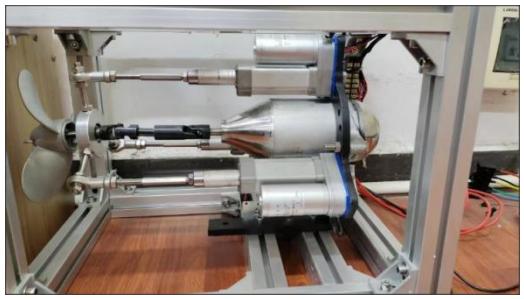


图 3 实验室小型水下推进器

表 1 轴承结构参数

轴承几何结构参数	值/单位
轴承长度	25mm
轴承直径	60mm
半径间隙	0.07mm
径向载荷	10N
转轴转速	1000rpm
载荷角	270°

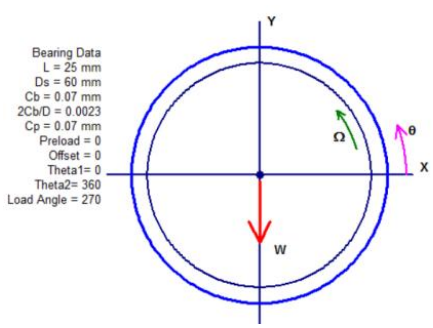


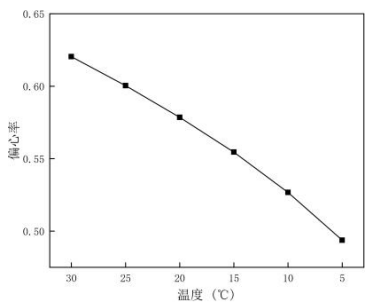
图 4 水润滑轴承物理模型

3.2 不同进水温度对水润滑轴承水膜特性的影响

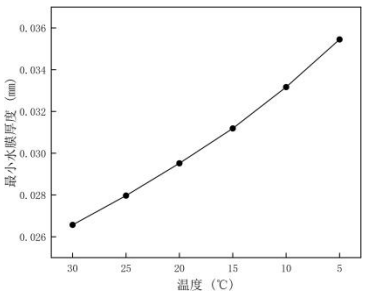
由于水下推进器常常需要下潜到海底进行工作，而随着下潜的深度不断增加，将导致水润滑轴承的进水温度不断降低，这可能对轴承水膜特性产生影响，所以需要分析不同进水温度对水润滑轴承水膜特性的影响。

将转轴转速设置为 1000rpm，外加载荷为 10N，将水润滑轴承的进水温度依次设置为 30℃、25℃、20℃、15℃、10℃、5℃，其他参数保持不变，研究不同进水温度对水润滑轴承水膜特性的影响。图 5（a）是不同进水温度下水润滑轴承偏心率的变化。从图中可以看出，偏心率随着进水温度的降低而减小，进水温度从 30℃降低到 5℃过程中，偏心率从 0.6204 减小到 0.4937，分别减小了 3.22%、3.65%、4.15%、5.01%、6.27%，偏心率随着温度的降低，减小幅度逐渐增大。随着进水温度的不断降低，水的粘度会逐渐增加，较高的粘度可以使水膜可以更好的去承载较大的外加载荷，这样就减少转轴和轴承的摩擦，从而使偏心率逐渐降低。还有一些其他原因，在低温的条件下，轴承材料的性能也会更加的稳定，不容易发生由于高温导致的材料软化或者形变，从而偏心率也会不断降低。图 5（b）是不同进水温度下水润滑轴承最小水膜厚度的变化。从图中可以看出，最小水膜厚度随着进水温度的降低而增大，最小水膜厚度从 0.02657 增大到 0.03545，在进水温度 30℃降低到 5℃过程中，最小水膜厚度分别增大了 5.27%、5.54%、5.65%、6.34%、6.87%，最小水膜厚度增大的幅度逐渐增大。较低的进水温度使得水的粘度增加，比较容易形成更加稳定的水膜，从而会逐渐增大最小水膜的厚度，水的粘度不断增加，水膜对轴的支撑能力会增强，这样会大大提高轴承的承载能力，有利于轴承系统的稳定运行。图 5（c）是不同进水温度下最大水膜压力的变化，随着进水温度的不断降低最大水膜压力也在不断减小，最大水膜压力从 19.0517Kpa 减小到 16.7344Kpa ，在进水温度下降的过程中，最大水膜压力分别减小了 2.17%、2.16%、2.15%、2.68%、3.64%，进水温度从 30℃下降到 15℃时，最大水膜压力减小幅度比较平稳，从 15℃下降到 5℃时，减小幅度开始增大。水的粘度随着温度降低而增加，进而导致水膜的流动性会减弱，在轴承的间隙中流动速度就会降低，压力分布也就更加的均匀，从而最大水膜压力就会逐渐减小。此外，高粘度的水在轴承间隙中会产生更大的剪切应力，这会使得水膜在承受负载时会更加分散，而不是集中在某一个点，这样会大大降低水膜的压力。最大水膜压力的减小意味着轴承的负载能力可能降低，这可能导致轴承在较高负载的情况下不可以提供足够的支撑，可能会造成轴承的损坏，轴承承载能力的下降主要是因为最大水

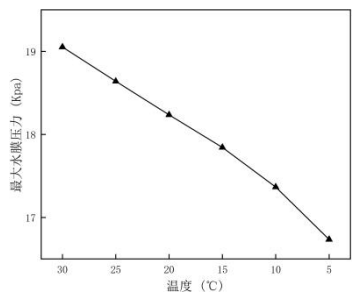
膜压力较低的情况下，压力分布可能变得不均匀，导致局部压力集中，这种集中会增加接触应力，导致轴承磨损。图 5（d）是不同进水温度下主刚度的变化，其中主刚度 Kxx 随着进水温度降低呈现先减小后增大的趋势，在进水温度 30℃下降到 15℃过程中，Kxx 从 293N/mm 减小到 271N/mm，Kxx 分别减小了 2.39%、2.45%、2.87%；当进水温度从 15℃下降到 5℃时，Kxx 从 271N/mm 增大到 326N/mm，Kxx 分别增大了 5.54%、13.99%。主刚度 Kyy 随着进水温度的降低不断减小，从 526N/mm 减小到 347N/mm，分别减小了 3.80%、4.15%、4.33%、9.91%、17.04%，Kyy 减小幅度逐渐增大。如果轴承主刚度不断减小可能会导致振动加大，严重影响水下推进器的稳定运行，轴承对负载的支撑能力会大大降低。图 5（e）是不同进水温度下主阻尼的变化，其中主阻尼 Cxx 和 Cyy 均随着进水温度的降低而逐渐增大，Cxx 从 3.07N-s/mm 增大到 5.08N-s/mm，Cyy 从 8.78N-s/mm 增大到 9.04N-s/mm。适量的阻尼可以提高轴承系统的稳定性和运行的平稳性，可以起到减少振动和噪音的效果，可以改善润滑效果，但是过大的阻尼可能会导致能量损失，还会造成动态响应速度降低等问题。图 5（f）是不同进水温度下交叉刚度的变化，交叉刚度 Kxy 随着进水温度不断降低而逐渐增大，从 41.3N/mm 增大到 173N/mm，而交叉刚度 Kyx 先减小后增大。图 5（g）是不同进水温度下交叉阻尼的变化，交叉阻尼在进水温度 30℃降低到 15℃时不断增大，从-2.90N-s/mm 增大到-2.36N-s/mm，在进水温度从 15℃降低到 5℃时，交叉阻尼随进水温度降低而减小，从-2.36N-s/mm 减小到-3.45N-s/mm。



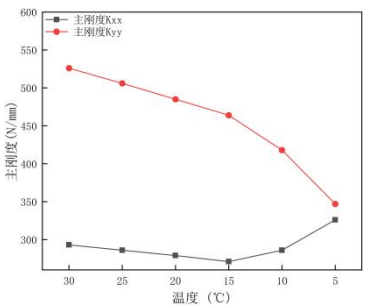
（a）不同进水温度下偏心率的变化



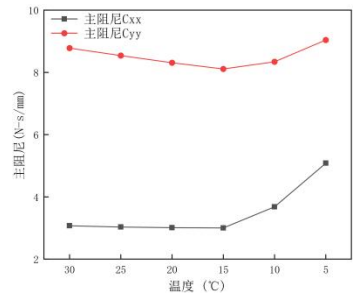
（b）不同进水温度下最小水膜厚度的变化



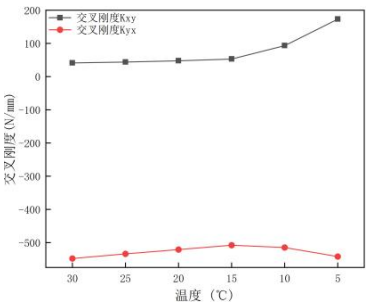
（c）不同进水温度下最大水膜压力的变化



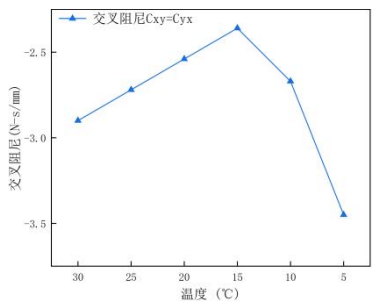
（d）不同进水温度下主刚度的变化



（e）不同进水温度下主阻尼的变化



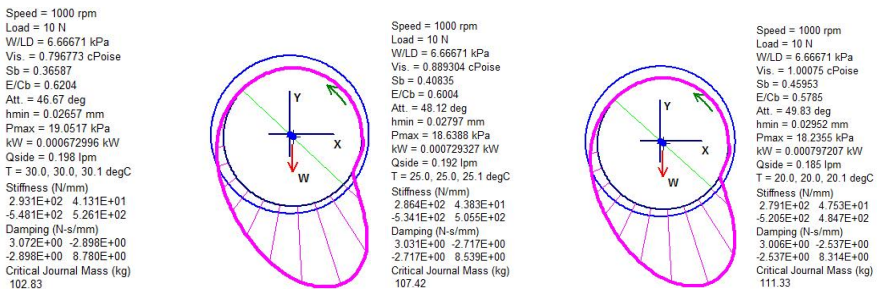
（f）不同进水温度下交叉刚度的变化



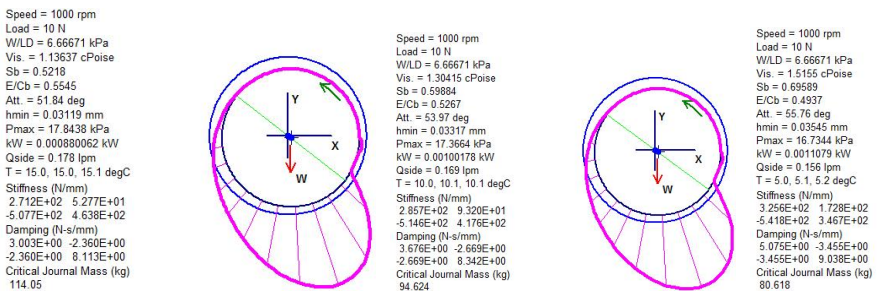
（g）不同进水温度下交叉阻尼的变化

图 5 进水温度对水润滑轴承水膜特性的影响

从图 6 中可以看出，随着进水温度的不断降低，水的粘度增加，最小水膜的厚度不断增大，使得轴颈中心和轴承中心之间的距离在逐渐减小。这主要是因为较高粘度的水可以形成更厚、更稳定的水膜，从而可以有效地支撑外加载荷并且可以减少轴颈的偏移。



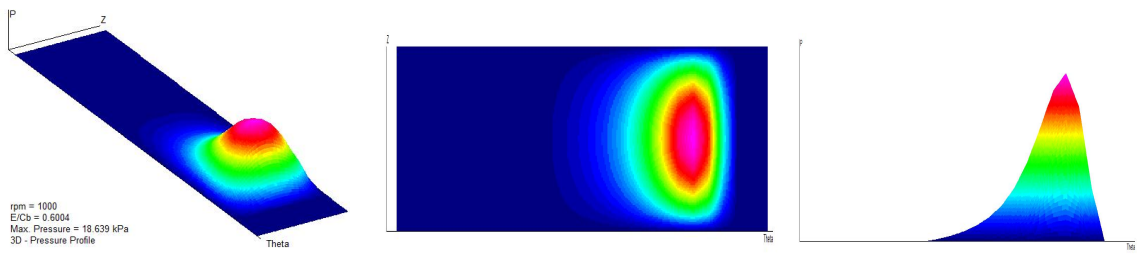
（a）进水温度=30℃ （b）进水温度=25℃ （c）进水温度=20℃



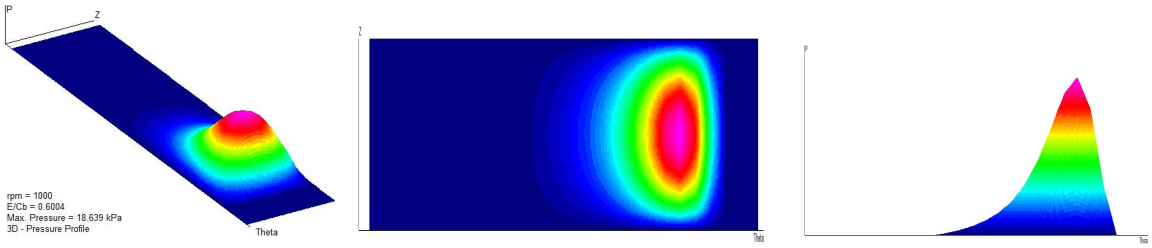
（d）进水温度=15℃ （e）进水温度=10℃ （f）进水温度=5℃

图 6 不同进水温度下水润滑轴承二维水膜压力分布图

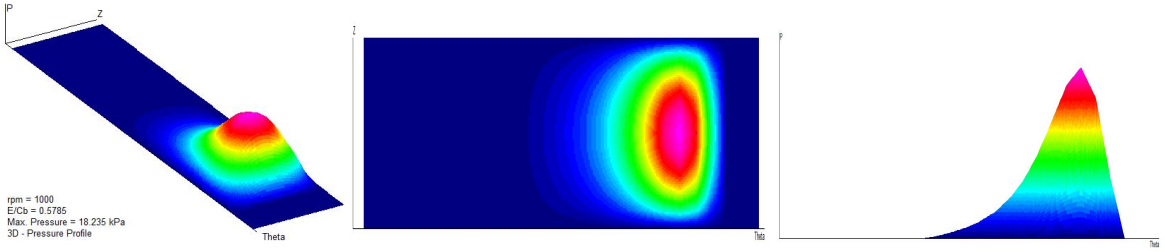
为了进一步获得不同进水温度下水润滑轴承水膜的压力分布情况，利用 DyRoBeS 得到了水润滑轴承的三维水膜压力并得到了其俯视图和切片图 7 所示。



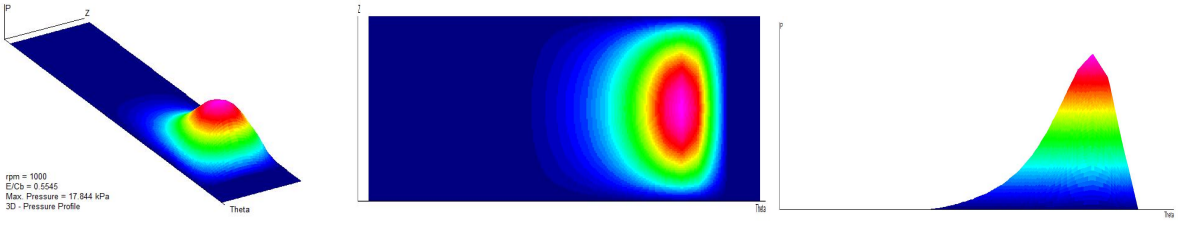
进水温度 30℃水膜压力三维分布图、俯视图和剖面图



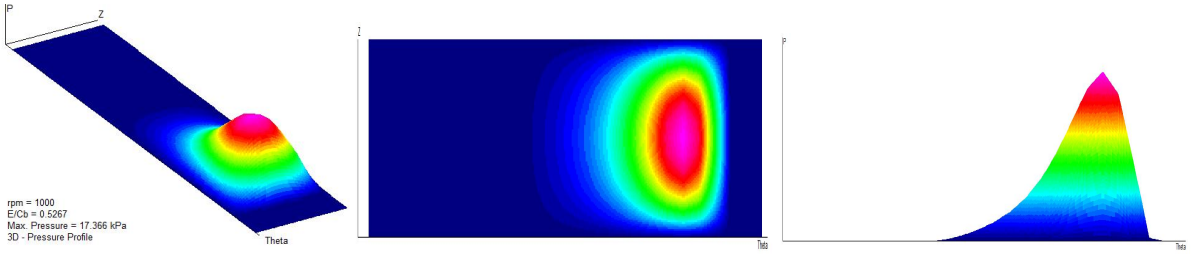
进水温度 25℃水膜压力三维分布图、俯视图和剖面图



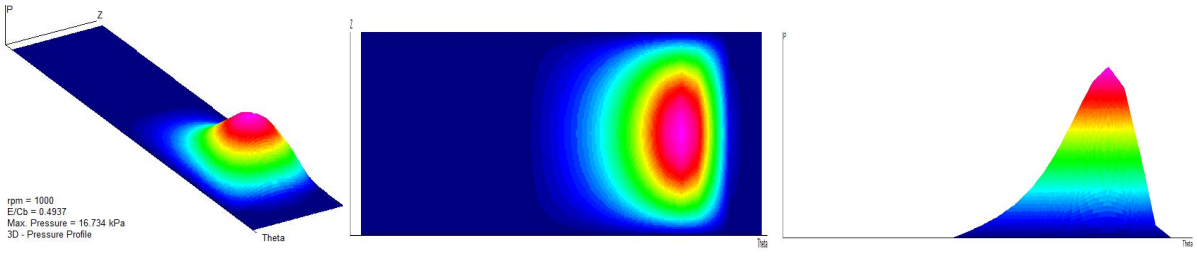
进水温度 20℃水膜压力三维分布图、俯视图和剖面图



进水温度 15℃水膜压力三维分布图、俯视图和剖面图



进水温度 10℃水膜压力三维分布图、俯视图和剖面图



进水温度 5℃水膜压力三维分布图、俯视图和剖面图

图 7 不同进水温度下水润滑轴承水膜压力分布图

4 结论

在转速、载荷等其他条件相同的情况下，随着进水温度的不断降低，水润滑轴承的偏心率逐渐减小，减小的幅度逐渐增大，主要是由于温度降低，水的粘度增加，较高的粘度使水膜可以承受较大外加载荷，从而减小摩擦，偏心率也逐渐降低；最小水膜厚度随着进水温度不断降低而逐渐增大，主要因为水的粘度增加可以形成比较稳定的水膜；最大水膜压力随着进水温度的降低而不断减小，水的粘度增加，水的流动性减弱，导致压力分布更加均匀，从而最大水膜压力减小；随着进水温度

不断降低，水润滑轴承主刚度 Kxx 逐渐减小，主刚度 Kyy、主阻尼 Cxx 和主阻尼 Cyy 均呈现出先减小后增大的趋势;交叉刚度 Kxy 逐渐增大，交叉刚度 Kyx 和交叉阻尼均呈现出先增大后减小趋势，得到上述的研究规律可以有效指导水下推进器水润滑轴承设计，提高轴承系统运行稳定性，可以全面提升水下推进器的性能、可靠性和寿命，从而提高水下航行器的运行效率，获得显著的经济效益。

参考文献

[1] 冯森.自补偿式水下推进器的设计及其密封和水动力性能研究[J].润滑与密封,2022,47(05):141-147.
[2] 黄思铭.仿照直升机旋翼的水下矢量推进装置[J].机电产品开发与创新,2024,37(02):151-154.
[3] 提云钊.多推进器 AUV 结构设计及水动力学分析[D].中国计量大学,2021.DOI:10.27819/d.cnki.gzgjl.2021.000345.
[4] 胡继敏,罗斌,石帅,等.进水温度对水润滑轴承润滑特性的影响[J].润滑与密封,2024,49(05):159-16 4.
[5] 季晨龙.水润滑条件下材料特性对轴瓦摩擦学性能影响的试验研究[J/OL].润滑与密封,1-6[2024-07-31].
[6] Xie Z,Li J,Tian Y, et al.Theoretical and experimental study on influences of surface texture onlubrication performance of a novel bearing[J].Tribology International,2024,193.
[7] 崔忠承,乌日开西·艾依提,阿依古丽·喀斯木.楔形织构对流体动压润滑性能的影响[J].机械设计与制造,2024,(02):17-21+29.DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2024.02.001.
[8] 王安帅,于学会,曾兴昌,等.压裂泵滑动轴承流体动压润滑性能研究[J].润滑与密封,2023,48(05):16-22.
[9] Gangadia H ,Sheth S.Tribological Behaviour of Cross-Shaped Dimples on Sliding Surfaces Under Hydrodynamic Lubrication[J].Acta Mechanica et Automatica,2024,18(3):393-402.
[10]解忠良,田佳彬,杨铭,等. 考虑界面滑移和惯性力效应的水润滑轴承润滑性能分析[J].润滑与密封,2023,48(10):1-7.

作者简介：王帅帅（1997-），男，硕士研究生，研究方向为海上安全技术，E-mali:2058253215@qq.com。滕宪斌，男，硕士，教授，主要研究方向：现代轮机工程管理、船舶柴油机智能检测与仿真技术等，E-mail：TENG563363@163.com。董良雄，男，博士，教授，主要研究方向：船舶与海洋工程、轮机工程等，E-mail:Dong86632596@163.com。
通讯作者：朱发新，男，硕士，副教授，主要研究方向：船舶安全与污染控制，E-mail：ssw0312896@163.com。

基于 CFD 的纵倾对船舶保向性研究

朱鹏飞，艾万政，张洪刚，王家宏，毛超进

（浙江海洋大学，船舶与海运学院，浙江 舟山，316022）

摘 要：为探究船舶纵倾变化对船舶航向稳定性产生的影响，采用重叠网格技术，基于 URANS 粘性数值模拟方法，对标准船模 KVLCC2 裸船体开展了船舶纵倾对航向稳定性影响的数值研究。通过平吃水状态下斜航试验和纯艏摇试

验结果与船模试验结果对比，对采用的数值方法和数值模型进行了验证，进而通过比较不同纵倾状态下的稳定性衡准数计算结果，分析了 KVLCC2 船体纵倾对航向稳定性的影响。计算结果表明，船舶首倾时，航向稳定性变差，随着由首倾变为尾倾，航向稳定性提高，在尾倾 0.537° 时，航向稳定性最佳。

关键词：纵倾优化；斜航运动；纯艏摇运动；航向稳定性

船舶在海上航行，因受到气象因素影响，船舶的纵倾会发生很大变化，对其快速性和操纵性产生很大影响，根据 The Fourth IMO GHG Study 2020(IMO, 2020)[1]，以往研究多关注纵倾优化对船舶阻力的影响，较少关注船舶纵倾对船舶操纵性的影响。Larsen[2]等通过一系列的水槽物理试验研究了船舶在不同纵倾角度下的阻力性能和推进性能的变化，发现纵倾优化具有约 2%-3%的节能潜力。Yang[3]等用 CFD 方法计算了 VLCC 在设计航速下不同纵倾角度的阻力，获得最优纵倾角。Islam H 和 Soares[4]利用 CFD 模拟研究了在不同航速和吃水情况下，纵倾对集装箱船阻力的影响。随着船舶大型化，船舶纵倾变化不仅改变船舶阻力，也会改变船舶的操纵性能，航向稳定性是船舶操纵性的重要内容之一，因此，研究船舶纵倾对航向稳定性影响，对减排背景下的船舶操纵性预测具有重要意义。

随着计算机能力的增长，计算流体力学（CFD）在近几十年内取得了快速发展。许多学者致力于利用 CFD 方法来研究船舶水动力。Liu Yi[5]等以 KCS 船模为研究对象，分别对有下沉和纵倾的和无下沉和纵倾的斜航运动进行了数值计算，得到了不同漂角和舵角下的水动力系数及力矩，结果表明下沉和纵倾对船舶水动力有影响。Sakamoto[6][7]等采用 CFD 商用软件对 DTMB 5415 裸船体进行了静态及动态的平面运动机构试验，得到了力、力矩系数及流体动力导数并验证了纵倾对船舶水动力的影响。宋深科[8]等以大型油轮 KVLCC2 船模为研究对象，基于 RANS 方法进行了船体纵倾对航向稳定性的影响研究，研究表明船体在发生一定幅度的下沉和首倾时，稳定性衡准数会变小，航向稳定性变差。Zhang[9]等对纵倾条件下船舶的操纵性水动力导数进行研究，船舶纵倾变化会改变水动力导数。

本研究以 KVLCC2 船型为研究对象，采用 URANS 方法，基于 STAR-CCM+平台，开展了船舶纵倾对航向稳定性影响的数值研究。采用重叠网格对在不同纵倾状态下的目标船型进行 PMM 试验数值模拟，包括斜航运动和纯艏摇运动，由船体运动过程中受到的水动力分析得到船舶水动力导数和稳定性衡准数，并分析 KVLCC2 船体纵倾对航向稳定性的影响机理，探讨在实现纵倾优化以减小船舶阻力、减少碳排放的基础上优化船舶航向稳定性，提高船舶通航安全能力。

1 数学模型及数值方法

1.1 船舶操纵运动数学模型

根据在小幅度操纵运动假设下的 Abwkowitz 整体型模型，其线性化后的船舶操纵运动方程如下：

$$m(\dot{v}+Ur+x_G\dot{r})=Y_v v+Y_r r+Y_{\dot{v}}\dot{v}+Y_{\dot{r}}\dot{r}+Y_\delta\delta \tag{1}$$

$$I_z\dot{r}+mx_G(\dot{v}+Ur)=N_v v+N_r r+N_{\dot{v}}\dot{v}+N_{\dot{r}}\dot{r}+N_\delta\delta \tag{2}$$

式中，u 为船舶横向速度，r 为回转角速度，U 为船舶直航初速度，δ 为舵角，m 为船舶质量，I_z 为船舶绕 z 轴惯性矩，x_G 为船舶重心纵坐标，Y 为船舶横向外力，N 为船舶转首力矩，下标表示为相应的水动力导数。

船舶做斜航运动时，船舶纵中剖面与水池中心线成漂角 β，拖车以航速 U 作等速斜航运动，斜航运动方程为：

$$Y = Y_0 + Y_v v + Y_{vvv} v^3 \tag{3}$$

$$N = N_0 + N_v v + N_{vvv} v^3 \tag{4}$$

$$v = -U\sin\beta \approx -U\beta \tag{5}$$

力和力矩以及横向速度按如下方法做无因次化处理，以便得到无因次化位置导数：

$$F' = \frac{Y}{1/2\rho U^2 L^2} \tag{6}$$

$$N' = \frac{N}{1/2\rho U^2 L^3} \tag{7}$$

$$v' = \frac{v}{U} \tag{8}$$

船模做纯艏摇运动时，在沿纵向匀速运动时叠加横向低频振荡运动，同时，叠加一个余弦变化的船艏向角，模型运动轨迹与其纵轴处相切，其运动方程为：

$$\begin{cases} \psi_{\max} = \dfrac{a\omega}{U} \\ \psi = -\psi_{\max}\cos\omega t \\ r = r_{\max}\sin\omega t \\ \dot{r} = \dot{r}_{\max}\cos\omega t \end{cases} \tag{9}$$

式中，ψ为艏向角；a为横向简谐振荡运动幅值；ω为简谐运动频率，$\omega = 2\pi f$，其中 f为运动频率，t为时间；$\psi_{\max}$，$r_{\max}$，$\dot{r}_{\max}$ 分别为船艏向角、转艏角速度和转艏角加速度幅值。

纯艏摇运动在线性化假设下，其横向力 Y和转首力矩 N近似满足：

$$\begin{cases} Y = Y_r r + Y_{\dot{r}}\dot{r} \\ N = N_r r + N_{\dot{r}}\dot{r} \end{cases} \tag{10}$$

1.2 数值方法

本研究基于有限体积法的商用 CFD 程序 STAR-CCM+对模型进行数值模拟。在笛卡尔坐标下，用张量形式给出了无外力的不可压缩流的平均连续性和动量方程如下：

$$\frac{\partial\left(\rho\overline{u_i}\right)}{\partial x_i} = 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial\left(\rho\overline{u_i}\right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\overline{u_i}\overline{u_j} + \rho\overline{u_i'u_j'}) = -\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial\overline{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \tag{12}$$

其中 $\overline{\tau_{ij}}$ 为平均粘性应力张量分量。

$$\overline{\tau}_{ij} = \mu\left(\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{u}_j}{\partial x_i}\right) \tag{13}$$

式中 ρ 为密度，$\overline{u}_i$ 表示速度矢量的平均笛卡尔分量，$\rho\overline{u_i'u_j'}$ 为雷诺应力，p 为平均压力，μ 为动态粘度。

2 数值计算

2.1 研究对象

本研究的研究对象为 KVLCC2 标准船模，此船模是韩国 KRISO（Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering）设计的超大型油轮船型，被 ITTC 操纵性委员会推荐为船舶操纵性水动力试验和 CFD 计算的作为标准模型之一。试验模型缩尺比为 1:45.714，试验船模外形见图 1，实船和模型的主尺度见表 1。



图 1 KVLCC2 船体模型

表 1 KVLCC2 实船及船模主尺度参数

主要参数	符号	实船	船模
缩尺比	λ	1.0	45.7140
两柱间长	Lpp (m)	320.0	7.0000
型宽	B (m)	58.0	1.2688
型深	D (m)	30.0	0.6563
吃水	T (m)	20.8	0.4550
排水量	V (m^3)	312622.0	3.2724

2.2 计算域设置及边界条件

本研究主要模拟 KVLCC2 船体在深水中小振幅运动，计算中船舶航速较低，傅汝德数小于 0.1，兴波影响忽略不计，为提高计算效率，采用叠模方法进行计算。根据以往研究经验[10]计算域设置如图 2 所示，入口边界距船首 2 倍船长，出口边界距船尾 2.5 倍船长，侧面边界距离船体中纵剖面 2 倍船长，上边界为水线面，下边界距离水线面 1 倍船长，因采用重叠网格技术，在船体周围设置为网格重叠区域，各边界的边界条件设置如表 2 所示。

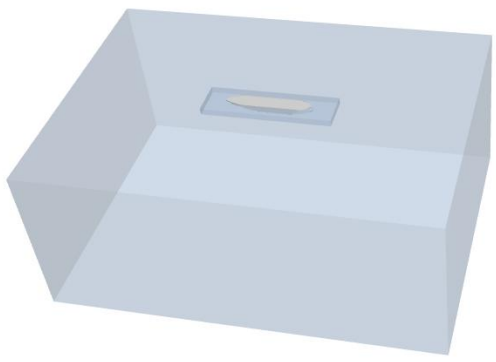


图 2 计算域示意图

表 2 边界条件

边界	深水边界条件
入口	速度入口
出口	压力出口

侧边界	壁面（移动壁面）
上边界	对称边界
下边界	壁面（移动壁面）
船体	壁面（无滑移）
重叠边界	重叠网格

2.3 网格划分

KVLCC2 船体几何外形复杂，本研究采用切割体网格对计算域进行划分，可以在保证计算精度的前提下，减小网格量，缩短计算时间。计算通过求解 URANS 方程，采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭方程，对船体首、船尾和船体周围进行网格加密，同时，湍流模型对近壁面区域的处理采用壁面函数法，因此 y+值在 30~60 之间是合理的[11]，船体表面设置棱柱层网格，共设置 6 层，y+值为 30～60 之间，对距离船体较远的控制域，采用较为稀疏的网格，船体表面网格划分及计算域体网格划分如图 3 所示，共约 91 万网格。

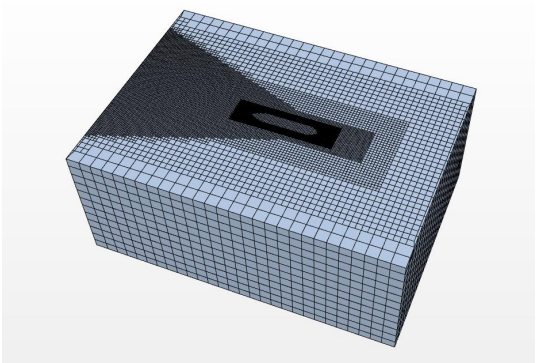


图 3 网格示意图

2.4 数值计算工况

航向稳定性是指船舶在航行过程中保持航向的能力，固有稳定性是航向稳定性的基础，二者之间是正相关关系。一般通过稳定性衡准数 C 判断船舶是否固有稳定性，稳定性衡准数 C 为正时，说明船舶具有固有稳定性，并且其值越大，船舶的固有稳定性就越好。无因次化的稳定性衡准数 C' 的表达式如下：

$$C' = -Y'_v\left(m'x'_G - N'_r\right) + N'_v\left(m' - Y'_r\right) \tag{14}$$

位置导数通过斜航试验获得，斜航试验船模漂角设为 0°、2°、4°和 6°，与 INSEAN 的试验工况一致，通过测得船模所受横向力 Y、转首力矩 N，进而确定位置导数。旋转导数主要通过纯艏摇试验获得，纯艏摇运动为动态平面运动机构试验，除匀速纵向运动，还叠加一个横荡运动和一个艏摇运动，纯艏摇运动相关参数如表 3 所示。

表 3 纯艏摇数值计算工况

U（m/s）	Fr	f(Hz)	r'	a(m)
0.533	0.064	0.060	0.400	0.116

为了保证船舶首向盲区限制，根据 SOLAS 公约中第五章航行安全第 22 条驾驶室可视范围规定和目标船《盲区图 BLIND ZONE PLAN》，分析得出最小吃水时纵倾限制条件为吃水差应小于等于 4.75m，因此本研究的目标船纵倾条件选取为尾倾 4m 至首倾 4m 具有实际应用意义。据此，数值计算中船模的纵倾角度选取为-0.716°、-0.537°、-0.358°、-0.179°、0°、0.179°、0.358°、0.537°和 0.716°，首倾为正。

2.5 方法验证

为验证本数值方法的可行性，对平吃水状态下的 KVLCC2 裸船模进行斜航试验和纯艏摇试验，将斜航运动、纯艏摇运动中的模型所受的横向力和转首力矩的数值计算结果（CFD）与 INSEAN 的模型试验结果（EFD）进行对比，结果分别如图 4 和图 5 所示，通过对比发现，计算值与试验值的相似程度较高，表明本研究采用的数值方法具备较好的精度。

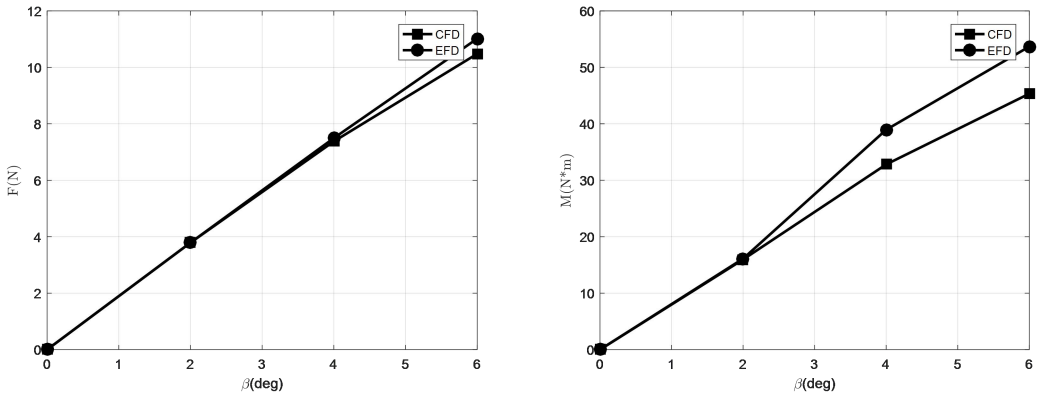


图 4 斜航运动横向力和转首力矩

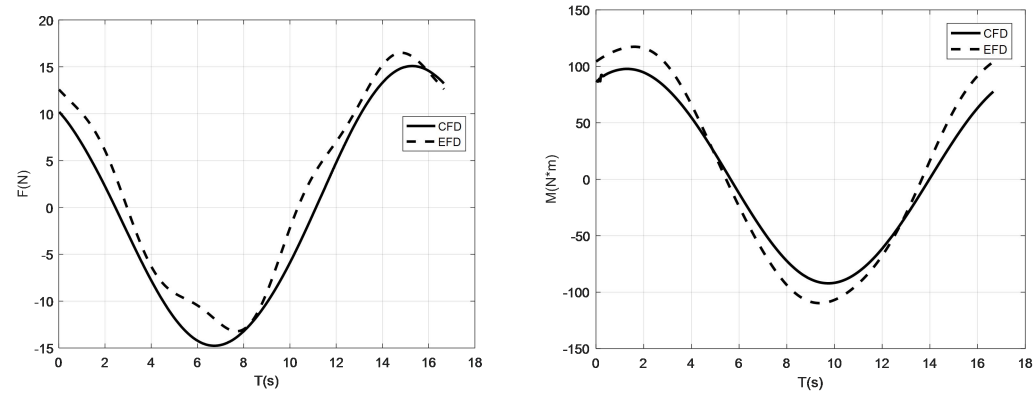


图 5 纯艏摇运动横向力和转首力矩

3 计算结果及稳定性衡准数计算

本研究纵倾角度设为-0.716°、-0.537°、-0.358°、-0.179°、0°、0.179°、0.358°、0.537°和 0.716°共 9 种工况，对 KVLCC2 光滑船体分别进行斜航试验和和纯艏摇试验，船模所受横向力和艏摇力矩如图 6 至图 9 所示。

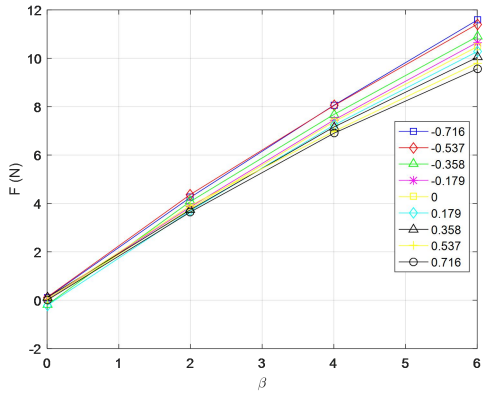


图 6 船模斜航运动所受横向力

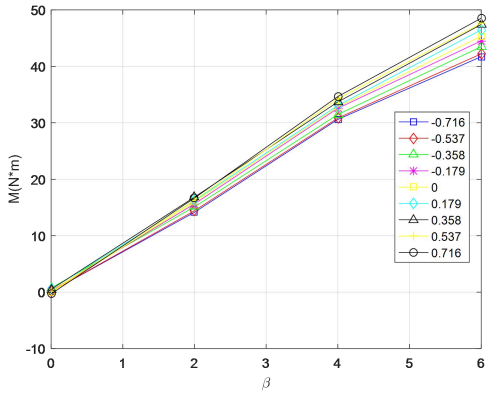


图 7 船模斜航运动所受艏摇力矩

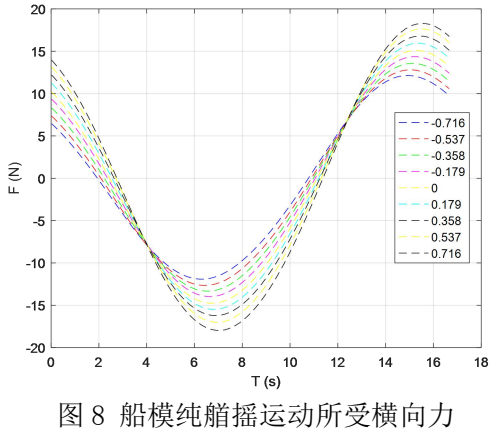


图 8 船模纯艏摇运动所受横向力

motion of the ship model

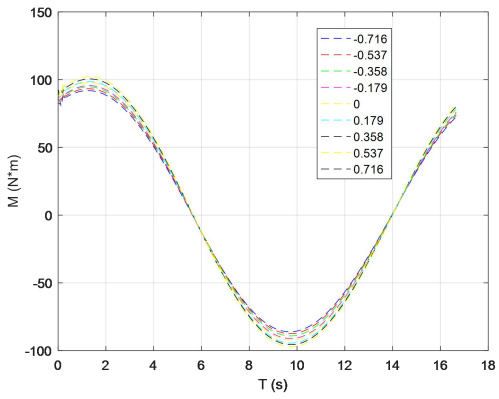


图 9 船模纯艏摇运动所受艏摇力矩

对斜航运动、纯艏摇运动运算结果进行拟合分析获得位置导数和旋转导数，其位置导数和旋转导数随船舶纵倾变化如图 10 和图 11 所示。

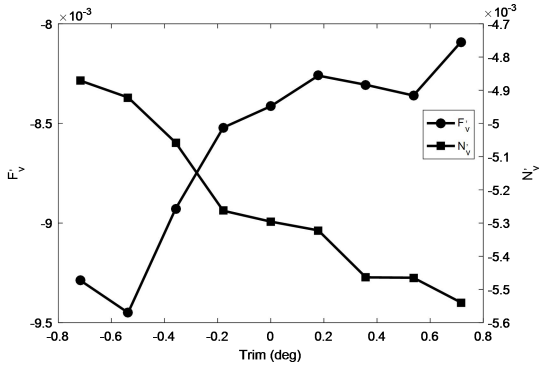


图 10 船舶不同纵倾时位置导数

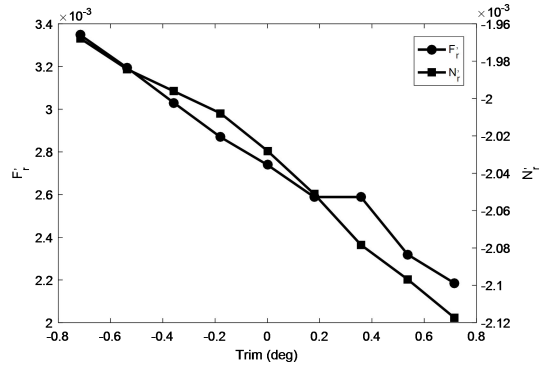


图 11 船舶不同纵倾时旋转导数

根据公式（14）得到无因次化的稳定性衡准数 C’，船舶航向稳定性随船舶纵倾变化如图 12 所示。

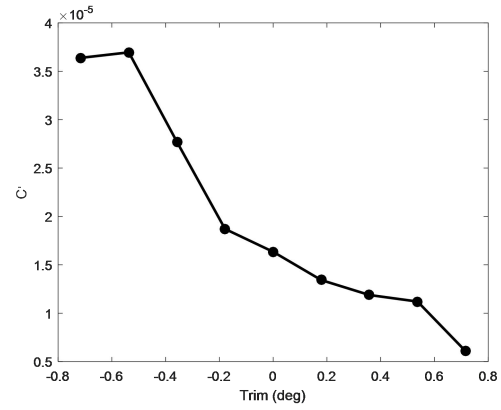


图 12 船舶不同纵倾时航向稳定性

从结果可以看出，船舶航向稳定性随着船舶纵倾的改变而变化，从尾倾 0.716° 到尾倾 0.537° 稳定性增加，从尾倾 0.537° 到首倾 0.716°，船舶稳定性逐渐降低，在尾倾 0.537° 时，目标船稳定性最佳。这主要是由于随着船舶从尾倾到首倾，其$|N_r|$在不断变大，$|F_r|$在不断变小（图 10），而$|N_r|$和$|F_r|$变化趋势相近（图 11），导致N_r/F_r变大，对稳定性不利。当船舶采取纵倾优化，减小船舶阻力改善船舶快速性时，会由于改变船舶纵倾而改变稳定性，根据文献[12]的船模试验和数值试验研究，目标船尾倾 0.537° 到尾倾 0.716° 时阻力较小，因此目标船在尾倾 0.537° 到尾倾 0.716° 时既可以获得较小阻力，又可以保持较好航向稳定性。

4 结论

本研究采用重叠网格技术基于 URANS 方法进行了 KVLCC2 船体纵倾对航向稳定性影响的数值研究，模拟了 KVLCC2 船模在-0.716°、-0.537°、-0.358°、-0.179°、0°、0.179°、0.358°、0.537°

和 0.716° 纵倾角度下的斜航试验和纯艏摇试验，通过平吃水状态下的数值结果与船模试验结果对比，证明了本文采用的数值方法和重叠网格技术有效，采用上述方法对各纵倾状态下的稳定性衡准数进行了计算，结果表明：

（1）目标船纵倾对航向稳定性有明显影响，在尾倾 0.537° 时航向稳定性最佳，从尾倾 0.537° 到首倾 0.716° ，船舶稳定性逐渐降低，这主要是由于随着船舶从尾倾到首倾使 N_v/F_v 变大导致的。

（2）从尾倾 0° 增加到尾倾 0.537° 可以较快提高目标船航向稳定性。

（3）结合目标船各纵倾下阻力，目标船在尾倾 0.537° 到尾倾 0.716° 时既可以获得较小阻力，又可以保持较好航向稳定性。

参 考 文 献

[1] IMO. Fourth IMO GHG study 2020, Executive Summary.

[2] Larsen, L.N., Simonsen, C.D., Klimt, N.C., Rae, H.C., 2012. In: Understanding the Physics of Trim. 9th Annual Green Ship Technology Conference, Copenhagen, Denmark.

[3] Yang, JiMan, Kim, HyoChul, 2005. Prediction of propulsive performance of VLCC at heeled and trimmed conditions. J. Soc. Naval Archit. Korea 42 (4), 307–314.

[4] Islam, H., Soares, C.G., 2019. Effect of trim on container ship resistance at different ship speeds and drafts. Ocean Eng. 183, 106–115, 2019.

[5] Liu Y, Zou L, Zou Z J. Computational fluid dynamics prediction of hydrodynamic forces on a manoeuvring ship including effects of dynamic sinkage and trim[J]. 2019, 233(1): 251-266.

[6] Sakamoto N, Carrica P M, Stern F. URANS simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant: part 1. Verification and validation for forces, moment, and hydrodynamic derivatives[J]. Journal of marine science and technology, 2012, 17: 422-445.

[7] Sakamoto N, Carrica P M, Stern F. URANS simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant: part 2. Analysis and validation for local flow characteristics[J]. Journal of marine science and technology, 2012, 17(4): 446-468.

[8] 宋深科,邹早建,邹璐.基于 CFD 的船体纵倾对航向稳定性的影响研究[C].上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院;2020. SONG S K, ZOU Z J, ZOU L. Research on the influence of hull trim on course stability based on CFD[C]. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University; 2020. (in Chinese)

[9] Zhang, Guangbin, Junsheng Ren, and Xiaowei Tan. "Estimation of Ship Hydrodynamic Derivatives using Numerical PMM Test with Trim Conditions." 2023 IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS). IEEE, 2023.

[10] Terziev M, Tezdogan T, Oguz E, et al. Numerical investigation of the behaviour and performance of ships advancing through restricted shallow waters[J]. Journal of Fluids and Structures, 2018, 76: 185-215.

[11] Stephen B. Pope. Turbulent Flows [M]. United Kingdom:Cambridge University Press, 2010.

[12] 张宏森. 船舶航态/航速优化与实船油耗性能预报[D].哈尔滨工程大学,2020. ZHANG H S. Optimization of Ship State/Speed and Prediction of Real Ship Fuel Consumption Performance [D]. Harbin University of Engineering, 2020. (in Chinese)

作者简介：朱鹏飞，讲师，15268001167,浙江海洋大学，lovedifa@126.com。

通信作者：艾万政，教授，15257070064，浙江海洋大学，aiwanzheng@126.com

基于小波包分解的船舶功率平抑控制策略

王杰[1]，滕宪斌*[2]，朱发新*[1]，常高雷[1]，王帅帅[1]，朱鑫波[1]

(1.浙江海洋大学船舶与海运学院，浙江舟山 316022；2. 广州航海学院轮机工程学院，广东广州 510725)

摘　要：针对混合动力船舶在不同航行工况下因高频暂态功率输入导致负载总线电压急遽波动和电能质量下滑等问题，本文提出了一种基于小波包分解的船舶功率平抑控制策略。在深入分析船舶负载功率幅频特性的基础上，利用 db9 小波包函数对其进行多重尺度分解与重构，以识别与不同储能介质特性相匹配的功率分频点，从而最大化复合储能系统的“追峰隆谷”效应。在 MATLAB/Simulink 环境中搭建混合动力船舶仿真模型，并与巴特沃斯滤波器的滤波效果进行对比分析。结果表明，所提出的策略能够自适应地优化船舶负载功率的分解与合理分配，有效平抑燃料电池输出功率波动，验证了所提算法的有效性和优越性。

关键词：复合储能系统；小波包分解；船舶功率平抑；巴特沃斯滤波器

1 引言

燃料电池混合动力船舶是以 PEM(Proton Exchange Membrane，PEM)燃料电池为船舶主动力源，并通过将多种类型的储能装置耦合形成复合储能系统作为船舶辅助能源，以并行供电的方式平抑船舶的输出功率波动。然而单一动力源的燃料电池船舶在航行和靠离港口过程中频繁的启停和加减速工况会引入急剧变化的浪涌式负荷功率，而 PEM 燃料电池和蓄电池其内部响应过程具有时滞性，难以应对这种高频瞬时功率波动，导致动力系统可靠性下降和使用寿命周期缩短，严重制约了电能利用效率及清洁能源的大规模应用。因此，协调控制各动力源的输出特性，利用有限的储能容量最大程度抑制负载功率的脉冲波动并保持直流母线电压的稳定性，成为推动混合动力船舶的快速发展的关键研究课题。

为解决这一问题，国内外学者对复合储能系统在平抑船舶功率波动方面的能量管理策略展开了广泛研究，其中低通滤波算法被认为是应对船舶暂态功率波动的有效方法之一。丁和 Jiang[1-2]基于复合储能系统的 SOC 值调节低通滤波器的时间常数，将风电场功率的低频率成分作为目标功率，达到了较为理想的平抑效果。李[3]提出了一种蓄电池和超级电容主动并联的独立光伏微网结构，结合传统低通滤波器和模糊控制器，修正了滤波时间常数不可变的问题。张[4]采用一阶巴特沃斯低通滤波器获取风力发电的目标功率以及蓄电池与超级电容的补偿功率，并通过预控制超级电容器的终端电压优化其运行状态。然而，低通滤波器难以完美兼顾灵敏度和平稳性，容易受到干扰引起的采样偏差影响，并且难以精确控制滤波器的时间常数。

相较于低通滤波算法，小波变换具有多尺度分析和时频局域化等特点，而小波包分解是在小波变换的基础上，进一步细化了对高频信号的全频带分解，具备更高的频率分辨率和尺度选择能力，有助于更准确地表征原始信号的时频信息。李[5]基于储能单元 SOC 划分工作区，协同调控复合储能系统的充放电行为，但其方法在多种储能单元协同工作时需考虑复杂的工况条件。贾[6]通过多层次小波包分解对风电场有功功率进行处理，提取出作为并网参考功率的低频信号，并利用复合储能系统的不同物理特性进一步划分高频信号，从而有效平抑风电场的输出功率波动。丁[7]采用小波分解方法提取更为精细的高频信号，并通过比较不同边界条件下的功率信号变化规律，提出了一种兼顾经济型和储能特性的能源优化分配策略，无需过多考虑储能设备的最优工作状态。

本文以复合储能系统平抑船舶输出功率波动为研究目标，通过引入不同类型的储能装置进行耦合得到复合储能系统，充分利用优劣互补的储能介质特性来有效平抑船舶航行中出现的高频暂态功率。在分析目标船舶负载功率幅频特性的基础上，提出一种基于小波包分解理论的复合储能系统平抑船舶输出功率波动的控制策略，并通过详细的仿真研究进行了验证。首先，采用快速傅里叶变换对船

舶负载功率进行频谱分析，以确定负载功率波动的频率分布范围。其次，利用自适应小波包分解对船舶负载功率进行全频段分解与重构，结合蓄电池和超级电容的充放电响应时间，分别选择与其频率范围相适应的负载功率进行平抑，从而获取整个航行工况中功率分配策略的全局最优解。最后，针对小波包分解后各动力源的输出功率，设计了一阶巴特沃斯低通滤波器，并通过仿真验证了所提出功率分配策略的优劣性。

2 基于复合储能系统的混合动力系统

本文以世界首艘燃料电池-蓄电池混合动力旅游观光船--FCs Alsterwasser 为研究对象，该船主要承担德国汉堡区域的乘客运输和观光旅行任务。如图 1 所示[8]，该船的推进系统功率为 100kW 级，配备两台峰值输出功率为 50kW 的集成式燃料电池系统和一组容量为 560V/360Ah 的铅酸蓄电池。图 2 展示了 Alsterwasser 号在德国汉堡的典型航行功率需求曲线[9]，从中可以看出船舶的最大功率需求为 110kW 左右，并伴随 50 秒左右的剧烈负载波动，涵盖内河和沿海地区等中小型观光船舶的多种运行工况，具备一定的仿真代表性。

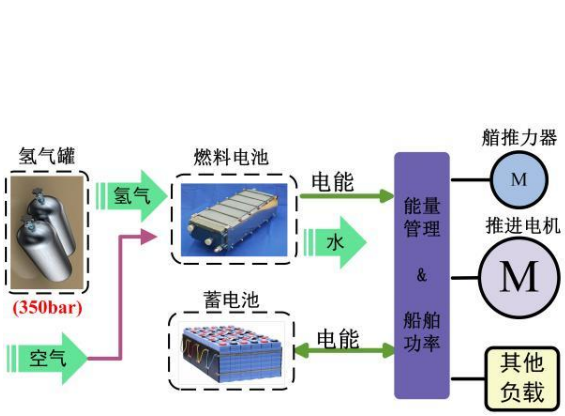


图 1 FCs Alsterwasser 混合动力系统拓扑结构

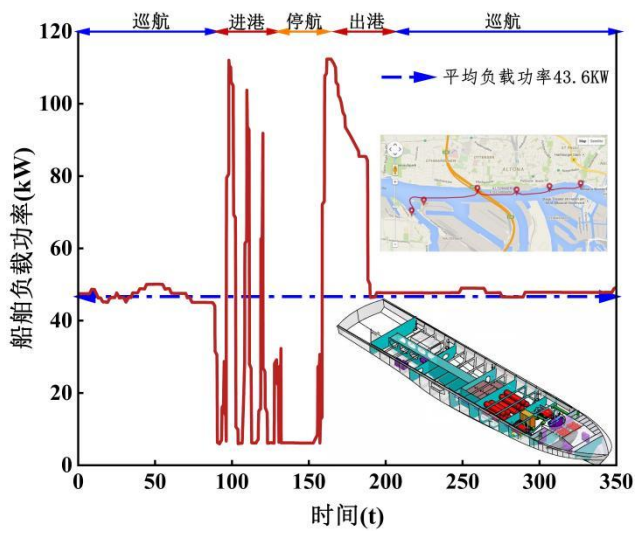


图 2 “Alsterwasser”号船舶典型负载功率曲线

在面对复杂多变的循环航行工况，混合动力燃料电池船舶在高低频负载剧烈变化下，易使燃料电池和蓄电池频繁进入怠速或过载状态，从而削弱动力系统整体的稳定性与鲁棒性。为解决这一问题，本文对目标船舶进行了模拟改进，提出了如图 3 所示的并联式混合动力系统拓扑结构。在该拓扑结构中，PEM 燃料电池仍为主动力源，同时将蓄电池和超级电容耦合为复合储能系统，替代了原动力系统中的单一储能装置。其中能量管理系统是在保证船舶动力总成的前提下，实现对各供能模块的灵活高效控制，并合理划分复合储能系统的工作模式。

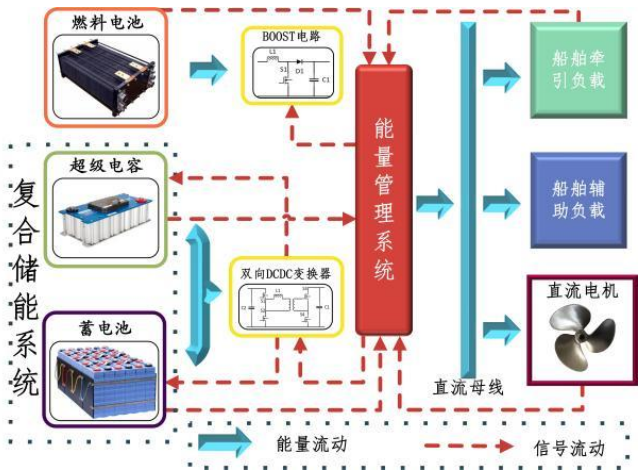


图 3　改进后混合动力船舶系统拓扑图

3 混合动力系统功率分配策略研究

3.1 巴特沃斯滤波器原理

巴特沃斯滤波器(Butterworth Filter)是数字滤波器的一种设计分类[10]，也被称作最大平坦滤波器，由英国工程师 Butterworth 与 1930 年在英国《无线电工程》提出，可用如下幅度平方-频率函数表示：

$$\left|H\left(j\Omega\right)\right|^2=\frac{1}{1+\left(\frac{\Omega}{\Omega_r}\right)^{2N}}=\frac{1}{1+\varepsilon^2(\frac{\Omega}{\Omega_s})^{2N}} \tag{1}$$

式中：正整数 N 为滤波器阶数；Ω_r 为实际截止频率，即幅度下降-3dB 时的频率；Ω 为输入信号频率，Ω_s 为通频带边缘频率。一阶巴特沃斯低通滤波器拓扑图如图 4 所示。

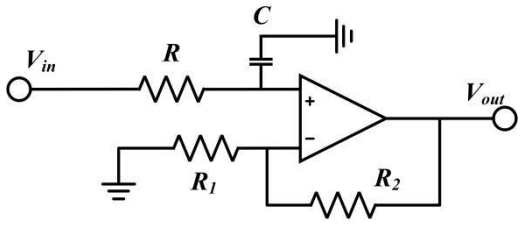


图 4 一阶巴特沃斯低通滤波器

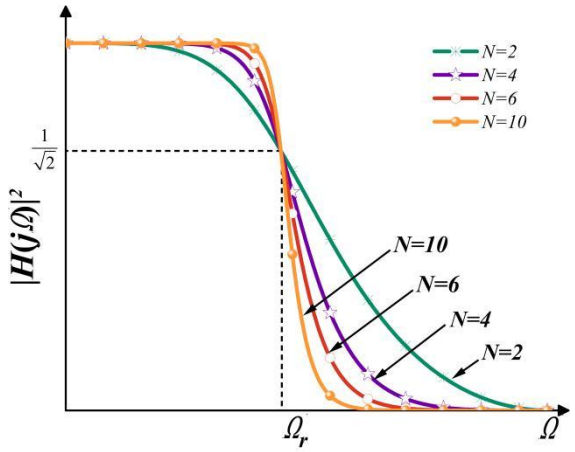


图 5 不同阶数 N 下巴特沃斯滤波器幅频特性图

不同阶数 N 下巴特沃斯滤波器的幅频特性如图 5 所示[11]，具有如下特性：

（1）有 $\Omega=0$ 当时，$\left|H(j\Omega)\right|^2=1$，即在 $\Omega=0$ 处幅频响应曲线最大程度平坦，幅值无衰减。

（2）巴特沃斯滤波器的幅值对角频率单调下降，且滤波器阶数 N 越大，在过度带幅值衰减速度越快，滤波器越逼近于理想幅频特性。

（3）当 $\Omega=\Omega_r$ 时，对不同阶数 N，都有 $\left|H(j\Omega)\right|=1/\sqrt{2}=0.707$，即在截止频率处通带的最大衰减为 3dB。

3.2 小波包变换理论分析

3.2.1 小波包分解原理

小波包分解是基于小波分析的一种更为精细化的信号分解算法，在处理非稳态随机信号时具有更好的时频分辨率和信噪比处理能力。它能够自适应地匹配与被分解信号频谱相吻合的频段，通过小波基函数的伸缩和平移实现信号的多尺度分解，从而更精确地捕捉各频率范围内的关键时间点或时序特征[12]。鉴于本文以德国某燃料电池渡轮为目标船舶，该船在靠离港或加减速工况下，船舶负载功率变换频繁且波动剧烈，因此本文选择具备信号突变分解优势和时频局部分析能力的小波包分解方法。

小波包分解的基本原理可以通过节点树来表示，其中信号的分解是通过多次迭代的小波变换实现的，并逐层提取输入信号的特征[13]。图 6 展示了小波包分解的示意图，从左侧到右侧，通过分解第一层原始信号获得第二层的信号分量...和第 n 层；S 代表原始功率需求信号，将其分解为 n(n≥1)层，以获得相应的低频近似信号 A^n 和高频细节信号 D^n。

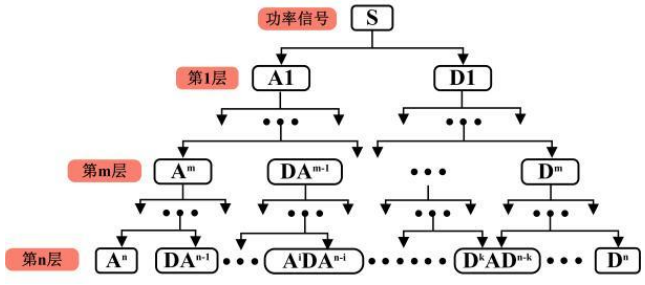


图 6 小波包分解示意图

小波包算法包括两个过程：分解与重构。图 7 为小波包一阶分解与重构结构图，数学模型可表示为式(2)和式(3)：其中 f_{j+1}^n 和 f_j^{2n+1} 是分解和重构的低、高频系数，h_{l-2k}、g_{l-2k} 为小波包分解低、高通滤波器组；h'_{k-2l}、g'_{k-2l} 是小波包重构低、高通滤波器组。

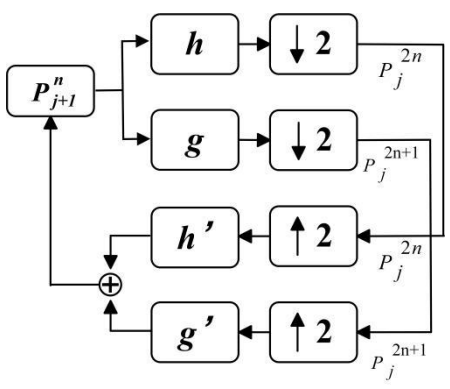


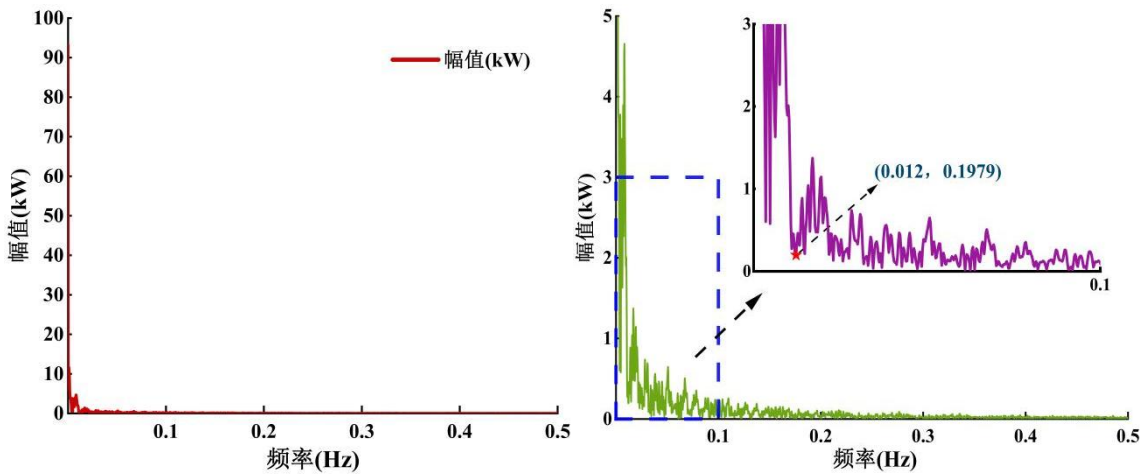
图 7 小波包一阶分解与重构模型

$$\begin{cases} P_j^{2n+1}[k] = \sum_{l\in Z}^{n} h_{l-2k} f_{j+1}^n[l] \\ P_j^{2n+1}[k] = \sum_{l\in Z}^{n} g_{l-2k} f_{j+1}^n[l] \end{cases} \tag{2}$$

$$P_{j+1}^n[k] = \sum_{l\in Z} h'_{k-2l} f_j^{2n}[l] + \sum_{l\in Z} g'_{k-2l} f_j^{2n+1}[l] \tag{3}$$

3.2.2 船舶负载功率信号频谱分析

本文针对“Alsterwasser”号船舶的典型负载功率波动，结合其功率在频域和时域中的特性，以 1s 为采样间隔，利用 Matlab 中的 FFT 函数对原始需求功率信号进行快速傅里叶变换[14]，得到如图 8(a)所示的幅频响应曲线。为了更清晰地展示频率响应的幅度特性，图 8(b)绘制了局部放大信号曲线。



(a) 原始频谱响应曲线图　　(b) 频谱局部放大图

图 8 船舶负载功率频谱响应曲线图

通过对船舶负载功率的幅频特性进行分析可以确定不同频率范围内负载功率的能量分布。由图 8 的原始频谱响应曲线和局部放大图可知，船舶负载功率的净功率能量频段主要集中在 0.012Hz 以内；在 0~0.012Hz 内的低频段，功率曲线幅值最大且曲线趋势震荡明显；而在大于 0.012Hz 的高频功率部分幅值较小且曲线趋势变化较为平缓，这与能量型和功率型电池的平抑特性一致。鉴于蓄电池的充放电响应时间为分钟级，而超级电容的充放电响应时间则在毫秒级，且蓄电池充放电速率较低，高倍率和深度充放电会加速其寿命衰减和老化，进而影响整个储能系统的容量配置和成本经济性[15]。因此，本文选择 10min 作为超级电容和蓄电池充放电响应时间分界点，即将 0.012Hz 作为二者平滑输出的分界频率阈值，由超级电容负责平抑 0.012Hz 以外的高频功率，其余部分次高频功率则由蓄电池进行平抑。

由文献[16]可知，PEM 燃料电池和蓄电池输出功率的理想频率分别为 10^{-4}~10^{-2}Hz 和 10^{-2}~10^{2}Hz。故本文选择小波包分解重构后的最低频信号 $S_{n,0}$ 作为燃料电池的输出功率 P_{fc}，$S_{n,1}\sim S_{n,i}$ 的功率之和作为蓄电池平抑功率指令 P_{bat}，其余 $S_{n,i+1}\sim S_{n,2^n-1}$ 段高频功率作为超级电容的平抑功率指令 P_{sc}，功率分配计算式如下：

$$\begin{cases} P_{fc}(t)=P_{S_{n,0}}(t) \\ P_{bat}(t)=\pm\sum_{i=1}^{k}P_{S_{n,i}}(t) \\ P_{sc}(t)=\pm\sum_{m=k+1}^{2^n-1}P_{S_{n,m}}(t) \end{cases} \tag{4}$$

式中：$P_{bat}/P_{sc}(t)>0$ 表示复合储能装置放电，$P_{bat}/P_{sc}(t)<0$ 表示复合储能装置充电。

3.2.3 最优小波基函数的选取

对船舶负载功率进行小波包分解旨在平抑其负载功率波动，减少对供能系统的影响。合理选择小波基函数对船舶整体能量管理策略的平抑效果、储能系统的容量配置和燃料电池的输出功率波动范围等方面起着决定性作用。由于本文目标船舶在不同航行工况时负载功率波动急剧变化且无规律，故需选择具有良好的多尺度分析能力和频域局部性的小波函数。

通过对比不同小波函数的实时滤波效果，本文选用简单常用的 db9 小波作为小波基函数。该小波函数因其具有较好的紧支撑性、正交性和近似对称性，能够有效匹配船舶负载功率在时域和频域上的不规则性变动，其 db N 小波族的母函数 $\mu(t)$可以用以下方式表示：

$$\mu(t)=\sum_{k=0}^{2N-1}h_k\times\sqrt{2}\times\frac{\sin(\pi(2t-k))}{\pi(2t-k)} \quad (5)$$

式中 h_k 是高通滤波器系数，N 是小波函数阶数，t 是自变量，图 9 是 N=9 时的 db9 小波基的尺度函数和幅频图。

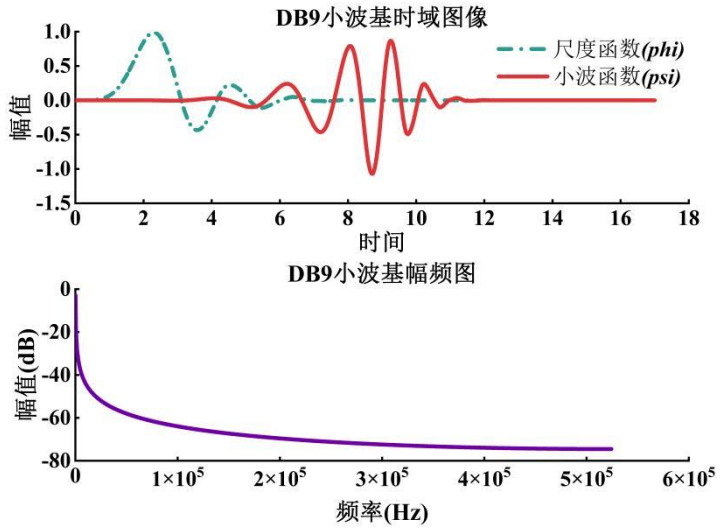


图 9 db9 小波的尺度函数和幅频图

3.3 小波包最优分解层数

由于船舶负载固有的间歇性和不可预测性，本文主要从波动率角度出发，以 10s 内船舶负载的功率标准偏差为平抑效果评价指标进行分析，其功率标准偏差计算公式为：

$$S_{fc}=\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}(P_{nt_fc}-P_{avg_fc})}{N}} \quad (6)$$

式中：P_{nt} 为第 n 个采样窗口负载功率；P_{avg_fc} 为该窗口的平均负载功率；N 为采样窗口数据长度。

将基于小波包分解的控制策略应用到如图 2 所示的典型负载功率曲线，逐渐增大分解层数 n，将不同分解层数下的低频近似分量 $S_{n,0}$ (n=9，10，11，12)进行比较分析，得到如图 10 所示的最低频功率信号对比曲线，对每层分解和重构后得到的低频近似分量 $S_{n,0}$ 进行波动率统计分析，若信号 $S_{n,0}$ 在 10s 内功率标准偏差值首次小于 3kW 时，取得小波包迭代中的最优分解层数 n，即实现目标船舶负载功率的最佳分解，图 11 为信号 $S_{n,0}$ 在 10s 内功率标准偏差曲线。

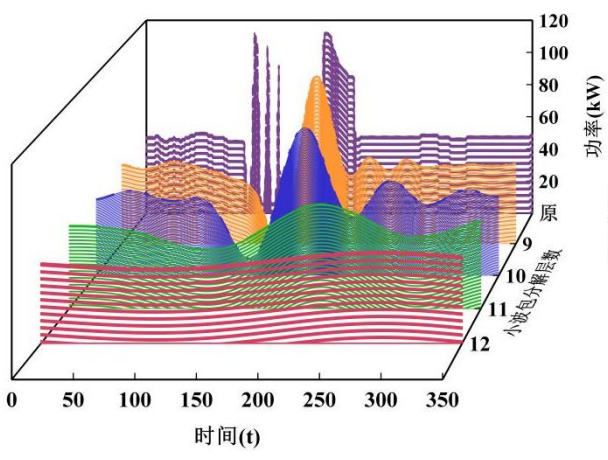


图 10 不同分解层数下最低频功率信号对比图

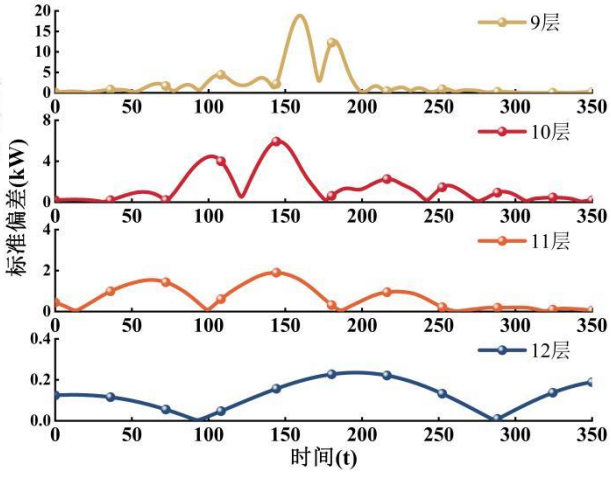


图 11 $S_{n,0}$ 功率标准偏差曲线

结合图 10 和图 11 的仿真结果可知，航行期间原始负载功率的最大功率波动量为 106.42kW、10s 内的功率标准偏差值为 44.54kW；当小波包分解层数 n<11 时，得到的最低频信号 $S_{n,0}$ 的最小功率标准偏差值为 5.94 kW，平抑效果未达预期，无法满足燃料电池输出功率的要求。然而，当分解层数达到 11 层时，10 秒内的功率标准偏差值降至 2.95kW，最大功率波动量降至 33.75 kW，相较于原始负载功率波动幅度下降了 68.29%，功率标准偏差同比下降了 95.74%。理论上，随着分解层数的增加，小波包分解的频率分辨能力增强，能够更有效的滤除高频功率，从而降低功率信号的标准偏差和波动幅度，过高的分解层数虽能进一步平滑信号，但其滤除的高频功率指令会显著增加复合储能系统的容量配置，导致船舶航行的整体经济成本增加。综上，分解层数为 11 时在平抑功率波动方面效果最佳，既满足了燃料电池输出功率的标准，又避免了不必要的经济成本增加，其中 P_{fc}、P_{bat} 和 P_{sc} 计算公式为：

$$P_{fc} = P_{11,0}(t) \tag{7}$$

$$P_{bat} = P_{11,1}(t) + P_{11,2}(t) + \cdots + P_{11,8}(t) \tag{8}$$

$$P_{sc} = P_{11,9}(t) + P_{11,10}(t) + \cdots + P_{11,2048}(t) \tag{9}$$

4 仿真验证与对比分析

为检验本文所提船舶功率平抑控制策略在不同航行工况下的平抑效果，在 Matlab 软件中搭建混合动力系统仿真模型，对目标船舶在典型工况下的历史航行数据进行仿真分析。本文将小波包分解后各储能介质输出功率的频率分界点作为巴特沃斯滤波器的截至频率，仿真结果如图 12-17 所示。

图 12 展示了燃料电池、蓄电池和超级电容在经过 11 层小波包分解和重构后各自承担的功率输出曲线。可以看出，燃料电池主要负责平抑原始负载功率的最低频分量 P_{fc}，其输出功率曲线在整个时间域内保持了较为平稳的趋势，有效滤除了高频分量，不仅减缓燃料电池老化，还显著提高了其效率与使用寿命。蓄电池则依托其较大的能量密度和较长的充放电周期，承担了时间尺度较长、功率变化相对平缓的次高频功率分量 P_{bat}。在 100 秒至 200 秒的时间段内，尽管蓄电池的输出功率出现了一定程度的波动，但整体幅度依旧较小，避免了频繁充放电行为对其寿命的负面影响。超级电容则在图中展示了其动态响应速度快、功率密度高和寿命周期长等优势，通过小波包分解，超级电容主要平抑原始负载功率中波动幅度较大且频率较高的瞬时功率变化，其功率输出曲线在时间轴上表现出频繁且迅速的波动，确保了储能装置的状态(SOC)维持在合理区间，从而延长了循环使用寿命。

图 13 展示了在相同控制条件下，基于 11 层小波包分解和巴特沃斯滤波器的功率分配策略对 PEM 燃料电池输出功率的影响。结果表明，在大多数循环工况下，经过小波包分解平抑后的燃料电池输出功率曲线更加平稳。具体而言，燃料电池在整个航行期间的输出功率极差为 33.84 kW，而在某一时间窗口内最大功率标准偏差仅为 1.89 kW。相比之下，经过巴特沃斯滤波器平抑后的燃料电池输出功率极差为 38.12 kW，最大功率标准偏差为 2.58 kW。数据的差异表明，巴特沃斯滤波器在功率波动的平抑方面相较与小波包分解算法略显不足。此外，巴特沃斯滤波器处理后功率曲线在当多个时间段内出现明显的滞后现象，尤其在 100 秒到 150 秒之间，滞后特性较为突出。尽管巴特沃斯滤波器在某些时段表现出较强的平滑效果，但在应对瞬时高频波动和动态负载变化时，其响应速度和适应性相对较慢，容易导致功率滞后和过度波动。而小波包分解能够更有效地捕捉和分离原始功率信号中的各个频率分量，使得每种储能装置都能在其最佳的工作频段内运行，减少了能量储存装置的过度损耗，提高了整个系统的运行效率和寿命。因此，在混合动力船舶负载功率的实时平抑和合理分配方面，小波包分解策略更加适用，能够显著提升系统的性能和稳定性。

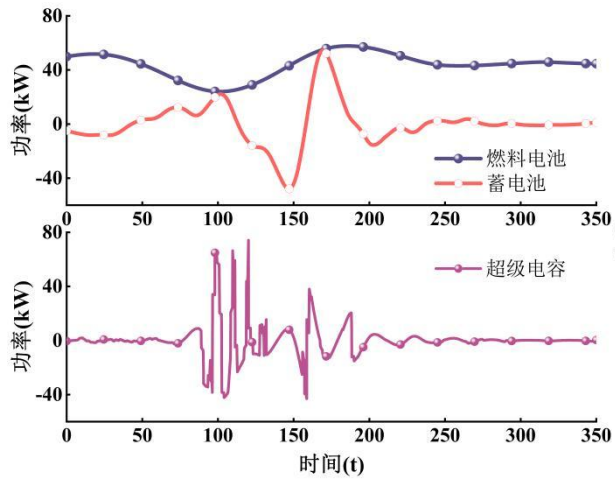


图 12 混合动力系统功率分配指令

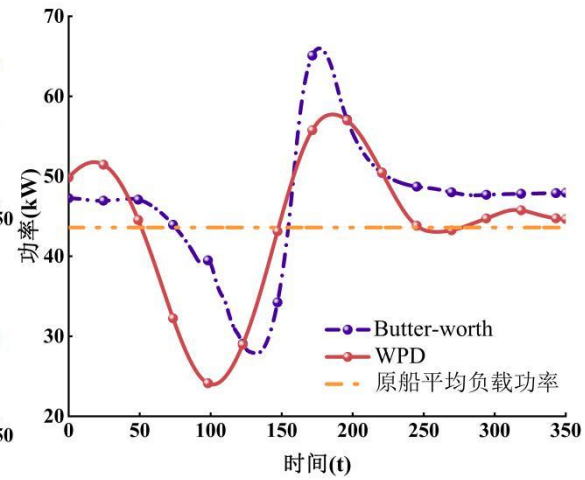


图 13 不同控制策略下燃料电池输出功率曲线

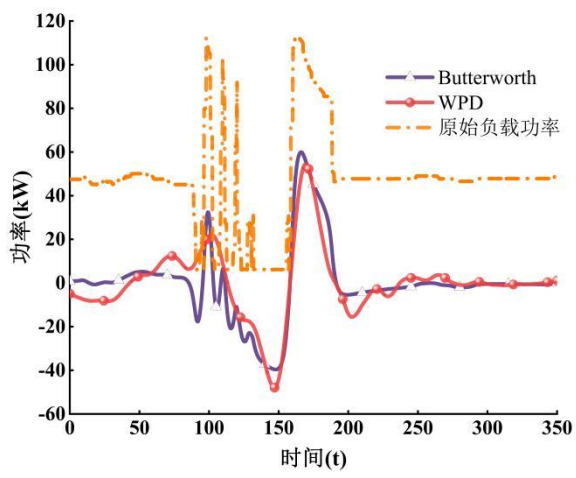


图 14 不同控制策略下蓄电池输出功率曲线

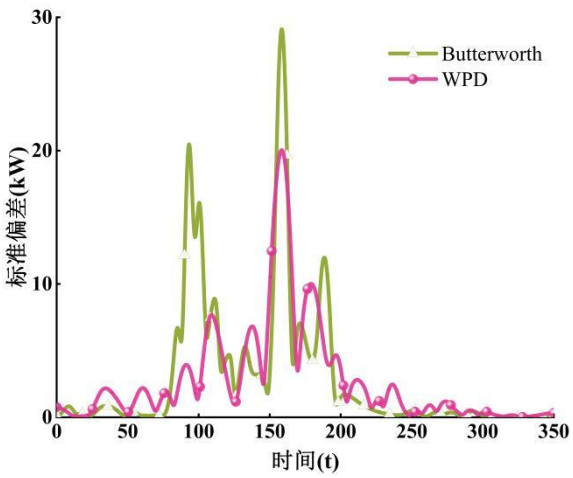


图 15 蓄电池输出功率标准偏差曲线

图 14 和图 15 分析可得，本文所提的平抑控制策略对蓄电池输出功率的调控更加平稳。在图 14 中，经过巴特沃斯滤波处理后功率波动极差为 90.27kW，而经小波包平滑处理后的功率波动极差为 102.38kW，相较前者增加 11.83%。这表明在负载波动较大的情况下，小波包分解平抑后的蓄电池不仅能有效应对负载的瞬时波动，还能承担部分峰值功率以及超过燃料电池最大输出功率的部分稳态功率。图 15 中，经小波包分解后的蓄电池输出功率标准偏差最大值为 20.04kW，其中标准偏差超过 3kW 的采样窗口个数占比 27.32%，其总和为 20.15Mw。而经过巴特沃斯滤波平抑后的功率标准偏差最大值为 29.08kW，标准偏差超过 3kW 的采样窗口个数占比为 29.79%，其总和为 25.95Mw，这些数据表明，小波包分解处理后的曲线平滑效果更为显著，减少了功率波动对蓄电池充放电频率的影响，充分体现了蓄电池功率缓冲器的作用。综上可得，两种平抑算法在大多数时间节点呈现相似的波动趋势，能够实时跟踪原始负载功率的变化特征。巴特沃斯滤波器尽管在功率波动幅度上表现出较好的控制能力，但在处理负载动态变化时略显不足，而经小波包分解算法处理得到的蓄电池输出功率虽然功率波动极差略高，但其能够更加灵敏地适应复杂信号的变化，改善蓄电池的充放电周期并延长其使用寿命。

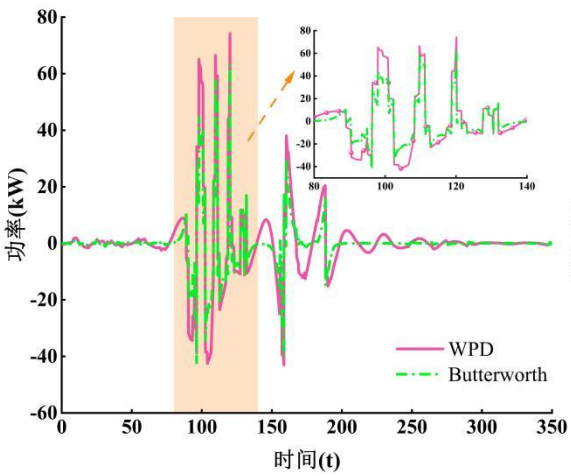


图 16 不同控制策略下超级电容输出功率曲线

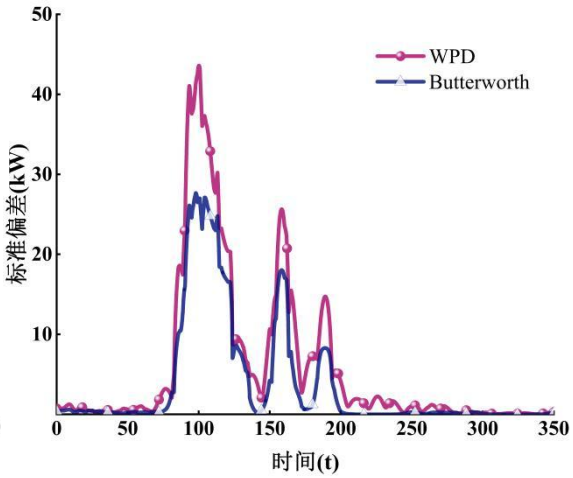


图 17 超级电容输出功率标准偏差曲线

通过对分析图 16 和图 17 可知，超级电容主要负责平抑原始负载功率中波动幅度较大的瞬时高频功率。在 100s 至 150s 时间段内，超级电容输出功率呈现多次急剧变载，反映出小波包分解在捕捉负载功率瞬态变化方面的敏感性和高效性，经其平滑处理后的功率波动极差达到 117.21kW，最大输出功率标准偏差为 43.58kW；相比之下，巴特沃斯滤波后的功率极差为 105.55kW，最大输出功率标准偏差为 26.67kW，相较前者分别降低 9.95%和 24.06%，这些数据差异表明巴特沃斯在应对负载动态变化时略显不足。综上可知，小波包分解算法能够更加有效地捕捉和响应负载功率中的高频瞬态功率，充分发挥了超级电容动态响应速度快和能够频繁充放电转换的优势，有效避免了燃料电池和蓄电池承受暂态高频功率冲击，从而提升系统整体的效率和寿命，从侧面也验证了基于小波包分解的船舶功率平抑控制策略更加适用于混合动力船舶负载功率的实时平抑，并能够实现更为合理的功率分配。

5 总结

本文针对目标船舶中的单一储能装置存在的循环寿命短、可调度性差等问题，从幅频特性角度对原始负载功率进行频谱分析，以燃料电池有功功率变化限值为约束，提出一种基于小波包分解的船舶功率平抑控制策略，并对不同的小波基函数和分解层数进行分析和选择，结合蓄电池和超级电容各自的充放电响应时间，实现了船舶负载功率的优化分配。仿真结果表明，本文设计的功率平抑控制策略相较于巴特沃斯滤波算法具有更好的平滑性和更小的波动性，其中蓄电池的充放电转换频率降低了 30.78%，有效避免了频繁充放电对蓄电池的不利影响。在充分发挥复合储能系统“追峰隆谷”作用的同时，实现了船舶负载功率的最优分配，显著延长了整个储能系统的使用寿命。

参考文献

[1] 丁明,林根德,陈自年,等.一种适用于混合储能系统的控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(07):1-6+184.

[2] JIANG Q,WANG H.Two-time-scale coordination control for a battery energy storage system to mitigate wind power fluctuations[J].IEEE Transactions on Energy Conversion,2013,28(1):52-61.

[3] 李正明,何斌,张家浚.一种应用于光伏混合储能系统的模糊控制方法[J].信息技术,2018,42(10):23-27.

[4] 张野,郭力,贾宏杰,等.基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J].电力系统自动化,2012,36(16):36-41.

[5] 李培强,李文英,唐捷,等.基于 SOC 优化的混合储能平抑风电波动方法[J].电力系统及其自动化学

报,2017,29(03):20-27.
[6] 贾伟青,任永峰,薛宇,等. 基于小波包-模糊控制的混合储能平抑大型风电场功率波动[J]. 太阳能学报, 2021, 42(09):357-363.
[7] 丁明,吴杰,张晶晶. 面向风电平抑的混合储能系统容量配置方法[J].太阳能学报,2019,40(03):593-599.
[8] 徐晓健,杨瑞,纪永波,等.氢燃料电池动力船舶关键技术综述[J].交通运输工程学报,2022,22(04):47-67.
[9] HAN J,Charpentier J-F,TANG T.An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat.Energies 2014;7:2799e820.
[10] 汪倩,陈思磊,刘家欣,等. 低压直流系统剩余电流检测技术研究综述[J].高压电器,2023,59(06):1-12.
[11] 黄睿,李兴源,廖建权,等. 混合直流输电直流侧谐波分析及滤波器设计[J].电子科技大学学报,2019,48(02):208-215.
[12] 刘仕兵,武沛池,喻星,等.基于小波包分解的城市轨道交通混合储能容量优化配置研究[J/OL].电源学报:1-14[2024-05-11].
[13] 刘云侠,贝广霞,蒋忠贇,等.基于小波包变换的自适应混沌信号降噪算法[J].电子与信息学报,2023,45(10):3676-3684.
[14] JOSHI M,PUJAR K . MATLAB-based fault diagnosis of industrial rotor-bearing systems [J].Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2023.
[15] 许庆祥.平抑风电功率波动的混合储能容量配置方法[D].华北电力大学(北京),2023.
[16] AGBLI K. Energy flows modelling of a PEM electrolyser-photovoltaic generator PEM fuel cell coupling dedicated to stationary applications. 2012. PhD of the University of Franche-Comte, order number: 2012011.

作者简介：
王杰（1999-），男，浙江海洋大学，在读硕士，交通运输专业，海航安全技术，E-mail:wj15935501788@163.com。
滕宪斌（1969-），男，广州航海学院，教授，硕导，轮机工程专业，现代轮机工程管理，E-mail:tengxbin@163.com。
朱发新（1982-），男，浙江海洋大学，副教授，硕导，轮机工程专业，船舶安全与污染控制研究方向，E-mail:zhufax7758@163.com。

受限水域 DTC 船航行阻力特性研究

毛超进，艾万政，忽园园，朱鹏飞

（浙江海洋大学船舶与海运学院，浙江 舟山 316022）

摘 要：受限水域内，由于富余水深的限制，船舶周围流场速度加快和船体周围压力差更大的特点使得升沉和纵倾运动幅度更加明显，极大增加船舶航行的阻力。此文基于 STAR-CCM+软件对 DTC 集装箱船在受限水域中航行阻力进行数值研究，以雷诺平均方法（RANS）进行数值模拟，VOF 模型来模拟兴波,采取 DFBI（六自由度）变形模型和 SST k-ω湍流模式来模拟湍流的影响，通过水池试验数据验证了方法的可靠性。基于此，探究不同航速、航道断面系数、纵倾角度条件下 DTC 集装箱船模航行阻力变化情况，对比其计算结果，分析其航行阻力的数值规律。结果表明：

当 F_r 从 0.044 到 0.097 时，船舶总阻力系数随速度增大而减小，当 F_r 超过 0.097 后，船舶总阻力系数急剧增大；航道断面系数变大，船舶总阻力系数变小；在航速不变的情况下，保持船舶尾部适当倾斜，可以达到减阻效果。此研究相关成果可为船舶航行减阻、提高海上运输能源效率提供理论支撑。

关键词：受限水域；DTC 集装箱船；数值模拟；阻力

0 引言

近年来，随着经济全球化和贸易全球化的发展，船舶数量日益增长，直接导致燃油消耗量的增加。而在船舶航行中，燃油消耗的成本占总成本的一半以上。同时在航行过程中产生的各类油污对海洋影响日益加剧，破坏海洋生态系统平衡。在环保政策的推动下，航运企业需要加大力度投资新技术与设备研发，降低船舶燃油消耗。这不仅能够实现船舶运输成本的有效控制与管理，还有助于减少温室气体和其他污染物的排放，促进航运业的绿色低碳发展，对维护生态环境和生物多样性保护具有重要意义，也符合现代交通节能环保化的发展趋势。当下实现船舶节能减排最有效的方式是减少船舶航行阻力。目前针对船舶航行时的阻力研究主要有：Prakash 和 Chandra[1]使用 Fluent 探究不同航速对船舶航行阻力的影响,实验显示 CFD 技术可以成功地对船舶在浅水中的阻力进行预测。Wortley[2]使用 RANS 求解器— OpenFOAM，对 DTC 船模的下沉量和阻力进行了计算。通过对比试验结果发现 OpenFOAM 对阻力估值过高。Khaled Elsherbiny[3]等人以 KCS 标准集装箱船作为研究对象，对船舶在允许的速度范围内通过苏伊士运河时的水动力现象进行了物理实验、数值模拟、和经验方法分析，表明限制水域会放大对船舶航行阻力等性能的相对影响。刘义[4]等人对 3 艘在长江营运的内河船舶通过粘性绕流数值模拟的方式进行了运动水动力计算。揭示了不同水深下这 3 艘船舶的操纵变化趋势。罗鑫[5]等采用数值仿真软件 STAR-CCM+模拟并计算了在静水面下大型船舶以不同航速和侧滑角航行时的流场特性，得到其流体阻力变化的数据。

由以上文献梳理可得，现有研究船舶水动力特性常用理论计算方法、水池试验方法和数值模拟方法，且大多数在不受限制的开阔水域，对于限制水域内水动力特性研究较少。此文采用数值模拟方法，结合 2023 年扩建工程完工后的苏伊士运河探究不同航速、航道断面系数、纵倾角度条件下受限水域船舶航行阻力特性变化规律，其成果不仅适用于受限水域，对于开阔水域亦有一定参考[3]。DTC 船作为其内主流船型之一，研究其船舶阻力变化，对于提高航行性能及相关部门航道优化具有重要意义。

1 数值模拟条件

1.1 基本原理

此文基于 RANS 方程模拟了 DTC 航行时的黏性流场。计算过程中，采用有限体积法对控制方程进行离散，并利用 SST k-ω 湍流模型对流体控制方程进行封闭。为了减少边界对数值计算结果的影响，还采用人工阻尼法处理进口和出口的波浪影响。此外，采用 VOF 法（Volume of Fluid method）捕捉自由面位置，基于精度好、效率高的全 y+法进行近壁处理，DFBI 设置六自由度变形模块，并开放了垂荡和纵摇方向的自由度。

1.2 研究对象

以韩国 KRISO（Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering）所设计的不带舵的 DTC 集装箱船裸船体标准船模为研究对象，该船模已被 ITTC(国际拖曳水池会议)操纵性委员会推荐为 CFD 计算的标准模型之一。试验模型缩尺比为 1:59.407，试验船模见图 1，实船和模型的主尺度见表 1。



图 1　DTC 船体模型

表 1　DTC 船主尺度参数

主尺度	符号和单位	模型尺度	实船尺度
缩尺比	λ	59.407	1
垂线间长	L_{pp}/m	5.976	355
水线宽	B_{WL}/m	0.859	51
船中吃水	T/m	0.244	14.5
排水体积	Δ/m^3	0.827	173467
质量	m/kg	825.35	177804
方形系数	C_B	0.661	0.661

1.3 试验工况

为更加符合实际，以苏伊士运河苏伊士市至大苦湖段按同等缩尺比缩放来模拟受限水域情况，航道断面如图 2 所示。W_1为航道上面宽度，W_2为航道下面宽度，h为航道水深，查阅相关资料计算出当前航道的边坡斜率 α。2022 年，大苦湖段面宽为 313 米，水深为 20 米，根据边坡斜率，计算得航道底面宽为 130 米，下文称原始航道。改造工程于 2023 年 7 月完工，拓宽之后的航道面宽为 353 米，水深为 22 米。根据边坡斜率计算可知底面宽为 141 米，下文称扩建航道。试验航道参数见表 2 所示。[6]

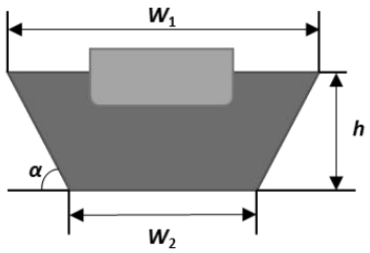


图 2　航道断面形状

表 2　原始航道与扩建航道参数

参数	W_1/m	W_2/m	h/m
原始航道	5.629	2.188	0.338
扩建航道	5.942	2.373	0.37

邓锐[7]等认为仿真模拟需要进行速度换算，本文采用傅汝德相似定律公式对试验速度进行换算。

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}} \tag{1}$$

$$\frac{v_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{v_s}{\sqrt{gL_s}} \tag{2}$$

$$v_m = \frac{v_s}{L_s / L_m} = \frac{v_s}{\sqrt{\lambda}} \tag{3}$$

式中，m，s 分别为船模和实船的参数；λ 是实船和船模间的缩尺比。

1.4 计算域设置及边界条件

本文研究的研究对象是 DTC 无舵裸船体，因其在静水航行时严格对称，为节约算力，数值模拟只对一半的计算域进行计算。计算域如图 3 所示，以一倍船长（L_{PP}）为单位，具体尺寸为：入口边界距离船模艏垂线 1 倍船长；出口边界距离船模艉垂线 2 倍船长；计算域上面宽度和下面宽度依据

航道 W_1和 W_2的一半长度换算得到；计算域高度依据水深和净空高度换算得到，为节省计算资源，净空高度取 1.3 m。[8]



图 3　计算域

Van[9]等表明边界条件的设置对计算结果有较大影响，因此需要合理设置边界条件。各边界的边界条件设置情况如表 3 所示，其中压力出口假定其压力为静水流场不受扰动的流体压力；水底边界切向速度等于船速（方向相反）。

表 3　边界条件设置

边界	边界条件
入口、顶部	速度入口
出口	压力出口
底部	移动滑移壁面
侧面	移动滑移壁面
对称面	对称边界
船体	不可滑移壁面

1.5 网格划分

基础尺寸取 L_{PP} /60 = 0.1 m，棱柱层数取 5，棱柱层延伸取 1.2。设置网格目标尺寸的加细比为 $r=\sqrt{2}$，对船体表面网格进行局部加密，对船首船尾附近、自由面附近网格进行加密，创建了粗、中等、细三种网格条件，所使用的网格分辨率分别为 51 万（粗）、109 万（中等）、256 万（细）。图 4，图,5 展示了扩建航道计算域整体网格结构及船首船尾加密网格结构。

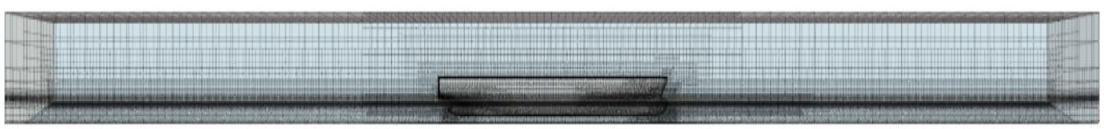


图 4　计算域整体网格结构

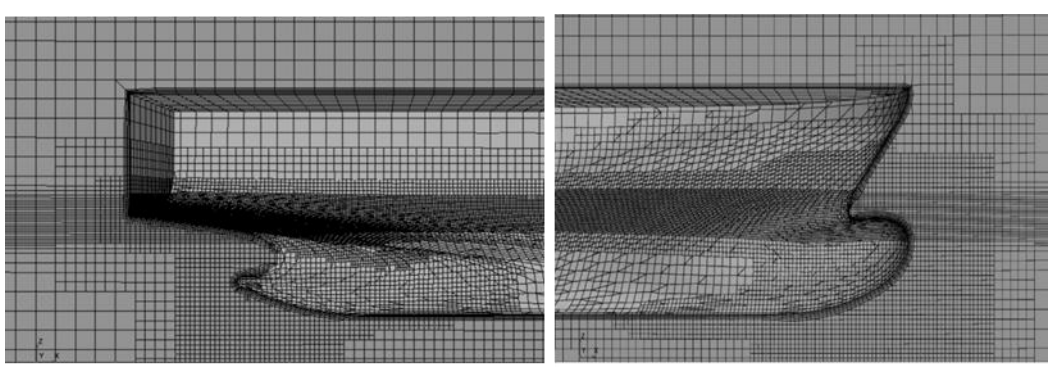


图 5　船尾和船首加密网格结构

2　方法检验

2.1 网格收敛性检验

为了评估网格收敛性，根据 ITTC 推荐的方法，引入ε_G，来表示相邻两套网格计算结果的差值，S_i 为数值计算结果，R_G 为收敛率。

$$E_{G12}=S_1-S_2 \tag{4}$$

$$E_{G23}=S_2-S_3 \tag{5}$$

$$R_G=E_{G12}/E_{G23} \tag{6}$$

式中，S_1 、S_2 、S_3 代表粗网格、中网格、细网格的计算结果。

数值模拟计算结果见表 4。其中，Rt 以沿船艏方向为正，为了下文与拖曳水池试验进行比较，故数值模拟阻力数据没有进行无量纲化；数值模拟计算所得阻力数据的收敛比例 R_G =0.32， 阻力计算结果单调收敛。

表 4　网格收敛性检验计算

	S_1	S_2	S_3	R_G
Rt/N	0.3955	0.40775	0.4456	0.32

2.2 方法验证

计算工况按照第五届 MASHCON 会议的约束试验工况设置，如表 5 所示。据 h/d=2，W/LPP=1.757 进行换算得到本文验证试验工况，将表 6 数值模拟计算结果与试验测量结果进行比较。经计算相对误差结果为 5.17%，可接受范围内。相对误差 D %计算公式如下：

表 5　数值计算试验工况

参数	h/m	W/m	V/kn	V/(m/s)	F_r
值	0.488	10.5	6	0.4	0.0531

$$D\%=\frac{CFD-EFD}{EFD}\times 100\% \tag{7}$$

式中，CFD为数值计算结果；EFD为水池试验结果，水池试验数据来自第五届 MASHCON 会议[9]。

表 6　数值模拟结果与试验数据对比表

网格	网格数/w	Rt/N(EFD)	Rt/N(CFD)	D%
中等	109	0.86	0.8155	-5.17%

3　船舶阻力数值计算结果及分析

3.1 船速对阻力的影响

采用控制单一变量法，探究航行速度对船舶阻力的影响，选择扩建航道进行试验。查询相关资料可知，苏伊士运河扩建前最高允许航速为 8.64 kn，但其内船舶在航行时常有超速现象，2021 年超大型船舶“长赐”轮搁浅前 AIS 最高航速更是可达 13.3kn。因此，此文依据实船航速，设定最低至最高五个航速：5 kn、8 kn、11 kn、14 kn、17 kn，对应傅汝德数为 0.044、0.071、0.097、0.124、0.151，用以分析船舶航行阻力特性变化，为船舶航行及苏伊士运河当局扩建后航速规定提供参考，

计算结果如图 6 所示。船舶总阻力是直接作用在船体表面的力，即作用在船体的压力和摩擦力之和。船舶模型的总阻力通常用无量纲总阻力系数对船模阻力数据进行无量纲化处理[10]。无量纲化既能避免绝对尺度对阻力值产生的影响，并且所表示的数值在任何单位系统中都是相同的，使研究具有普遍意义。总阻力系数无量纲化公式如下：

$$C_t = \frac{R_t}{0.5\rho v^2 S} \tag{8}$$

式中：C_t为总阻力系数；R_t为船模总阻力；S为船模湿面积，数值为 6.243；V为船速；ρ为水的质量密度。

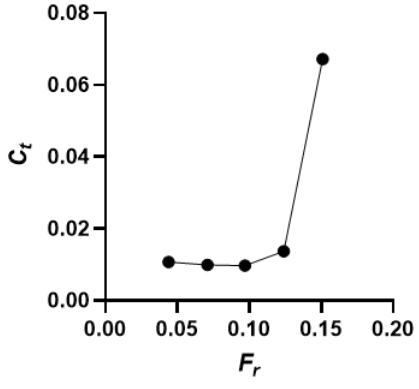


图 6　不同航速总阻力系数

图 6 展示了船舶阻力系数随航速变化的情况。由图可知，F_r= 0.044、0.071、0.097 时，船舶总阻力系数变化不大，分别是 0.0107、0.0099、0.0097。F_r = 0.124、0.151 时，船舶总阻力系数变化较大，分别是 0.0137、0.0672。在此过程中船舶总阻力系数变化依次为：降低 7.62%、降低 1.83%、增加 40.99%、增加 391.99%。总阻力系数先减少后增大的现象，主要是受到摩擦阻力、波浪阻力以及空气阻力等多种因素相互作用的影响，初始阶段速度较低时，摩擦阻力（主要是水面和船体表面的摩擦）对总阻力的影响较大。随着船速增加，摩擦阻力相对减小，因为在低速时，水与船体之间的相对运动较大，消耗较多的能量，随着速度增加，这种相对运动减少，摩擦阻力开始逐渐减小。而当速度达到某个临界速度后，波浪阻力可能会急剧增加。根据曲线的整体走向，可以得出当 F_r从 0.044 到 0.097 时，船舶总阻力系数随速度增大而减小，当 F_r超过 0.097 后，船舶总阻力系数急剧增大。

3.2 航道断面系数对阻力的影响

航道断面系数的大小直接影响船舶航行阻力、船舶的营运航速以及航道的开挖工程量，是确定航道横断面尺度的一个重要指标[11]。在设计最低通航水位时，航道过水断面面积(Ω)与设计船舶船舯部面浸水面积(Φ)的比值，即航道断面系数，通常以 n 来表示，n =Ω/Φ。为探究航道断面系数对船舶阻力的影响，选择原始航道和扩建航道进行试验。经计算原始航道断面系数为 6.02，扩建航道断面系数 7.35。依据 3.1 章节的船速，计算原始航道船舶阻力数值并将之与 3.1 数据进行比较，研究船舶在两种试验航道中航行，船舶总阻力系数随着航行速度增加的的变化情况如图 8 所示。由于在原始航道中，实船速度为 17 kn 时，对应船模速度为 1.135 m/s，船体触底，故该速度下不进行比较。图 7 以 VOF 图来展示原始航道中，船舶以 17 kn 航速航行时，船舶触底情况。在高航速下，船舶航行会形成巨大的波浪，由图 9、图 10 中船舶形成的波浪能够充分发展，波形稳定并能够保持在设计预期的范围内可以证明船后两倍船长的计算域空间足够保证船舶兴波的完全发展。

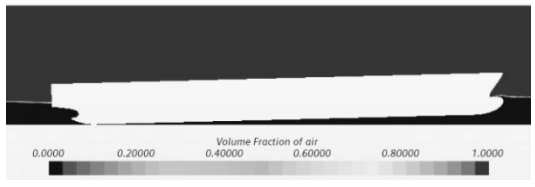


图 7　模拟结束时原始航道水线面（F_r=0.151）

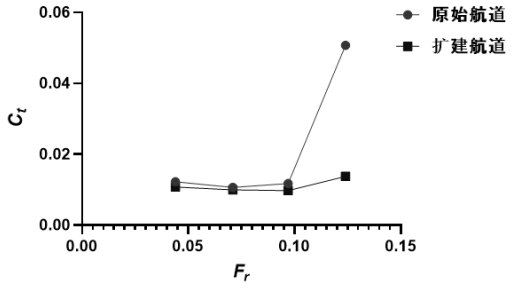


图 8　不同航道断面系数不同航速总阻力系数

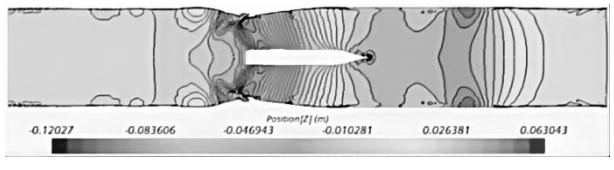


图 9　原始航道自由面波高图（F_r=0.151）

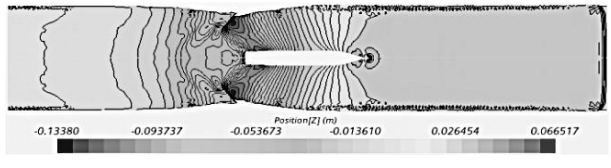


图 10　扩建航道自由面波高图（F_r=0.151）

航道断面系数是影响船舶航行阻力的重要因素，由图 8 可知，船舶在两种试验航道中航行，船舶总阻力系数随着航行速度的增加，呈现先减小后增大的趋势。在扩建航道中，船舶总阻力系数变化依次为：降低 7.62%、降低 1.83%、增加 40.99%。在原始航道中，船舶总阻力系数变化依次为：降低 13.37%、增加 10.47%、增加 334.41%。与在原始航道中航行相比，船舶在扩建航道中行驶，船舶总阻力系数变化幅度较小，且在各对应航速下，船舶总阻力系数都小于在原始航道中航行的船舶总阻力系数。扩建航道与原始航道相比，随着航行速度的增加，船舶总阻力系数降幅逐渐变大，依次 6.46%、12.28%、16.87%、73.02%。因此，航道断面系数变大，船舶总阻力系数变小。

3.3 纵倾角度对阻力的影响

纵倾是指船舶中纵剖面垂直于静止水面，但是中横剖面与铅锤面成一纵倾角时的浮态。通常将船舶向首部方向倾斜称“艏倾”，纵倾角为正值；向尾部方向倾斜称“艉倾”，纵倾角取负值。为探究纵倾角度对船舶阻力的影响，选择扩建航道进行试验，在 DFBI 模块中放开纵倾、升沉自由度，进行匀速直航流场的数值模拟。对于船舶来说艏倾是比较危险的，因此本文设置纵倾角度均为艉倾。依据自由航行纵倾角度的范围，进行本试验纵倾角度的设定计算结果见表 7 所示。

表 7　扩建航道不同纵倾计算结果

W_1/m	W_2/m	h/m	V/kn	F_r	$Trim$/deg	C_t
5.942	2.373	0.37	8	0.071	0	0.00994
					-0.1	0.01008
					-0.2	0.01000
					-0.3	0.01001
					-0.4	0.01002
					-0.5	0.01002
					-1	0.01024
			11	0.097	0	0.00979
					-0.1	0.00983
					-0.2	0.00976

			-0.3	0.00981
			-0.4	0.00987
			-0.5	0.00993
			-1	0.01006
			0	0.01376
			-0.1	0.01384
			-0.2	0.01375
	14	0.124	-0.3	0.01369
			-0.4	0.01372
			-0.5	0.01373
			-1	0.01401

根据图 11 可知，在航速为 F_r = 0.071、F_r = 0.097、F_r = 0.124，随着艉倾程度的增大，船舶总阻力系数先增大再减小再继续增大。当 F_r = 0.071 时，艉倾为 0 deg 时，即船舶为平吃水时，船舶总阻力系数达到最小。当 F_r = 0.097 时，艉倾为-0.2 deg 时，船舶总阻力系数达到最小。当 F_r = 0.124 时，艉倾为-0.3 deg 时，船舶总阻力系数达到最小。由图可知随着航速增大，达到最小阻力的艉倾角也会变大。

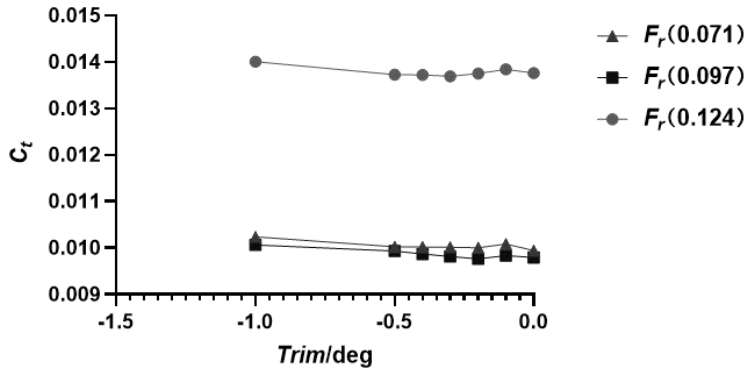


图 11　不同航速不同纵倾船舶总阻力系数

4　结论与建议

研究船舶航行阻力特性有利于减少船舶的燃料消耗，从而降低运输成本，减轻环境污染。随着国际社会对碳排放和气候变化的关注不断增加，船舶节能减排已成为全球航运业的重要课题之一。此文基于 CFD 技术研究受限水域 DTC 集装箱船不同航速、航道断面系数、纵倾角度对航行阻力的影响，研究所得结论与建议如下：

1）保持合理速度

由于船舶航行时受到摩擦阻力、波浪阻力以及空气阻力等多种因素相互作用的影响，当 F_r从 0.044 到 0.097 时，船舶总阻力系数随速度增大而减小，当 F_r超过 0.097 后，船舶总阻力系数急剧增大。因此，当在受限水域航行时，需要适当降低船舶的航速，进而降低船舶的阻力，从而节省船舶燃料，减少对主机的磨损。

2）尽量拓宽航道断面系数

船舶在扩建航道中行驶，船舶总阻力系数变化幅度较小，且在各对应航速下，船舶总阻力系数都小于在原始航道中航行的船舶总阻力系数。在受限水域中，拓宽航道断面系数对高航速时船舶总阻力亦有一定的减少作用。

3）选择合适艉倾角度

在航速不变的情况下，在保证船舶航行安全的前提下适当艉倾可以减小船舶总阻力系数。船舶

纵倾优化可以在不改变船舶速度和承载能力的情况下，通过调整航行时的纵倾角度达到降低船舶的航行阻力的目的。与其他节能减排方法相比，具有成本低、实施方便、效果好等优点。

通过以上的三个建议，可以减少船舶阻力，减少能源损失，同时更优化的航行建议还有利于改善船舶的操纵性和稳定性，提高航行安全性，减少船舶发生意外事件的可能性。此研究结果对船舶航行减阻、相关单位制定规章制度具有一定意义。

参考文献

[1] Prakash S, Chandra B.Numerical estimation of shallow water resistance of a river-sea ship using CFD[J].Int J Comput Appl, 2013, 71(5):33－40

[2] Wortley S.CFD Analysis of Container Ship Sink age,Trim and Resistance[J].Perth Australia:Curtin University of Technology, 2013.

[3] Elsherbiny, Khaled & Terziev, Momchil & Tezdogan, Tahsin & Incecik, Atilla & Kotb,Mohamed.Numerical and experimental study on hydrodynamic performance of ships advancing through different canals[J]. Ocean Engineering, 2019, 195.

[4] 刘义, 邹早建, 夏立, 等. 基于 CFD 的内河船深浅水中操纵性预报[J].船舶力学, 2021,25(06):739-751.

[5] 罗鑫, 于大海, 陈欢, 等.特大型水面高速船流场阻力特性仿真[J]. 舰船科学技术, 2022,44(15):41-44.

[6] 航摘.苏伊士运河南段航道拓宽工程预计 2023 年 7 月完工[J].航海,2022(01):22.

[7] 邓锐, 黄德波, 周广利, 等.影响船舶阻力计算的部分 CFD 因素探讨[J].船舶力学, 2013,(6):616-624.

[8] 埃及拟将苏伊士运河双向航道延长 10 千米[J].天津航海, 2022(01):25.

[9] Van Zwijnsvoorde, T, Tello Ruiz, et al. Sailing in shallow water waves with the DTC container carrier: open model test data for validation purposes[C].Proceedings of 5th MASHCON International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water,Ostend,Belgium, 2019:1-10.

[10] 刘志强, 刘鑫旺, 万德成. 基于 CFD 数值模拟和模型试验的三体船片体位置优化[J].中国造船, 2022,63(02):116-125.

[11] 李响, 刘志强, 万德成. CFD 数值分析三体船片体位置对阻力及兴波干扰影响[J].海洋工程, 2022,40(06):76-82.

作者简介：毛超进，硕士研究生，18868002483,浙江海洋大学，859723926@qq.com。

通信作者：艾万政，教授，15257070064，浙江海洋大学，aiwanzheng@126.com

并联伸缩杆式矢量推进器水动力分析

李诏贤*[1]，高军凯[1]，董良雄[2]，朱发新[1]

（1 浙江海洋大学 船舶与海运学院，浙江 舟山 316022；2 广州航海学院 轮机学院，广东 广州 510725）

摘 要：为了获得矢量推进器的流体动力学性能，研究整体结构及性能优化，采用 CFD 方法对控制区域方程进行离

散，通过数值求解对矢量推进器粘性流场及推进器的敞水性能进行分析。建立推进器的粘性流场模型，利用运动坐标系 MRF 方法对不同偏摆角度的矢量推进器进行数值模型，使用控制变量方法分析不同转速、偏摆角度、螺旋桨效率等。结果表明螺旋桨在较大偏摆角时推力会减小，水动力效率也会降低，在推进器下方形成涡，同时尾流随着偏摆角度增大呈现增大的趋势，使得压差阻力减小，表现为推进器纵向力减小。流体动力学分析对矢量推进器结构、性能提高具有指导作用。

关键词：水下航行器；矢量推进；并联伸缩杆机构；水动力性能

0 引言

水下矢量推进器(AUV)是一种先进的水下航行技术，通过调节方向来改变水下航行器的推力方向和大小，从而实现推力矢量化的目的[1]。螺旋桨矢量推进器作为船舶、推进器等设备的常用动力装置，其中单一螺旋桨矢量推进器通过调节螺旋桨叶片的角度或者通过可旋转的推进器外围罩来实现推力方向的调节[2]，它可以快速调整推力方向，有助于推进器在狭窄水域以及更为恶劣的复杂环境中进行航行和转向操作[3]。

水下水量推进器的研究和应用在国外已经有了较为成熟的发展，尤其是在军事和商用领域。美国在自主式水下航行器(AUV)领域具有极其重要的影响力[4]，其在技术研发、军事应用等方面均处于全球领先地位，拥有 AUV 的数量占全球 AUV 数量的一半以上。Jagadeesh Kadiyam[5]、Manavendra Desai[6]、Tam Willy Nguyen[7]等设计了多种推进器均可以灵活完成矢量推进效果。国内学者对于该方向的研究缓慢，且设计的矢量推进器结构复杂，未考虑各种参数对推进器的结构及水动力性能的影响。Farhad Safari[8]等提出了水动力系数估算的新方法，Faheem Ahmed[9]等分析了不同攻角和速度下 AUV 的水动力性能，但采用的模型和方法较为复杂，只有在特定的攻角下进行模拟，并不适用于所有环境。关英杰等使用计算流体力学（CFD）方法进行分析，研究了槽道推进器对 AUV 水动力性能的影响，涵盖了平移和旋转运动的水动力系数计算，但未考虑不同水流条件等。

本文利用 CFD 对矢量推进器流场及螺旋桨压力等进行数值模拟。对单独的螺旋桨以及船桨一体模型的敞水性能进行分析，考虑推进器不同的俯仰、偏航角，螺旋桨水平、垂直偏摆角及螺旋桨转速等因素的影响。得到该推进器模型的水动力系数数值，推力系数的变化等。

1 粘性流场建模

为了对矢量推进器及螺旋桨进行仿真计算模拟，需要满足三个相似准则。分别为几何模型相似、运动状态相似和动力相似。几何相似指的是为了使仿真与实验更接近，将矢量推进器模型与实物进行 1:1 建模[10]。在不影响仿真结构的同时也对结构进行一定程度的简化以达到减少网格数量和计算机运行内存的目的。

1.1 螺旋桨实体建模

针对荷兰试验水池已经得到结论的 P4119 型号螺旋桨进行研究[11]，螺旋桨具体参数如表 1，采用这种螺旋桨可以将仿真与实验相对比，进一步验证仿真过程及其结果的正确性。本节基于坐标变换方法，利用 MATLAB 编程技术，对螺旋桨三个压力面和吸力面线条进行处理，后利用 SolidWorks 软件建立曲面、生成实体，P4119 型螺旋桨的实体模型如图 1 所示。

表 1　螺旋桨的主要参数

桨模名称	P4119
直径 D （m）	0.305
叶数	3
毂径比 D_{hub}/D	0.2
盘面比 A_E/A_O	0.6
纵倾角	0
侧斜角	0

叶剖面形状	NACA66-mod
桨毂长度	0.156

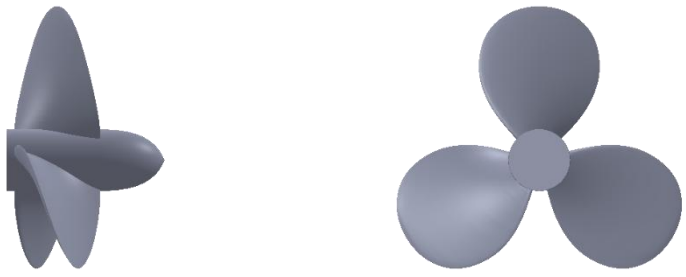


图 1 P4119 型螺旋桨模型

1.2 计算域模型的建立与网格划分

本节中所建立外流域圆柱体的长度为 4m，直径为 1.6m；内流域圆柱体的长度为 0.4m，直径为 0.4m。内流域左侧距离入口 0.8m，右侧距离出口 2.8m，如图 2 所示。

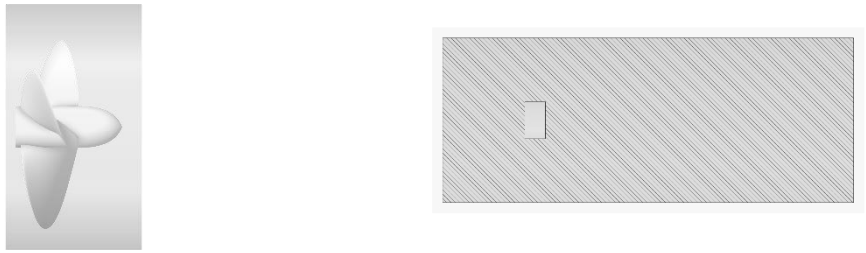


图 2 旋转域与静止域

这里湍流模型采用 $k-\omega$ 模型，定义流体的属性，螺旋桨转速保持在 600rpm，边界条件中入口速度根据进速系数公式不断变化，出口压力默认，网格交界面进行 interface 处理后，设置监控值、残差和定义报告，进行迭代计算。

螺旋桨的敞水性能预报主要是通过得到不同进速系数条件下的推力系数 K_T 、转矩系数 K_Q 和敞水效率 η 。计算所用公式如下：

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \tag{1}$$

T 为螺旋桨推力， ρ 为海水的密度， n 为螺旋桨转速， D 为螺旋桨直径。

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \tag{2}$$

Q 为螺旋桨推力， ρ 为海水的密度， n 为螺旋桨转速， D 为螺旋桨直径。

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}\eta = \frac{K_T}{K_Q} \times \frac{J}{2\pi} \tag{3}$$

K_T 为螺旋桨推力系数， K_Q 为螺旋桨转矩系数， J 为进速系数。

1.3 螺旋桨仿真结果分析

将仿真的结果和实验结果相对比，如图 3 所示。可以发现当进速系数在 0.9 以下时，误差值较低，实验数值与仿真结果高度吻合，验证仿真模型和所采用的方法的合理性，但进速系数高于 0.9 时，误差较大。

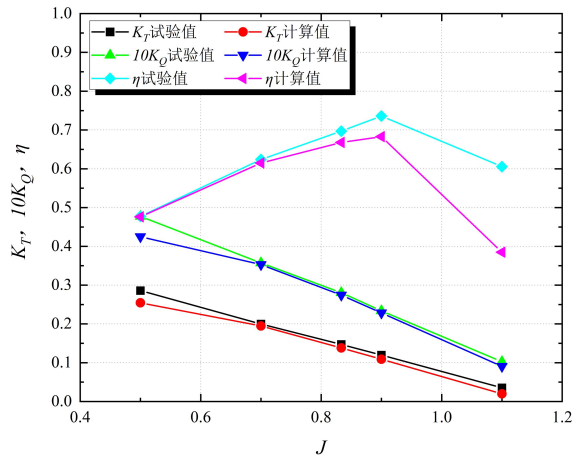


图 3 敞水性能计算值与实验值对比

图 4 为螺旋桨的压力面（叶面）和吸力面（叶背）的压力云图。根据压力云图可以看到压力面的颜色深度更深，说明叶面的压力大于叶背，这也是符合水下螺旋桨的压力规律的，当压力面压力大于背压面时，水流会对螺旋桨提供反向的推动力，使螺旋桨装置可以向前运动。从径向压力分布来看，叶面压力从叶根逐渐增到$1.52\times10^3\,Pa$，约为 0.8R 处达到最大，之后压力逐渐减小，从垂向看导边和随边压力较大。叶背侧径向压力一直减小，垂向压力分布跟压力面相同。

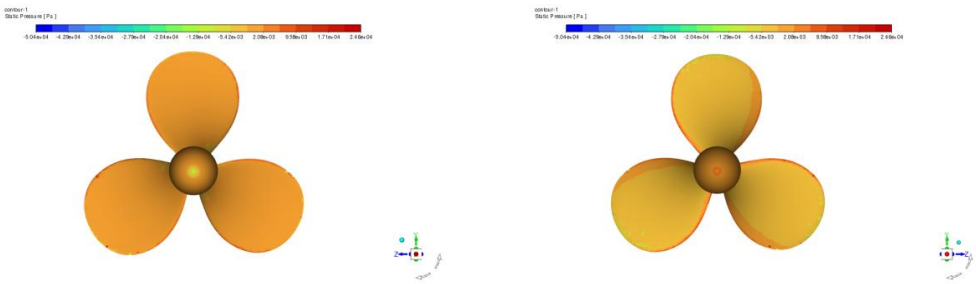


图 4 螺旋桨表面压力分布

流线图 5 可以揭示流场中流动的整体趋势和模式，如回流、旋涡、层流或湍流区等。通过观察流线的分布和方向，可以直观地了解流体在各个区域的运动情况。由流线图可以看出螺旋桨高度旋转区域流体分布较为密集，符合边界条件的设定。

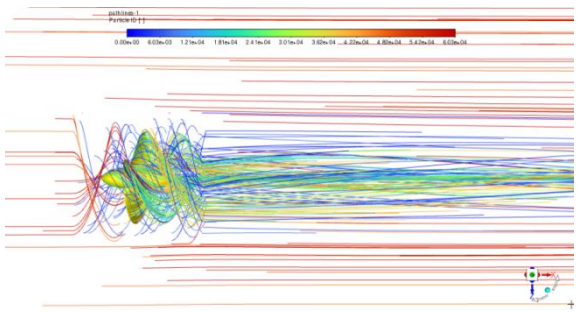


图 5 螺旋桨流线图

如图 6 为螺旋桨涡流图，显示了进速系数 J=0.7、0.833、0.9 时螺旋桨的尾涡流规律，从中可以看出，螺旋桨的涡流图与上图的流线图螺旋桨尾流形状基本对应，由不同进速系数下涡流形状的对比可知，进速系数较小为 0.7 时，螺旋桨尾部涡流直径小于螺旋桨的直径，在进速系数为 0.833

时，尾流直径近乎等于桨叶直径，而当进速系数为 0.9 时，涡流直径大于螺旋桨直径，进速系数与入口流速成正比，越小表明入口流速越低，反映重载时螺旋桨对流体有较强的抽吸作用。

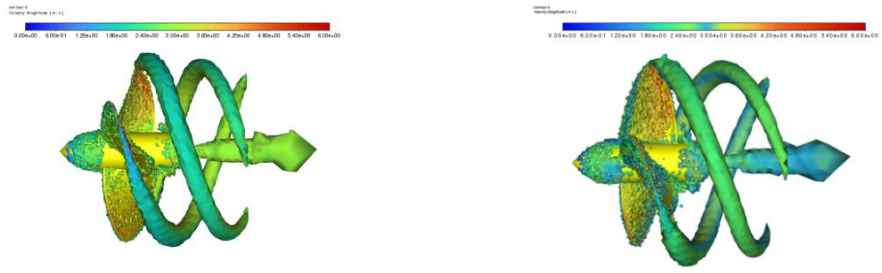


图 6　螺旋桨尾流涡流图

2 矢量推进器的粘性流场建模

2.1 伸缩杆式矢量推进器的物理建模

该推进器由推进电机、三个转向电机控制推进螺旋桨的俯仰偏航角、可伸缩式杆、伸缩套杆、连接主轴和从动轴万向联轴节、螺母、端面球轴承（NTLHS8R 右旋）和螺旋桨组成。推进电机通过联轴节传递扭矩使螺旋桨转动，伸缩杆的长度变化控制推进器的姿态变化。

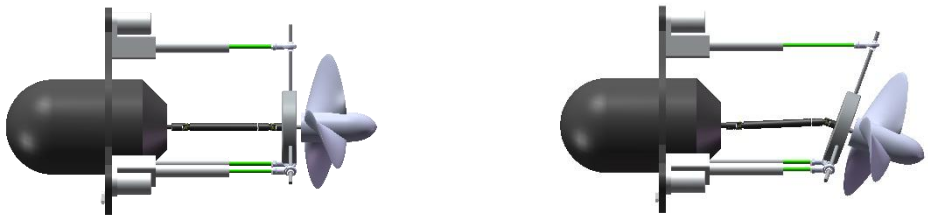
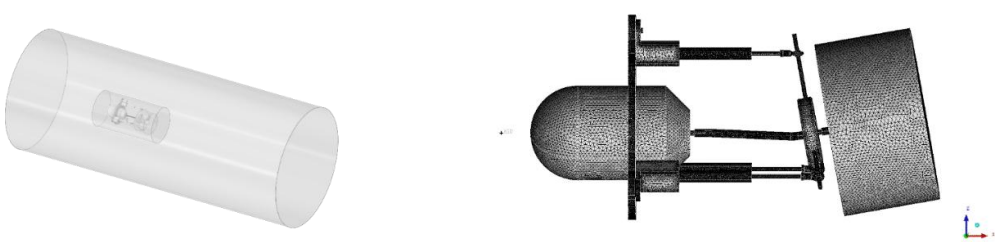


图 7　矢量推进器三维模型

如图 7 为所建立的矢量推进器的三维模型，该模型可以伸缩杆及螺旋桨运动可以真实反映实物模型的运动过程。该矢量推进器的各结构模型参数如下表所示，由于伸缩杆长度的限制，为了满足结构的稳定性伸缩杆变化时保持两根伸缩杆长度始终相等，这里螺旋桨的俯仰以偏航角度的变化范围设置在 0˜20°，并对此角度变化范围内的推进器的水动力特性进行仿真研究。

2.2 矢量推进器计算域模型的建立

为了更真实的模拟矢量推进器在水下的流场，建立一个足够大的外圆柱来使仿真结构更真实切易收敛。圆柱型的流体域其长度为矢量推进器长度的 5 倍，直径为推进器电机直径的 5 倍。建模时坐标原点定位螺旋桨桨毂的中心，为了方便后续对螺旋桨进行模拟。流体域左侧距离矢量推进器中心为其长度的 2 倍，右侧距其中心为长度的 3 倍[12]。



(a)　　(b)

图 8 矢量推进器的流体域划分与面网格

对于矢量螺旋桨的水动力计算问题，因为要考虑螺旋桨的转速的影响，这里将流体域划分为包围螺旋桨的内部的旋转域、中型的域和外层域 3 个部分，旋桨的旋转域采用 *MRF*(多参考系模型)，使螺旋桨绕轴进行旋转，设置螺旋桨各旋转参数；边界条件中入口边界采用速度入口，流速根据螺旋桨不同进速系数来决定。出口采用压力出口，由于一直在水中运动，压力出口采用默认条件。矢量推进器的表面及大型计算域的 *side* 面均为静止无滑移壁面。为了使计算域进行网格信息的交互，流体能够在不同计算域中流动，采用内部(*interior*)处理，相比 *interface*，网格节点对应性更好，使旋转域、中型计算域、外侧流体域两两配对[13]。

2.3 螺旋桨偏摆角度的水动力仿真

为了保证模拟结果的准确性和可信度，通过改变计算域内的网格密度来检查模拟结果的变化，以此来判断是否达到了网格独立解。当雷诺数 $\mathrm{Re}=5.6\times10^{6}$ 时，采用全局尺寸为 0.02m，局部加密尺寸分别为 0.0026m、0.0020m、0.0018m、0.0016m，用 4 套网格分别计算螺旋桨的推力。网格数量如下表所示。

表 2　网格无关性验证

全局网格尺寸/m	局部加密尺寸/m	旋转域网格数	总网格数	推力大小/N
0.02	0.0026	657181	2570613	465.23
0.02	0.0020	1219378	4175417	377.03
0.02	0.0018	1573470	5171558	366.12
0.02	0.0016	2094005	6587448	359.51

2.3.1 敞水性能分析

本文中设计的伸缩杆式矢量推进器的工作原理是通过伸缩杆的动作改变螺旋桨的偏摆方向实现六自由度的运动，故需要针对不同偏摆角度来研究推进器的水动力性能。根据推进器的结构取螺旋桨的偏摆角度分别为5°、10°、15°、20°，螺旋桨的转速为600rpm、800rpm、1000rpm、1200rpm，速度分别为 1m/s、1.5 m/s、2 m/s、2.5 m/s，进速系数根据(8)求得。根据(9)(10)可知，不同偏摆角度工况下公式转变为

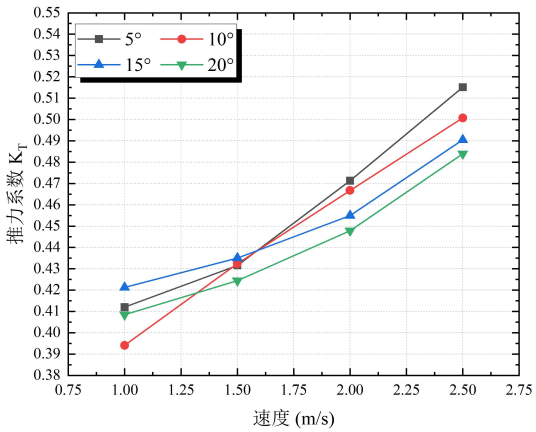
$$J=\frac{V\cos\delta_v}{nd} \tag{8}$$

$$T=T_x\cos\delta_v+T_z\sin\delta_v \tag{9}$$

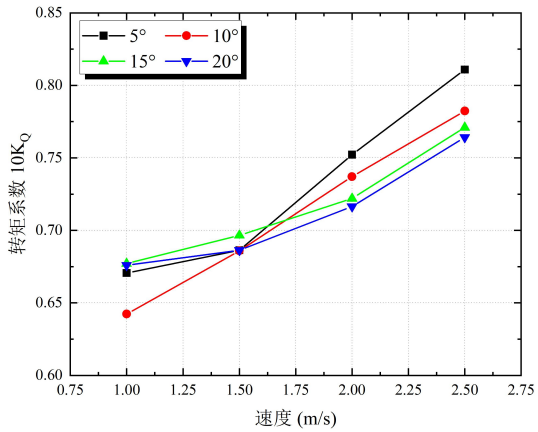
$$K_Q=Q_x\cos\delta_v+Q_z\sin\delta_v \tag{10}$$

T_x 为在 x 轴上的分力，T_z 为 z 轴上的分力，Q_x 为绕 x 轴的转矩，Q_z 为绕 z 轴转矩，δ_v 为螺旋桨的竖直偏摆角度。同理可知，根据水平面的偏摆角度 δ_h，也可求得水平面的推力和转矩公式。式中三个方向的力和转矩可以依据仿真结果得到。

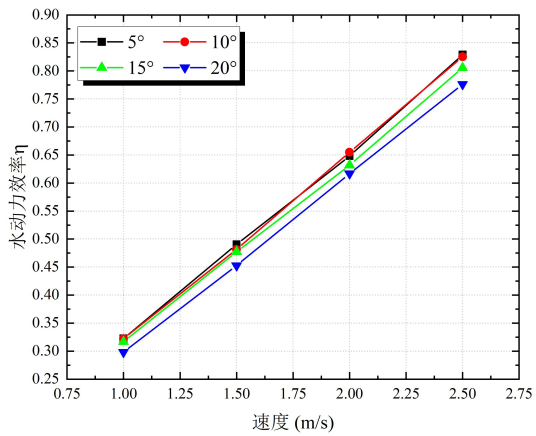
表格中记录的六分力结合偏摆角度的螺旋桨公式，最终得到不同角度下的螺旋桨的水动力性能曲线，如图所示。通过详细的仿真数据分析，可以系统地了解水下矢量推进器螺旋桨在不同水平和垂直偏摆角度、进速系数和转速下的推力系数、转矩系数和效率之间的关系。



（a）推力系数



（b）转矩系数



（c）水动力效率

图 9　不同偏摆角度水动力性能曲线

从图 9 中可以看出，从小到大的 4 种速度工况下，随着矢量推进器垂直偏摆角度的增加，推力系数在整体趋势上表现为减小，因为推力矢量被分成了纵向和垂向分量，使得一部力变为控制螺旋桨的转向的所需，但速度在低于大约 1.55m/s，偏摆角度为15°，推力系数保持最大，且最初10°时的推力系数为最低。同时，不同的进速系数下转矩系数也呈现下降的趋势，因为垂直偏摆角使螺旋桨叶片的角度发生变化，导致叶片的有效攻角减少，从而减少叶片产生的转矩。由图（c）发现各垂直偏摆角度下螺旋桨的水动力效率的几乎无明显的变化，在 20°时相比其他角度略小，推力和转矩系数相比于其他角度较低，推进器产生的推力减少，这意味着推进器需要更高的转速或功率来达到相同的前进速度，导致能量消耗增加，效率降低。

2.3.2 流场中参数分布及尾流研究

为了观察不同偏摆角度、入口流速下螺旋桨表面压力，将不同状态进行对比，压力分布如图 10。

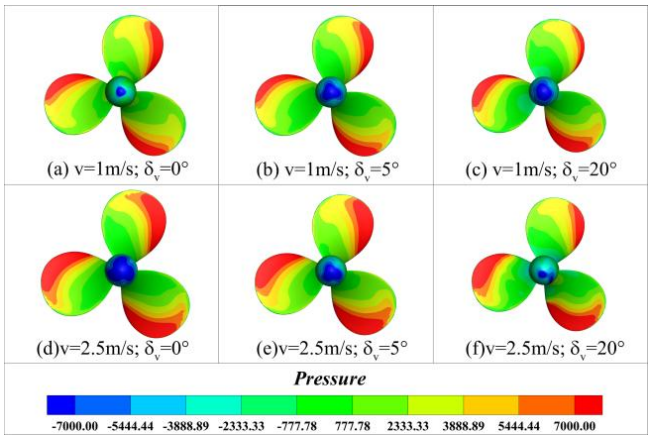
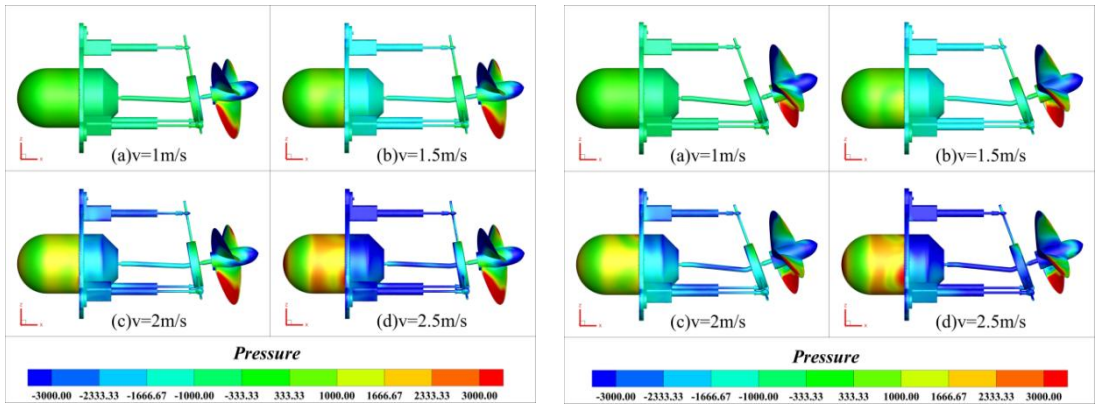


图 10　不同偏摆角度螺旋桨压力云图

如图可知螺旋桨压力面中高压区主要分布在螺旋桨的侧边即导边和随边，而在导边处达到正压力的最大值，低压区主要分布在桨毂及叶根部位，在叶梢处达到低压峰值，主要是因为流速大的位置压强小。根据不同速度及角度可以发现随着入口流速即进速系数的增加，螺旋桨承受更多的高压区和低压区，且速度较低时，桨毂处低压面积更大，偏摆较角度增加，20°时低压力区从中心向侧面偏移。



(a) 偏摆角 $\delta_v = 10°$　　(b) 偏摆角 $\delta_v = 20°$

图 11　不同偏摆角推进器压力分布图

矢量推进器压力分布图可以得到不同偏摆角度下，推进器表面压力分布与速度的关系，可以根据云图观察高压及低压部分，为推进器的设计提供参考依据。当偏摆角度一定时，推进器电机迎水面受到压力更大，当速度为 1m/s 时推进器表面压力分布较为均匀，为-333.33Pa，前后表面压力差不明显，随着水流速度的增加，压力趋近于 1666.67Pa，增长幅度为 2000Pa,图中可以明显看出推进器靠近入口水流处压力和远离入口处压力差值为 6000Pa，不同的螺旋桨偏摆角度下，螺旋桨吸力面压力小于压力面的压力，两侧的压力差也为推进器运动提供动力。同一速度下，转角越大，连接伸缩杆的机构，压力越低，在低压区会导致推进器的推力产生不足，从而影响其总体的推进效率。

3 水下矢量推进器试验

为了保证伸缩杆式矢量推进器在水中的正常使用及各传感器检测数据的准确性需要进行推进器的水下试验，该试验可以通过推力测试和其他性能测试，评估推进器的推力输出、响应速度等方面的性能；测试推进器的姿态控制能力，包括俯仰、偏航和滚转等方向的控制，确保推进器在实际运行中能够准确、灵活地控制飞行器的姿态；评估推进器在各种环境条件下的性能，包括温度、湿度、压力等方面，确定推进器在不同工作环境下的稳定性和可靠性。在一定程度上不断提高测试装置的性能指标，并计算螺旋桨的敞水性能数据等，得到最高效的推进效率，并且试验可以大幅缩短研发的时间，对矢量推进器的研究有一定的意义。

本试验将使用水下动力系统综合测试台，对设计的该伸缩杆式矢量推进器开展试验，试验主要包括了不同水域环境条件、拉力传感器、转速传感器等采集装置，对采集到的试验数据进行分析，将处理的结果与仿真得到结果相对比，以此来验证仿真模型、计算方法以及各参数的正确性。



图 12　矢量推进器实物图

矢量推进器在运动过程存在六个自由度分别为横滚、进退、侧移、浮沉、俯仰、偏航，矢量推进器与竖直面的夹角取值为5°、10°、15°、20°，螺旋桨转速为600rpm、800rpm、1000rpm、1200rpm。该矢量推进器在不同仰角下受力情况如下表3、4所示。

表 3　仰角为10°不同螺旋桨转速下推进器受力分析

转速	压差阻力/N	粘性阻力/N	总阻力/N	升力/N
600	103.48	2.66	106.14	2.29
800	186.96	5.67	192.63	27.35
1000	502.39	8.27	510.66	23.95
1200	917.67	11.66	929.63	18.90

由表3可知，仰角为10°，进速系数等其他条件保持不变，随着螺旋桨转速的不断增加压差阻力和粘性阻力都在不断增加，因为在一定范围内转速提高，在螺旋桨旋转区域，需要的推力越大，矢量推进器所受到压力差越大以提高动力；而粘性阻力时由于表面粘性切应力产生的阻力，由于推进器的结构产生的粘性阻力较小。随着转速提高到一定程度，会在螺旋桨区域形成低压区，导致空泡现象发生。

表 4 不同俯仰角度推进器六分力数据

俯仰角	纵向力/N	横向力/N	垂向力/N	横滚力矩/N.m	俯仰力矩/N.m	偏航力矩/N.m
-20°	103.6466	-5.2642	-8.1545	19.5479	-7.1545	0.0354
-15°	101.7674	-4.7208	-7.1515	19.1583	-6.3565	0.2740
-10°	101.2557	-4.8936	-6.4014	18.4763	-5.5329	0.7156
-5°	104.8654	-1.6637	-5.9315	18.9736	-3.7878	0.0073
0°	102.3425	0.0175	2.9803	19.9565	1.6659	0.6598
5°	106.3466	2.2119	5.4400	19.2039	4.5691	0.0663
10°	97.3955	4.6998	13.2818	18.9657	9.0700	0.0868
15°	96.4460	5.4474	16.5443	19.1984	11.1219	0.0374
20°	94.0885	15.0945	18.3566	20.3214	14.0953	1.0636

分析表4发现，在垂直斜航时不考虑横向力、横滚、偏航力矩对矢量推进器的影响。主要因为

推进器的结构为左右对称，三伸缩杆结构使得上下面不对称，故需要考虑正负俯仰角度的影响。水下推进器在垂向斜航时，当运动速度不变时，主体受到的垂向力随着垂直偏摆角的增大出现增大的趋势，因为流体以一定的角度流向推进器的时候，纵向受到水流压力有效面积随偏摆角增大而增大。角度越大，转向运动所需要的转矩也越大，六分力变化可以看出推进器的力及力矩的变化规律，研究水下自航行器在垂直面上斜航上计算结果，对水下自航行器在工作时的操控有一定的指导意义。

4. 结论

本文设计研究的伸缩杆式矢量推进器，并对螺旋桨敞水性能及水动力参数进行分析。结果表明：

(1)螺旋桨的敞水性分析的实验数值与仿真结果高度吻合，验证仿真模型和所采用的方法的合理性，但进速系数高于 0.9 时，误差较大。

(2)随着矢量推进器垂直偏摆角度的增加，偏摆角度为15°，推力系数保持最大，且最初10°时的推力系数为最低。同时，不同的进速系数下转矩系数也呈现下降的趋势，导致叶片的有效攻角减少，从而减少叶片产生的转矩。而各垂直偏摆角度下螺旋桨的水动力效率的几乎无明显的变化。

(3)随着入口流速即进速系数的增加，螺旋桨承受更多的高压区和低压区，且速度较低时，桨毂处低压面积更大，偏摆较角度增加， 20°时低压力区从中心向侧面偏移。速度较小时推进器表面压力分布较为均匀，不同的螺旋桨偏摆角度下，螺旋桨吸力面压力小于压力面的压力，两侧的压力差也为推进器运动提供动力。

(4)垂向力随着垂直偏摆角的增大出现增大的趋势，角度越大，转向运动所需要的转矩也越大，综合六分力变化得到推进器的力及力矩的变化规律，研究水下自航行器在垂直面上斜航上计算结果，对水下自航行器在工作时的操控有一定的指导意义。

参考文献

[1] 叶金铭, 邹笑宇, 郑子涵, 等. 矢量泵喷推进器尾流场特性及操纵性能研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(18): 38-44.

[2] 张荣敏. 水下机器人并联矢量推进机构与操纵性能研究[D]. 山东: 山东大学, 2017.

[3] 高富东. 复杂海况下新型水下航行器设计与关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.

[4] 张宏伟. 可着陆水下自航行器系统设计与动力学行为研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.

[5] Kadiyam J, Mohan S, Deshmukh D, et al. Simulation-based semi-empirical comparative study of fixed and vectored thruster configurations for an underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2021, 234: 109231.

[6] Desai M, Halder A, Benedict M, et al. A control scheme for 360° thrust vectoring of cycloidal propellers with forward speed[J]. Ocean Engineering, 2022, 249: 110833.

[7] Fossen T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. John Wiley & Sons, 2011.

[8] Safari F, Rafeeyan M, Danesh M. Estimation of hydrodynamic coefficients and simplification of the depth model of an AUV using CFD and sensitivity analysis[J]. Ocean Engineering, 2022, 263: 112369.

[9] Ahmed F, Xiang X B, Wang H T, et al. CFD-Based lift and drag estimations of a novel flight-style AUV with bow-wings: insights from drag polar curves and thrust estimations[J]. Journal of Marine Science and Application, 2024, 23(2): 352-365.

[10] Won D J, Kim J, Kim J. Design optimization of duct-type AUV using CFD analysis[J]. Intelligent Service Robotics, 2015, 8: 233-245.

[11] Leong Z Q, Ranmuthugala D, Penesis I, et al. Quasi-static analysis of the hydrodynamic interaction effects on an autonomous underwater vehicle operating in proximity to a moving submarine[J]. Ocean engineering, 2015, 106: 175-188.

[12] 关英杰,崔庆佳,徐彪,等.基于 CFD 的槽道推进器对 AUV 水动力性能的影响研究[J]. 控制与信息技术, 2023, (06): 65-71.
[13] 曹佳安.浅水小型 AUV 结构设计与分析[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2022.

作者简介

李诏贤（1999-），男，硕士研究生，研究方向：轮机工程，E-mail：603060579@qq.com。
高军凯，男，博士，副教授，主要研究方向：船舶溢油污染防治等，E-mail：gaojk@zjou.edu.cn。
董良雄，男，博士，教授，主要研究方向：轮机工程等，E-mail：dongliangxiong@zjou.edu.cn。
朱发新，男，硕士，副教授，轮机工程专业，主要研究方向：船舶安全与污染控制研究方向，E-mail:zhufax7758@163.com。

Y 型航道交汇口分离区特征数值模拟

毛超进[1]，艾万政[1]，宋宇秋[1]，王家宏[1]

(1.浙江海洋大学，船舶与海运学院，浙江 舟山 316000)

摘 要：Y 型航道的交汇口处，水流流动会产生分离区，分离区内流速降低，泥沙容易淤积形成浅滩使船舶搁浅，同时分离区内还时常有回流和漩涡，对船舶通航有显著影响。本文运用 Star ccm+软件对 Y 型交汇口的水流进行数值模拟，以交汇角、汇流比和干流入口流速为变量研究分离区特征。结果表明：支流侧分离区并不是每个工况都会出现，其范围与交汇角、汇流比以及干流入口流速成正比，且在交汇角 150°、汇流比 0.8、干流入口流速 2.5m/s 时宽度达到最大；干流侧分离区范围和交汇角、干流入口流速成正比，和汇流比成反比。船舶航行时通过避开分离区可以改善船舶航行操纵性和稳定性，提高船舶安全性，其研究数据也可为海事航道部门布置航道提供一定参考。

关键词：Y 型交汇；分离区；数值模拟；交汇角；汇流比；干流入口流速

0 引言

在 Y 型航道的交汇口处，水流流动会产生分离区。分离区内水流流速降低，从上游携带来的泥沙和污染物等容易在此淤积，使得水位降低，形成浅点区域，船舶靠近航行时，如果不小心应对，极有可能搁浅，同时分离区内特殊情况下，还会产生漩涡和回流，严重影响船舶的航行安全。研究分离区，将航道布置在分离区范围之外，可以提高船舶在 Y 型航道内航行的安全性。

国内外众多学者对分离区进行了大量研究。茅泽育等通过水槽试验，深入探究了明渠交汇口的三维水力特性。试验的结果表明交汇口附近存在漩涡，包括平面漩涡和立面漩涡，并得出对于特定形状和尺寸的交汇口，其分离区形状基本不会变化，但是分离区的尺寸会随着干支流输入流量的变化而不同，并呈现出一定的规律性。茅泽育等对明渠交汇口的水流分离区进行了研究，借助理论分析和物理试验，深入研究了影响分离区形状和尺寸的因素，并在此基础上给出了分离区的收缩系数及能量损失系数的计算公式。冯亚辉等对 Y 型交汇航道进行数值模拟，结果表明交汇口下游存在水流分离区，在该区域内水流流速降低，水位也降低，且某些工况下还会出现水流的回流现象。郭维东等通过建立数值模型，研究了交汇角为 90°和 120°的 Y 型交汇水流的分离区，研究得出分离区的范围和交汇角成正比，和汇流比成反比。王协康等借助水槽试验，对交汇区的水流分离区进行了研究，介绍了传统定义水流分离区的方法，指出此方法的弊端，并顺势提出一种新方法用来定义分离区的边界，该方法相对于传统方法更为准确。Webber 和 Greated 考虑了阻力存在的影响，用保角

变换的方法定义了交汇口处水流的理论流动方式，并用试验得到的边壁压强对理论公式进行修正，使得理论曲线和试验曲线更加吻合，而且此方法还可以预测下游分离区的位置和形状。Best 和 Reid 通过物理实验，改变不同交汇角度，研究交汇段的纵横向回流区尺寸和汇流比以及动量比的关系，并分析了分离区的成因。Weerakoon 和 Tamai 建立交汇水流的三维数学模型，比较交汇口水流试验数据与数值模拟结果，发现交汇口下游回流区的长度比观测数据小了 30%。Hsu 通过研究交汇口上下游深泓线的变化，确定分离区的位置和水流经过分离区的收缩特性，以及分析了分离区前后的能量变化与动量变化。2004 年 Pascale M 和 Biron 通过三维明渠水流数值模拟研究了床底高差对交汇口下游靠近支渠侧分离区的影响。

本文运用 Star ccm+软件，对 Y 型航道交汇口的水流进行数值模拟，以交汇角、汇流比和干流入口流速为变量，分析不同的交汇角、汇流比和干流入口流速对分离区范围的影响，得出具体的分离区范围，船舶航行时避开分离区，有利于减少船舶航行阻力，改善船舶航行操纵性和稳定性，其研究数据也可为有关部门管理提供参考，将航道布置在分离区范围之外。

1 数值模拟方法

1.1 控制方程和边界条件

本文应用 realizable k- ε 紊流模型与流体力学守恒方程联立进行模拟，用 VOF 法处理自由表面，控制方程的离散采用有限体积法。本文模型为气液两相流模型，边界条件见图 1。支流和干流的进口条件设置为速度进口，主流的出口条件设置为压力出口，空气的进口条件设置为压力进口，出口条件设置为压力出口，顶部为压力入口，时间的选择是隐式非稳态，壁面函数选择混合壁面函数。

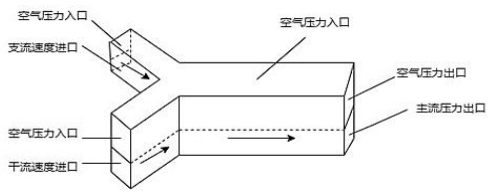


图 1 边界条件示意图

1.2 模型验证

选取冯亚辉的交汇角 90°、汇流比 0.6 的那组模型试验数据对本文的数值模型进行验证，选取的验证因素是水位高度，用冯亚辉的无量纲方法处理后不同区域的水位高度数据较为接近，证明文所选择的数值模型是可靠的。

1.3 模拟工况

本文的坐标原点取在干支流交汇的上游角点处，高度取在自由液面处，X 方向是主流方向，Y 方向和主流方向垂直向前，Z 方向和主流方向垂直向上。为了便于数据分析，将数据进行无量纲处理。横坐标和纵坐标分别和主流的宽度进行无量纲处理，主流宽度用 W 表示，横坐标和纵坐标无量纲处理后的结果为：$X^*=X/W$，$Y^*=Y/W$；由于本文高度坐标取在自由液面处，因此水位高度坐标未将初始水深加入进去，初始水深用 h 表示，高度坐标和初始水深无量纲处理后，即：$Z^*=Z/h$；测点流速和干流进口流速进行无量纲处理，测点流速用 V 表示，干流进口流速用 v_2 表示，即：$V^*=V/v_2$。

数值模型的支流、干流、主流长度分别为 2400m、2400m 和 4800m，宽度分别为 300m、400m 和 450m。模型高度取 50m，初始的干支流入口水深条件均为 25m。计算区域网格的生成采用正六面体网格生成，并在交汇口处对网格加密。

本文选定交汇角、汇流比和干流入口流速研究交汇口的水流特性。对 5 种汇流比（0.2、0.35、0.5、0.6、0.8）、5 种交汇角（30°、60°、90°、120°、150°）及 5 种干流入口流速（0.6m/s、1.2m/s、1.5m/s、1.8m/s、2.5m/s）共 125 个工况进行计算。本文对汇流比的定义为：支流进口流量与干流进口流量之比，用符号 q 表示。表 1 是本文 5 种交汇角的工况计算参数。

表 1　5 种交汇角的计算参数

（a）计算参数

汇流比 q	干流进口流量（m^3/s）	干流进口流速（m/s）	支流进口流量（m^3/s）	支流进口流速（m/s）	主流出口流量（m^3/s）
0.2	6000	0.6	1200	0.16	7200
0.35	6000	0.6	2100	0.28	8100
0.5	6000	0.6	3000	0.4	9000
0.6	6000	0.6	3600	0.48	9600
0.8	6000	0.6	4800	0.64	10800

（b）计算参数

汇流比 q	干流进口流量（m^3/s）	干流进口流速（m/s）	支流进口流量（m^3/s）	支流进口流速（m/s）	主流出口流量（m^3/s）
0.2	12000	1.2	2400	0.32	14400
0.35	12000	1.2	4200	0.56	16200
0.5	12000	1.2	6000	0.8	18000
0.6	12000	1.2	7200	0.96	19200
0.8	12000	1.2	9600	1.28	21600

（c）计算参数

汇流比 q	干流进口流量（m^3/s）	干流进口流速（m/s）	支流进口流量（m^3/s）	支流进口流速（m/s）	主流出口流量（m^3/s）
0.2	15000	1.5	3000	0.4	18000
0.35	15000	1.5	5250	0.7	20250
0.5	15000	1.5	7500	1	22500
0.6	15000	1.5	9000	1.2	24000
0.8	15000	1.5	12000	1.6	27000

（d）计算参数

汇流比 q	干流进口流量（m^3/s）	干流进口流速（m/s）	支流进口流量（m^3/s）	支流进口流速（m/s）	主流出口流量（m^3/s）
0.2	18000	1.8	3600	0.48	21600
0.35	18000	1.8	6300	0.84	24300
0.5	18000	1.8	9000	1.2	27000
0.6	18000	1.8	10800	1.44	28800
0.8	18000	1.8	14400	1.92	32400

（e）计算参数

汇流比 q	干流进口流量（m^3/s）	干流进口流速（m/s）	支流进口流量（m^3/s）	支流进口流速（m/s）	主流出口流量（m^3/s）
0.2	25000	2.5	5000	0.67	30000
0.35	25000	2.5	8750	1.17	33750
0.5	25000	2.5	12500	1.67	37500
0.6	25000	2.5	15000	2	40000
0.8	25000	2.5	20000	2.67	45000

2 Y 型汇流口分离区特征分析

2.1 分离区边界定义

已有的参考文献中，对分离区的几何边界定义基本都采用如下两种方法。一种是定义分离区的长度为分离区最外侧的一条流线至接触固壁时 X 方向的长度，宽度定义为此流线 Y 方向的最大距离，此种方法为流线法。还有一种方法是王协康[5]定义的等值线法，以顺主流方向流速为零的等值线为分离区边界。干流侧和支流侧的分离区位置见图 2。

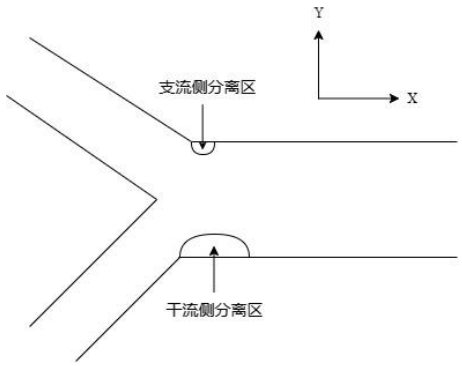


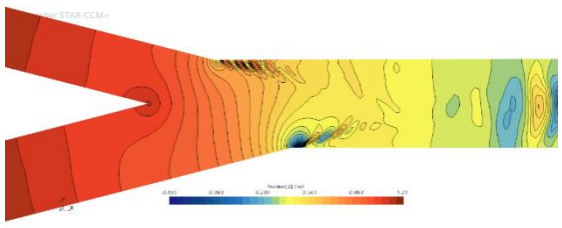
图 2　分离区位置示意图

本文研究分离区的目的是为了确定其范围，以便在其附近布置浮标，让船舶远离此区域。因此对分离区边界的定义可不参照上述两种方法，而是以水位高度来划定分离区边界。分离区除了具有低流速、低压强的特点，而且还容易形成回流和漩涡，经过数值模拟后，如果以水位高度来定义分离区的边界，模拟图中很容易就可以找到漩涡的位置，因此采用此种方法定义分离区的边界，能够很明显的就观察到分离区的位置。观察数值模拟的结果图，发现分离区的形状并不是规则的，考虑以漩涡 X 方向的最长边和 Y 方向的最长边大致定义它的范围。

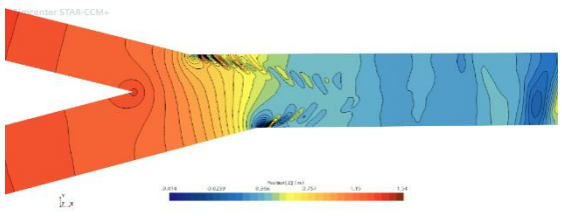
2.2 支流侧分离区特征分析

通过数值模拟发现，支流侧的分离区并不是每个工况都能观察到的，对于 Y 型交汇而言，分离区主要出现在干流侧。

图 3 和图 4 的干流入口流速都为 0.6m/s。图 3 是交汇角为 30°、汇流比为 0.6 和 0.8 时的水位等值线图。从图 3 可以发现，支流侧的分离区几乎不可见，汇流比为 0.8 的时候，才能观察到支流侧的分离区，且范围较小。



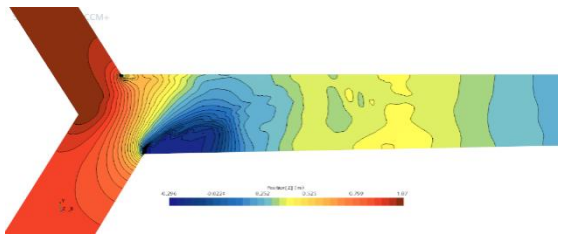
（a）0.6 的汇流比



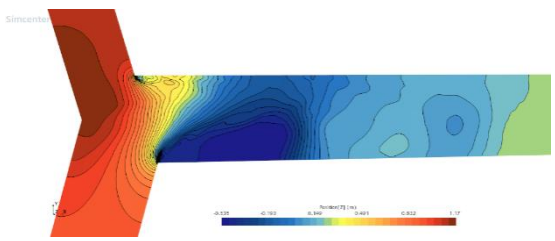
（b）0.8 的汇流比

图 3　交汇角 30° 的分离区示意图

图 4 是汇流比 0.35 时、交汇角为 120° 和 150° 的分离区示意图，从图中可以看到交汇角超过 90° 后，即使汇流比为 0.35 的情况下，支流侧分离区就已经出现，且随着汇流比的增大，其范围也在增大。



（a）交汇角 120°



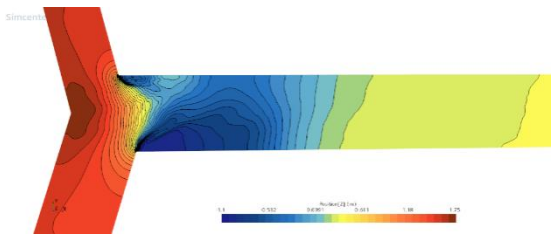
（b）交汇角 150°

图 4 汇流比 0.35 的分离区示意图

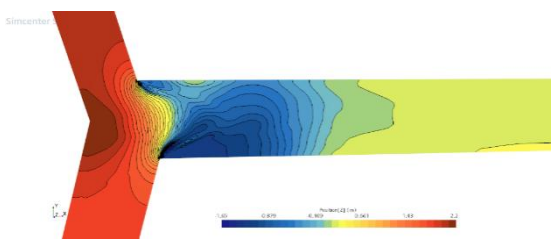
从图 3 和图 4 中可以得出下述结论：对于支流侧的分离区而言，当汇流比不变时，交汇角较小的时候，分离区也较小，而随着交汇角增大，分离区的范围也随之增大；当交汇角不变时，汇流比越小，分离区就越不容易观察到，增大汇流比，分离区范围也会随之增大。

支流侧分离区范围和流速也有关系：当其它条件不变时，由于汇流比相同，干流入口流速的增加，使得支流入口流速也会增加，交汇口处水流的扩散作用会更加明显，从而会让支流侧分离区的范围变大。

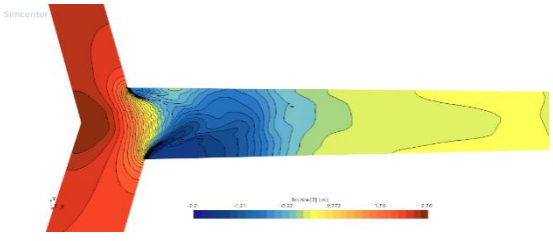
图 5 是交汇角为 150° 、汇流比为 0.8、干流入口流速分别为 0.6m/s、1.2m/s、2.5m/s 时的水位等值线图。支流侧分离区宽度指的是沿 Y 方向的长度，其和主流宽度对比无量纲处理后，干流入口流速 0.6m/s 时支流侧分离区宽度为：54.5m/450m=0.121，干流入口流速为 1.2m/s 时支流侧分离区宽度为：67.7m/450m=0.150，干流入口流速为 2.5m/s 时支流侧分离区宽度为：75.5m/450m=0.168。可以看出，增大干流入口流速，支流侧分离区宽度也在增大。



（a）干流入口流速 0.6m/s



（b）干流入口流速 1.2m/s



（c）干流入口流速 2.5m/s

图 5　交汇角为 150°、汇流比为 0.8 的分离区示意图

综合上述分析，得出支流侧分离区的宽度和交汇角、汇流比、干流侧入口流速都成正比的关系。

由于支流侧分离区在大部分的工况下难以出现且范围较小，不利于确定具体范围，考虑用区间范围确定其尺寸，即用不同工况下的最大支流侧分离区范围定义其尺寸，因为本文确定分离区范围的目的是将航道布置在分离区范围外，因此较大的分离区范围对船舶的通航更加安全。分离区对航道布置的影响主要体现在其宽度上，在本文研究范围内（交汇角 30°~150°，汇流比 0.2~0.8，干流入口流速 0.6m/s~2.5m/s），交汇角 150°、汇流比 0.8、干流入口流速 2.5m/s 时的支流侧分离区宽度是最大的，将其和主流宽度无量纲对比处理后为：75.5m/450m=0.168，得到支流侧的分离区最大无量纲宽度为 0.168。

2.3　干流侧分离区特征分析

相对于支流侧的分离区，干流侧的分离区不仅明显可见且范围较大，而且每个工况都能出现。通过改变交汇角、汇流比以及干流入口流速，探究干流侧分离区范围和它们的关系。

选取本文所有工况中任意某组交汇角和干流入口流速不变，不同汇流比下的分离区长和宽取值，所取交汇角为 120°，干流入口流速为 0.6m/s，取值结果见表 2。表 2 中的 L^*表示干流侧分离区长度和主流宽度对比无量纲处理后的值，分离区长度 L 指的是沿 X 方向的长度；B^*表示干流侧分离区宽度和主流宽度无量纲处理后的值，分离区宽度 B 指的是沿 Y 方向的长度；L^*/B^*表示分离区的长宽比。

表 2　交汇角 120° 时分离区范围

干流入口流速(m/s)	汇流比 q	L^*	B^*	L^*/B^*
0.6	0.2	1.498	0.421	3.558
	0.35	1.451	0.411	3.530
	0.5	1.433	0.395	3.628
	0.6	1.396	0.376	3.713
	0.8	1.311	0.331	3.961

由表 2 可知，交汇角和干流入口流速保持不变时，增大汇流比，L^*和 B^*都在减小，即分离区的长和宽在减小。

选取本文所有工况中任意某组交汇角和汇流比不变，不同干流入口流速下的分离区长和宽取值。所取交汇角为 60°、汇流比为 0.5，将 L^*和 B^*的值绘图，取值所绘的曲线见图 6，图中蓝色线条代表 L^*，橙色线条代表 B^*。从图中可以看出增大干流入口流速，分离区的长和宽都在增大。

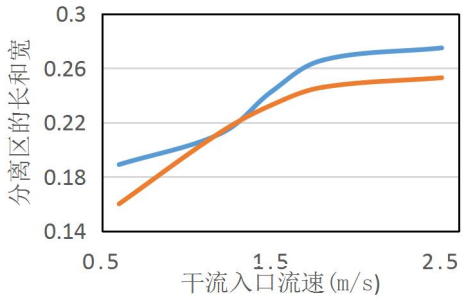


图 6　分离区长和宽变化曲线

选取本文所有工况中中任意某组汇流比和干流入口流速不变，不同交汇角下的分离区长和宽取值。所取汇流比为 0.35，干流入口流速为 1.2m/s，将 L^*和 B^*的值绘图，取值所绘的曲线见图 7，图中蓝色线条代表 L^*，橙色线条代表 B^*。从图中可以看出增大交汇角，分离区的长和宽都在增大。

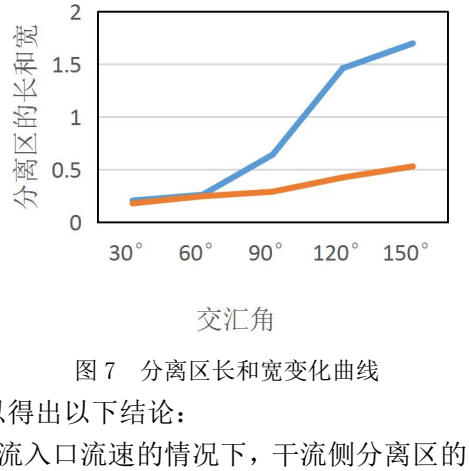


图 7　分离区长和宽变化曲线

从表 2、图 6 和图 7 中可以得出以下结论：

（1）在同一交汇角下和干流入口流速的情况下，干流侧分离区的长和宽都随着汇流比的增大而减小，这是因为支流侧的流量在持续增加，所以惯性力也在增加，由于支流侧水流的惯性力总是朝向干流侧，这就导致其对干流侧的扰动作用变大，分离区的范围也就随之变小了。

（2）在同一汇流比和干流入口流速的情况下，干流侧分离区的长和宽都是随着交汇角的增大而增大，这是因为随着交汇角的增大，干流流线在交汇口的偏转幅度也在增大，使得分离区范围持续增大。

（3）在同一交汇角下和汇流比的情况下，增大干流入口流速，干流侧分离区的长和宽都在增大，这是因为流速的增大会使得水流在交汇口处的扩散和分流作用更加明显，因此分离区范围会随之增大。

在本文的研究范围内（交汇角 30°~150°，汇流比 0.2~0.8，干流入口流速 0.6m/s~2.5m/s），干流侧分离区范围如表 3 所示。

表 3 干流侧分离区范围

交汇角	汇流比 q	干流入口流速(m/s)	L^*	B^*
30°	0.2～0.8	0.6～2.5	0.084～0.276	0.131～0.260
60°	0.2～0.8	0.6～2.5	0.182～0.340	0.153～0.302
90°	0.2～0.8	0.6～2.5	0.512～0.755	0.216～0.563
120°	0.2～0.8	0.6～2.5	1.311～1.746	0.331～0.534

150°	0.2～0.8	0.6～2.5	1.436～1.912	0.427～0.766

在布置航道时，为了船舶的航行安全，需要考虑分离区的影响，要将航道布置在分离区范围之外。

3 结论

航道交汇口是船舶航行中容易发生碰撞和事故的高风险区域之一，研究其分离区范围有助于提升航运业安全性，此文通过 CFD 对航道交汇口进行数值模拟研究，得到支流和干流分离区特点结论如下：

（1）支流侧分离区并不是每个工况都会出现，即使出现范围也较小，增大交汇角、汇流比或者干流入口流速都会使得支流侧分离区范围变大；在本文研究范围内（交汇角 30°~150°，汇流比 0.2~0.8，干流入口流速 0.6m/s~2.5m/s），交汇角 150°、汇流比 0.8、干流入口流速 2.5m/s 时的支流侧分离区宽度是最大的，其最大宽度和主流宽度对比无量纲后为 0.168。

（2）干流侧分离区不仅每个工况都会出现，且范围较大，干流侧分离区范围随交汇角以及干流入口流速的增大而增大，随汇流比的增大而减小。

Y 型航道极易导致船舶交叉会遇，影响船舶通过能力，通过以上结论，得到分离区的范围，船舶航行时尽量避开分离区，有利于改善船舶的操纵性和稳定性，其研究数据也可为港区航道建设提供参考。

参考文献

[1]. 茅泽育,赵升伟,张磊等.明渠交汇口三维水力特性试验研究[J].水利学报,2004(02):1-7.

[2]. 茅泽育,赵升伟,罗昇等.明渠交汇口水流分离区研究[J].水科学进展,2005(01):7-12.

[3]. 冯亚辉,郭维东.Y 型明渠交汇水流数值计算[J].水利水运工程学报,2006,(04):34-40.

[4]. 郭维东,梁岳,冯亚辉等.Y 型明渠交汇水流分离区的数值分析[J].水利水电科技进展,2007,(06):49-52.

[5]. 王协康,杨青远,卢伟真等.交汇水流分离区特征研究[J].四川大学学报(工程科学版),2008,(06):1-6.

[6]. Webber, Norman Bruton, and C. A. Greated. "An investigation of flow behaviour at the junction of rectangular channels." Proceedings of the Institution of Civil Engineers 34.3 (1966): 321-334.

[7]. Best, James L., and Ian Reid. "Separation zone at open-channel junctions." Journal of Hydraulic Engineering 110.11 (1984): 1588-1594.

[8]. Weerakoon, S. B. "Three-dimensional calculation of flow in river onfluences using boundary fitted coordinates." J. Hydroscience and Hydraulic Engineering 7 (1989): 51-62.

[9]. Hsu, Chung-Chieh, Feng-Shuai Wu, and Wen-Jung Lee. "Flow at 90 equal-width open-channel junction." Journal of Hydraulic Engineering 124.2 (1998): 186-191.

[10]. Biron, Pascale M., Amruthur S. Ramamurthy, and Sangsoo Han. "Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences." Journal of Hydraulic Engineering 130.3 (2004): 243-253.

作者简介：毛超进，硕士研究生，18868002483,浙江海洋大学，859723926@qq.com。

通信作者：艾万政，教授，15257070064，浙江海洋大学，aiwanzheng@126.com

基于变异蚁群算法的无人水下航行器路径规划

李行行[1]，朱发新*[1]，董良雄[2]，滕宪斌[2]
（1-浙江海洋大学 船舶与海运学院，浙江 舟山 316022；2-广州航海学院 轮机工程学院，广东 广州 510725）
（2-

摘 要：无人水下航行器（Unmanned Underwater Vehicle，UUV）常被用于海洋探勘、水下环境检测等领域。随着水下作业的智能化，UUV 的智能水平要求也随之上升，高效且合理的路径规划是提高 UUV 智能化的关键。考虑到 UUV 的在进行路径规划时使用的传统算法存在缺陷的问题，本文设计了一种基于传统蚁群算法的变异蚁群算法，该算法通过设计新的启发函数来提高初始解的质量，并且通过变异启发式信息因子的函数达到自适应调整参数的效果，使算法在初始阶段具备更高的探索能力。同时，通过改进信息素更新规则，提高了算法的收敛速度和全局搜索能力。此外，为了验证改进算法的有效性，本文进行了在不同环境模型下的仿真实验。实验结果表明，与其他传统路径规划方法相比，本文提出的变异蚁群算法能够缩短规划路径的长度，并且计算程序更加稳定。

关键词：无人水下航行器；路径规划；蚁群算法；启发函数；仿真模拟

1. 引言

无人水下航行器（Unmanned Underwater Vehicle，UUV）作为一种智能化的水下设备，能够极大的拓展人类在水下空间的探索能力。但是，现阶段的 UUV 智能水平还远远无法满足人们对水下探索的需求。其中，UUV 的水下航迹规划是 UUV 实现水下作业的先决条件，并且水下环境十分复杂，因此高效且合理的路径规划是提高 UUV 智能化的关键。

关于路径规划的算法已有大量的研究，如 Dijkstra 算法、遗传算法（GA）、人工势场法（APF）、蚁群算法（ACA）等。其中，ACA 因其强大的鲁棒性和强大的搜索能力被广泛应用于路径规划中。然而，由于海洋环境十分复杂，水下环境的限制造成这些算法往往会过早收敛，许多学者为了使优化算法更好地应用于实际海洋环境下的 UUV 路径规划，提出了一些改进的优化算法。Akka 利用自由步长原理构造了一个新的全局启发式函数来加速算法的收敛。如 Dong 等人提出了一种基于动态反馈的双蚁群算法。Liu 等人提出了一种基于路径几何特征的局部优化方法。Gao 等人提出了一种路径合并策略来加速算法的收敛。然而，在传统的蚁群算法中，容易出现前期寻路的盲目性问题和陷入局部最优的情况。

为了解决传统蚁群算法在 UUV 路径规划中搜索速度慢和易陷入局部最优的问题，本文根据其特点，提出了一种基于蚁群算法改进的变异蚁群算法 A-ACA。该算法通过设计新的启发函数和信息素更新方法来提高初始解的质量，加快了蚂蚁的搜索速度，在提高收敛速度的同时又尽量避免陷入局部最优，使得所规划出的 UUV 路径更加贴合实际应用，并以传统鸽群算法（PIO）和 A*算法作为对比算法，通过不同环境下的仿真实验验证了本文算法的优越性。

2. 环境模型构建

2.1 二维环境模型

在探讨 UUV 的路径规划时，二维的平面路径规划往往更加具象且便于规划，因此需要将 UUV 的运动维度设定在三自由度，将 UUV 航行的轨迹平面简化为 UUV 在二维平面的的水下定深航行。以水下环境的海底山脉为例，通过截面法截取海底山脉在二维平面上的投影模型，将 UUV 的航线平面投影到二维平面上，以便于路径的规划计算，如图 1。

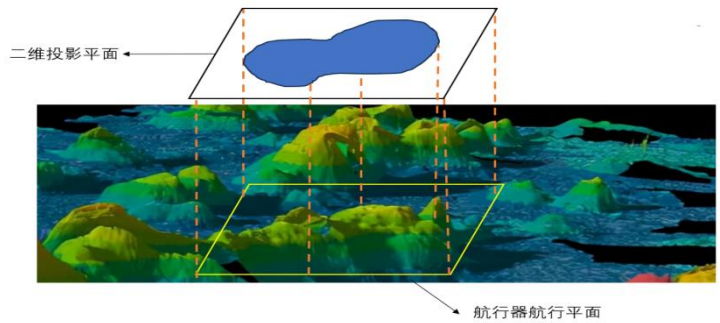


图 1 二维投影模型示意图

栅格法是目前最常用的环境建模表示法，在路径规划中应用广泛，将 UUV 的二维投影平面放入笛卡尔坐标系当中，以此将海洋环境栅格化，离散成由矩阵组成的网格空间，并将 UUV 视作为空间中的质量点，以便于路径规划的计算。基于 MATLAB 软件，通过绘制矩阵作为 UUV 定深航行的障碍网格，将图片中的像素值转化成仅包含 0 和 1 的矩阵。在离散网格空间中，网格主要分为自由空间网格和障碍网格，用仅包含 0 和 1 的矩阵表示，其中 0 表示自由空间网格，1 表示障碍网格[13]。

如图 2，是 25*25 的栅格空间，黑色网格代表障碍物空间，白色网格代表可行的自由域。栅格法采用 0 表示障碍物栅格，1 表示可行栅格。栅格法描述的是一个静态二维环境，可将其置于正交坐标系 XOY 中，计算每个栅格的坐标。栅格的几何中心作为 UUV 移动的节点，将 UUV 看作栅格中移动的质点，不考虑的它的几何形状对运动的影响。

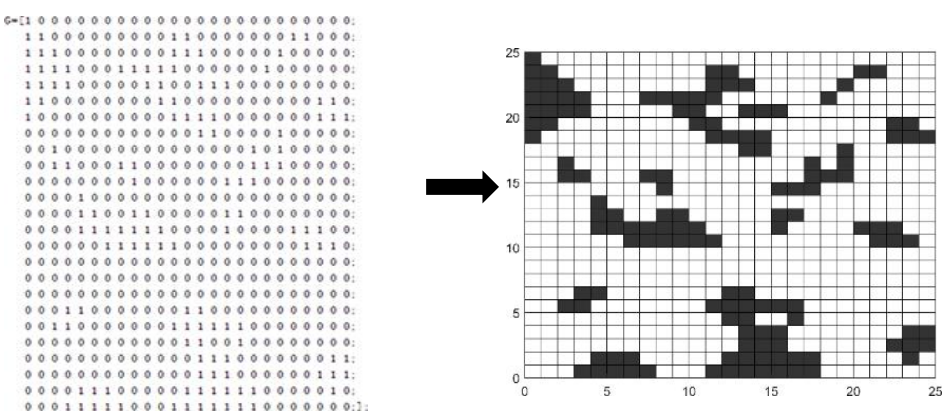


图 2 栅格环境模型

对于非规则地形，有的非规则形状的障碍物只能占据栅格的一部分，而不能占满，为了增加航行安全性，对障碍物进行膨化处理，将其看作是一个完整的栅格。为简化计算，提高规划效率，UUV 的路径规划问题可以进一步定义为在给定海洋环境，二维网格空间中，从起点到目标点寻找一组距离最低且不发生碰撞的网格节点序列。

2.2 三维环境模型

在建立三维的环境模型时，首先将三维地图的左下角顶点设为三维空间的原点 A，并在 A 点建立三维坐标系。在这个坐标系中，x 轴沿经度增加的方向，y 轴沿纬度增加的方向，z 轴垂直于海平面。以点 A 为起点，沿 x 轴方向取三维地图的最大长度 AB，沿 y 轴方向取三维地图的最大长度 AA’，沿 z 轴方向取三维地图的最大长度 AB，这样便构建出包含三维地图的立方体区域 ABCD-A’B’C’D’，即三维路径的规划空间，如图 3。

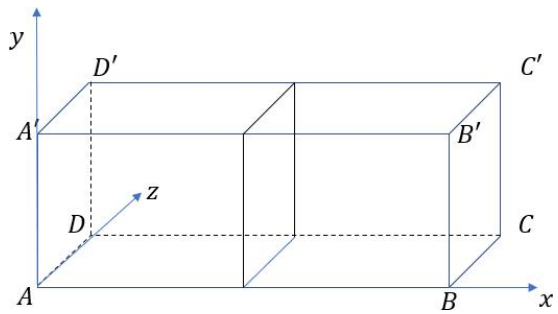


图 3 三维环境模型

其次，在构建了三维路径规划空间后，通过等分空间的方法，从三维空间中提取出三维路径规划所需的网格点。首先沿 AB 边将规划空间 ABCD-A'B'C'D' 等分，得到 n+1 个平面Ⅱ i（i=1,2,…,n），然后沿 AD 边将这 n+1 个平面等分 m 次，沿 AA' 边等分 1 次，并计算出各交点。

经过上述步骤，整个规划空间 ABCD-A'B'C'D' 被离散化为一个三维点集合，集合中的每个点都有两个坐标：序号坐标 $a_1(i,j,k)$，(i=0,1,2,…,n; j=0,1,2,…,m; k=0,1,2,…,1)和位置坐标 $a_2(x_i, y_i, z_i)$，其中 i，j，k 分别为当前点 a 沿 AA，AD，AA' 边的划分序号。UUV 将在这些三维路径点上进行规划，最终得到从出发点到目标点的三维全局最优路径。

3. 算法改进设计

传统蚁群算法模拟了自然界蚂蚁觅食的过程，通过并行计算以及正反馈迭代的方式，寻找最优路径。其核心思想是，蚂蚁在探索路径时会在经过的路上释放信息素，后续的蚂蚁会根据路径上的信息素浓度和节点之间的距离来选择行进路径，直至达到目标点。这种算法模拟了蚂蚁群体通过相互之间的信息交流找到食物的集体智能行为[4]。以下为蚁群算法的核心思想公式。

$$P_{ij}^{k}=\begin{cases}\dfrac{\tau_{ij}^{\alpha}(t)\eta_{ij}^{\beta}(t)}{\sum_{\mu\in J_k}\tau_{i\mu}^{\alpha}(t)\eta_{i\mu}^{\beta}(t)}, & \mu\in J_k\\ 0, & \mu\notin J_k\end{cases} \tag{1}$$

式中，α为信息素浓度的控制因子，β为启发值的控制因子，这两个因子式分别代表了信息素和启发函数的重要占比，对于 k 蚂蚁选择路径的有着影响的作用。τ为t时刻信息素的浓度值，η为t时刻启发函数的值。J_k为 k 蚂蚁所能前往的路径选择集合。在分式中，分子为处于 i 点的 k 蚂蚁对选择 j点为路径的权值，分母为k蚂蚁从i点出发到所有点的路径之和的权值。即P_{ij}为 k 蚂蚁选择 i 点作为目的地的路径概率。

当 k 蚂蚁完成一次所有目的地点的路径周游之后，各路径上会留下相应的信息素，蚂蚁通过留下的信息素浓度来判断该路径的优先程度，以此选择更优的路径。在完成一次周游之后，信息素的浓度会进行更新，信息素浓度的更新按照下式进行：

$$\tau_{ij}(t+1)=(1-\rho)\tau_{ij}(t)+\Delta\tau_{ij}(t)(0<\rho<1) \tag{2}$$

$$\Delta\tau_{ij}(t)=\sum_{k=1}^{m}\tau_{ij}^{k}(t) \tag{3}$$

$$\Delta\tau_{ij}^{k}(t)=\begin{cases}\dfrac{Q}{S_k}, \\ 0\end{cases} \tag{4}$$

式中，ρ为该路径上信息素蒸发量；则$(1-\rho)$即为该路径上信息素的保有量（持久度），通常情况下，ρ的取值为一个定值常数；$\Delta\tau_{ij}$为该路径上信息素的增量（本次迭代下信息素的增量）；$\Delta\tau^{k}ij$

为 k 蚂蚁的信息素增量；Q为常数，S_k为 k 蚂蚁所经过的所有路径距离之和（S_k越小，$\Delta\tau^k ij$越大）。

在传统的蚁群算法中，容易出现前期寻路的盲目性问题和陷入局部最优的情况。因此，根据蚁群算法的特点，调整信息素启发式因子α和信息素蒸发系数ρ。

在算法初期，为了提高搜索出全局最优解的概率，应尽可能让蚁群在更大的空间内搜索，然而此时环境中的信息素分布是均匀的，如果正反馈效应加强，则容易过早地陷入局部最优[11]。在算法的中后期，蚁群逐渐集中在全局最优解或次最优解周围，应逐步加强正反馈效应，加快算法的收敛速度。因此，基于上述分析，将参数的自适应调整方法设计如下：

$$\begin{bmatrix}\alpha(t)\\ \rho(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.9-(0.9-2)\left(\dfrac{t}{T}\right)^{1.2}\\ 0.1-(0.1-0.3)\left(\dfrac{t}{T}\right)^{1.2}\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中，t为当前迭代次数，T为最大迭代次数。进一步，对每只蚂蚁的费洛蒙启发式因子进行了变异，进一步提高了全局搜索能力利用蚁群的异质性特征对蚁群进行搜索。参数变异方法如下：

$$\alpha(t,m)=\alpha(t)+rand(-0.02,0.02) \tag{6}$$

式中，$\alpha(t,m)$为第t代中第m只蚂蚁的信息素启发式因子 $rand(-0.02,0.02)$ 为在 $(-0.02,0.02)$ 内满足正态分布特征的随机数。

为了降低算法初步搜索的盲目性，提高低能量节点对蚁群的吸引力，本文提出了一种改进的启发式信息函数。由于算法使用的环境模型为二维栅格模型，因此考虑蚂蚁在经过每一栅格所消耗的能量为定值，在启发式信息函数当中，将节点之间的距离信息与 UUV 在节点之间所消耗的能量相结合，综合考虑路线的距离和能量消耗。改进的启发式信息函数如下：

$$w_{ij}=\frac{1}{d_{ij}}+\frac{\sigma}{E_x(k)+E_y(k)} \tag{7}$$

式中，d_{ij}为下一个节点到目标节点的距离， σ 为常数。

信息素更新规则是蚁群算法的重要组成部分，是蚂蚁个体之间信息交换的关键通道。传统蚁群系统的信息素更新规则是在蚂蚁完成搜索后对全局或临时最优解进行信息素更新，可以很好地发挥高质量解的作用，但也在一定程度上影响算法的全局搜索能力[16]。

为了改善这种情况，本文利用相对信息熵对每一代候选解的多样性进行定量分析，根据分析结果提出自适应因子，并根据该因子对信息素更新规则进行调整。当候选解决方案的多样性较好时，应增强优质解决方案的主导作用;反之，则说明该算法的全局搜索能力相对较差[17]。相对信息熵和改进后的信息素更新规则如下：

$$H_o(t)=\frac{-\sum_i^n p(t,x_i)\cdot\ln p(t,x_i)}{\ln n} \tag{8}$$

$$\tau_{ij}(t)=\begin{cases}(1-\rho(t))\tau_{ij}(t-1)+\Delta\tau_{ij}^{best}(t),if\,\varepsilon(t)>q\\ (1-\rho(t))\tau_{ij}(t-1)+\Delta\tau_{ij}^{best}(t)\varepsilon(t),if\,\varepsilon(t)<q\end{cases} \tag{9}$$

$$\Delta\tau_{ij}^{best}(t)=\frac{Q}{D_{best}} \tag{10}$$

其中 $p(t,x_i)$是在第 t 次迭代时第 i 类候选解出现的概率，其中候选解根据适应度值进行分类。

n 为本次候选解的总数，$\Delta\tau_{ij}^{best}(t)$ 为当前最优解的费洛蒙增量，Q 为信息素更新的强度，D_{best} 为当前最优解的距离。

4. 仿真实验分析

4.1二维环境下的仿真实验

根据本文所提出的改进蚁群算法 A-ACA 对 UUV 的定深航行过程进行全局路径规划，并选用了路径规划中较为常用的两种算法鸽群算法（PIO）和 A*算法进行比较，验证本文所提出方法的优越性。在 MATLAB 软件中进行仿真实验，算法的初始参数的选取参照表 1。

表 1 初始化参数

初始参数	设定值
蚂蚁数量 M	50
总迭代次数 K	100
信息启发式因子α	1
信息素残留因子（1-ρ）	0.8
信息素强度 Q	50
信息素蒸发系数 Rho	0.2

考虑到栅格的大小，将蚂蚁数量设置为栅格坐标值的两倍，其他参数按照表 1 完成 A-ACA 的初始化设定后，使用 A-ACA 算法对图 1 所示的水下环境模型进行寻径计算。根据水下环境的大致位置在 MATLAB 中创建 25*25 的栅格环境模型，以便于进行计算，如图 4。

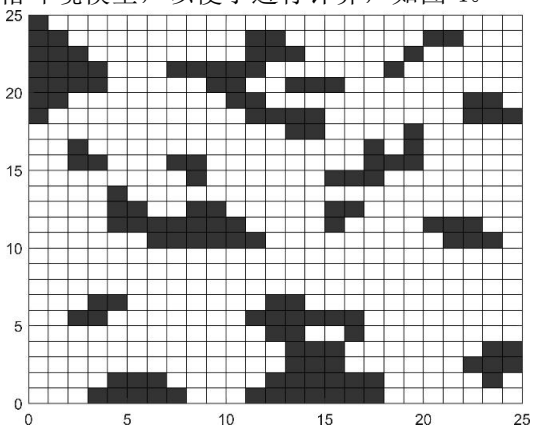
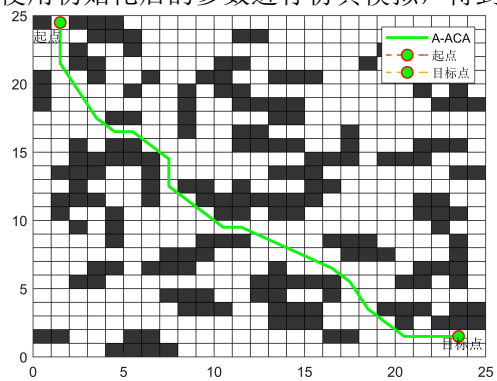
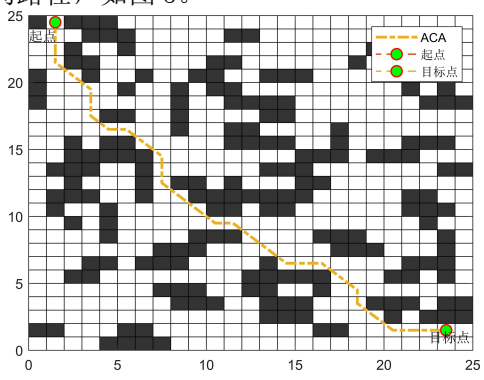


图 4 25*25 栅格环境模型

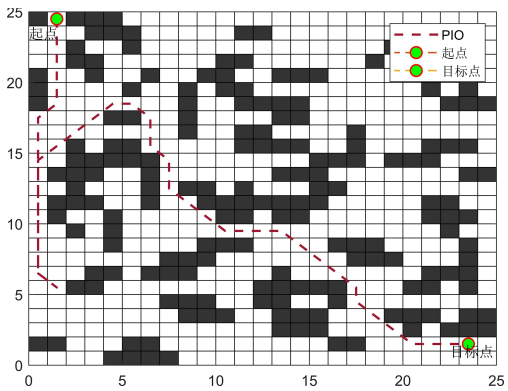
使用初始化后的参数进行仿真模拟，得到最优的全局路径，如图 5。



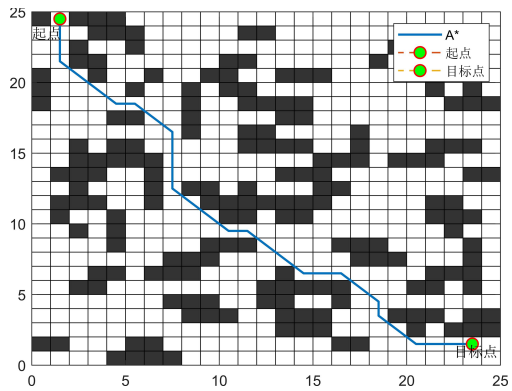
(a) A-ACA 最优路径



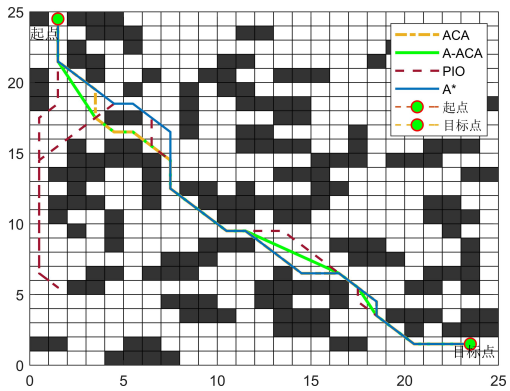
(b) ACA 最优路径



(c) PIO 最优路径



(d) A*最优路径



(e) 最优路径对比图

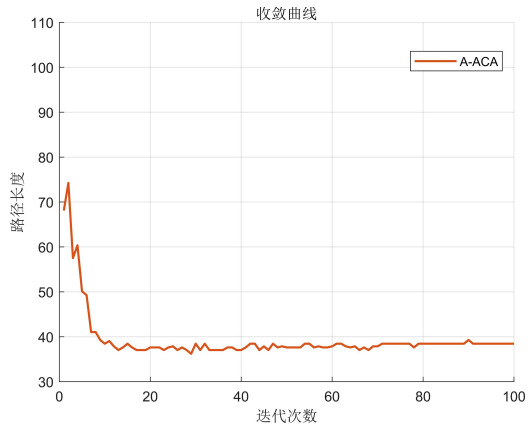
图 5 各算法下的最优路径

从图 5 中可以看出，在同一二维环境障碍下，A-ACA、ACA、A*等算法都可以寻找到最优路径，而 PIO 路径规划算法在复杂的多拐点环境下已经无法找到最优路径，且产生了多余的探索路径。除此之外，A-ACA 得到的最优路径距离最短，同时，A-ACA 规划路径的拐点相较于其他算法更少，整体平滑程度高于其他算法，更少的拐弯意味着 UUV 在航行过程中所因拐弯所产生的能量消耗更少，较高平滑程度的规划路径有利于 UUV 在实际作业中减少能耗损失，从而提高其工作效率和减少作业时间，如表 2。

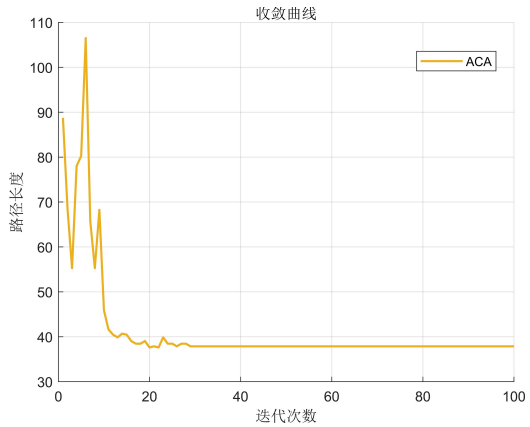
表 2 四种算法仿真结果对比

算法	A-ACA	ACA	PIO	A*
迭代次数	100	100	100	\
路径长度	35.0420	36.1446	62.5563	39.011
拐点个数	9	14	16	12
程序运行时间/s	14.33	16.12	21.11	15.41

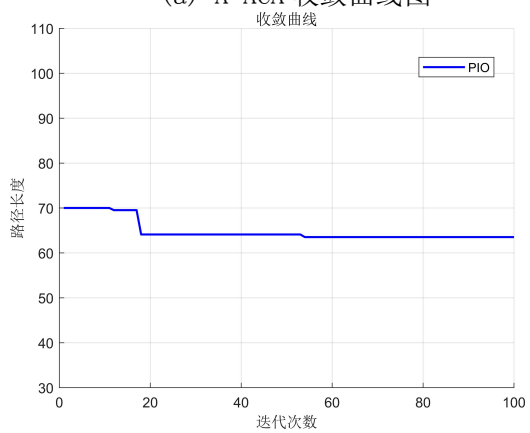
通过图 6 中的收敛曲线对比图可以看出，相较于传统的 ACA 算法，A-ACA 不仅规划出的最优路径距离最短，并且拥有更快的收敛速度；相较于 PIO 算法，A-ACA 的程序更加稳定，且效率更高。



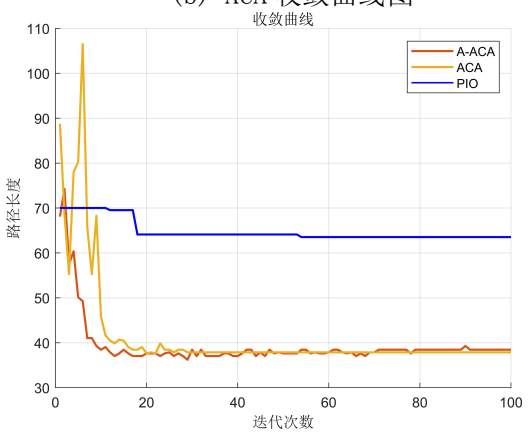
(a) A-ACA 收敛曲线图



(b) ACA 收敛曲线图



(c) PIO 收敛曲线图



(d) 对比收敛曲线图

图 6 收敛曲线对比图

4.2 三维环境下的仿真实验

采用 A-ACA 在跨度为 20 的三维水下空间中搜索从起点到终点,并且避开所有障碍物的路径，为了方便问题的求解，取该区域内最深点为水底基准面，的高度为 0，其他点高度根据和最深点高度差依次取得。路径规划整个搜索空间为 20×20×20 的水下空间。其中，起点坐标为(1,10,800),终点坐标为(21,4,1000)。

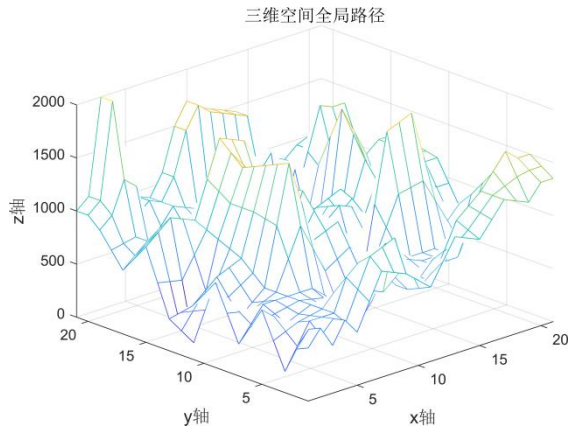
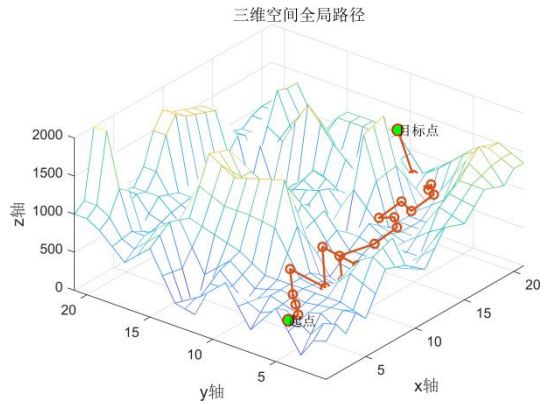


图 7 三维环境模型

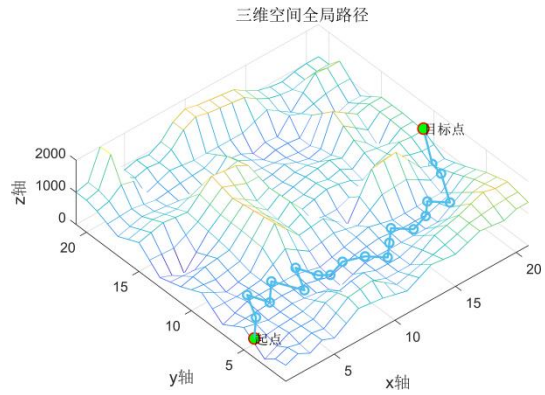
在建设好的三维环境模型中进行仿真实验，由于增加的维度导致计算量的上升，将跨度设置在 20，蚂蚁数量仍然设置为栅格值的两倍，其他参数与二维一致，具体参数如表 3。经过仿真实验得到结果如图 8 所示。

表 3 三维环境下的仿真实验参数

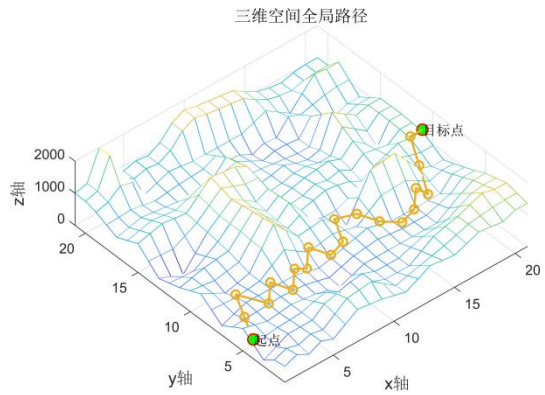
初始参数	设定值
蚂蚁数量 M	50
总迭代次数 K	100
信息启发式因子α	1
信息素残留因子（1-ρ）	0.8
信息素强度 Q	50
信息素蒸发系数 Rho	0.2



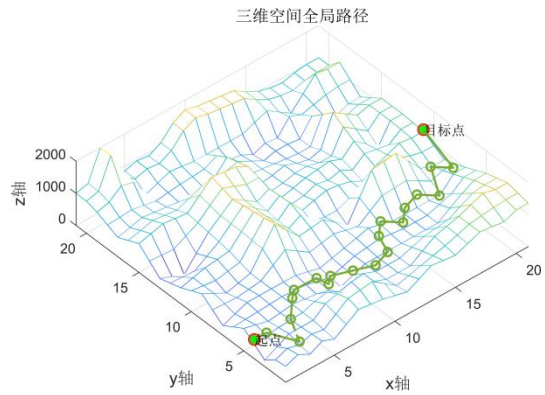
(a) A-ACA 最优路径



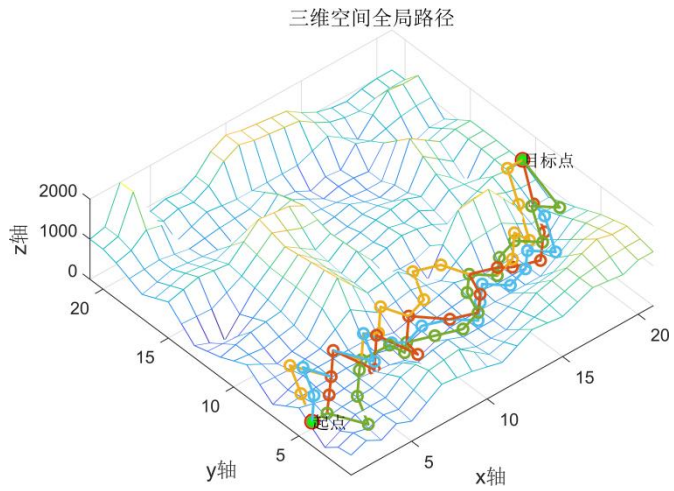
(b) ACA 最优路径



(c) PIO 最优路径



(d) A*最优路径



(e) 最优路径对比图

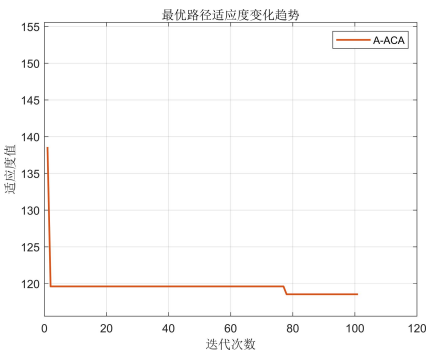
图 8 各算法下的最优路径

从仿真结果中可以看出，在三维的环境障碍下，4 种算法都可以寻找到最优路径，但是与改进后的 A-ACA 相比，其他 3 种传统路径规划算法所得到的路径都产生了部分额外的拐弯路径。除此之外，A-ACA 规划路径的贴合度也更高，与三维环境的贴合程度整体高于其他算法，规划的路线更加贴合环境障碍意味着 UUV 在作业时的状态会更加稳定，从而提高其工作效率和减少作业时间，具体的仿真数据如表 4。

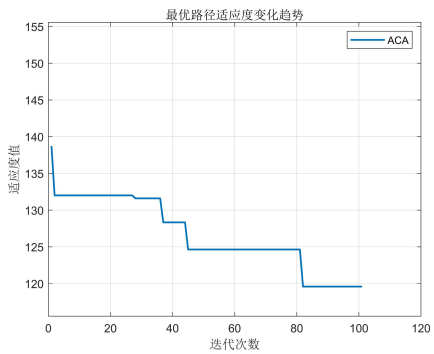
表 4 三维环境下的仿真实验结果

算法	A-ACA	ACA	PIO	A*
迭代次数	100	100	100	\
路径长度	41.0420	42.1446	49.5563	47.042
程序运行时间/s	32.21	29.12	34.11	37.41

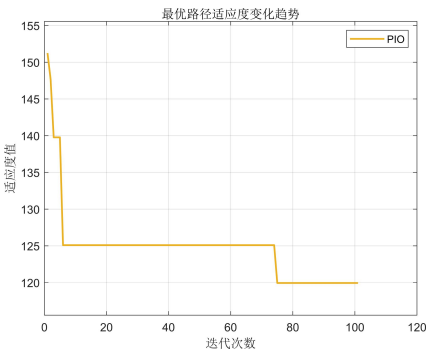
通过图 9 中的路径适应度曲线对比图可以看出，相较于传统的 ACA 算法，A-ACA 不仅规划出的最优路径适应效果最好，并且收敛速度也更快；相较于传统算法，A-ACA 的程序更加稳定，且效率更高。



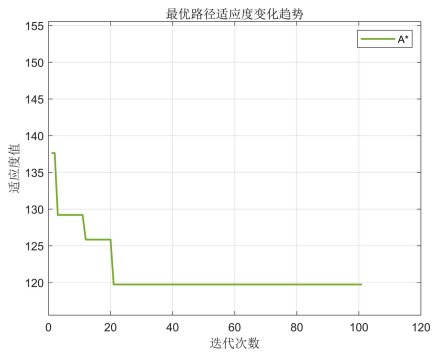
(a) A-ACA 路径适应度曲线图



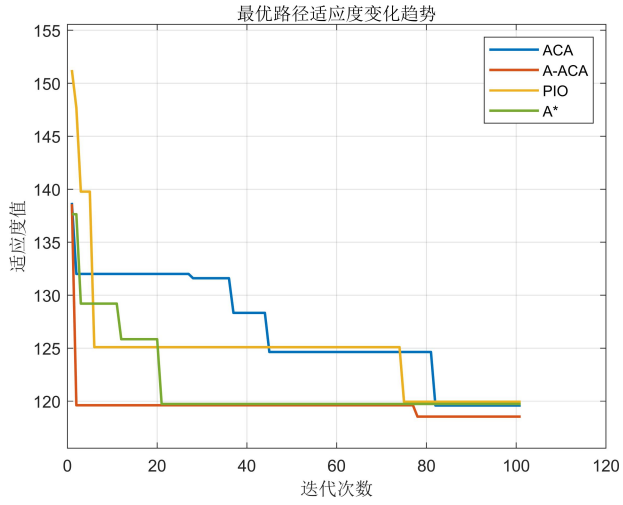
(b) ACA 路径适应度曲线图



（c）PIO 路径适应度曲线图



（d）A*路径适应度曲线图



（e）路径适应度曲线对比图

图 9 规划路径适应度曲线图

5. 结论

本文提出了一种无人水下航行器的全局路径规划算法——A-ACA 算法，该算法以传统蚁群算法作为基础进行改进，通过变异自适应函数来调整算法的参数以及改进信息素的更新规则，提高了算法的效率和稳定性，并且通过不同环境下的仿真实验验证了本文算法的优越性，相比其他传统算法，A-ACA 算法在最优路径的距离以及算法的稳定性方面都更具有优势。

在未来的工作中将继续通过各种改进以进一步优化算法性能，包括改进蚁群算法搜索能力和收敛速度等方面，并且将进一步考虑海洋环境的影响，如动态障碍物以及 UUV 的主机功率等对其航行状态的影响。

参考文献

[1] H. Wang, W. Mao, and L. Eriksson, “A Three-Dimensional Dijkstra’s algorithm for multi-objective ship voyage optimization,” Ocean Eng., vol. 186, p. 106131.

[2] L. Wang, Z. Zhang, Q. Zhu, and S. Ma, “Ship Route Planning Based on Double-Cycling Genetic Algorithm Considering Ship Maneuverability Constraint,” IEEE Access, vol. 8, pp. 190746–190759, 2020.

[3] A.Lazarowska, “A Discrete Planning Approach in Collision Avoidance for Smart Ships,” Procedia Computer Science, vol 176, pp. 380-389,2020.

[4] G. Xia, Z. Han, B. Zhao, C. Liu, and X. Wang, “Global Path Planning for Unmanned Surface Vehicle Based on Improved Quantum Ant Colony Algorithm,” Math. Probl. Eng., vol. 2019,

pp. 1–10, Apr. 2019.

[5] L. Dong, J. Li, W. Xia, and Q. Yuan, “Double ant colony algorithm based on dynamic feedback for energy-saving route planning for ships,” Soft Comput., vol. 25, no. 7, pp. 5021–5035, Apr. 2021.

[6] J. Tang, G. Liu, and Q. Pan, “A Review on Representative Swarm Intelligence Algorithms for Solving Optimization Problems: Applications and Trends,” IEEECAA J. Autom. Sin., vol. 8, no. 10, pp. 1627–1643, Oct. 2021.

[7] B. K. Patle, G. Babu L, A. Pandey, D. R. K. Parhi, and A. Jagadeesh, “A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot,” Def. Technol., vol. 15, no. 4, pp. 582–606, Aug. 2019.

[8] W. Du, Y. Li, G. Zhang, C. Wang, B. Zhu, and J. Qiao, “Energy saving method for ship weather routing optimization,” Ocean Eng., vol. 258, p. 111771, Aug. 2022.

[9] K. Akka and F. Khaber, “Mobile robot path planning using an improved ant colony optimization,” Int. J. Adv. Robot. Syst., vol. 15, no. 3, p. 172988141877467, May 2018.

[10] J. Liu, J. Yang, H. Liu, X. Tian, and M. Gao, “An improved ant colony algorithm for robot path planning,” Soft Comput., vol. 21, no. 19, pp. 5829–5839, Oct. 2017.

[11] W. Gao, Q. Tang, B. Ye, Y. Yang, and J. Yao, “An enhanced heuristic ant colony optimization for mobile robot path planning,” Soft Comput., vol. 24, no. 8, pp. 6139–6150, Apr. 2020.

[12] L. Alvarez & G. S. Pavani, “Crosstalk- and fragmentation-aware survivable routing, modulation, space, and spectrum assignment using Ant Colony Optimization,”. Computer Networks.,vol. 249,pp. 110513-110513,Jun.2024.

[13] M Boulares and A Fehri, “UAV path planning algorithm based on Deep Q-Learning to search for a floating lost target in the ocean,”. Robotics and Autonomous Systems.,vol,179,pp. 104730-104730,Jun.2024.

[14] 王淼弛. 基于A*算法的移动机器人路径规划[D]. 沈阳工业大学, 2017.

[15] 唐玉洁. 复杂三维地形自主探索与环境建模技术研究[D]. 上海大学, 2020.

[16] G Starzec and M Starzec, “Ant colony optimization using two-dimensional pheromone for single-objective transport problems,”. Journal of Computational Science., vol. 79,pp. 102308-102308, May.2024.

[17] S Rakhmetullina and G Zhomartkyzy, “Development of an Algorithm for Solving an Asymmetric Routing Problem Based on the Ant Colony Method,”. Cybernetics and Systems Analysis., vol.59,pp. 526-534,Jul.2023.

作者简介：

李行行（2000- ），浙江海洋大学，硕士研究生，交通运输专业，海上安全技术研究方向，电话：19818053985，邮箱：19818053985@163.com ；

朱发新（1982- ），通讯作者，浙江海洋大学，副教授，硕士学位，轮机工程专业，船舶安全与污染控制研究，电话：15858050245，邮箱：zhufax7758@163.com。

基于CFD的船舶桥区航行偏航变化分析

朱鹏飞，毛超进，艾万政，王家宏
（浙江海洋大学，船舶与海运学院，浙江 舟山 316022）

摘　要：为了正确地控制船舶的航迹，保证船舶安全通过桥梁区域，研究桥墩对船舶产生的水动力干扰力具有重要的参考价值。本文基于CFD（计算流体力学）软件STAR CCM，对船舶通过桥墩时的水动力特性进行数值模拟，计算船舶所受的横向力，并分析不同时段的船舶偏航力学特性。研究结果表明，船舶在桥区航行时，由于流压场的变化，会受到横向力的影响向桥墩偏移；当船艏靠近桥墩时，所受横向力最大，船艏向桥墩偏移；当船尾离开桥墩时，船舶所受横向力与接近桥墩时相反，船尾向桥墩偏移。因此，船舶在桥区航行时，应注意船舶向桥墩的偏移；在横向力达到最大值之前，可提前操纵与横向力相反方向的舵来对抗船舶偏移。

关键词：桥区；船舶；CFD；水动力特性

0　引言

近年来，随着经济和科技的进步，人们的出行和货物流通变得更加频繁，对交通运输的需求也在不断增加。世界各地在航道上修建了大量桥梁，这虽然极大地方便了陆地交通，却给水路交通带来了一定困难。随着船舶数量的增加及船舶大型化、高速化的发展，船桥碰撞事故的概率正在增加，船舶在桥区航行的安全问题已成为社会各界关注的焦点[1]。 国内外许多专家学者已对船桥碰撞问题进行了研究，主要集中在以下几个方面：船桥碰撞的动力机理、风险分析、碰撞载荷计算和防撞装置设计[2-4]。钟佳昌[5]对通航水域的桥墩单墩以及受前排桩保护桥墩的周围流场进行数值模拟，研究其水流对船舶的影响，其研究的侧重点在于前排桩。蔡斌斌[6]等基于Ansys/Ls-dyna软件分析船舶-桥墩碰撞的基本过程及碰撞力的大小。朱益民[7]等分析不同工况、不同桥墩形式下桥墩水流分布，并分析其与船舶通航之间的关系。廖睿轩[8]结合实拍图像和数据增强建立了针对桥梁航道船舶的图像数据集，其目的在于识别航道船舶，实现桥梁防撞预警。曹明[9]等结合不同船速、不同通航水位、不同基础形式和不同船型等因素对船撞力的影响分析研究，探究其撞击力影响因素。

这些研究主要从船桥碰撞和被动碰撞避免的角度出发，较少分析船舶如何主动避免撞上桥梁。船舶主动避免撞上桥梁，其本质在于尽可能保持船舶按照预定的航线轨迹航行，但随着船舶大型化的发展和桥梁的日益增加，控制船舶桥区航行时保持在同一个航线轨迹越来越困难。

此文基于流体力学软件STAR-CCM+，以KCS集装箱船为研究对象，对船舶桥区航行时船舶周围及桥墩流场水动力特性进行模拟，计算了桥墩对船舶产生的横向力，并分析了不同时段船舶所受偏航力矩特性。此研究成果对于改善船舶桥区航行安全性，减少船桥事故风险，保障船员和船舶在复杂环境中的安全运行具有重要意义。

1 船型尺度及特征

此研究选取的研究对象是由韩国海洋与海洋工程研究所(Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering)开发的KCS集装箱船的裸船舶模型，模型几何形状见图1所示。KCS集装箱船模型船舶设计流畅，易于进行水动力模拟研究，且船舶周围网格及特殊区域处理方便，数值计算易收敛，模型数值模拟结果精确度好，已被国内外专家学者广泛运用到集装箱船水动力特性模拟实验中。此外，该模型更是被ITTC(国际拖曳水池会议)组织推荐为作为模型试验的标准集装箱船模型之一，其数值模拟结果经多次实验论证受尺度效应影响较小。模型缩尺比 λ =1:31.6，船长为7.2786m，船宽为1.019m，船舶详细参数见表1所示。此文主要研究船与桥墩相距一倍船宽情况下，船舶桥区航行水动力特性变化。



图1　KCS模型几何形状

表1　KCS船舶参数

主要参数	实船	船模

缩尺比λ	1	31.6
两柱间长Lpp (m)	230.0	7.2786
型宽B (m)	32.2	1.0190
型深D (m)	19.0	0.6013
吃水T (m)	10.8	0.3418
湿面积S (m^2)	9530	9.4379
方形系数C_B (m)	0.6505	0.6505
排水量V (m^3)	52030	1.6490
K_{yy}(%)	0.25 *Lpp*	0.25 *Lpp*

2 数值模拟及网格划分

2.1基本原理

此文采取可以解决更好解决复杂流场的雷诺平均Navier-Stokes (RANS)方程模拟了KCS航行时的流场。采用模拟多相流体动力学的VOF法（Volume of Fluid method）对计算域中的流体进行建模并捕捉自由表面位置。该方法具有良好的数值稳定性，能够在长时间模拟中保持较高的精度。此外，采用有限体积法对控制方程进行离散，并利用k-Epsilon湍流模型对流体控制方程进行封闭，该模型相对于更为复杂的湍流模型（如LES或DNS），计算相对较为简单和快速，适合工程应用中大规模的流体动力学计算。为了减少边界对数值计算结果的影响，还采用人工阻尼法处理出口的波浪影响。

2.2 计算域设置及边界条件

此文研究对象为KCS无舵裸船体。为避免计算域边界太小对计算数据的影响，计算域的尺寸设定为：速度进口边界与压力出口边界的距离为5倍船长；计算域的宽度（即两对称平面的距离）为3倍船长；水深为1.5倍吃水，计算域如图2所示。

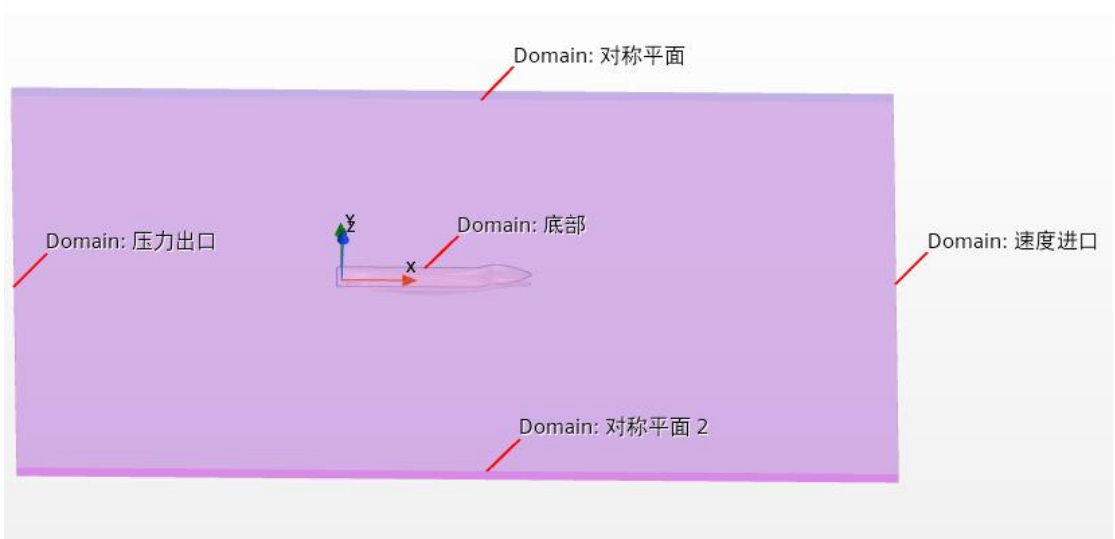


图2 计算域

船舶表面和对称平面的边界条件设置为不可滑移壁面。为了抑制回波对流体产生影响从而对计算结果造成误差，在压力出口边界设置了波浪阻尼。网格为非结构网格，在船舶周围和桥墩周围流场都进行了网格细化加密处理，船舶表面采用棱柱层网格，Y+值为60，图3为Y+值。表2为边界条件设置。

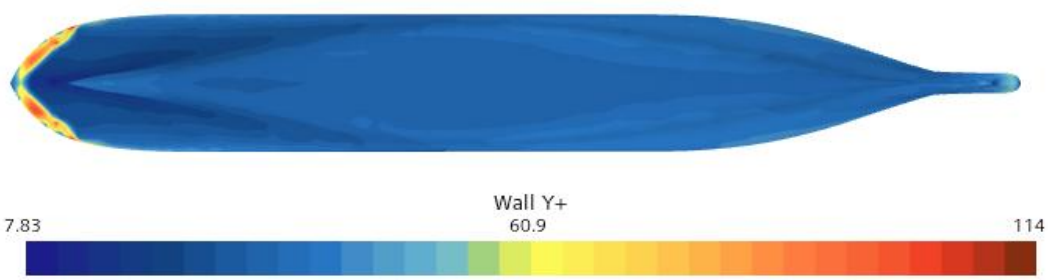


图3 计算域Y+值设置

表2 边界条件设置

边界	边界条件
顶部	对称平面
出口	压力出口
底部	不可滑移壁面
侧面	对称平面
对称面	对称平面
船舶	不可滑移壁面
入口	速度进口

2.3 网格划分

此研究采取了计算精度更高的六面体网格单元，网格基础尺寸取LPP /50 =0.15 m，设置5层棱柱层，棱柱层延伸设置为1.2。为了提高计算精度性和效率，可对网格进行加密网格设置，即针对不同对象设置不同网格量。此文选择的网格尺寸加细比为r=$\sqrt{2}$，用于放大网格大小，对整个计算域采取粗网格设置，对船舶表面网格进行中等网格设置，对船首船尾附近、桥墩处水动力特性这些需要更加细致的分析的位置设置了细网格设置。图4，图5展示了计算域整体网格结构及船首船尾加密网格结构，图6展示了桥梁区域内船舶航行的流体域网格。

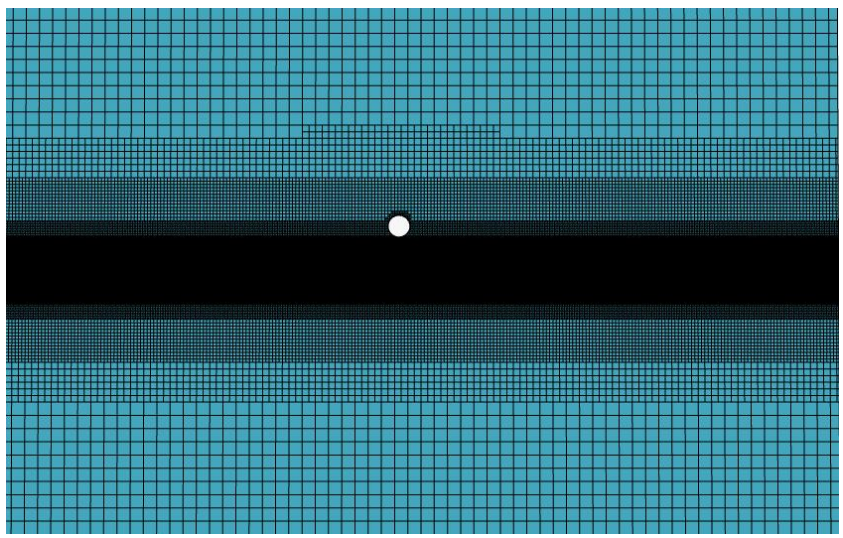


图4 计算域整体网格结构

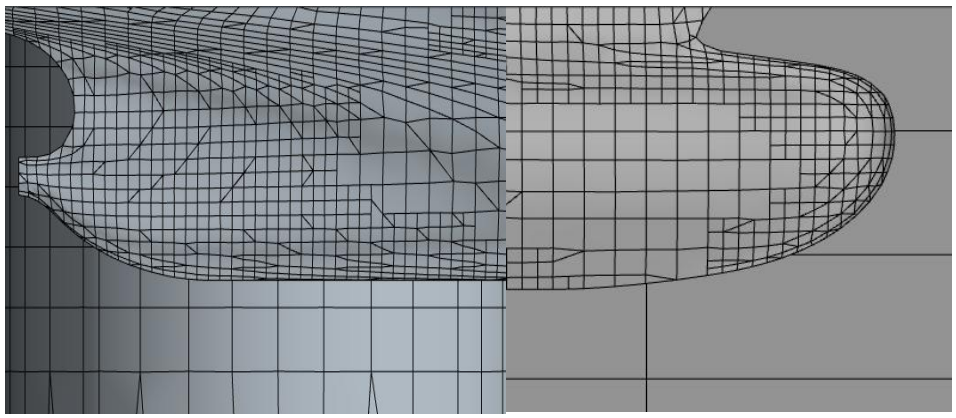


图5　船尾和船首加密网格结构

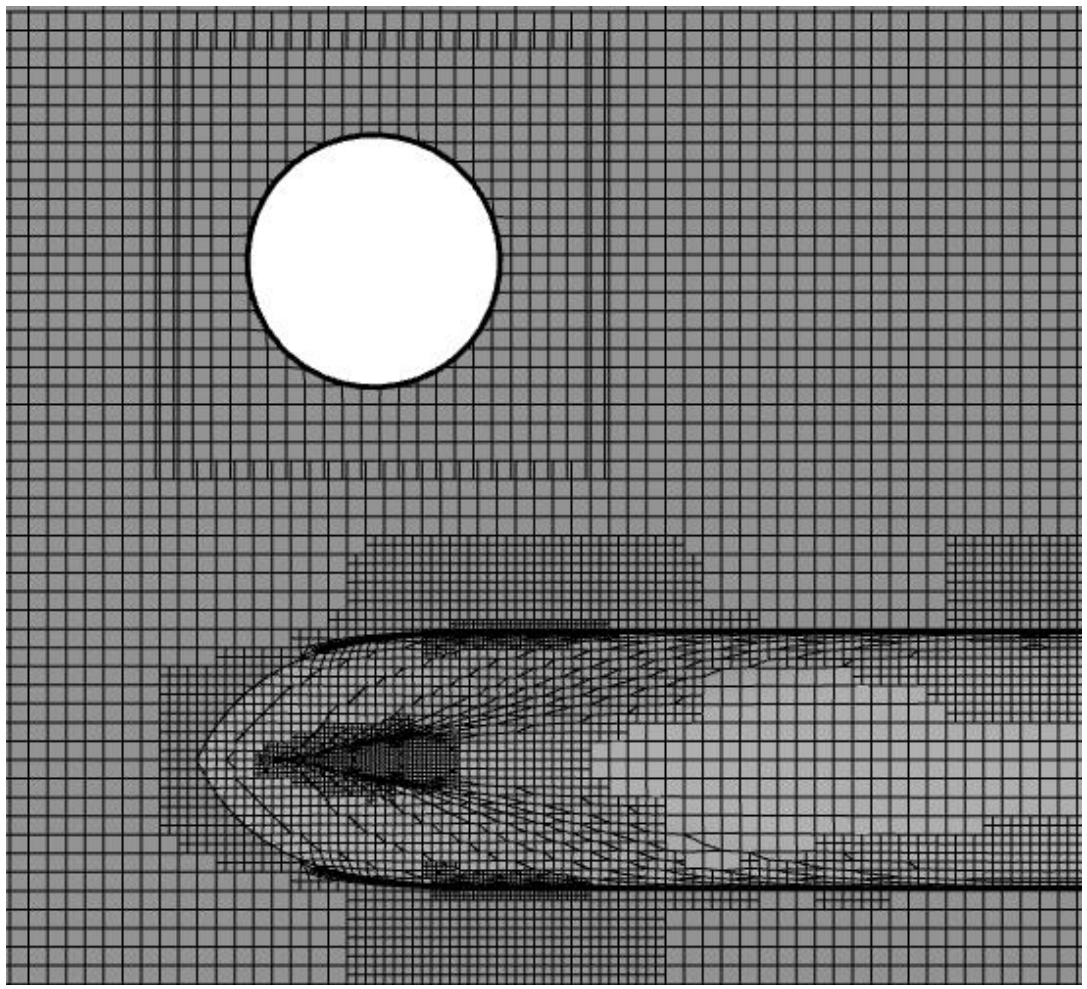


图6 桥梁区域内船舶航行的流体域网格

3 数值模拟结果分析

此章使用Star-CCM+仿真模拟软件对KCS船模进行数值模拟，模拟船舶通过桥墩时的流压场分布，计算船舶所受的横向力，并分析偏航力矩的变化规律，以研究桥墩附近水流结构与船舶的相互作用。

3.1 船舶航行对流压场分布的影响

此节探究船舶经过桥墩周围流压场特性变化情况。 船舶航行对流压场分布的影响：在平吃水情况下，采用船速8kn，逆流2kn，船舶与桥墩竖直距离为一倍船宽作为实验条件。船舶置于远离桥墩处，圆形桥墩半径通过相似换算为0.5m，实验结果见图7所示。

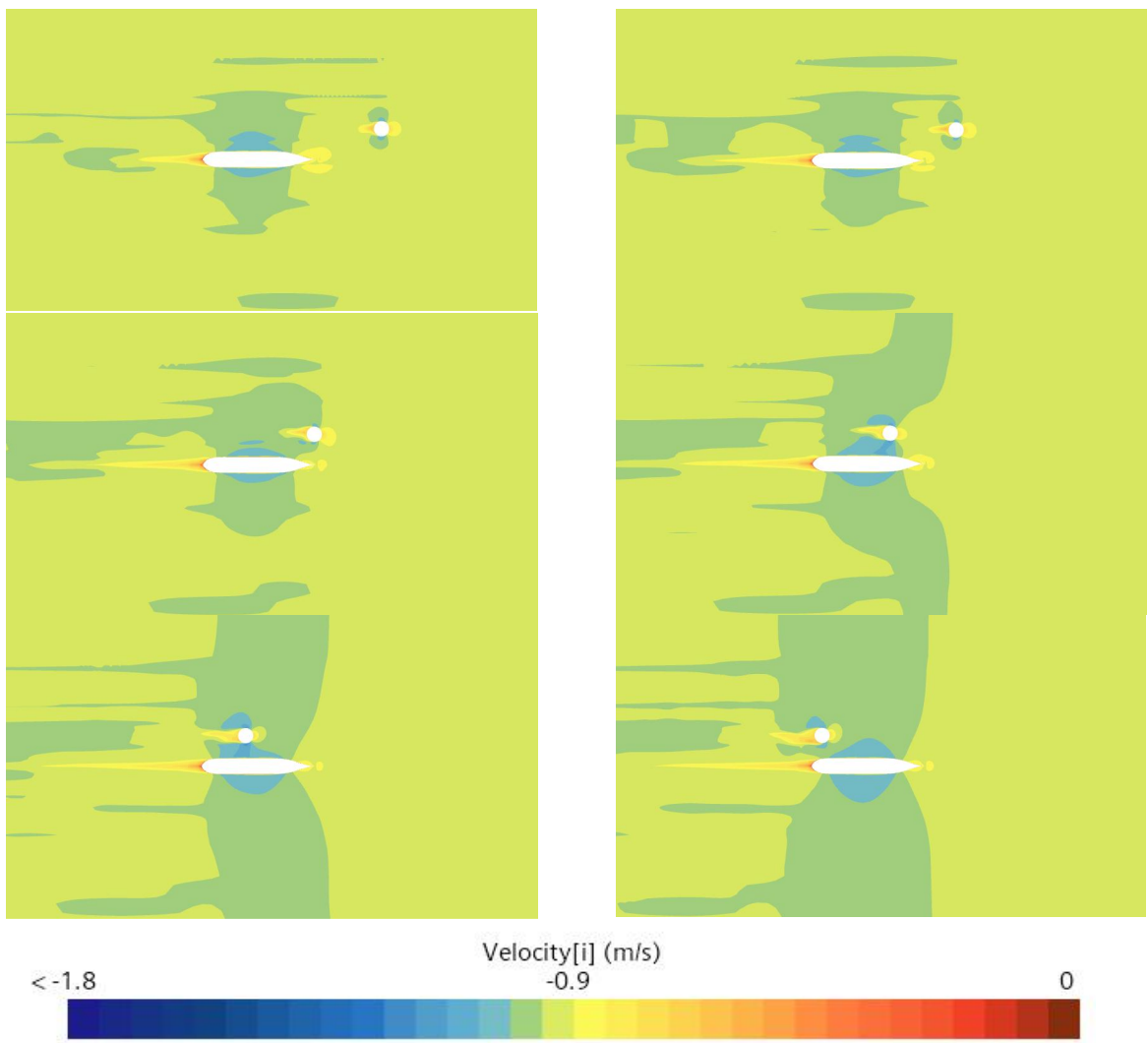


图7 船舶运动对流速场分布影响

由图7可知，随着船舶运动越来越靠近桥墩，船舶与桥墩周围流场相互作用不断明显。当船舶刚进入桥墩流场区域时，周围流场变化较小，仅是略微扩大。

当船艏接近并通过桥墩时，船舶周围的流速场发生明显变化。靠近桥墩侧的流速明显快于远离桥墩侧，且船艏处的流速明显快于船尾处。流速场的变化会影响压力场，其产生的流速差也会导致压力差的改变，船舶近桥侧压力要低于远桥侧，压力的作用会使船舶更容易向桥墩处倾斜，且由于船艏流速快于船尾，会造成船艏更加靠近与桥墩，船尾更远离于桥墩，这也解释了为什么桥墩区域船舶事故频发的原因。

当船中通过船舶及到船尾接近桥墩时，其流场变化刚好与船艏通过时相反，靠近桥墩侧流速明显快于远桥侧，且同侧船尾流速快于船艏，需注意流场变化所带来的压力改变。

当船舶离开桥墩时，桥墩与船舶形成收缩断面，且桥墩处的尾涡流速增加，会导致较大的切应力，对船舶（特别是船尾）产生吸引作用。

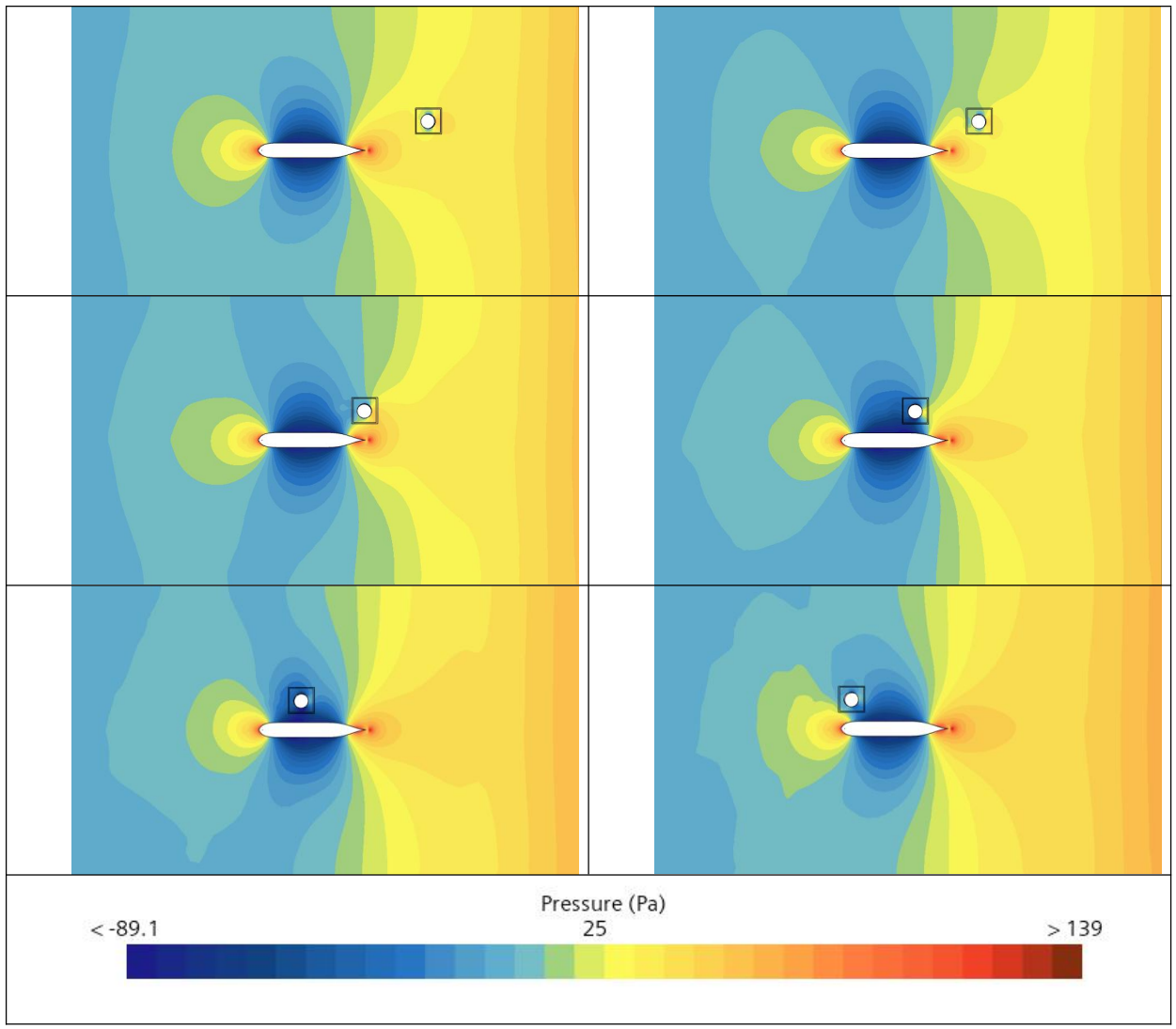


图8 船舶运动对压力场分布影响

流速场的变化会影响压力场的变化。由图8可知，特别是船舶靠近桥墩及通过桥墩时，船身近桥区域压力要低于远桥侧；船身部分变化同理，这与流速场变化是一致的，这就导致船舶两侧压力不同，进而导致船舶在通过桥墩时容易偏向桥墩，且同一侧船舶靠近桥墩处会受到更大的桥墩吸引力，导致船舶靠近桥墩处向桥墩偏移，如未及时调整容易产生碰撞危险，未靠近桥墩处受到远离桥墩的推力。

3.2 船舶航行对偏航力学特性的影响

本节针对3.1节的流压场特性分布，探究船舶通过桥墩偏航力学特性变化并进行分析。

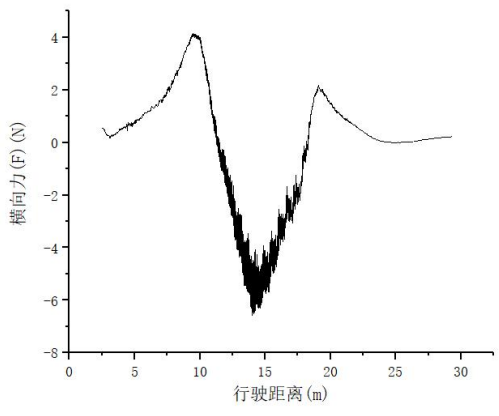


图9 横向力仿真模拟结果

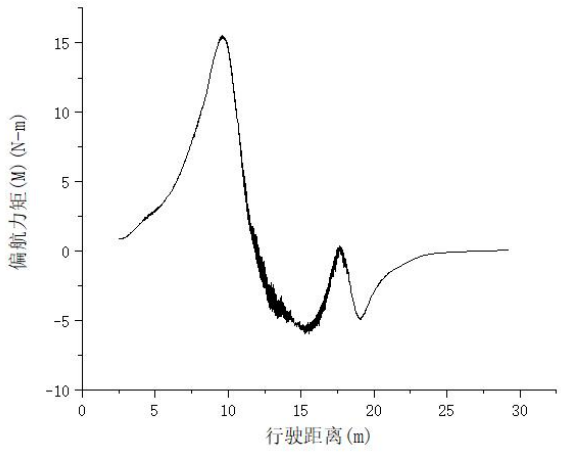


图10 偏航力矩仿真模拟结果

船舶经过桥墩时，船舶所受垂直于船舶的横向力变化具有明显的规律性。图为船舶经过桥墩所受到的横向力和偏航力矩变化。由图9、图10可以看出：船舶所受横向力有两个正峰值，进而导致船舶偏航力矩有两个正峰值。与船舶行近过程中2.1章流压场分布对比可以发现其中的规律：

初始阶段船舶携带一定的水体向桥墩运动，由于近桥处流速小于远桥处，两侧产生压力差，船艏受到压力作用向桥墩处偏移，最大值出现在船舶头部，当船舶刚刚进入桥墩时横向力达到最大，进而产生最大的偏航力矩。

当船舶继续前进时，桥墩尾部的涡流与船舶流场相互作用，导致船舶所受横向力逐步降低，偏航力矩逐渐减小。由于桥墩流场和船舶流场的互相影响，船桥间水流剧烈变化，从而产生横向力与偏航力矩数值的上下波动，在第一正峰值和第二正峰值之间产生负值。

当船舶尾部离开桥墩时，船舶流压场与船艏刚进入桥区刚好相反，最大值出现在船舶尾部，且在船舶刚刚离开桥墩时横向力达到最大，进而产生偏航力矩，使船尾向桥区移动，对船安全通过桥墩区域产生影响。

此后由于船舶慢慢远离桥墩区域流场，所受横向力慢慢降低直至无限趋向于零，又因为桥墩侧涡流的影响，所受力矩有正有负，但因其横向力较小接近趋于零，其变化对船舶航行影响较小，故此文不再做详细讨论。

3.3 船舶桥区航行建议

此研究主要探讨船舶从远到近通过桥区并驶离时的水动力变化。研究表明，船舶通过桥区时，由于船身两侧流速场的变化，导致压力场改变，产生横向力使船舶向桥区偏移，且同侧近桥处的横向力更大。因此，船舶在桥区航行时需时刻关注压力场变化引起的横向力，注意船舶向桥墩的偏移。

通过3.2节的分析，可以得到船舶所受横向力在船艏刚刚进入桥墩时达到最大，所以在船艏即将要进入桥墩时可进行适当的向桥墩反方向操适量的舵，使船舶自身产生一个向反的力对抗桥墩流场所带来的横向力，尽可能保持船舶航行时保持在同一个航线轨迹上；当船尾即将离开桥墩时，应向桥墩方向操舵，以对抗桥墩尾涡流场产生的切应力对船舶的吸引作用，减少船舶偏离航线撞上桥墩的风险。

4 结论

船舶在桥区航行时，受到桥墩区域流场的影响，产生横向力并导致航行轨迹偏移。结合此文数据，得出以下结论：

（1）当船舶进入桥墩流场区域时，由于两侧流压场不同，船舶会受到偏移至桥墩的横向力，且同侧近桥处横向力更大，力的大小与船舶离桥墩的距离成正比。

（2）船舶所受横向力有两个峰值，分别在船艏刚进入桥墩和船尾离开桥墩时。船艏刚进入桥墩时，横向力导致其船艏向桥墩偏移；船尾离开桥墩时，横向力导致其船尾向桥墩偏移。

因此，船舶在桥区航行时，应时刻关注横向力变化导致的偏移。在船艏刚进入和船尾离开桥墩时，提前操舵以对抗横向力，保持船舶在同一航向轨迹上航行。

参考文献
[1]菅永坤.船舶桥区航行事故分析与对策[J].天津航海,2024,(02):64-66.
[2]刘华海,沈聪,祝涵,等.基于差分GPS技术的船桥防撞预警技术研究[J].中国水运,2024,(05):19-21.DOI:10.13646/j.cnki.42-1395/u.2024.05.007.
[3]郑霄阳,范存斌,王英森,等.三峡库区弯曲河段大偏角船桥碰撞力分析[J].科学技术与工程,2024,24(07):2937-2946.
[4]张景峰,荀非帆,尹震君,等.常泰长江大桥船撞抗力研究及安全性评估[J].桥梁建设,2024,54(03):78-84.DOI:10.20051/j.issn.1003-4722.2024.03.011.
[5]钟佳昌.前排桩对桥墩周围水流及船舶影响研究[D].长沙理工大学,2015.
[6]蔡斌斌,李骏.基于LS-DYNA的船舶-桥墩碰撞数值模拟[J].工程与建设,2015,29(01):21-23.
[7]朱益民,李艳清,张壮壮.枫江大桥桥区航道通航条件数值模拟研究——以广东惠来为例[J].珠江水运,2023,(16):106-108.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2023.16.023.
[8]廖睿轩,吴同,张一鸣,等.用于船桥碰撞预警的复杂场景下视觉船舶检测（英文）[J].Journal of Southeast University(English Edition),2024,40(01):33-40.
[9]曹明,张南,沈强,等.船桥撞击力影响因素有限元仿真模拟分析[J].防灾减灾工程学报,2021,41(03):603-611.DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201903065.

作者简介：朱鹏飞，讲师，15268001167,浙江海洋大学，lovedifa@126.com。
通信作者：艾万政，教授，15257070064，浙江海洋大学，aiwanzheng@126.com

基于优化灰色马尔科夫动态模型的三峡过坝货运量预测

姚博远,艾万政，王家宏，毛超进
（浙江海洋大学船舶与海运学院，浙江 舟山 316022）

摘　　要：近年来，随着我国内河水路运输持续较快发展，货运量累创新高，但长江三峡的堵点问题遏制着长江航运经济的发展，三峡船闸现已达到设计之初的最大通过能力。为解决三峡水运拥堵问题，“超级工程”三峡水运新通道即将正式落地。准确地预测三峡水运枢纽的货运量，可为工程建设提供有效参考。此文以历年三峡过坝货运量数据为支撑，通过动态改进，建立优化的马尔科夫动态模型来对未来的过坝货运量进行预测。因三峡水运新通道建设期长达 10 年，货运量的预测存在时间顺序的复杂性和不确定性。因此，此文采用无偏灰色理论来优化 GM(1,1)预测模型，并选择多组数据序列更新初始数据序列，然后使用马尔科夫理论修正残差值，最终对三峡过坝货运量进行科学精准的预测。结果表明研究具有很高的可信度，并且预测出 2025、2035、2050 年长江三峡的过坝货运量，能在水运新通道建设期间，提出合理有效的建议，配合缓解三峡枢纽的碍航情况。
关键词：三峡枢纽；运量预测；灰色马尔科夫模型；三峡水运新通道

0 引言

随着我国加快建设港口枢纽体系，打通内河航运堵点卡点等发展战略的实施，困扰长江沿岸多个省市的三峡船闸拥堵问题，正在加速破题。2025 年即将正式实施三峡水运新通道工程，今后三峡枢纽过坝货运量怎样发展是突破三峡枢纽运输瓶颈必须思考的问题。所以精准预测三峡通航货运量非常重要。

国家发改委、长江航务管理局、三峡通航管理局对往年货运量进行了预测，但由于预测方法、参考数据和定性定量的指标各不相同，所以预测的结果也有差别。在较早的三峡过坝货运量预测中，梁晶[1]使用的弹性系数法，水运系数法等类比推断的定性方法对过坝货运量进行了定量预测，预测结果与目前已知的数据相比比较偏保守。同样的方法，马奕[2]对三峡枢纽货运量进行了预测，但实际在 2015 年，实际三峡过坝货运量就超过了其预测的 2030 年的值。近几年货运量预测出现各种创

新的预测方法，过坝货运量更偏向精准预测，丁涛[3]等人基于遗传算法和统计学习理论，运用 GA-SVM 模型进行预测训练，证明了经济发展与货运量之间的内在联系，对 2017-2021 年的三峡过坝运输量进行预估。张浩、肖金龙[4]等人根据长江上游区域产业结构，分析建立三峡枢纽过坝量预测模型，预测 2020、2030、2040、2050 年三峡枢纽过坝货运量分别为 1.61、2.54、3.10 、3.17 亿吨，这种方法好在符合经济社会规律，但其中远期的 2040、2050 年数据没有考虑到三峡船闸高负荷的情况，仍然持续地增长显得不合理。张义军从时空分布的周期规律出发，构建了多元尺度下的回归预测模型，对 2035、2050、2060 年的货运需求量进行预测[5]。另外，他又采用 GA-SVM 模型构建函数在对遗传算法中的参数寻优，运用灰色模型对最优参数和评价因素进行长期预测，最终预测 2045 年三峡过坝的货运需求为 2.7 亿吨[6]，刚好符合三峡水运新通道工程的最大通航量。柯桥[7]在考虑到过坝货运量预测受多种因素影响，提出了灰色模型与神经网络组合预测的模型，基于加权几何平均算子的赋权方法，计算结果的误差都远小于单一模型，并且预测了 2019-2020 年的三峡枢纽货运量数据。赵旭[8]等人为了缓解三峡大坝通航拥堵，通过建立各种翻坝方式的效用函数来分析主导权的转移机制，将货运量分担到多种目标上，极大改善了货物过坝的运输状况。

上述对三峡过坝货运量预测方法主要从定性定量两种角度出发，早期的定性的预测方法是按照经济社会发展规律做出主观性判断，或者借鉴往年资料数据进行类比推理，这些预测模型放在实际应用中可能导致精度不高。在定量方法上的大部分模型方法又存在着依赖历史数据，计算复杂等问题。三峡过坝货运量预测是受诸多因素干扰，复杂的动态系统，结合三峡水运新通道的建设期长达 10 年，货运量的预测具有时间序列多变性和模糊性，传统的灰色马尔科夫预测模型不适宜在系统中做长期预测。因此，研究提出一种优化无偏灰色马尔科夫预测动态模型方法，以 2006-2023 年的三峡过坝货运量为样本数据，简化计算过程，对提高三峡通航货运量的预测精度有较大的实际意义。

1 三峡过坝货运需求分析

1.1 三峡水运通航现状

三峡枢纽建成以来，迅速发挥了巨大的航运效益，目前船闸负荷已达极限状态，货运量远超建成时所设计的最大通航量，导致大量船舶积压，平均待闸时间超过了 200 小时，三峡枢纽的船闸通过能力与不断增长的运输需求之间的矛盾愈演愈烈，使得周转效率下降、运营成本攀升、能源浪费，为了缓解三峡船闸堵点问题，建设三峡水运新通道和葛洲坝航运扩能工程迫在眉睫。

图 1 2023 年三峡船闸运行闸次

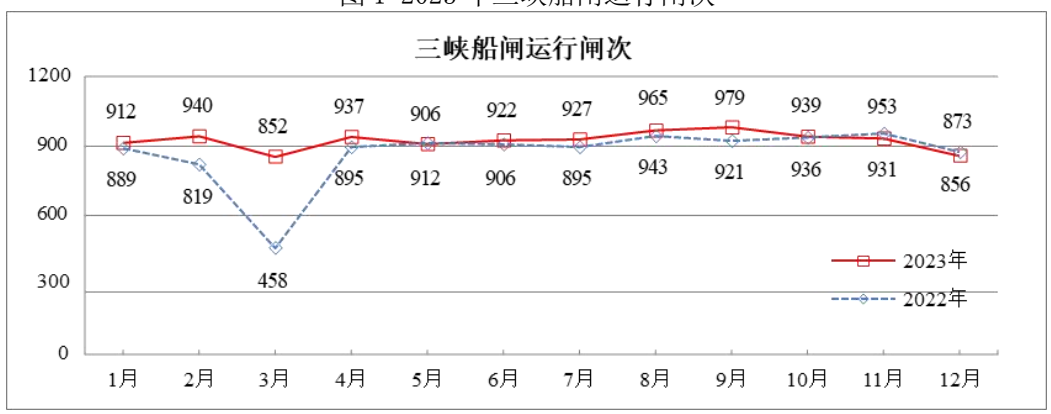


图 2 2023 年三峡船闸船舶艘次

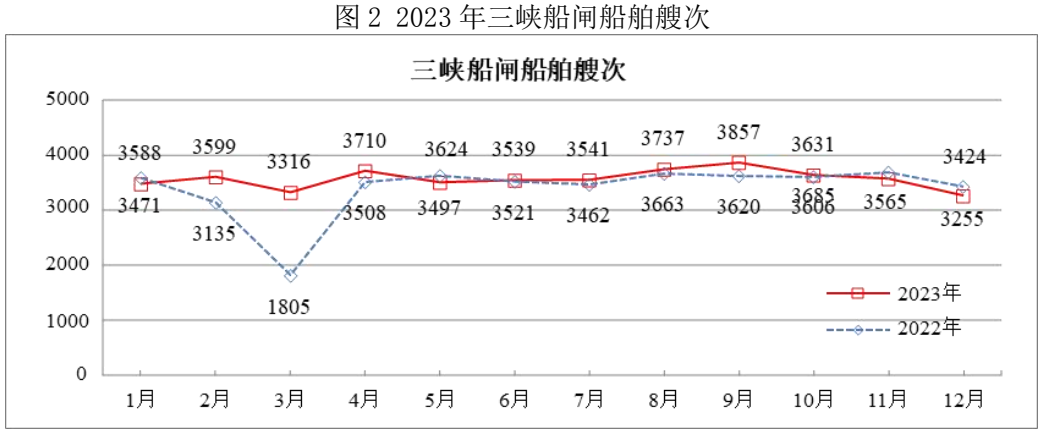
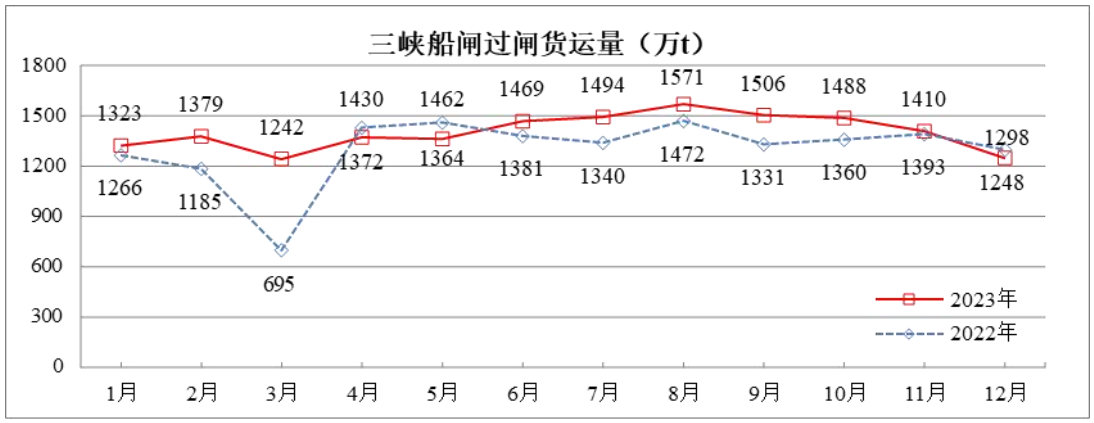


图 3 2023 年三峡船闸过闸货运量



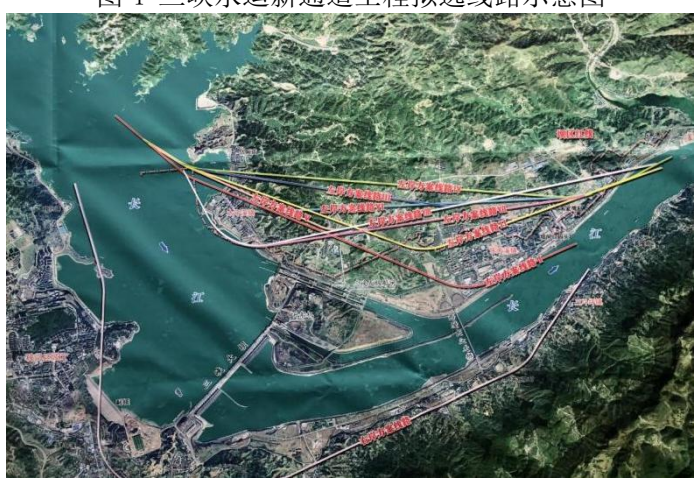
从上述三张图，我们看出过闸货运在增长的基础上，逐渐趋于饱和，且通航能力难以继续挖潜，过坝船舶持续拥堵，周转效率下降，造成能源与成本的浪费。

1.2 三峡水运新通道基本概况

三峡水运新通道项目分为三峡水运新通道和葛洲坝航运扩能工程两个部分，工程建设期约 9 年，估算静态总投资约 650 亿元。建成后预测通航量达 2.8 亿吨。

三峡水运新通道工程规划在三峡工程左岸新建两线连续五级船闸（单线单级船闸闸室尺度为 280 米×40 米×8 米），线路总长 6680 米，项目静态投资 461.62 亿元，其中工程投资 349 亿元，移民投资 85 亿元，征地面积 19025 亩，移民 3075 户，1.08 万人。经多轮技术审查和咨询，目前方案基本确定为六号线路方案，如下图蓝线所示：

图 4 三峡水运新通道工程拟选线路示意图



葛洲坝航运扩能工程规划在三江航道内新建两线单级船闸（单级船闸尺度闸室为 280 米×40 米×8 米），同时挖深拓宽三江上、下游航道，通航最小水深达到 7.5 米。拆除葛洲坝 3 号船闸方案静态投资 188.38 亿元，其中工程投资 126.8 亿元，征收补偿费用 58.16 亿元，征迁区域占地 657 亩，2728 户，4407 人。保留葛洲坝 3 号船闸方案静态投资 329.88 亿元，其中工程投资 177.43 亿元，征收补偿费用 143.39 亿元，征迁区域占地 2025 亩，8926 户，18400 人。

图 5 葛洲坝航运扩能工程



方案	人口（人）	土地（亩）	面积（万平方米）	四周征地搬迁投资（亿元）	工程部分投资（亿元）	工程静态总投资（亿元）	建设总工期（年）
拆除三号船闸方案	4900	2615	33.23	58.16	121.82	188.38	71（不含导建期12个月）
保留三号船闸方案	10350	3840	87.50	143.39	177.43	329.88	88（不含导建期24个月）
直线（保留+拆除）	13450	1225	54.27	85.23	55.61	141.5	17

目前需要对三峡过坝货运量进行精准预测，以服务于三峡水运新通道整体工程。

2 动态改进的无偏灰色预测模型

2.1 GM(1,1)预测模型的建立

记第 k 年过坝货运量为 $x^{(0)}(k)$，以历年过坝货运量为原始序列 $X^{(0)}=\left\{x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\ldots x^{(0)}(n)\right\}$；称 $X^{(1)}=\left\{x^{(1)}(1),x^{(1)}(2),\ldots x^{(1)}(n)\right\}$ 为 $X^{(0)}$ 的一阶累加序列，$X^{(1)}(k)=\sum_{i=1}^{k}x^{(0)}(i),k=1,2,\ldots,n$；称 $Z^{(1)}=\left\{z^{(1)}(2),z^{(1)}(3),\ldots,z^{(1)}(n)\right\}$ $X^{(1)}$ 的紧邻均值序列，$z^{(1)}(k)=\frac{1}{2}x^{(1)}(k)+x^{(1)}(k-1),k=2,3,\ldots,n$。

构造一阶线性方程白化模型：

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt}+ax^{(1)}(t)=u \tag{1}$$

令 $\hat{a}=(a,u)^T$，并构造矩阵 B 和 Y，求得参数 a 和 u：

$$B=\begin{pmatrix}-z^{(1)}(2) & 1\\ -z^{(1)}(3) & 1\\ \vdots & \vdots\\ -z^{(1)}(n) & 1\end{pmatrix},\quad Y=\begin{pmatrix}x^{(0)}(2)\\ x^{(0)}(3)\\ \vdots\\ x^{(0)}(n)\end{pmatrix} \tag{2}$$

$$\hat{a}=(a,u)^T=(B^TB)^{-1}B^TY \tag{3}$$

由式（1）和式（3）即可求出三峡过坝货运量 GM(1,1)预测模型的响应式：

$$\hat{x}^{(1)}(k+1)=(x^{(0)}(1)-\frac{u}{a})e^{-at}+\frac{u}{a},k=1,2,\ldots,n \tag{4}$$

对式（4）进行做差计算，即可得到三峡过坝货运量的 GM(1,1)预测模型：

$$\hat{x}^{(0)}(k+1)=(1-e^{a})(x^{(0)}(1)-\frac{u}{a})e^{-ak},k=1,2,\ldots,n \tag{5}$$

2.2 GM(1,1)的无偏优化

传统的 GM(1,1)预测模型存在计算过程复杂，且不适宜在三峡过坝货运这个系统作长期预测，为消除预测偏差，对 GM(1,1)进行无偏优化，可大幅提高预测精度和计算效率，为未来的三峡水运枢纽发展提供些许数据参考。

首先我们依据 GM(1,1)建模流程确定参数 a 和 u 的值，接着计算无偏灰色的相关参数 b 和 M：

$$b=\ln\frac{2-a}{2+a},M=\frac{2u}{2+a} \tag{6}$$

最后，可得经过无偏优化的 GM(1,1)：

$$\hat{x}^{(0)}(k)=\begin{cases}x^{(0)}(1), & k=1\\ Me^{b(k-1)}, & k=2,3,\ldots,n\end{cases} \tag{7}$$

2.3 对无偏优化后的 GM(1,1)进行动态优化

通过对三峡过坝货运量数据进行分析，因过坝货运量受多方因素影响，波动性较大会影响到预测精度。在用 GM(1,1) 进行预测时，很多数据是逐年变化的，利用这种动态特征，我们在预测过程中需要不断更新数据，使用多组数据，数据序列不断重组。即用数据序列 $X^{(0)}=(x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\ldots,x^{(0)}(k))$ 得到（k+1）年的预测值后，重组该数据序列：移除 $x^{(0)}(1)$，在重组序列中加入 $\hat{x}^{(0)}(k+1)$ 的值，又形成全新数据序列 $X'^{(0)}$，此序列又能进一步计算下一年（k+2）的值：

$$X'^{(0)}=(x^{(0)}(2),x^{(0)}(3),\ldots,\hat{x}^{(0)}(k+1)) \tag{8}$$

使用这种方法所构造出来的无偏灰色动态预测模型所使用的数据是一直动态变化，该模型在利用过往数据并动态更新，大大提高了预测精度。

3 改进优化的灰色马尔科夫动态模型

系统中存在长江三峡实际过坝货运量与灰色预测值的残差，残差的分布状态就是马尔科夫链状态。马尔科夫预测可以修正残差值，且结果不看系统的过去状态，只考虑当前状态，因此，系统可以通过动态建模对无偏 GM(1,1)进行改进，考虑到系统数据的波动性，让数据不断动态迭代，大大增强了高波动性，长时间序列下的系统预测精度。

具体如下：首先根据灰色模型的预测值计算出相对误差和残差：

$$e(k)=x^{(0)}(k)-\hat{x}^{(0)}(k),k=1,2,\ldots,n \tag{9}$$

$$Q=\frac{e(k)}{x^{(0)}(k)},k=1,2,\ldots,n \tag{10}$$

其次，根据残差序列值的误差大小，等分成 i 个状态区间绝对值相同的区间：

$$E_i=[L_i,U_i],i=1,2,\ldots,n \tag{11}$$

然后，计算状态转移概率矩阵 P：

$$P=\begin{pmatrix}p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n}\\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn}\end{pmatrix} \tag{12}$$

设系统中残差的初始状态为 T_0，经过状态转移后状态变为 T_n，转移结果如下：

$$T_n=T_0P^n \tag{13}$$

最后，结合状态转移矩阵比较概率最大的状态 $E_i=[L_i,U_i]$，得到预测公式：

$$y=\frac{\hat{x}^{(0)}(k)}{1\pm0.5(L_j+U_j)} \tag{14}$$

改进优化后的灰色马尔科夫动态模型中，需要用到马尔科夫理论逐年修正预测残差值。

表 1 预测精度等级划分对照表

预测精度	小概率误差（Δ）	均方差比值（C）
良好	>95%	<35%
合格	>80%	<50%
勉强合格	>70%	<65%
不合格	≤70%	≥65%

4 长江三峡过坝货运量预测

为实现长江三峡过坝货运量预测，本文利用 2006-2023 年三峡大坝货运量数据（来自三峡通航

管理局）见表 2，结合改进优化的灰色马尔科夫动态模型进行预测，以期与各模型的预测精度进行直观比较。

4.1 三峡过坝货运量的 GM(1,1)预测

2006-2023 年三峡过坝货运量基本逐年稳定增长，但是受 2009 年建立库区和 2020 年新冠疫情影响使货运量有一定波动。最终适宜选取 2010—2019 年的货运量数据作为原始数据序列，具体数据如表所示：

表 2　2006 年到 2023 年的长江三峡过坝货运量

年份	过坝货运量（万吨）	年份	过坝货运量（万吨）
2006	5022.2	2015	13106.5
2007	6056.9	2016	13057.2
2008	6847.3	2017	13790.9
2009	7425.7	2018	14194.8
2010	8795.4	2019	14640.6
2011	10997.0	2020	13690.8
2012	9507.0	2021	15058.2
2013	10711.4	2022	15965.6
2014	12098.1	2023	17234.4

通过上文的阐述，现将实际数据应用于模型，先建立初始序列：

$X^{(0)}=\left\{x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\ldots,x^{(0)}(10)\right\}$={8795.4，10997.0，9507.0，10711.4，12098.1，13106.5，13057.2，13790.9，14194.8，14640.6 }

根据式(1)~(5)可得三峡过坝货运量预测模型：

$$\hat{x}^{(0)}(k+1)=87.54897416e^{0.0269k},k=1,2,\ldots,n \tag{15}$$

由此可求得 2010—2019 年的灰色模型预测值，见表 2。对 GM(1,1)进行精度检验，$C\approx 29.28\%$，$\Delta=1$，对比表 1，预测精度属于良好，达到精度要求。然而对比图 6，GM(1,1)预测值曲线与初始值曲线的误会差较大，接下来继续对 GM(1,1)进行优化。如下：

1）取三峡过坝货运量原始序列 $X^{(0)}$ 中的前 5 个数据，组成序列

$X'^{(0)}$={8795.4，10997.0，9507.0，10711.4，12098.1}

2）以 $X'^{(0)}$ 为初始序列，由式(1)~(3)可得 a 和 u 的值

3）根据式(6)和(7)对 $X'^{(0)}$ 进行无偏优化，得到无偏优化的 GM(1,1)模型:

$$\hat{x}'^{(0)}(k+1)=92.76876211e^{0.0158k},k=1,2,\ldots,n \tag{16}$$

年份	初始值/万吨	GM(1,1)预测			无偏优化的 GM(1,1)的动态预测						
		预测值/万吨	残差/万吨	预测误差/%	第 1 组/万吨	第 2 组/万吨	…	第 5 组/万吨	预测值/万吨	残差/万吨	预测误差
2010	8795.4	8795.4	0	0	8795.4		…		8795.4	0	0
2011	10997.0	10,193.7	803.3	7.3	10657.8	10997.0	…		10657.8	339.2	3.0
2012	9507.0	10706.4	-1199.4	-12.6	10568.9	9912.1	…		9912.1	-405.1	-4.3

2013	10711.4	11,240.3	-528.9	-4.9	11105.9	10662.7	…		11068.2	-356.8	-3.3
2014	12098.1	11796.2	301.9	2.5	11670.3	11470.1	…	12098.1	11969.1	129.0	1.1
2015	13106.5	12375.0	731.5	5.6	12263.2	12338.6	…	12377.1	12377.1	729.4	5.6
2016	13057.2	12977.7	79.5	0.6		13272.9	…	12973.3	12973.3	83.9	0.6
2017	13790.9	13605.2	185.7	1.3			…	13598.1	13598.1	192.8	1.4
2018	14194.8	14258.5	-63.7	-0.4			…	14253.1	14253.1	-58.3	-0.4
2019	14640.6	14938.8	-298.2	-2.0			…	14939.5	14939.5	-298.9	-2.0

4）无偏优化的 GM(1,1)的动态优化。通过上述几步的计算得到无偏优化的 GM(1,1)预测值，获得第 6 个数据的预测值后，移除 $X'^{(0)}$ 中的初始值 8795.4，加入第 6 个数据的预测值，组成新的数列 $X''^{(0)}$。以此类推，反复迭代运算，最终得到无偏优化的 GM(1,1)的动态预测值，见表 3

表 3 传统灰色 GM(1,1)和无偏动态优化的 GM(1,1)的预测值

对二者进行精度检验，传统 GM(1,1)模型的 $C \approx 29.28\%$，$\Delta = 1$，无偏优化的 GM(1,1)模型的 $C \approx 15.94\%$，$\Delta = 1$。根据检验标准，见表 1，两种模型的预测等级均为良好，说明这两种模型适用于解决三峡过坝货运量预测问题。但经过无偏优化的 GM(1,1)动态预测模型的平均预测误差更小。

4.2 无偏 GM(1,1)动态预测结果的马尔科夫修正

基于马尔科夫理论修正无偏 GM(1,1)的动态预测，具体方法如下：

1）规定状态区间。由表 3 的数据可知，残差的变化范围在[-405.1，729.4]内，按照残差直接的绝对误差，能够把变化范围分为 E_1、E_2、E_3、E_4、E_5 5 种区间，其对应范围见表 4， 2010~2019 年对应状态分别为（2,4,1,1,3,5,3,3,2,1）。

表 4 残差状态划分

状态	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
区间	[-500,-240]	[-240,20]	[20,280]	[280,540]	[540,800]

2）根据式（12）建立状态转移概率矩阵：

$$P=\begin{bmatrix} 1/3 & 0 & 1/3 & 0 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 1/3 & 1/3 & 0 & 1/3 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3）优化的灰色马尔科夫动态模型预测值也就是计算无偏优化 GM(1,1)动态预测值的修正值。首先求出当年的无偏 GM(1,1)的预测值，由状态转移矩阵确定当年对应概率，根据对应概率确定区间中间值，然后进行马尔科夫修正，采用式（14）计算。结果如表 5 所示

4）表 5 马尔科夫动态优化预测值前后对比

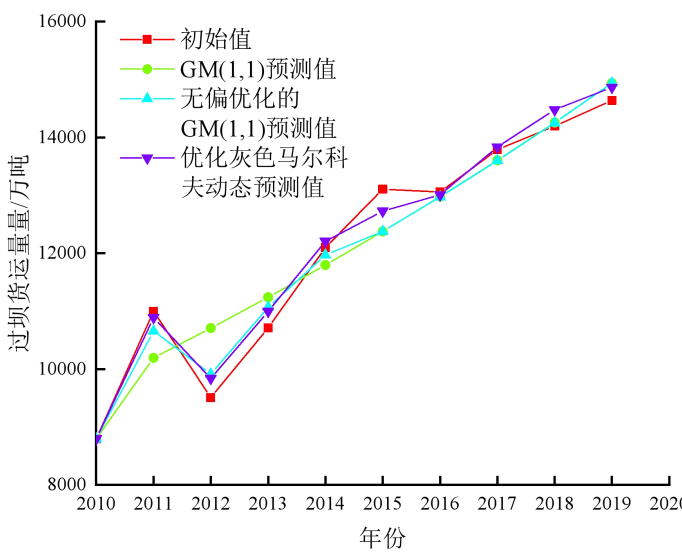
年份	初始值/万吨	无偏优化的 GM(1,1)的动态预测			优化的灰色马尔科夫动态预测值		
		预测值/万吨	预测误差/%	误差累计平方和/%	预测值/万吨	预测误差	误差累计平方和/%
2010	8795.4	8795.4	0		8795.4	0	
2011	10997.0	10657.8	3.0	0.7743	10887.8	1.0	0.3516
2012	9507.0	9912.1	-4.3		9838.8	-3.5	

2013	10711.4	11068.2	-3.3	10994.9	-2.6
2014	12098.1	11969.1	1.1	12205.8	-0.9
2015	13106.5	12377.1	5.6	12727.1	2.8
2016	13057.2	12973.3	0.6	13010.0	0.4
2017	13790.9	13598.1	1.4	13834.8	-0.3
2018	14194.8	14253.1	-0.4	14478.1	-2.0
2019	14640.6	14939.5	-2.0	14866.2	-1.5

4.3 预测模型的对比分析

由表 3 可知，经过无偏优化 GM(1,1)模型的预测结果相较于传统 GM(1,1)模型，计算精度有明显提高，且相对误差更小，而本文提出的无偏优化灰色马尔科夫的动态模型在此基础上又进一步缩小了平均误差，见表 5。为了更直观地比较 GM(1,1)模型，无偏灰色马尔科夫模型和优化的灰色马尔科夫动态模型的预测精度，我们使用初始值与三组预测值进行拟合，见图 6，通过比较三组拟合曲线和初始值曲线的趋势可得出结论，优化的灰色马尔科夫动态模型预测值曲线最接近初始值曲线。

图 6 预测值拟合曲线



4.4 三峡大坝 2025 年、2035 年、2050 年的过坝货运量预测

通过对比可知，优化的灰色马尔科夫动态模型可以精准预测三峡过坝货运量，接下来对三峡大坝短期内的 2025 年以及未来远景目标 2035 年和 2050 年进行货运量预测。首先选择 2019 年数据为初始值，代入无偏优化后的式（16），得到无偏优化的 GM(1,1)预测值，然后继续对预测值进行动态优化，得到动态预测值，然后代入式（14），对预测结果进行马尔科夫修正，最终得到 2025 年、2035 年、2050 年的三峡过坝货运量预测值，如表 6 所示，表中数据基本符合长江三峡过坝货运量的历年发展趋势，预测数据精度高，误差小，具有较高的可信度。

表 6 三峡大坝 2025、2035、2050 年的货运量预测

年份	2025	2035	2050
预测货运量/万吨	18980	22068	25350

5 结论与建议

1）一般的货运量发展趋势都可以通过 GM(1,1)很好预测，但是却不能应用于大的数据波动，也不能做长期预测，通过马尔科夫理论修正后的无偏灰色马尔科夫模型，在预测精度上有了提高，本文在此基础上对无偏灰色马尔科夫模型进行了数据迭代动态优化后，大幅提高了预测精度的同时，并且减小了误差，为配合后续三峡水运新通道的建设有实用意义。

2）此次预测结果远超目前三峡大坝通航能力，需加紧推进三峡水运新通道工程，这一超级工程建成后，三峡大坝的通航量将达到 2.8 亿吨，不仅完美解决三峡过坝堵点问题，而且实现万吨级船舶直达重庆，真正意义上连接起长江上中下游，达到长江水运大贯通的目的。目前三峡水运新通道

布置方案基本确定，预计 2025 年正式开工，建设期接近 10 年，建设期间的区域经济与航运制约冲突更加明显，必须加快投资建设三峡翻坝转运体系，对宜昌市进行政策扶持和社会投资，如若翻坝转运体系顺利运营，整个体系的年最高通航能力将达 9580 万吨，可为船舶过坝拥堵缓解大量压力。

参考文献

[1] 梁晶,李晶,吕靖.三峡枢纽过坝运输需求分析及其预测[J].水运工程,2009,(12):DOI:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2009.12.040.
[2] 马奕. 长江三峡船闸过闸需求与通过能力研究[学位论文]. 武汉理工大学, 2008. 59.
[3] 丁涛，植链，郭琦，等．基于 GA-SVM 的三峡大坝过坝货运量预测[J]．物流技术,2018,37(09):62-65.
[4] 张浩,肖金龙,温泉,等.基于长江上游区域产业结构测度的三峡枢纽货运量预测[J].水运工程2019:58-62.DOI:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20191104.006.
[5] 张义军.基于变尺度回归的三峡货运量需求预测方法[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(05):938-942.
[6] 张义军，贾进，王广莹，等．基于 GA-SVM 模型的三峡过闸货运需求预测[J]．综合运输,2023,45(10):149-155+162.
[7] 柯桥,邓萍.基于改进灰色神经网络模型的三峡枢纽过坝货运量预测[J].上海海事大学学报,2021,42(01):82-87.DOI:10.13340/j.jsmu.2021.01.014.
[8] 赵旭,尹熙琛,高攀.主导权异质性视角下的过坝方式货运量分担率研究[J].运筹与管理,2020,29(08):192-201.
[9] 蒋军,舒文,黄嘉怡,等.基于无偏灰色马尔科夫模型的三峡枢纽通航运输需求量预测[J].物流科技,2022,45(07):63-67.DOI:10.13714/j.cnki.1002-3100.2022.07.025.
[10] 杜柏松,艾万政,胡林燕,等.基于优化灰色马尔科夫动态模型的上海港集装箱吞吐量预测[J].上海海事大学学报, 2021, 42(01):76-81.
[11] 王士鹏,周兆欣,于皓琛,等.基于改进无偏灰色马尔科夫动态模型的山东海上辖区险情事故量预测[J].交通与港航,2022,9(06):2-8.DOI:10.16487/j.cnki.issn2095-7491.2022.06.003.
[12] Wang Mingye, Xu Tong, Li Kaili, et al. Application of Unbiased Grey Markov Model in Prediction of Death Rate Per Million Tons Coal[C]//The 2016 International Symposium on Safety Science and Technology, 2016:167-169.
[13] Dong Sheng, Chi Kun, Zhang Qiyi, et al. The Application of a Grey Markov Model to Forecasting Annual Maximum Water Levels at Hydrological Stations[J]. Journal of Ocean University of China, 2012,11(1):13-17.
[14] Tian Liang, Xi Xi. Study on Infectious Diseases Prediction and Control Based on Unbiased Grey Markov Model[C]//The Fourth International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management, 2010:487-493.
[15] 陈泽.长江三峡过坝货运量预测与运输方案研究[D].重庆：重庆交通大学（硕士学位论文），2018.
[16] Rathnayaka R M, Seneviratna D. Taylor Series approximation based Unbiased GM(1,1)Hybrid Statistical Approach for Forecasting Stock Market[J]. Journal of Grey System,2020,32

作者简介：姚博远，硕士研究生，13891402208,浙江海洋大学，1013009426@qq.com
通信作者：艾万政，教授，15257070064，浙江海洋大学，aiwanzheng@126.com