2024 年“苏浙闽粤桂沪湘皖”航海学会学术研讨会论文集

江苏省综合交通运输学会航海分会

数字化推动航运公司安全与防污染管理转型升级研究探讨 …… 熊道泉　曹思源　1
浅谈智能驾驶技术及其在内河受限水域的应用 …… 成志华　周　盟　郭颜斌　7
《江苏省长江船舶污染防治条例》船舶“冒黑烟”条款浅析 …… 严懿忞　12
南印度洋一次典型低纬度热带低压个例气象保障分析及对船舶航行安全启示 …… 钟　剑　吴玉琴　孙一妹　16
某船燃油自清滤器泄放监控系统设计与实现 …… 袁彦伟　王　超　酉小广　刘　恒　姚　晔　25
基于 AHP-FCE 模型的福姜沙北水道引航风险评价研究 …… 陈　壮　乔邦阳　唐仁康　32
基于 WOS 核心数据库的海洋文化文献计量研究 …… 张金艳　41
基于智能视频监控的船载危险货物安全监管 …… 彭树林　薛建军　陈　诚　孙　文　48

浙江省航海学会

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　53
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　57
基于高斯过程回归的船舶 DMCC 发动机整机性能优化 …… 蒋更红　才　正　64
杭州航区客运航线夜航安全风险评价研究 …… 周鹏翔　74
急流场中甲板驳船稳泊研究及应用 …… 方念坚　79
“铭浩”轮进石浦港区的引航操纵 …… 周俊杰　马春华　郑浩亮　任明星　84
基于“虚拟航海”的 VLCC 应急锚位合理性分析 …… 李子强　汪益兵　谢广伟　施传鸿　91
海上船舶防污染常见问题及对策 …… 朱进岳　98

福建省航海学会

基于特征增强的实例级船舶识别 …… 程　静　王荣杰　林安辉　蒋德松　王亦春　102
基于 VR 的船舶基本安全防火灭火实训系统教学设计与场景实现 …… 戴官全　王宗开　辛勤芳　张泽慧　109
具有工况适应性的船舶综合能源系统能量管理 …… 司玉鹏　王荣杰　刘亚杰　114
复杂场景下的水面漂浮物识别方法 …… 曾广森　王荣杰　俞万能　131
基于机器学习的海上无线通信网络自适应路由优化研究 …… 蔡家旭　145
基于群体智能算法的船用质子交换膜燃料电池参数识别 …… 张　博　王荣杰　蒋德松　149
基于注意力特征融合和多尺度一维卷积的船舶电网系统级故障诊断研究 ……
…… 崔亚波　王荣杰　刘　浩　王亦春　林安辉　156
通过仿真试验探讨三船会遇的避碰方案 …… 朱　帅　163

广东省航海学会

航运业绿色低碳转型趋势与应对建议探讨 …… 初佩林　钟世龙　169
南海环境污染和生态退化状况 …… 蒋跃进　174
船舶货物运输中大件物流风险防范探讨 …… 崔盛建　181
浅议企业安全文化中“人的本质安全”作用 …… 李　琳　黄天翔　185

强化船舶应急管理 筑牢船员安全防线……汤常明 188
散货船货运风险及常见货损货差案例探讨……杨英超 191

广西航海学会

内河避碰规则在珠江口水域的适用性分析……郑晓东 195
浅谈平陆运河项目建设与发展意义……邵泊洋 杨宇清 莫大怀 200
西江航运干线整治工程通航安全影响与对策研究……杜小燕 204
西江干线航道商品车滚装运输思考与研究……曹 斌 李 钊 庄惠子 209
广西内河船舶附属艇水上交通安全监管措施研究……彭 瑾 毕昌明 215
广西航运文化中伏波文化与龙母文化的传承与发展……钟童建超 钟 叶 220
新质生产力发展背景下航海类院校产教融合建设实践与探索
——以广西交通职业技术学院航海工程学院为例……李先会 唐 锋 225
浅谈大数据平台开发应用助力航运经济转型升级……徐文勇 230

上海市航海学会

近海消防拖船无人化适应性改造研究……梁海咏 郑国祥 李世锋 刘 磊 235
船舶航行表层流服务产品生产实践……王 超 王好平 242
关于加快国有航运企业绿色低碳发展的思考……陈 超 范胤宏 耿佳东 248
豪华邮轮走锚原因分析与探讨……陶士陆 253
极地卫星通信使用大规模 MIMO-OTFS 的导频设计……翁从严 吴华锋 韩 冰 梅骁峻 黄 亮 258
大型集装箱船在洋山四期顺流离泊操纵浅析……高 涛 蔡 斌 赵建成 谢云华 267
船用甲醇燃料的全生命周期分析及应用……薛树业 272
基于 PLC 和 PPU 的船舶自动化电站常见故障分析与对策……侯少卿 孟铉博 279

湖南省航海学会

基于 BIM 技术的船闸浮式系船柱结构设计……李超军 叶雅思 283
曲线型隧洞式引航道通航断面尺度研究……王 能 李 明 陈叶华 乾东岳 章日红 普晓刚 291
基于设备运行可靠性理论分析确定船闸输水阀门检修周期……尹斌勇 杜 丁 莫 雄 贺柏武 298
基于多式联运的怀化国际陆港与水港融合发展研究……熊浩奇 虢名琦 吴米玲 官志鑫 303
船闸人字门振动与背拉杆动力特性关系研究……刘永胜 叶雅思 匡 涛 牛继业 彭厚德 309
大跨度网架钢结构施工监测控制关键技术研究与应用……刘新民 丁 杰 317
岩质高陡边坡动态支护设计在船闸改扩建工程中的应用……凌 威 李芃芃 王 能 322
“双碳”背景下湖南省内河货运船舶发展现状及对策研究……邓 聪 熊浩奇 332

安徽省航海学会

安徽省智慧交通发展现状与路径研究……吴志刚 杨 凯 殷 亮 黄 淼 338
在役水下工程安全状况智能检测与评定成套技术研究与应用……汪凡文 344
BIM 技术在临淮岗复线船闸设计和施工中的应用……焦钰宇 349
港航水运的数字化技术应用……金 锐 洪 艳 355
构建安徽省航道综合管理平台 助力淮河干流航道航运发展……卢 斌 尹小文 姚 路 罗时友 359
内河航道保障船舶安全航行的应用技术探讨……白翠洪 梁 云 常大海 365
浅谈内河智慧航道的发展趋势……韩久春 吴继成 张玉明 史晓涛 邱 征 赵晓舒 王 宁 370
长江珠三角背景下安徽航运业高质量发展的路径探索……谢旭东 374

数字化推动航运公司安全与防污染管理转型升级研究探讨

熊道泉[1]　曹思源[2]

（泰州海事局，江苏泰州　226001）

摘 要：随着数字化和人工智能技术的不断发展，航运公司也面临着安全与防污染管理数字化转型的挑战和机遇。本次研究聚焦航运安全，通过数字化帮助航运公司抢抓发展先机，以信息化培育新动能，用新动能推动新发展，提升航运公司的核心竞争力。研究结合了泰州辖区航运公司数字化转型实践，分析了数字化转型过程中存在的困难，并提出了解决措施，为航运公司将数字化这一新质生产力用于航运安全管理提供可以借鉴的解决方案。

关键词：人工智能；数字化；新质生产力

1　研究背景

当今世界正面临百年未有之大变局，近二十年来企业信息化发展迅速，完成了互联网企业向移动互联网转，ChatGPT 在全球掀起了新的工业革命，大数据、人工智能、数字孪生、无人技术等热门关键词频出。全球航运业进入数字化转型关键期，第二次工业革命成就了荷兰、新加坡、香港等国际航运中心，下一个航运中心的竞争将围绕数字化航运展开。

传统的“登轮检查 + 纸质记录”管理模式，存在着“动态掌握滞后、预警手段匮乏、信息获取传递中梗阻、安全管理体系监控成本高”等难题。随着公司管理规模日趋庞大，容易发生“动态无法有效掌控、安全营运状态不清、营运风险管控不力”情况。为顺应数字化发展浪潮，国内陆续出现了蓝水母、瀛海、互海等第三方航运数字化管理平台，帮助航运公司在线开展安全与防污染管理。以蓝水母为例，该平台于 2018 年底正式上线，开通航企、监管机构、金融机构、船员、培训机构等功能板块，经过 5 年的推广运行，目前入驻的规模企业已经达到 750 家，合作的船舶近万艘，船员 57 000 余人，企业分布浙江、上海、福建、江苏、长江等区域。

2　应用实践

截至目前，江苏海事局辖区体系内航运公司 192 家，其中国际 (含国际国内双证公司) 航运公司共有 20 家，国内航运公司共有 172 家。辖区航运公司管理船舶 1 825 艘，其中国际航行船舶 112 艘，国内航行船舶 1 713 艘。航运公司通过企业自建平台、海事监管服务平台、第三方平台等 3 种路径实现数字化转型。下面结合泰州辖区航运公司数字化转型推进情况进行详细介绍。

2.1　推进情况

2021 年 6 月 22 日，泰州海事局上线全国首个航运公司数字化平台，并按照“信息化—数字化—智能化”路径持续推动平台迭代升级。三年来，累计为泰州辖区近 100 家航运企业、1 000 余艘船舶、10 000 余名船员

提供航运安全数字化服务。作为一个较为庞大的产业链，航运的共同参与主体较多，航运业数字化转型即全产业的整体转型，对整个航运的数字化转型的实施，应在这些业务主体之间积极将“业务链”转变至“数据链”[1]。为此，我们促进第三方平台重要作用的发挥，与蓝水母签订长期战略合作协议，为航运公司数字化转型提供稳定、可靠的技术支撑。

2.1.1 信息化

泰州是航运经济大市，2023 年进出港 40.7 万艘次、装卸货量 4.36 吨，登记船舶 14 650 艘、715 万总吨。“小”“散”“弱”现象普遍，登记运输船舶 12 782 艘，约占全国运输船舶总量的 10%，平均单船总吨仅 488 总吨，10 000 总吨以上船舶仅 72 艘；航运公司 142 家，但上市企业、国际航运企业、部局诚信航运公司为零，综合竞争实力差。如何在“航运公司管理不高、船舶管理情况差异大、船员数字化应用能力基本为零”的情况实施数字化转型？从其他行业应用情况来看，数字化转型应密切联系企业战略发展，为此航运企业应从其实际经营特点出发，结合市场环境对顶层设计和专项规划作出明确制定，在转型中明确方向、目标以及重点[2]。

以船舶适航为突破口建立信息化管理平台，帮助航运公司动态管理 1 000 余份船舶技术资料、10 000 余本船舶证书和 20 000 余本船员证书；有效汇聚 1 200 余条访船检查视频、2 400 余项风险提示、4 000 余项能耗管理报告记录、9 200 余项安全报告记录、20 000 余张船舶照片、37 000 余条数字化活动流程记录。通过“一员全景”“一船全景”“一企全景”“一港全景”实时完成了船员、船舶、船公司、船籍港的精准画像，筑牢航运公司安全管理基础。

一员全景：自动汇聚船员的基础信息、船员证书、服务资历、面试信息、派遣合同、培训信息、考评信息等，实现对船员的精准画像。

一船全景：自动汇聚船舶的基础信息、船舶证书、技术资料、在船船员、营运信息、照片视频等，实现对船舶的精准画像。

一企全景：自动汇聚企业的基本信息、在企船舶、在企人员、营运信息、管理情况等，实现对船公司的精准画像。

一港全景：系统自动汇聚辖区航运公司、管理船舶等要素信息，一键在天地图上精准定位，实现对船籍港的精准画像。

2.1.2 数字化

通过信息化，引导航运公司在线开展安全与防污染管理，实现在线收集航运安全数据。如何用数据更好的服务航运公司安全管理，是亟需解决问题。为此我们将大数据技术与航运公司安全管理需求结合，采取以下解决措施：

一是数字化航运安全管理标准。结合管理实际，数字化船员适任、船舶适航等安全管理标准，建立公司安全管理和海事业务监管两个动态数据库，数字化压实企业安全生产主体责任。

二是打造航运安全风险闭环管理模式。通过公司自治、营运地监管、船籍港管理三条管理链，实现航运安全公司风险有效管控。公司自治：系统自动向公司发出船舶动态异常、船舶证书异常、配员不足异常、船员证书异常等四类风险预警，累计发布预警 14 700 余次，已完成处置 14 600 余次，闭环处置率 99.3%，帮助公司严把船舶适航关。营运地监管：系统自动将安检滞留、重点跟踪、事故险情、海事协查、通报举报等 5 类营运地发现异常共享至航运公司，累计发布预警 200 余次，已完成处置 180 余次，闭环处置率 90.0%，实现营运地信息高效共享。船籍港管理：系统自动识别重点关注和四类船舶，船籍港机构核实后通过平台流转至航运公司，累计发布预警 390 余次，已完成处置 320 余次，闭环处置率 82.1%，船籍港顽疾得到有效解决。

三是引导航运公司体系运行数字化。2023 年 10 月 1 日以来，39 家体系公司全部完成体系文件电子化、体系活动数字化。10 家公司选择 46 艘船舶有效运行体系数字化，6 个月累计运行总流程 22 006 个，泰州申燃航

运有限公司等 3 家公司数字化覆盖率超过 85%，具备远程监控体系运行能力。全面运行审核数字化系统，自内而外推进航运公司安全与防污染管理数字化转型，2024 年 2 月 18 日以来，累计在线实施公司审核 7 起、船舶审核 18 起，在线审核实施率超 50%。

2.1.3 智能化

在全面、准确收集数据的基础上，选用合适的算法对已有数据进行处理，深入挖掘数据价值，量化安全监管要求，构造智能服务模型，推动航运安全管理实现“被动向主动”“粗放向精细”“人工向智能”转变。目前已实现月度点验、运营总览、风险管控、附加审核、登记注销、船舶评级、公司评级、数字化监控等 8 个应用场景。下面主要介绍运营总览、附加审核、船舶评级、数字化监控 4 个常用场景。

（1）运营总览

从基础数据、公司自治、营运地监管、船籍港管理、船舶掌控五个方面，选择 20 个量化指标实现公司精准画像，一键生成运营报告。

（2）附加审核

将附加审核规则数字化，系统自动发出附加审核提醒。功能上线以来累计发出附加审核提醒 24 次，其中船舶附加审核 9 次，公司附加审核 15 次，解决了过往附加审核被动、滞后的问题。

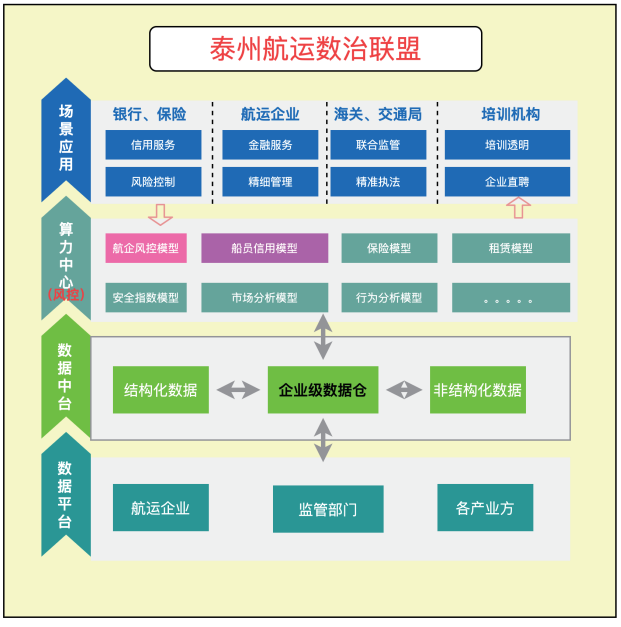
（3）船舶评级

将四类船舶、重点关注船舶等规则数字化，通过实时穿透企业安全生产数据，自动识别重点船舶。功能上线以来共识别重点船舶 84 艘，其中四类船舶 51 艘、重点关注船舶 33 艘，为船籍港精准管理、靶向施策提供数据支撑。

（4）数字化监管

为掌握体系数字化推进进度，发现体系数字化运行短板，上线了体系数字化监控功能。该功能可以实时掌握各公司体系活动数字化、体系流程运行数量、公司体系活动覆盖率、未覆盖流程等信息，为体系数字化推进提供有力支持。

2.2 数治联盟



数据之间可以组合出很多的可能性，除了满足现有的业务数据分析需求，还可以碰撞出新的业务创新点，让数据产生“思考”。目前平台在历经了“企业集聚”“科学管理”“风险预判”迭代升级的同时，积累了大

量航运基础数据、企业运营数据以及外部监管数据等真实数据。通过构建航运安全管理数治联盟，深化机构间数据共享、协同合作，营造良好的航运营商环境，通过“行政 + 市场”双轮驱动，加速航运公司安全与防污染管理数字化转型。

建设航运公司安全数据中台，结合全域数据，获得了更多的数据可视化场景，为业务分析提供了更多的可能性 [3]。打通航运公司、银行保险、海关交通、培训机构之间的数据共享通道，在金融、保险行业率先开展应用试水，建立数据采集、共享、应用、优化全流程操作规范。成熟后，逐步向交通、船员培训机构、海事法院等方面拓展，用数字化加快航运法律、金融、保险、职业经纪等高端航运服务产业在内的航运资源要素通过平台集聚，形成航运统一大市场，实现航运经济发展能级跃升。

2.3 取得成效

三年来，泰州海事局聚焦航运安全风险和管理短板，推动平台迭代升级，持续提升航运公司安全管理能力和管理船舶本质安全水平。

2.3.1 数字化应用能力显著提升

航运公司逐步熟悉线上管理模式，数字化应用能力显著提升。一是管理模式颠覆性改变。传统“纸质记录 + 便单管理”的模式，耗时、费力，而且无法对过程进行有效控制；现有“数字记录 + 自动提醒”的模式，省时、高效，通过图片、视频等记录便捷记录活动开展情况，可以对过程和结果有效控制。二是管理效率大幅提升。通过体系文件电子化和体系活动流程化，公司可实时对船舶安全与防污染工作开展情况进行有效监控，大幅提供了公司岸基管理效能。三是降低公司管理成本。系统对所有人员工作任务自动流转、到期自动提醒、自动记录，体系内人员各司其职，可大大减少传统体系运行中的督促、催办等工作量。

2.3.2 安全管理成效显著

在航运公司安全与防污染管理完成数字化转型基础上，通过穿透管理实现精准监管，引导航运公司高质量发展。一是航运公司管理水平显著提升。推动航运公司所属船舶实现法定证书合规率、船舶配员合规率、AIS 在线率、重要事项报告率四个 100% 的目标。二是船舶本质安全水平显著提升。2023 年，管理船舶安全运行四大指标较 2021 年全面下降。单船年均处罚率从 232.2% 下降至 126.6%；安检滞留率从 11.6% 下降至 7.5%；海事协查率从 3% 下降至 1%；重点跟踪率从 1.1% 下降至 0.4%。三是高质量发展能力显著提升。三年来，共淘汰 500 总吨以下低标准船 87 艘：小海船 51 艘，液货船 36 艘 ；发展高标准船舶 40 艘：2 000 吨以上危化船 21 艘，10 000 总吨以上海船 19 艘。

3 问题及对策

3.1 存在问题

3.1.1 缺少顶层政策设计

NSM 规则已经经历了二十多年的应用与发展，安全管理体系审核工作已经较为成熟，但是对于航运公司安全管理体系数字化发展才刚刚起步，缺少适应中国国情的顶层设计，对于长远发展还存在着不足。一是缺少国家、省、市不同层面的航运公司数字化政策支持或指导文件；二是对于航运公司数字化平台或系统缺少统一的建设标准、数据标准；三是对于当前已有数字化系统缺少管理办法和行业规范。

3.1.2 暂未形成行业共识

国内各地区航运发展程度不一样，数字化发展程度也存在差异，不同地区对数字化系统的接受程度不一致。

（1）航运公司对数字化接受度不一。一是各家航运公司的步调不一致，持观望态度的公司较多，担忧公司管理方式的转变、成本的增加、数据的安全等，容易造成推动过程反复进行，存在转型成效缓慢的情况。二是部分中小型航运公司对“数字化”体系的认可度不足，岸基人员、船员运行“数字化”体系的能力不足，使

用深度和使用频次上处于较低水平，更多还是依赖原始的纸质台账记录。三是该平台开发起到了遏制“两张皮”的作用，部分公司主观上有逃避海事监管的不当想法，没有真正意识到安全监管带来的效率提升。

（2）海事部门对数字化认同度不一致。“数字化”体系在海事审核员中的认可也存在不同，部分审核员认为“数字化”体系不经签字认可，可能存在造假嫌疑。虽然“数字化”体系运行已经在较多地区进行了探索和实践，但一直未明确电子活动记录的法律效力，致使部分地区海事执法人员对“数字化”体系运行持不认可态度，在体系审核和日常执法检查时只认可纸质记录。

（3）航运业其他相关方对数字化缺少认同度。交通部门的营运资质核查、水上公安的消防检查、货主企业的公司和船舶准入检查、货主企业的船舶装货前安全检查等仍需提供纸质记录。

3.1.3 存在数据互通壁垒

（1）与海事审核发证系统间壁垒。为进一步推动体系审核工作数字化转型，江苏海事局率先开发并在全局范围内全面实行航运公司体系审核数字化，充分利用信息化平台为航运公司创造便利条件，自内而外推进航运公司安全与防污染管理数字化转型。但在实际应用过程中，无法与部局审核发证系统互联互通，导致审核发证、重大事项报告、不符合纠正整改等需要双轨运行，增加了数字化运行工作量。

（2）不同航运企业间的数据壁垒。由于目前数字化运行平台有自建平台、监管平台自带以及第三方平台三种模式，系统功能较为分散或系统没有完全涵盖安全管理体系 12 个要素，各种平台的流程设计和数据内容差异性较大，特别是自建系统的底层为非标结构，改造对接成本巨大，为数据的汇聚、建模应用带来较大困难。

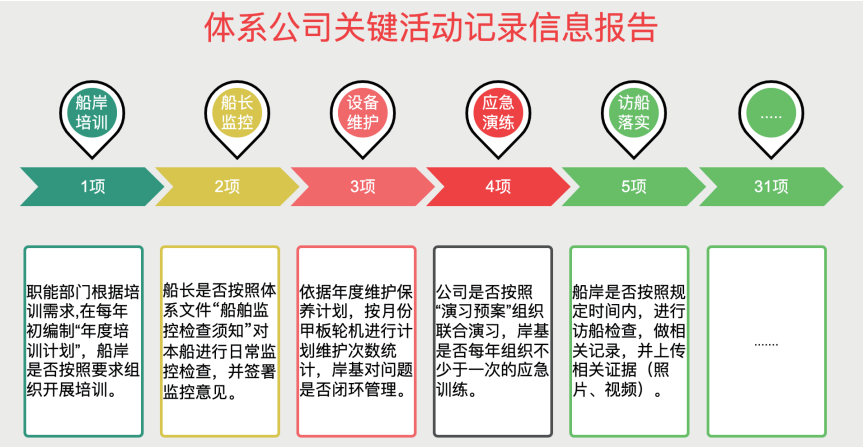
3.2 解决对策

针对以上存在的问题，本次研究结合江苏辖区航运公司数字化转型实践，从海事部门、航运公司、软件开发企业三个不同角度提出提升建议，为未来加强并完善航运企业数字化建设工作提供发展思路和前进方向。

3.2.1 加快顶层制度设计

为融合现代信息技术和人工智能等新技术，适应数字化航运发展，建议部海事局建议尽快出台相关政策法规。一是修订《航运公司安全管理体系审核发证程序》，规范实施远程安全管理体系审核和日常监督检查，明确航运公司的电子记录具备纸质记录同等法律效力。二是出台《航运公司安全管理数字化管理规定》，从符合性、覆盖性等方面明确数字化安全管理体系的建设标准、数据标准、运行标准，规范航运公司利用数字化手段履行安全管理职责。三是加强《国内水路运输管理规定》研究，在水路运输市场监督检查、海机务配备标准、登船检查方式等方面为已完成数字化转型企业提供便利，真正实现降本增效。

3.2.2 因地制宜实施数字化转型



航运公司安全与防污染管理数字化转型是一项任重道远的工作，在确定数字化转型目标时，应该考虑到航运公司的实际情况和发展阶段，遵循“因地制宜、分步走”的原则[4]，通过“行政 + 市场”双轮驱动加速数字

化转型。一是引导公司根据自身需要选择不同数字化路径，推动规模企业、有意愿企业率先完成数字化转型，通过公司间“传帮带”作用，鼓励数字化转型成功企业利用远程访船、远程内审替代传统方式，真正用好数字化这一新质生产力，帮助企业降本增效。二是逐步引导访船检查、应急演练、体系内审、新聘转岗培训、关键性操作等关键活动全面实现数字化，系统从法律法规、公司文件双维度对活动实施情况监控和提醒，让公司具备远程智能监控体系的能力。三是实施远程安全管理体系审核和日常监督检查，有关贯通航运公司体系运行数字化平台与部局审核发证系统，审核管理全流程线上闭环流转，为审核员减负、为企业提供便利，切实提升公司数字化转型获得感。

3.2.3 建立航运安全数据中台

大数据时代，数据资产是企业新的生产力，企业的数据应用程度越高，在未来企业竞争中的优势越明显[5]。目前航运仍然是传统的高风险行业，航运企业的经营管理人员只有把风险管理与航运企业的管理实际相结合，根据风险的等级来制定风险管理的策略，才能提升航运企业的竞争实力。软件开发企业应建立航运安全数据中台，帮助航运公司将历史数据进行清洗、标准化，打通不同系统中间的壁垒，使其在不同场景发挥作用。一是建立安全态势感知系统，整合 AIS 信号、安全管理体系、船员管理等数据资源，提升安全感知的“能力”和“精度”，打造全域感知、全量呈现、全要素参与的公司安全管理大脑。二是结合船舶自查、海事安检的缺陷进行数据分析，实时跟踪船舶缺陷的整改情况，避免船舶带病航行。三是同时建立船舶备件和物料数字化仓库，避免僵尸库存，让成本可控。

4 未来展望

未来，按照“信息化—数字化—智能化—数智化”引导航运企业完成数字化转型。2024 年：辖区所有航运企业完成体系文件电子化，实现体系审核申请、安全信息流转、体系文件修改、不符合纠正等全程线上流转，培养数字化习惯。2025 年：所有体系流程实现标准化、数字化，规模企业具备全流程实施数字化能力，访船检查、应急演练、人员培训、体系内审、新聘转岗培训、关键性操作等全面实现数字化，安全管理体系数字化逐步传导至船舶端。2026 年：在数字化基础上，量化法律法规和行业标准，建立公司安全管理体系运行质量智能监控系统，为远程监控体系和远程审核实现提供大数据支撑。公司具备远程监控体系和远程开展内审的能力，海事部门常态化开展远程监督检查和远程体系审核。2027 年：核心数据高效汇聚，管理要求全面量化，数治联盟共享共建，航运安全管理模式发生颠覆性变革。

参考文献

[1] 孟强 , 陈丽宁 . 航运企业数字化转型初步研究 [J]. 天津航海 ,2022(02):54-56.

[2] 赵海洋 . 航运企业数字化转型发展研究 [J]. 珠江水运 ,2023(12):102-104.

[3] 赵卫东 . 商务智能 [M]. 北京：清华大学出版社，2011.

[4] 张新辉 , 王淑萍 , 蓝贤钢 . 内河航运公司数字化转型创新研究 [J]. 珠江运 ,2024(06):132-135.

[5] 张桐建 . 数据中台对企业运营效率的提升研究 [D]. 北京邮电大学 ,2022.DOI:10.26969.

作者简介：

熊道泉，专业领域：海事管理，主要从事航运公司管理和船籍港管理，15629883139

浅谈智能驾驶技术及其在内河受限水域的应用

成志华　周　盟　郭颜斌

（长江引航中心张家港引航站，江苏张家港　215600）

摘 要：智能驾驶技术是一个涉及多项技术的新兴产业，在道路交通中蓬勃发展，其中五大核心技术包括感知技术、决策与规划技术、控制技术、地图定位技术以及人机交互技术。同样，在人工智能、大数据、物联网等诸多先进技术的推动下，智能船舶驾驶引领着全球航运业迈向一个全新的时代，与道路交通不同的是水上通航环境极其复杂。为此，本文系统介绍智能驾驶船舶涉及的相关技术，并探索将其应用在内河受限水域的航行中，降低驾引人员劳动强度，进一步提升船舶航行安全水平。

关键词：智能驾驶；船舶；通航环境；内河受限水域

中图分类号：U697

文献标识码：A

作为人类有史以来最具革命性的技术之一，人工智能给我们的生产和生活带来了巨大的改变，因其可靠智能近年来得到广泛应用并得到业界好评，人工智能在各个领域新的应用和发展将不断刷新我们的认知，IMO 对相关事故调查分析，发现人为因素导致的事故占 80% 左右，人工智能的应用可以很大程度降低人为因素的影响。由 IBM 及海洋研究非营利性组织 ProMare 共同打造的自动驾驶船舶 MAS 已于 2020 年 9 月正式起航。IBM 表示，人工智能船长让 MAS 具备侦测、思考与决策的能力，能够扫描地平线以发觉潜在危险，并根据各种即时数据来变更路线，随着先进技术不断优化运用到航运中，能够给航运业带来极大的帮助，减轻驾引人员工作量的同时大大提高航行的安全性。

1　船舶智能驾驶关键技术

1.1　传感器

传感器是智能驾驶的基础，它根据系统需求收集环境数据、船舶数据“感知”外部环境，然后“进入”操作情境、“发展”情境意识，分析处理数据，融合数据，最终做出决策和调整。智能驾驶船舶技术使用一系列感应器，诸如光学和红外相机、雷达、激光雷达、高分辨率声呐、麦克风以及风流压力传感器、惯性导航系统（INS）、全球定位系统（GPS））来驱动船舶驾驶功能 [1]。从传感器感知原理上来说，雷达靠回波成像，可见光传感器靠物体对光信号的反射成像，而热像仪根据目标与周围物体的温差成像。在目标空间分辨率和整体观测能力方面，可见光最高，红外线次之，雷达居后。在环境适应方面，红外的适用情况明显高于雷达和可见光，尤其是在恶劣的海洋环境下和能见度不良的夜间。探测目标与提取移动目标的特征是智能船舶感知系统的主要任务，布设视觉传感器，能够弥补雷达和 AIS 在探测和识别方面的不足。

传感器将被要求具有距标和高分辨率使船舶任务自动化，才能满足船舶瞭望的高要求。高可靠性的视觉感知系统既需要高性能的视觉传感器又需要对这些传感器进行合理布设，并使其相互协同，构成视觉传感器系统，

以实现对船舶航行环境高可靠性感知。开发中的先锋视觉传感器，它来自人视觉系统灵感，用较小的成本来为无人驾驶系统提供人工视觉。该类技术已在智能汽车中得到应用，特斯拉的 FSD，利用高清摄像头（纯视觉神经网络）能够提供高清图像和更准确数据，它通过八个摄像头的数据输入进车辆神经网络中，整合成 3D 环境的感知，这被称为 Vector space。总的来说，在感知技术领域，目前取得了惊人的进步，这些传感器的应用让无人驾驶系统采集数据更高效，有了它，海上复杂环境智能驾驶乃至内河智能驾驶将会更快成为可能。船舶传感器可以帮助无人系统监控位置和航向，用于导航和避碰。当有一套先进传感器，无人驾驶船舶将降低排放、低成本、更高效运行。未来的挑战将是相关软件的应用和处理能力，和算力更为密切。

1.2 通信连接

沿海以及繁忙的航路中船舶密度相对较大，然而在浩瀚的海洋中，水上移动通信目标（船舶）相对来说较为分散 [2]，传统单一移动通信无法较好地满足实际需求，然而水上无线移动通信系统，具备良好的陆地支撑并且技术成熟，覆盖范围广泛且不受地域限制，能够改善单一移动通信的不足。直播卫星业务常常应用于远海通信工作当中，而蜂窝移动通信系统则能较好地和陆地连接，如果将直播卫星业务和蜂窝移动相结合，则能较好地共享和传递信息。现代海洋通信技术一般分成两类：近距离船岸使用 VHF/MF；远距离船岸使用卫星通信和 HF。重要船舶系统依靠船外通信连接，提供业务范围包括自动识别、电子导航以及无线安全通知。智能驾驶船舶主要依赖 PNT（导航、定位、授时）系统来定位。我们通过高质量、多重星座、复合频率（MCMF）接收器，使用复合天线经多重星座来接收业务，能使目前可靠的 GNSS 系统更加强大（如 GPS、GLONASS、伽利略和北斗系统）。卫星直连技术或许能带给我们更多的选择性，但是目前还存在一些需要解决的难题，高轨道卫星离地球远，覆盖面积大，但时延长；低轨道卫星离地球近，时延小，但覆盖面积小。因此，要用许多卫星形成星座来实现全球覆盖，包括铱星计划和星联技术。空间轨道和频谱是稀缺资源，多种卫星相结合可以增加频谱利用率，有效利用珍贵的频谱资源。能够用于卫星通信的频谱资源比较有限，同时卫星产生的波束远大于地面无线网络，使得频谱的利用率远不如地面无线网络，这将直接影响通信的容量。相信不久的将来相关的技术发展能解决诸如此类的问题，将卫星直连技术运用到智能驾驶中成为可能。

无人驾驶船舶除了需要与外部建立广泛的连接，同时为了支撑船载 LOT，需要船舶内丰富的有线连接和无线连接。不同的无线连接技术 60GHz 和 Wi-Fi，这些会需要船上有线和无线技术来补充。核心技术是无线网格网络（WMN），是解决“最后一公里”问题的关键技术之一，融合了无线局域网和网络的优势，是一种大容量、高速率、覆盖范围广的网络。一些 PNT 备用系统或许将被使用：航海级惯性导航系统（INS）（不能长时间依靠，容易产生误差）；自动天文导航（通过星体的跟踪，尽管有些运行条件受限，如厚层云覆盖）；机会信号（使用非导航目的发射的信号，但可以以导航目的被采用）；和量子级 INS（使用冷原子干涉法），它每天有 1 m 误差，但仍然处于早期研究阶段。

1.3 人工智能

人工智能使船舶展现自动驾驶行为，做到极少或无需人为干预，海上商用领域的相关应用正吸引着商家的兴趣，船舶自动驾驶是受到特别关注的核心领域之一。海工船巨头法国 Bourbon、英国 Automated Ships 和挪威 Kongsberg Maritime 三家欧洲船企将联手合作一项开创性计划，打造全球首艘无人驾驶海工支援船（OSV）项目，公司为开发无人船舶近期将进一步投资船载智能应用。“Hrönn”号的船舶控制系统包括 K-Pos 动态定位、K-Chief 自动化、K-Bridge 电子海图 ECDIS）和雷达等，所有控制系统均将在陆上控制中心复制，从而实现完全的远程操作。人工智能有能力来支撑相关船舶的无人化。人工智能必须能使用编译信息通过机器学习算法来做决策，及时、准确地做到无人驾驶。人工智能的核心技术是不断进步的语音和图像辨认技术、数字通信技术、计算机处理能力。它们为分析和决策速度提供能力保障。目前相关的成熟应用：OpenAI 的 ChatGPT，IBM 的 Watson 以及抖音的豆包，都给我们带来了很好的应用体验。

船载自动驾驶系统以避障和导航系统为核心[4]，依据激光雷达采集船舶环境信息数据，提取障碍物特征向量，做到障碍物自动识别，包括静态障碍物以及动态障碍物[3]，满足船舶驾驶系统在未知环境下的避障需求，确保船舶安全航行。探测目标以及提取其特征是智能船舶感知系统的主要任务，纯视觉神经网络已在特斯拉 FSD 中应用，如果能在船舶上布设类似传感器，将会弥补 AIS 系统、雷达、激光雷达传感器在探测和识别方面的不足。通过计算机网络对矢量动力系统进行控制，从而实现智能驾驶功能。智能驾驶系统的导航系统中运用了水流监测传感器、风力监控传感器等，这些对自动驾驶功能的实现必不可少。智能驾驶系统通过罗经、AIS 系统、GPS 等设备对各种信号的接受，利用数据库和软件处理，实现实时反馈调节，实时显示航行轨迹，并由自动舵控制系统实现船舶航向的自动调整。有人驾驶船舶，船员能设定设备、评估相关信息，如果传感器故障，船员能发现故障，利用传统技术驾驶船舶，而自动驾驶船舶则需要在没有人工干预的情况下克服系统故障，从而实现船舶的智能驾驶。

2　智能驾驶技术在内河受限水域的运用

内河受限水域航行和海上航行存在很大差异。首先，内河水域可航水域范围较小，水深条件变化大；其次，船舶密度大，供船舶横越、掉头的空间有限；最后就是干支流交错，通航环境复杂，航路交错。可见，内河水域存在的客观条件实现完全无人驾驶难度巨大，例如航行在长江里的船舶还存在极少数的船舶 AIS 系统使用不规范的问题，不按规定开启 AIS，或开启了设备，但是 AIS 信息（船名、船长、船宽、吃水、目的港等）输入不规范，由于 AIS 是被动感知方式，这将使我船对这些船舶失去感知能力，会给智能航行带来困难。如果能够解决上述存在的问题，智能驾驶技术在内河水域可以得到有效发展，并运用于追越、横越、靠离泊等场景。

2.1　追越



图 1　“简图”追越会遇功能示意图

目前，助航软件“简图”已经有相关的应用实现，航行中我们点击前方的船舶，会显示追越发生的具体位置和时间，由于长江里不能追越的水域有很多，简图这项功能的应用为我们减轻了大量的计算，关键时刻能够给我们带来极大的便利。如果后方同向行驶的船舶速度大于我船速度，可以设置一个安全距离（根据后方船舶

的速度），当距离小于这个数值时，就会提醒我们注意后方来船以便采取相应的措施，条件允许和条件不允许配合追越的情况下给出相应的应对措施。由于船舶尺度（船长、吃水）的不同，船舶的惯性相差甚远，可以采用智能驾驶的手段在系统中给与相应的参数，比如允许追越的航道，不同尺度船舶相互追越的安全距离，速度差，采取降速、让道或降速又让道的措施，以便更安全的实施追越和被追越。同时可利用智能驾驶技术实时观察发生追越行为的两船船间距离，利用水动力仿真技术，实时计算船间作用力，为追越期间横距的确定提供参考。

2.2 横越航道

在长江驾引船舶的实际工作中，进出福南水道相对于其他横越操作更为复杂，所需考虑的要素更加全面。首先考虑的是行驶的海轮对我们的影响，其次才考虑其他小型江船对我们的影响，本质原因是因为海轮的速度相对于其他的船舶速度更快，由于船舶尺度的原因，避让余地有限，避让能力较差。我们可以提前将相应的参数输入，比如与前后方的船舶多大的安全距离，通过 AIS 系统（这里假设船舶出福南水道，AIS 系统可以根据我船速度，结合 51 号左右通航浮以上的下行船舶的实时速度提供我们一个或者多个合适的空档（进出福南转向都比较大，将近有 90° 的转向，转向中速度下降较大 [5]，速降要被考虑进去），实际应用中，有些船舶 AIS 系统因为种种原因处于关闭状态中，福姜沙下洲头植被和建筑物对视线的遮挡，导致我船雷达无法完全扫测到下水船舶，没有视线遮挡时我们才能通过纯视觉神经网络或者雷达明确下水船舶的具体信息，系统可以提示我们不同的横越速度下相应的横越空档，同时提醒我们需要联系哪些船舶，当然也有可能没有合适的空档供我船出福南，系统可以依据经验给予我船合理的方案，通过联系其中一条或者多条船舶，让其配合留出合适的空档。另外出福南水道时经常会遇到进出福南水道的小型船舶，提前联系，确认好会让关系，以上种种，如果想做到最大程度的智能化，需要先进的传感器，目前实际应用中，特斯拉的 FSD 实现，它通过八个摄像头（高清摄像头能够提供高清图像和更准确数据）的数据输入进单个神经网络中，整合成 3D 环境的感知，这被称为 Vector space，纯视觉神经网络在汽车自动驾驶领域的应用给我们航行智能化带来了更大的可能性，尤其福南下口水域，它能解决雷达系统处理延迟的弊端，但雷达传感器在各种天气条件下的表现，如雨天、雾天和夜晚等更具优势，两者结合，能使只能航行带来更大的可能性。

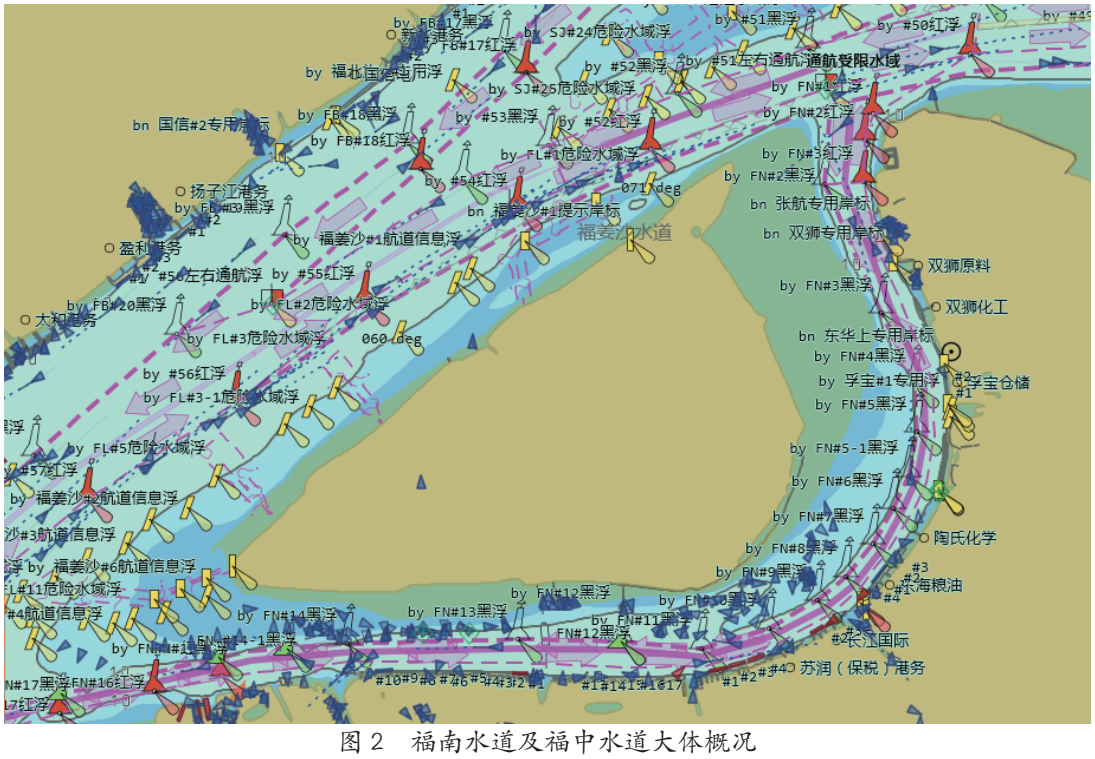


图 2　福南水道及福中水道大体概况

2.3 靠离泊

靠离泊时，船舶根据传感器提供的水流速度和方向以及风力大小和方向，根据设定的船舶前后安全距离，参考船舶装载情况，以及锚、缆、拖轮使用情况，通过传感器判断泊位前后距离是否足够（可以在船舶前后端，以及船舶的左右两端，还有船舶的最高处安装高清摄像头，当然还需要安装其他的高清摄像头来将其整合成相应的数据完成该功能），根据相应的传感器传递的信息，通过自动控制器来控制车、舵、锚、缆、拖轮使其船舶安全靠离泊。

船舶靠离泊期间需要与他船建立联系时，包括与协助拖轮建立联系，实现智能靠泊的难点之一在于如何成功建立联系以及如何处理相应的信息（包括去除干扰信息），相信随着处理能力的提高，通过相关语音识别技术的应用，终将能够完成船舶航行的智能化。

3 结 论

智能船舶自动驾驶技术，将会大大增加人们的便利，满足人们对安全、舒适的更高需求。融合新技术的自动化与智能化，将大大节省人力，提高通航效率，使船舶更安全、更环保、更可靠，实现更高效、更安全、更快速地出行。智能船舶自动驾驶技术利用了传感器、通信、人工智能等技术，自动感船舶通航环境，获取 相关通航信息和数据，运用大数据处理、分析技术、自动控制技术等，实现船舶航行、货物运输、维护保养、船舶管理智能化运行。我们应当整体分析智能船舶自动驾驶技术，争取研究出更多的创新思路和设计思路，以使船舶的智能驾驶技术日趋完善，让人工智能推进运输服务产业变革，在创新引领、绿色低碳、共享经济等领域培育新的增长点、形成新动能。

参考文献

[1] 刘洪涛 . 智能船舶感知系统中的视觉传感器布设及协同技术研究 [D]. 大连海事大学 , 2020.

[2] 刘德广 . 现代信息技术在海事通信中的应用分析 [J]. 中国新通信，2018,15.

[3] 严荣慧 , 谢海成 , 花敏恒 , 等 . 基于运动与表象特征的广域船舶目标识别方法 [J]. 中国舰船研究 , 2022, 17 (01): 227-234.

[4] 王昕 . 船舶自动驾驶系统的数据库构建研究 [J]. 舰船科学技术 , 2016, 38 (04): 124-126.

[5] 李宗波 , 张显库 , 贾云 . 船舶转向过程中速度下降问题的研究 [J]. 航海技术 , 2008, (03): 2-4.

作者简介：

成志华，一级引航员，（E-mail）14093741@qq.com

周盟，一级引航员，（E-mail）zhou--meng@163.com

郭颜斌，二级引航员，（E-mail）1418404899@qq.com

《江苏省长江船舶污染防治条例》船舶“冒黑烟”条款浅析

严懿丞

（泰州海事局，江苏泰州　210008）

摘　要：《江苏省长江船舶污染防治条例》的出台，填补了长江江苏段船舶污染防治缺少实施细则的空白，明确了船舶污染行为的相关罚则，这对促进长江经济带绿色高质量发展具有重要意义。但条例中“船舶向大气排放明显可见黑烟”条款在具体执行过程中存在一定困难。因此，本文力求通过解析条款、界定黑烟以及分析实例等方式，构建出相对统一的执法规范，确保海事执法合规高效可预期。

关键词：法律规制；船舶黑烟；海事监管

中图分类号：D912.1

文献标识码：C

近年来，由于长江上船舶航行期间大气污染物排放标准的缺失，船舶大气污染防治工作面临巨大挑战，特别是船舶冒黑烟现象时有发生。航运公司基于经济利益的考量，忽视船舶尾气造成的环境污染，对船舶船况把控不严，致使船舶“带病航行”屡见不鲜。相关法律法规实施细则的空白也对相关主管部门监管查处船舶污染行为带来一定困难。

1　《江苏省长江船舶污染防治条例》出台背景

江苏省人民政府本着生态优先、绿色发展理念，结合本省实际，着重加强长江江苏段船舶污染防治实施细则的修订。2022 年 11 月 25 日在江苏省十三届人大常委会第三十三次会议上表决通过《江苏省长江船舶污染防治条例》（以下简称“条例”），并于次年 3 月 1 日起正式实施。

条例制定的出发点就是在现有大气污染防治法律、法规的基础上，结合长江江苏段船舶污染防治的难点、特点，在船舶大气污染、船舶水污染、船舶作业污染以及船舶污染事故应急处置等方面补充细化，出台更有针对性、更具江苏特色的长江船舶污染防治规范。

2　船舶黑烟的成因及危害

船舶尾气的排放主要来源于主机、发电柴油机和燃油锅炉等设备。船舶主机在正常工况下，其尾气应为无色或淡灰色，而船舶冒黑烟则是船舶设备燃烧燃油不完全导致的。

造成不完全燃烧的主要原因可分为燃油质量问题和发动机系统问题。其中燃油质量问题主要是燃油粘度较大、燃油质量较差；发动机系统问题又可分为产品问题和运维问题，产品问题主要归咎于标准缺陷，GB15097-2016《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法（中国第一、二阶段）》中排放尾气数值是在设备稳定工况条件下测定的，并未考虑主机启动、倒车或频繁用车等变动工况下排放尾气数值情况，这就不可避免地导致设备在变动工况下存在尾气冒黑烟的可能。运维问题包括燃烧室形状改变、喷油器工作不良、活塞环与气缸套磨

损严重、气体渗漏增多、空气滤清器脏污、供油量过大、供油提前角调整不当等。

船舶黑烟中主要包含二氧化碳（CO_2）、二氧化硫（SO_2）、碳氢化合物（HC）、氮氧化物（NOx）、可吸入颗粒物（PM）等成分。其中，二氧化碳会加剧温室效应，二氧化硫可引发局部地区酸雨，可吸入颗粒物则会严重污染空气质量，同时对人体产生较大危害。当前，船舶尾气已被世界卫生组织为致癌物，可导致哮喘、心脏病、中风、肺癌、膀胱癌等疾病。因而，船舶黑烟整治刻不容缓。

3 相关条款解读

在习近平总书记关于“共抓大保护，不搞大开发”重要论述的指引下，条例进一步明确船舶相关污染行为的界定和对应罚则的补充完善。当前，在《中华人民共和国大气污染防治法》《江苏省大气污染防治条例》等相关法律法规中，仅有“机动车船、非道路移动机械不得超过标准排放大气污染物”“船舶向大气排放污染物，应当符合有关排放标准”等较为笼统的规定，缺少相关实施细则和罚则，实际操作难度较大。本次条例专门将“船舶大气污染防治”作为单独章节，针对部分船舶冒黑烟现象，提出“不得排放明显可见的黑烟”并设定了罚则，填补了法律空白，让海事执法有章可循。同时也起到了倒逼船舶加强机器维护保养，自觉使用合规燃油的积极作用。

本条例属于地方性法规，是在上位法规定的基础上作出的细化规定。配套出台的行政处罚裁量基准，则起到规范行政执法行为，促进合理行政，保障行政相对人合法权益的作用。例如，针对 GB15097-2016 标准中未涉及的变工况条件下船舶冒黑烟行为，裁量基准做出了相应调整，即“主机启动、倒车或频繁用车时瞬间排放黑烟”责令改正，原则上不处以罚款。

条例中第三十六条第一款规定船舶应当加强主机、辅机设备维修保养，使用符合国家标准或者要求的燃油。尾气排放应当符合国家大气污染物排放控制要求，且不得排放明显可见的黑烟。条例第六十二条第一款为处罚依据，即违反本条例第三十六条第一款规定，船舶向大气排放明显可见黑烟的，由海事管理机构责令改正，情节严重的，处一千元以上一万元以下的罚款。

4 国外船舶大气污染防治经验做法

4.1 较为完善的法律制度

欧盟通过借鉴其国内机动车、非道路移动装置大气污染物管理规定，制定了更为严格的船舶大气污染防治法律法规。欧盟委员会公布了对欧盟各国具有普遍约束力的《欧洲绿色协议》，避免了各自为政，治理效果不佳的问题。协议中要求船舶停泊地必须实现二氧化碳零排放。同时欧盟海事局发布了《硫检查指南》对低硫船舶减排措施和检查方面做出了更具操作性的规定。

美国的大气污染治理法律体系，涵盖了联邦、州、地区、地方政府四个层次，明确了各级政府权限和职责，同时积极制定大气污染物排放清单。2001 年美国洛杉矶港口开始编制港口大气污染物排放清单，是全球最早发布排放清单的港口。通过编制船舶港口大气污染物排放清单，可以详细了解港口区域大气污染物排放情况，更能作为政府完善补充优化大气污染物减排方案和监管措施的重要依据。

4.2 行之有效的监管举措

欧洲海事局建立了执法信息共享系统用来提高船舶监管的针对性。该系统不仅欧盟各成员国可以使用，加拿大、俄罗斯、冰岛等非欧盟成员国也可以使用。执法人员可以将检查结果输入系统，系统可以通过分析，挑选优先登轮检查的船舶，缩小检查的范围，提高了检查的精准度和有效性。

新加坡引入新技术、新能源助力降污减排。将绿色技术、生物燃料、和液化天然气、液化石油气等低碳能源作为推进碳中和、碳达峰的主要路径。同时新加坡政府采取激励措施设立了航运碳减排基金，用以支持航运

碳减排技术研发，以期能够在全球航运业低碳转型中抢占技术优势和市场。

5 条例执行情况与执行中存在的难点

5.1 “冒黑烟”船舶处罚情况

条例自去年 3 月 1 日实施以来，江苏海事局各分支局积极宣贯，在长江江苏段加大查出力度，共查处“船舶向大气排放明显可见黑烟”违法行为 396 起，占查处的违反船舶防污染管理秩序违法行为比重约为 23.3%，处罚金额总计约为 205.1 万元。

5.2 执行过程中存在的难点

5.2.1 黑烟界定标准模糊

目前对黑烟没有形成统一，具有可操作性的判定标准，一般以视觉判断为主。在处罚实例中，执法人员对黑烟的判定也是采用视觉观察，具有一定的主观性，容易产生执法尺度不一、选择性执法以及滥用执法权等问题。执法尺度的松紧将直接导致查处数量的变化，各地执法尺度不一，将导致行政相对人处于手足无措的尴尬境地，且不利于保障行政相对人的合法权益。

5.2.2 船舶监管查处存在困难

由于船舶冒黑烟行为发生时具有不确定性和短时效性，因而导致沿岸监控和执法人员难以第一时间对涉嫌违规船舶进行拍照、录像取证以及现场油样检测。加之船舶航行过程中原则上不进行登船检查，无法上船采集油样进行监测，以及现场笔录制作困难等问题，直接导致在证据收集固定上存在一定瑕疵，证据链无法形成有效闭环。从处罚实例中也可看出，部分海事执法部门存在使用船方提供的情况说明替代现场笔录的情况。此外，随着靠港船舶艘次的不断增加，船舶油样抽样检测压力增大，现场执法力量明显不足，仅能对有限的船舶开展检测，存在执法缺口。

5.2.3 督促船舶整改难度大

部分地方在实施处罚的过程中，仍存在“以罚代管”“一罚了事”的情况。在处罚实例中，部分地方对违章船舶后续整改落实情况跟踪不到位，这与条例设定罚则的初衷相悖。

6 对策与展望

6.1 明确黑烟判定标准

关于黑烟，美国环保署对其定义是“没有主色调、视觉上较暗的烟雾”，而我国机动车对黑烟的定义是“有明显可见烟度或烟度值超过林格曼 1 级”。所谓林格曼 1 级表示烟度很低，通常情况下为浅灰色。上述对黑烟的判定明显较为严格，若参照美国环保署的标准依旧不可避免地存在主观判断成分；若参照我国机动车关于黑烟的界定则将有可能导致打击面过宽，对长江航运经济发展造成一定影响。故此，笔者以为，采用林格曼黑度等级划分进行定性判定更为合理。针对船舶黑烟宜采用有明显可见烟度或烟度值超过林格曼 2 级的标准。执法人员可通过方格黑度比较、林格曼黑度仪或者数字式光电烟色仪等检测设备对涉嫌违规船舶排放黑烟进行更为客观准确的判定。

6.2 加大船舶全过程监管力度

继续建设完善集港口全程可视化监控系统、海巡艇水上巡航、无人机空中巡查、北斗定位导航于一体的“陆海空天”监控体系，提升沿岸监控设备抓拍和摄录清晰度和准确度。加强部门协同和联合监管。开发应用卫星遥感监测技术，有条件的地方推广辖区码头安装固定嗅探器，对靠离泊海船进行实时监测，弥补执法力量不足，有效缓解监测效率不高，证据固定困难的问题。树立系统思维和源头治理理念，更加注重始发港管理，实施船舶全过程安全诚信管理和失信船舶联合惩治。摸清辖区老旧船底数，完善老旧船淘汰机制，推动辖区老旧船清

退，鼓励船舶改造升级，使用 LNG、氢燃料等清洁能源，减少对化石燃料的依赖。

6.3 转变思路督促整改落实

针对涉嫌违规排放明显黑烟船舶，海事执法人员应主动引导其前往锚地、临时停泊区或回靠码头接受进一步调查处理，对船用燃油进行抽检，对涉嫌违规船舶进行船舶安检，重点检查轮机部设备运转情况，并有针对性提出相应整改措施，督促船方在下一航次纠正缺陷。严格落实《船舶大气污染排放控制区实施方案》，根据《船舶排放控制区海事监管工作指南》要求，依托智汇江海、港航一体化等信息化平台筛选评估到港船舶，有针对性地开展燃油抽检。要求海船进入内河控制区后，应使用硫含量 ≤0.1%m/m 的船用燃油，大型内河船舶和江海直达船舶应使用符合新修订的船用燃料油国家标准要求的燃油，其他内河船应使用符合国家标准的柴油。

参考文献

[1] 刘海英 . 船舶黑烟管控与监管研究 [J]. 水道港口 , 2023,03：8.

[2] 李凯 , 郭俊东 , 王蕾 , 等 . 长江口水域船舶黑烟排放成因及监管建议 [J]. 航海 , 2023,05：56-58.

[3] 姚晓坤 . 长江太仓段船舶污染防治问题研究 [D]. 青海：青海师范大学 , 2023 年 .

[4] 朱绍昕 . 船舶大气污染法律规制研究 [D]. 湖北：长江大学 , 2023 年 .

[5] 江志勇 . 船舶柴油机各种非正常烟色的分析与对策 [J]. 船舶物资与市场 , 2019,12：25-26.

作者简介：

严懿忞，一级行政执法员，（E-mail）1260439905@qq.com

南印度洋一次典型低纬度热带低压个例气象保障分析及对船舶航行安全启示

钟　剑　吴玉琴　孙一妹

（中国卫星海上测控部，江苏江阴　225300）

摘　要：热带气旋是影响船舶航行安全的最主要天气系统。2023 年“鲁蓬远渔”事件表明低纬度地区热带低压也可造成大型船舶灾难性沉船事故。本文结合船舶在南印度洋低纬度地区遭遇的一次典型热带低压个例，利用卫星云图和数值预报产品资料，分析其路径和风浪分布特征及原因，思考全球气候变暖条件下船舶航行安全保障策略。结果表明，1）本次热带低压生成位置低（赤道辐合带 10°S），且低纬度地区停留时间长（“东偏南—稳定少动—西偏南”移动路径，东偏南移动过程中移动缓慢），船舶航行气象保障难度大；2）东偏南移动过程中低纬度地区长期位于其危险范围，持续遭遇大范围大风浪天气，最大风力可达 10 级阵风 11 ~ 13 级，浪高 5.0 m 以上，船舶航行安全风险程度高；3）东偏南移动过程中虽然强度不强，但在 10—11 日存在强度突然显著增强过程，预报难度大，容易造成大风浪预报偏小误差，船舶航行遭遇误判危害安全概率增。全球变暖极端或异常天气增加情形下，航海和气象预报员需重点关注热带气旋强度显著增强和路径突然变化、及是否位于危险半圆等引起风浪变化对船舶航行安全影响，具备极端或异常天气的风险分析研判意识，提高船舶安全应急处置能力。

关键词：热带低压；南印度洋；低纬度；船舶安全

热带气旋（包括热带低压）是影响船舶航行安全的最主要天气系统 [1-4]。其会给海面带来狂风和大浪，造成船舶上下颠簸，严重时还会引起船舶倾覆，造成人员伤亡和财产损失。如，2023 年 5 月 16 日，中国籍远洋渔船“鲁蓬远渔 028”在印度洋中部海域倾覆，船上 39 人失联。其很有可能是受热带气旋“法比安”影响。

南印度洋是热带气旋生成的一个重要区域。每年生成热带气旋数量约占全球的 17% 左右，其中南印度洋西部占比 8%，而南印度洋东部占比 9% 左右。南印度洋活动主要集中在 11 月—3 月。热带气旋移动路径主要包括西南型、转向型等。南印度洋也是我国远洋船舶航行的一个主要区域，我国船舶前往非洲、美洲等国家，均需要穿过南印度洋。

热带气旋生成加强的条件包括：有初始扰动、有一定的科氏力、暖的洋面等 [5-6]。5°S—5°N 范围内，由于科氏力很小，不利于热带气旋的生成和加强，一般不会形成强大的低压涡旋。然而，“鲁蓬远渔 028”倾覆地点位于（5.8°S，77.8°E）左右，其倾覆纬度相对较低。初步分析表明，其可能与正在往西南方向的“法比安”迎面相碰遭遇大风浪有关。“鲁蓬远渔 028”船长 96 m，船宽 32 m，吃水 7.8 m，一般风浪不可能造成倾覆。

全球变暖条件下，极端或异常的热带气旋个例有所增加。如：快速增强的热带气旋数量增加，而南印度洋 5° ~ 20°S 就为快速增强数量显著增加区域之一 [7]。低纬度地区热带气旋快速增强数量增加，意味着低纬度地

区热带气旋初期热带低压的强度将更强，可能会造成更大的风浪，对船舶航行安全的威胁显著增大。同时，热带气旋快速增强预报误差相对更大，容易造成风浪预报偏小误差，影响船舶航行安全。

本文结合 2024 年 3 月船舶在南印度洋低纬度地区遭遇的一次典型热带低压个例，利用卫星云图和数值预报产品资料，分析其路径和风浪分布特征及原因，思考全球气候变暖条件下船舶航行安全气象保障策略。

1　热带低压天气过程

本文所用资料包括 2024 年 3 月 8 到 3 月 25 日间的日本葵花 9 号卫星云图资料、美国数值预报产品分析场资料（包含海平面气压、500 hPa 位势高度场、10 m 高度海面风场、海浪场等）。

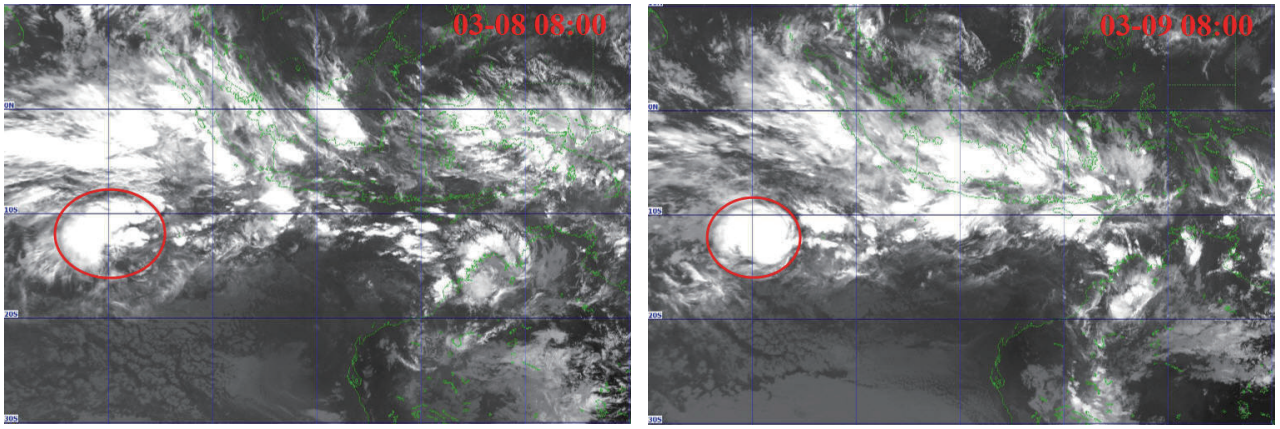
由于本次热带低压过程在东移过程中，强度并未明显增强，气压场上中心气压体现并不明显。本文以卫星云图中云图变化和位置描绘热带低压变化过程。

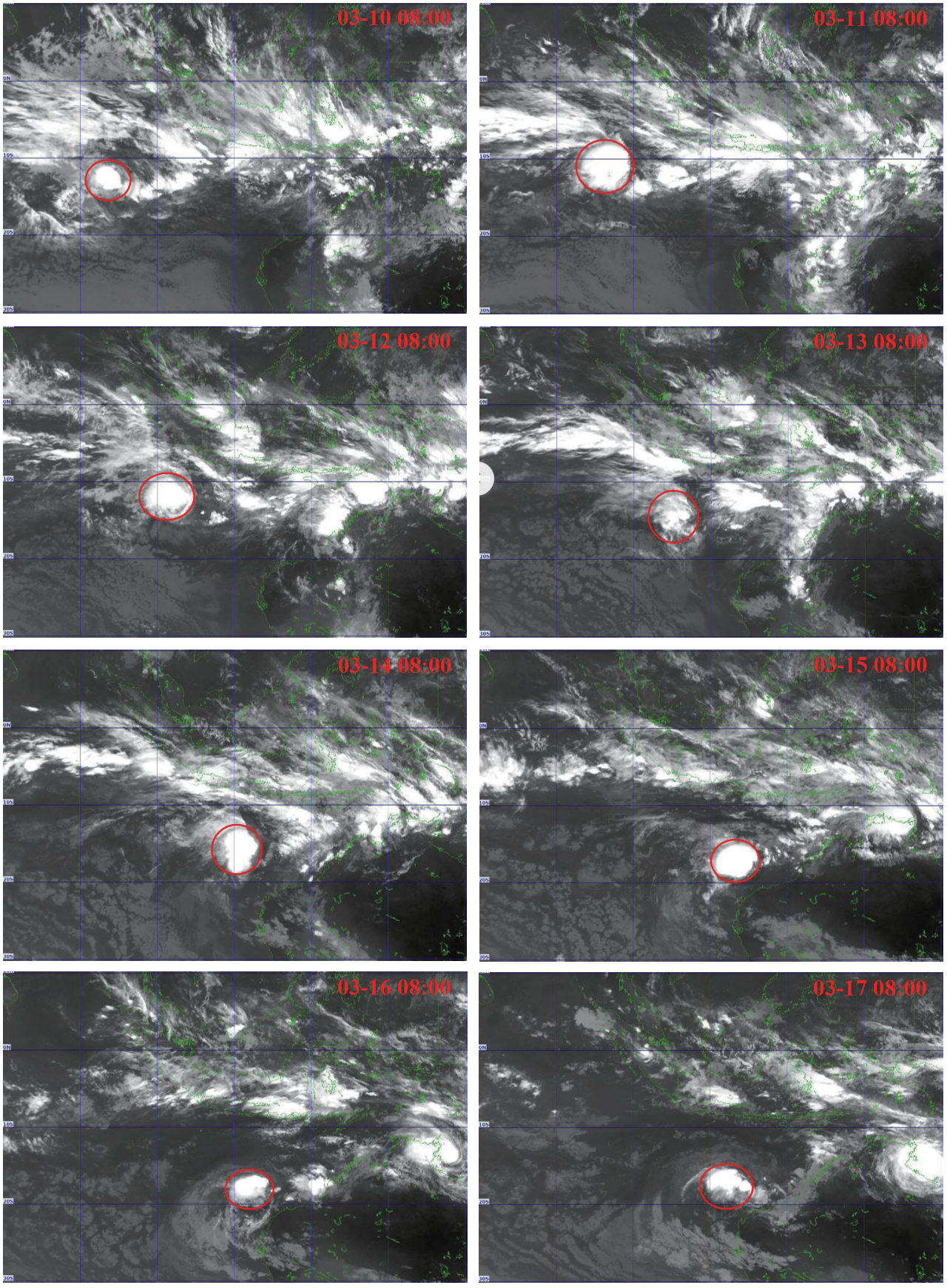
图 1 表示 3 月 8 日—3 月 24 日每天北京时 08 时葵花 9 号卫星云图，图中红色圈表示热带低压位置。3 月 8 日卫星云图显示，赤道附近存在一条东西向的高亮云系，该云系对应赤道辐合带，而在（10°S，90°E）附近，云团呈现出聚拢趋势，该云团对应本次热带低压过程。总体而言，该热带低压路径呈现出“东偏南—稳定少动—西偏南”移动特征，而强度呈现出“时强时弱—减弱后基本维持—逐渐加强”特征。具体分为三个阶段：

第一阶段：3 月 8 ~ 14 日移动东偏南、强度时强时弱阶段。8 日，中心位于（10°S，90°E）附近，云团开始聚拢，强度呈加强状态；9 日，中心位于（11°S，91°E）附近，云团呈明显团状，直径在 7 个经纬度左右，范围扩大，强度增强；10 日，中心位于（12°S，93°E）附近，云团直径在 2 ~ 3 个经纬度左右，范围缩小，强度减弱；11 日，中心位于（11°S，97°E）附近，云团直径在 6 个经纬度左右，范围扩大，强度稍有增强；12 日，中心位于（12°S，101°E）附近，云团直径在 5-6 个经纬度左右，范围基本维持稍有缩小，强度稍有减弱；13 日，中心位于（15°S，105°E）附近，云团呈发散形态，强度减弱；14 日，中心位于（16°S，102°E）附近，云团呈明显团状，直径在 3 ~ 5 个经纬度左右，强度增强。该阶段，热带低压移动缓慢，6 天移动经度 10° ~ 12°，纬度 6° ~ 8°。

第二阶段：3 月 15 日至 19 日位置基本不变、强度减弱后基本维持阶段。该阶段，中心均稳定在澳大利亚西北角（18° S，103° E）附近；云团强度减弱后基本稳定，呈团状，直径在 4 ~ 5 个经纬度左右。

第三阶段：3 月 20—24 日移动西偏南，强度逐渐加强阶段。20 日，中心位于（18°S，100°E）附近，云团呈团状，但范围相对较小，直径 1 ~ 2 个经纬度，强度较弱；21 日，中心位于（18°S，97°E）附近，云团直径 2 个经纬度左右，范围有所扩大，强度稍有加强；22 日，中心位于（19°S，93°E）附近，云团直径 4 ~ 5 个经纬度左右，范围持续扩大，强度持续增强；23 日，中心位于（20°S，87°E）附近，云团呈团状但呈现出发散状态，直径 4 ~ 5 个经纬度左右，范围基本不变，强度基本维持且开始减弱。




03-10 08:00
03-11 08:00
03-12 08:00
03-13 08:00
03-14 08:00
03-15 08:00
03-16 08:00
03-17 08:00

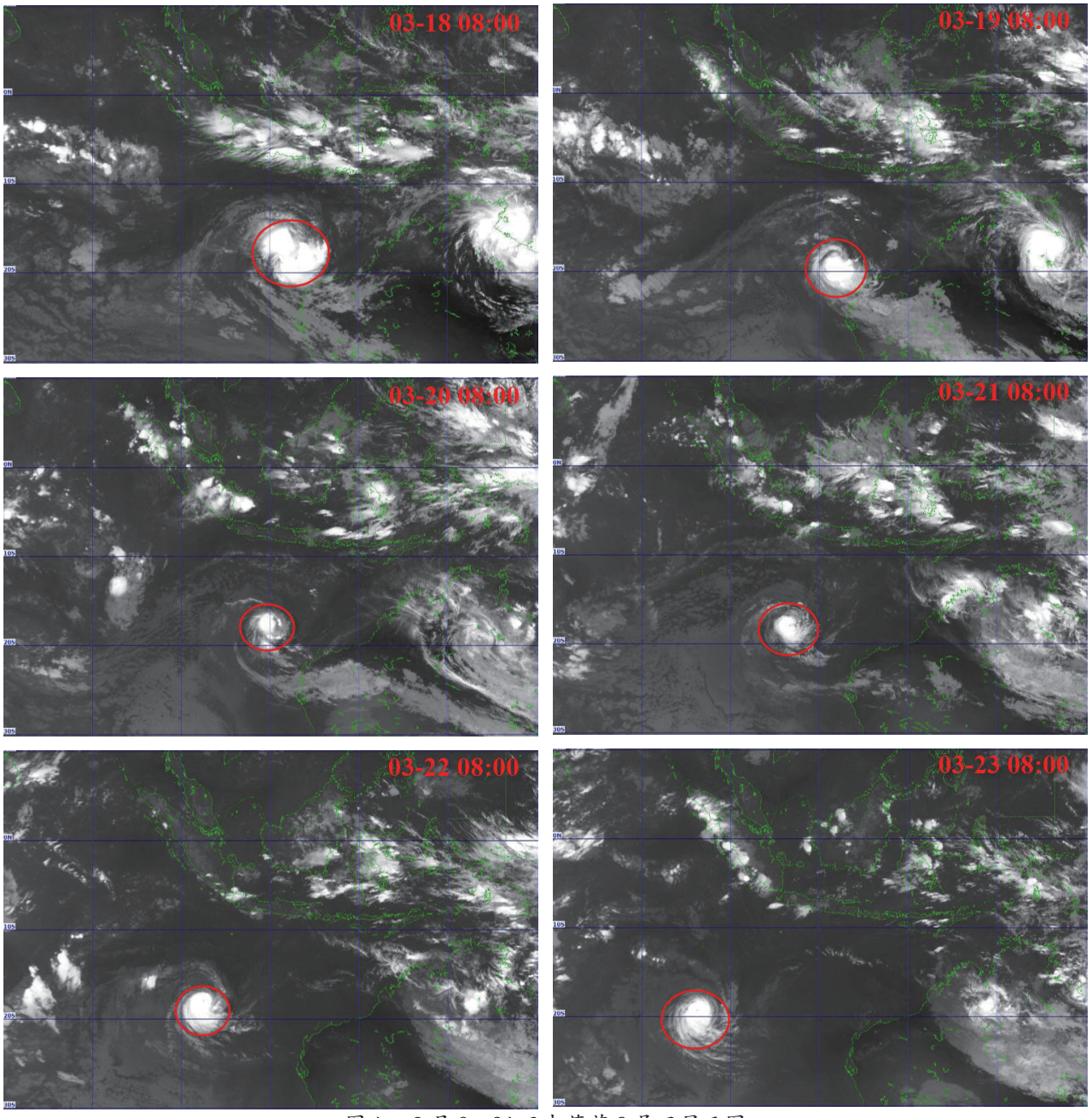


图 1　3 月 8—24 日本葵花 9 号卫星云图

2　热带低压形势和要素预报

2.1　移动路径相关位势高度场分析

热带气旋（低压）的移动，主要受大尺度天气系统影响，如副热带高压等。图 2 给出了 3 月 8 日、15 日、20 日和 24 日 500 hPa 位势高度场。图中显示，8 日，在热带低压西侧和南侧，存在强大的副热带高压，其将阻止热带低压往西或南方向移动，这是第一阶段 8—14 日热带低压往东偏南移动的主要原因。15 日，热带低压西侧和南侧的副热带高压进一步增强，高空并没有强大高空槽引导热带低压往东或东偏南移动，这是第二阶段 15—19 日热带低压维持稳定少动的原因。20 日和 24 日，热带低压西侧和南侧的副热带高压强度有所减弱，热带低压强度逐渐加强，在东风气流的引导下，沿着副热带高压外围移动，这是第三阶段 20—24 日热带低压

往西偏南方向移动的原因。

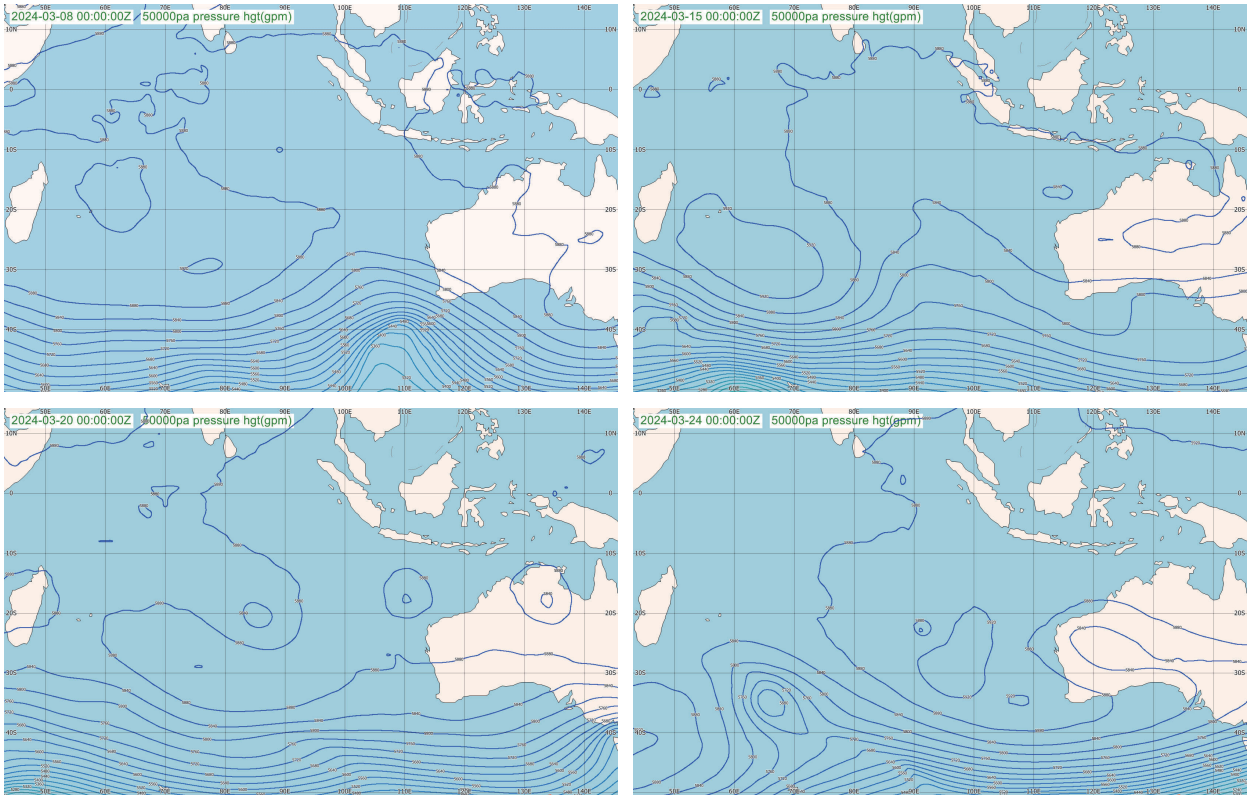


图 2　3 月 8 日、15 日、20 日和 24 日美国数值预报产品 500hPa 位势高度场。

2.2　典型要素海面风场和海浪场分析

船舶保障主要影响要素为风和浪，狂风、大浪会使得船舶上下颠簸，严重时可造成船舶倾覆。本文主要关注本次热带低压低纬度地区风浪分布变化。图 3 给出了 3 月 8—24 日美国数值预报产品 10 m 高度风场变化。图中显示，第一阶段：8—9 日，中心最大风力可达 7 级左右，10°S 锋面附近最大风力可达阵风 8 ~ 9 级；10 日，中心最大风力可达 8 级左右，11°S 锋面附近最大风力可达阵风 9 ~ 10 级；11 日，中心最大风力可达 10 级左右，11°S 锋面附近最大风力可达 11 ~ 13 级；12 日，中心最大风力可达 9 级左右，13°S 锋面附近最大风力可达 10 ~ 12 级；13—14 日，随着热带低压进一步东移强度有所减弱，风力有所减小，中心最大风力 8 级左右，锋面附近最大风力可达阵风 9 ~ 10 级。其中，11—12 日强度较强时，大风区 7 级以上风圈直径可达 8 ~ 9 个经纬度左右。

不同时次风场分析显示，最大风力基本都出现在靠近赤道的低纬度地区，即热带低压前进方向的左侧。根据天气学原理，在南半球，热带气旋前进方向左侧为其危险半圆，风力相对右侧半圆更大；对于中心最大风力达到 9 ~ 10 级以上，过热带气旋锋面附近时，阵风会大 2 ~ 3 个级别。

同时，本次热带低压过程中，10—11 日，存在 24 小时最大风速显著增大 2 级，中心最大风力由 8 级左右增大到 10 级左右，这表明，热带低压在 10—11 日存在一个强度显著增强的过程。全球变暖条件下，热带气旋快速增强的概率呈现出增大趋势，而快速增强预报误差相对较差。

第二阶段：15—19 日，热带低压强度减弱后基本维持且稳定少动，中心最大风力在 7 ~ 8 级左右。第三阶段：20 日开始，热带低压强度开始增强，风力也逐渐增大，21—24 日，中心最大风力可达 9 级、12 级、11 级、10 级左右，阵风也相对最大风力大 2 ~ 3 个级别；受热带低压尺度较小影响，大风区范围 7 级以上风圈直径为 2、5、5、4 个经纬度左右。同时，在 21—22 日，中心最大风力增大 3 个级别，也存在一次强度快速增强过程。

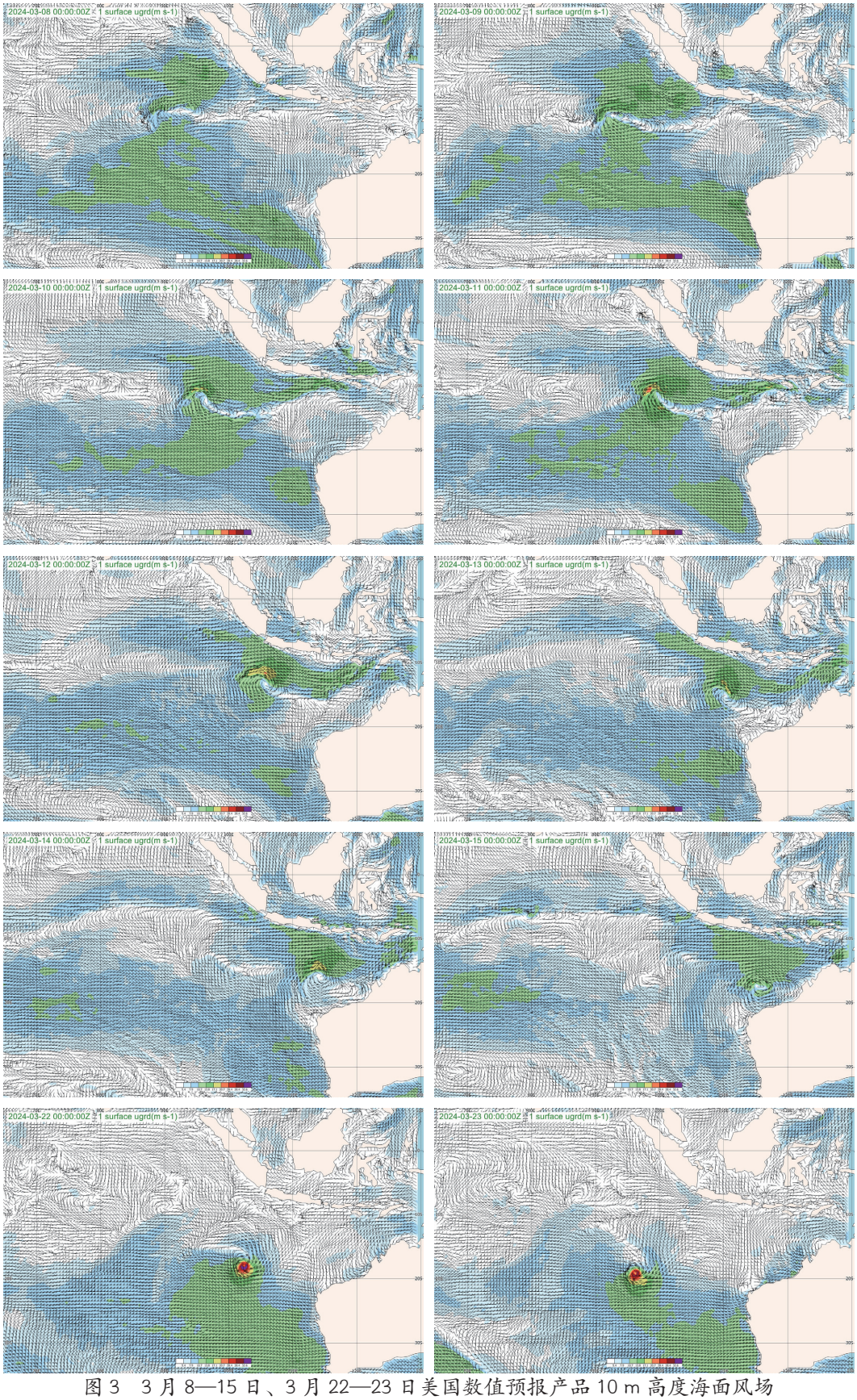
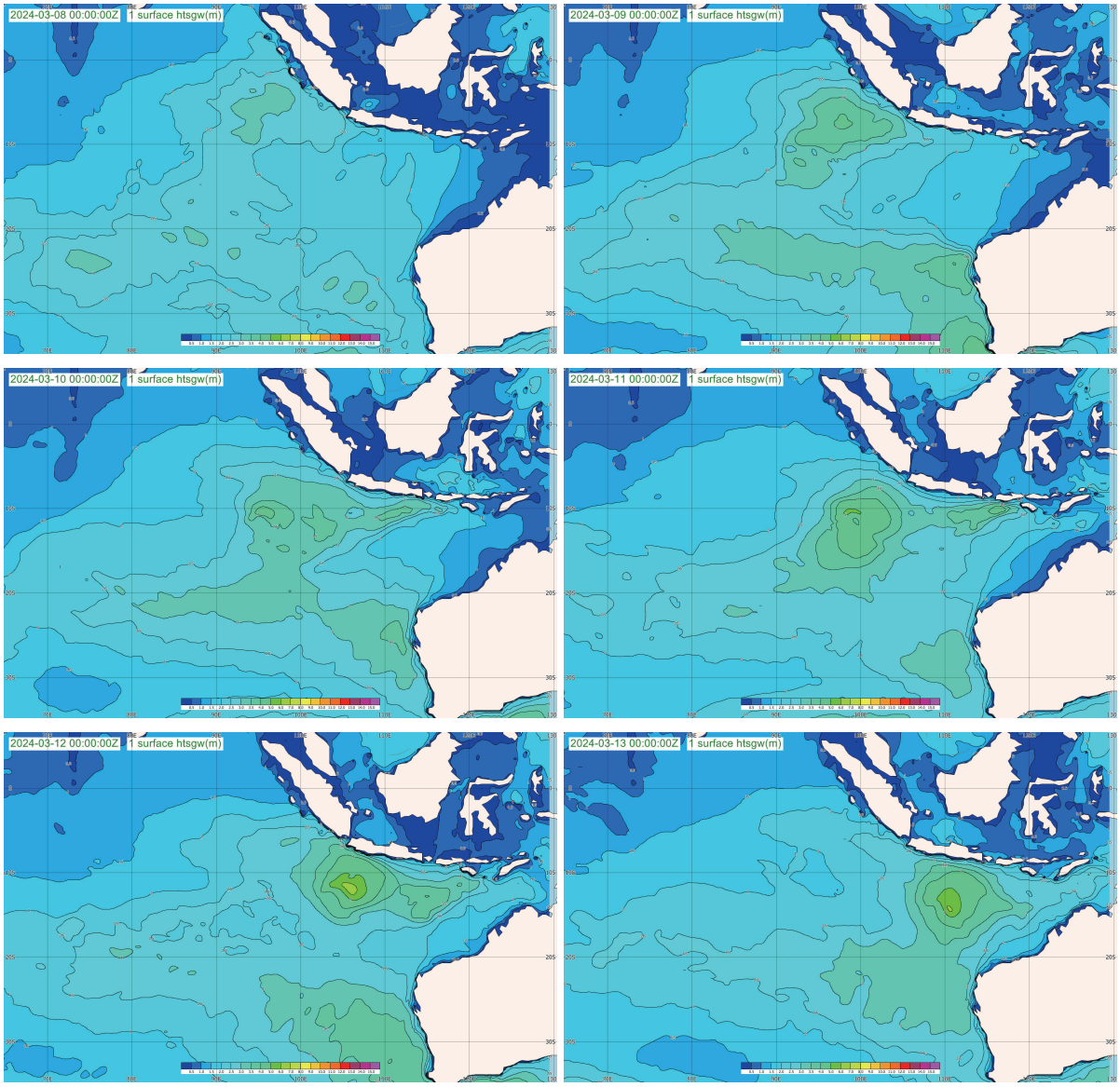


图 3　3 月 8—15 日、3 月 22—23 日美国数值预报产品 10 m 高度海面风场

图 4 表示 3 月 7—24 日美国数值预报产品海浪场变化。图中显示，第一阶段：8 日，中心最大浪高可达 3.0 m 以上；9 日，随着热带低压强度有所加强，中心最大浪高可达 4.0 m 以上，最大浪高中心位于 7°S 左右，10°S 以北大片区域 3.5 m 以上；10 日，随着热带低压往东南移动且强度稍有减弱，浪高稍有减小且大浪区偏东南，但中心最大浪高仍然在 4.0 m 以上，最大浪高中心位于 10°S 左右；11 日，热带低压强度有所加强，中心最大浪高达到 5.0 m 以上，最大浪高中心位于 10°S 左右；12 日，随着热带低压强度基本维持，受风浪叠加效应影响，中心最大浪高达到 6.0 m 以上，最大浪高中心位于 11.5°S 左右，大浪区整体东移；13—14 日，虽然热带低压强度稍有减弱，但中心最大浪高仍然在 6.0 m 以上，最大浪高中心位于 15°S 左右，大浪区继续东移。总体而言，最大浪高中心基本都位于热带低压移动方向的左侧，即靠近低纬度地区的危险半圆内，与风场的分布相对应。

第二阶段：15 日，热带低压移动至澳大利亚西北角，中心最大浪高仍然可达 4.0 m 以上，最大浪高中心在 15°S 左右；16—19 日，受强度有所减弱后基本维持且稳定少动，中心最大浪高在 3.0 ~ 3.5 m 左右。第三阶段：20—24 日，热带低压强度逐渐增强，且往西偏南方向移动，中心最大浪高也逐渐增大；中心最大浪高分别达到 4.0 m、5.0 m、10.0 m、10.0 m 和 .08 m 以上；最大浪高中心随着热带低压中心移动而变化。



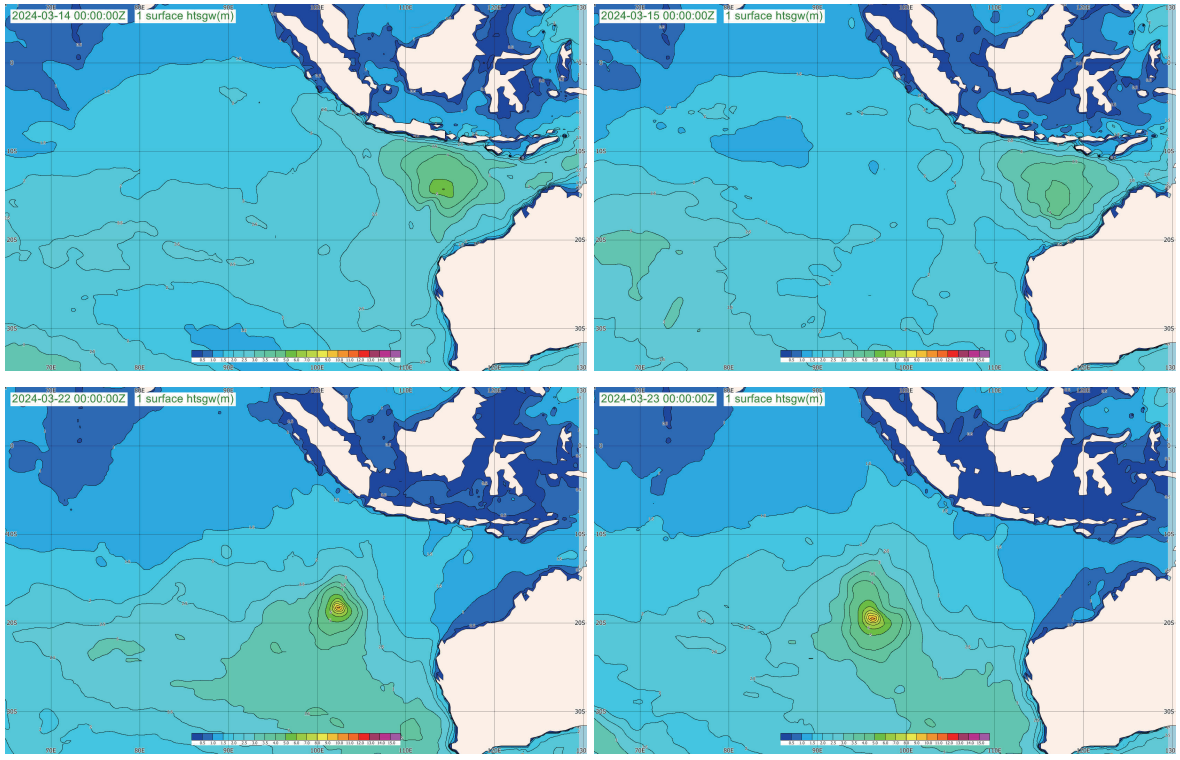


图 4　与图 2 相同，但表示海浪场。

3　结论和船舶航行安全保障启示

本文结合 2024 年 3 月船舶在南印度洋低纬度地区遭遇的一次典型热带低压个例，利用卫星云图和数值预报产品资料，分析其路径和风浪分布特征及原因，思考全球气候变暖条件下船舶航行安全气象保障策略。主要结论包括：

本次热带生成位置低（赤道辐合带 10°S），且低纬度地区停留时间长（呈现出“东偏南—稳定少动—西偏南”移动路径，东偏南移动过程中移动缓慢），船舶航行气象保障难度大；

本次热带低压东偏南移动过程中，低纬度地区长期位于其危险范围，持续遭遇大范围大风浪天气，最大风力可达 10 级阵风 11 ~ 13 级，浪高 5.0 m 以上，船舶航行安全危害程度高；

本次热带低压东偏南移动过程中，虽然强度低，但在 10—11 日存在强度突然显著增强过程，预报难度大，容易造成大风浪预报偏小误差，船舶航行遭遇误判影响安全概率高。

同时，全球变暖极端或异常天气增加情形下，航海和气象预报员需加强：

1）需重点关注热带气旋强度突然显著增强和路径突然变化影响船舶安全。全球变暖条件下，热带气旋强度突然显著增强的概率增大，强度增强预报误差大，容易造成风浪预报偏小误差，危害船舶安全。利用实况资料，包括卫星云图、传真图等，密切关注监测热带低压发展和强度变化。

2）需警惕危险半圆区域航行。根据天气学原理，热带气旋存在危险半圆，危险半圆中风浪相对非危险半圆更大，尤其是过锋面附近时。北半球和南半球危险半圆分别为前进方向的右侧和左侧。尽量减少船舶在危险半圆航行，即使热带低压在赤道 10° 以内强度较弱时，危险半圆航行也可能严重威胁船舶安全。

3）需加强极端和异常天气系统变化风险分析研判和应急航行调整能力。除了关注是否有热带气旋等灾害性天气系统外，还需关注热带气旋强度显著增强和路径突然变化，以及是否位于危险半圆等引起风浪变化对船舶航行安全影响，提高天气系统极端或异常变化的风险分析研判意识。一旦遭遇热带气旋强度显著增强大风浪

危害船舶安全等极端情形，应结合风向等资料判定船舶相对热带气旋中心位置，选择远离中心且非前进方向调整航行。

参考文献

[1] Song J J, Wang Y, Wu L. Trend discrepancies among three best track data sets of western North Pacific tropical cyclones[J]. J. Geophys. Res., 2010, 115: D12128.

[2] Zhong Jian, Du Huadong, Wu Yuqin, Peng Yuehua. Westward migration of tropical cyclone activity in Western North Pacific: Features and possible causes[J]. Journal of Meteorological Research. 2024, 38(1): 1-9.

[3] 钟剑 , 韩苗苗 , 吴玉琴 , 等 . 1951-2017 年热带气旋移动速度统计分析 [J]. 气象科学 . 2024,（已录用）.

Zhong Jian, Han Miaomiao, Wu Yuqin, et al. Characteristic statistical for the tropical translation speed using the best track data of 1951-2017[J]. Journal of the Meteorological Sciences. 2024, (have accepted).(in Chinese)

[4] 钟剑 , 周庆 , 顾沈旦 , 等 . 西北太平洋热带气旋生成在不同最佳路径集资料中的差异特征分析 [J]. 海洋预报 . 2022, 39(3): 37-45.

Zhong Jian, Zhou Qing, Gu Shendan, et al. Analysis of the different characteristics of tropical cyclogenesis among different best track data in the northwest Pacific[J]. Marine Forecasts. 2022, 39(3): 37-45. (in Chinese)

[5] Wang G, Su J, Ding Y. Tropical cyclone genesis over the South China Sea[J]. J. Marine Syst., 2007, 68: 318-326.

[6] Venkatesh T N, Mathew J. Prediction of tropical cyclone genesis using a vortex merger index[J]. Geophysics. Res. Lett., 2004, 31: L04105.

[7] Li Y., Tang Y. M., Wang S., et al. Recent increases in tropical cyclone rapid intensification events in global offshore regions[J]. 2023, Nature Communication. 14: 5167.

作者简介：

钟剑，中国卫星海上测控部高级工程师，研究方向：气象海洋保障，（E-mail）zhj_zhongjian@163.com

某船燃油自清滤器泄放监控系统设计与实现

袁彦伟　王　超　酉小广　刘　恒　姚　晔

（中国卫星海上测控部，江苏江阴　214431）

摘 要：本文根据发现的某船主机燃油泄放系统存在的设计盲区进行优化，自主设计完成一套安全监控系统，旨在填充此部分空白。当发现燃油泄漏时，该系统可立即向集控室发出报警提醒，同时加装一套速关装置，可以快速切断不正常泄放，阻止次生灾害的发生，以保障船舶安全。

关键词：PLC；泄漏；控制

0　引　言

据统计从 2022 年以来，某船主机发生的故障 80% 都与燃油系统有关，所以高品质的燃油对主机的安全稳定运行至关重要。某船主机使用的燃油从日用柜开始，经粗滤器过滤后由燃油供给泵加压至（11-12）bar，再经自清滤器、保安滤器过滤后进机，回油流回至燃油日用柜结束，自清滤器冲洗泄放至污燃油舱，如图 1 所示。

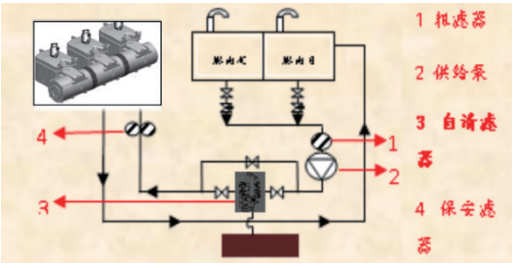


图 1　主机燃油系统图

使用过程中发现燃油自清滤器冲洗泄放系统存在设计盲区，冲洗泄放系统一旦发生故障不能及时发现处理，将会直接导致燃油大量泄漏、主机燃油进机压力波动、品质下降等问题，进而引发主机节流阀卡滞、共轨压力波动剧烈、各缸排温偏差大等报警，严重时可造成紧急停机危及船舶航行安全。本文针对发现的问题，提出改良优化方案，填补设计盲区。

1　原因分析与对策研究

1.1　典型故障描述

某航次中，值班人员在机舱巡视过程中发现大量燃油从污燃油舱的测量孔喷涌而出，泄漏压力大，污燃油舱测量孔附近海水泵等电机外表面溅落大量燃油，情况十分危急。随即值班人员向集控室报告现场情况，并立

即采取处置措施处理地面泄漏的燃油，同时集控室值班人员发现主机燃油进机压力降低、共轨压力波动剧烈等情况，此时机舱监控系统未发出任何报警。排查中发现为主机燃油自清滤器冲洗桶阀杆 O 型圈脱落引发泄漏导致，随即值班人员组织抢修，更换冲洗桶阀杆 O 型圈，装复后设备恢复正常使用，后续使用中发现此故障多次发生。

1.2 自清滤器功能及原理

1.2.1 自清滤器简介

某船主机燃油系统中自清滤器选用 BOLLFILTER 6.72 型自动反冲洗滤器，如图 2 所示，过滤精度为 10μm，用于过滤燃油中的杂质颗粒从而达到保护主机安全稳定运行的目的。因其滤芯能够被自动清洁，所以又被称为自净滤器。又因其是使用压缩空气进行反冲洗，所以也叫自动反冲洗滤器。

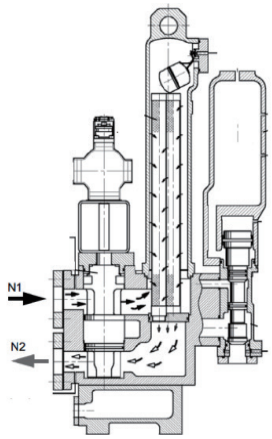


图 2 燃油自清滤器

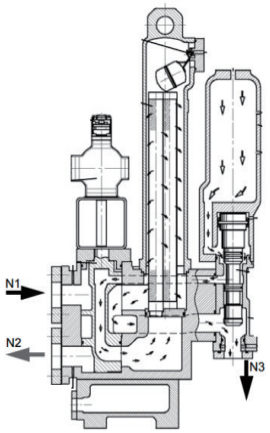


图 3 自清滤器过滤状态

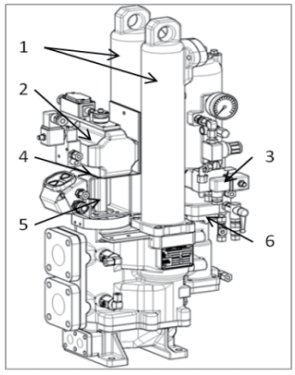


图 4 自清滤器冲洗状态

1.2.2 自清滤器工作原理

自清滤器工作状态分两种：过滤状态和反冲洗状态。

过滤状态时，燃油从进油口 N1 进入滤器被滤芯过滤，干净燃油从出油口 N2 流出。两个过滤腔分别处于过滤状态和备用状态，这时冲洗电磁阀未得电冲洗阀是关闭的，如图 3 所示。

反冲洗状态时，冲洗电磁阀得电，气动马达转动，带动转换柱塞将过滤腔隔离，先前的备用腔投入使用。反冲洗电磁阀得电，从而冲洗阀芯打开排污口 N3，压缩空气进入待冲洗腔室，对滤芯进行反冲，杂质从排污口排出。当冲洗时间达到 8 s 后冲洗结束，冲洗电磁阀失电，冲洗阀芯关闭，反冲洗结束，如图 4 所示。

1.3 原因分析

1.3.1 原因分析一：设备自身存在问题

燃油自清滤器工作时每 2 h 进行自动反冲洗一次，冲洗时冲洗桶阀杆在压缩空气作用下向上抬起进行泄放，泄放时间为 8 s，泄放结束后阀杆落座。自清滤器的冲洗桶阀杆 O 型圈为橡胶制品，长时间接触燃油导致 O 型圈老化失去弹性。冲洗桶阀杆 O 型圈老化后在阀杆抬起落座时受到冲击，容易造成脱落。

应对策略：在第一次出现冲洗桶阀杆 O 型圈脱落后，值班人员对于 O 型圈进行更换，更换后进行装复运行，工作约 120 h 后故障复现。经过分析得出可能冲洗桶阀杆因长时间使用，产生磨损，导致 O 型圈容易脱落，再次更换冲洗桶阀杆和 O 型圈后，装复运行，工作约 150 h 后，故障再次复现，因此排除此原因。

1.3.2 原因分析二：泄放管路设计问题

在冲洗桶阀杆抬起时， 12 bar 的燃油冲入泄放管，设计要求泄放管路应避免直角弯曲，以防背压过大致阀杆落座故障。但由于机舱管路密集，仅可改造部分管路，难以完全满足规范要求，因此阀杆落座故障难以完全避免（图 5 改造前、图 6 改造后）。

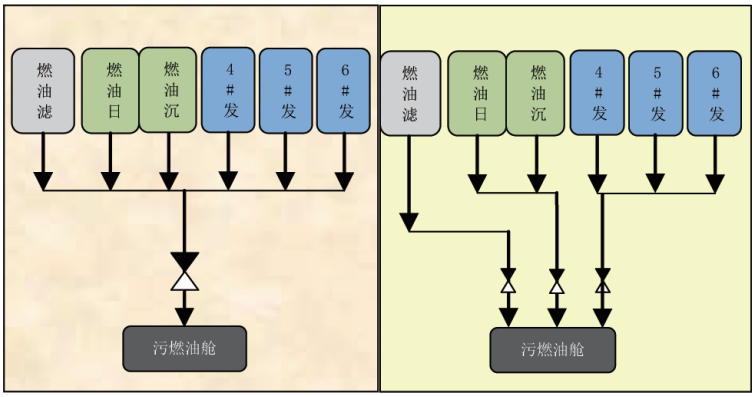


图 5　改造前　　图 6　改造后

应对策略：进行泄放管路改造，借助码头小修进行管路改造（两张图片 一张改造前，一张改造后），改造后取消了原先的直角弯设计，并加装缓冲箱，冲洗桶泄放管路独立泄放至污燃油舱，不与其它泄放管路合并。航次中发现故障复现，因此排除此原因。

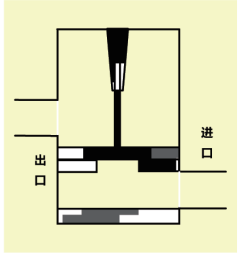
经过原因分析发现存在两点问题：问题一某船燃油自清滤器 O 型圈易发生脱落为泄放系统管路问题，且短时间内无法解决；问题二当燃油自清滤器冲洗桶阀杆 O 型圈脱落导致燃油泄漏时，集控室机舱安全监测系统未设置报警点，人员无法及时发现，只能通过每 4 h 进行的人工测量油舱液位才能发现。总结问题为自清滤器冲洗桶阀杆 O 型圈脱落问题无法彻底解决，集控室机舱安全监测系统存在盲区，故障发生后泄放系统缺乏监测报警以及应有的保险措施。

针对当前情况，从船舶安全出发，本文提出设计一套监控系统，填补安全监控系统存在的盲区。

2　设计思路

分析整个管路系统，在适应《船舶安全管理规定》的前提下，对泄放燃油入舱前的单向阀进行改造设计，同时在燃油自清滤器冲洗桶下方安装一个气动电磁阀和气动速关阀。

单向阀的内部构造（如图 7 所示）所示，在泄放的污燃油经过单向阀进污燃油舱时，单向阀芯向上动作（如图 8 所示），在此单向阀芯顶部加装一个位移传感器，将单向阀芯的移动距离转化为位移传感器的电压信号输出。



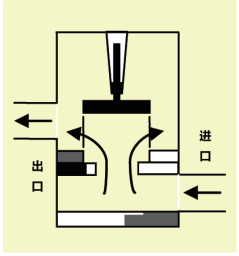


图 7　单向阀关闭剖面图　　图 8　单向阀打开剖面图

将位移传感器采集的电压信号（0 ~ 10V）分两路输出：一路输出至显示仪表，显示仪表将电压信号转化为数字量且进行可视化并将数字量信号送入集控室机舱监测报警系统，用于在集控室查看单向阀芯开度大小；第二路输出至 PLC 模块，PLC 模块将电压信号进行识别处理后将信号分两路输出：一路送到集控室机舱监测报警系统，用于报警；一路送到气动电磁阀，用于控制气路通断。

PLC 模块将接收的电压信号进行延时，延时 12 s 后触发报警，PLC 模块识别为燃油自清滤器 O 型圈脱落引发的泄漏，将报警信号送至集控室机舱监测报警系统，集控室报警系统发出提醒。同时将输出一路电压到气动电磁阀，气动电磁阀接收到电压后打开气路，此时压缩空气到达气动速关阀，触发气动速关阀动作，快速切

断泄放管路，阻断不正常泄漏。

当泄漏被阻断后，单向阀芯复位，此时集控室报警信号消除。系统结构（如图 9 所示）所示：

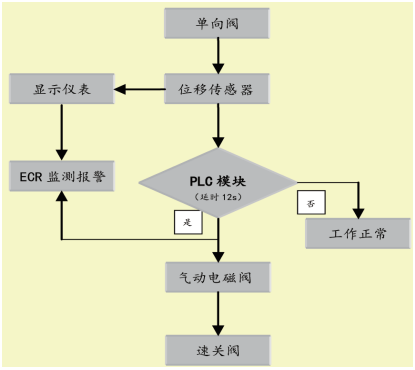


图 9　系统结构图

3　功能实现

3.1　元器件选择

本方案设计实现的功能，需要稳定可靠的PLC模块、位移传感器、显示仪表、气动电磁阀、气动速关阀等部件。

3.1.1　PLC 模块的选择

PLC 可编程控制器，主要包括负责执行程序和存储数据的微处理器，常称为 CPU（中央处理器）模块。主要由电源输入接口、输入接口、输出接口、通信接口、PLC 指示灯、输入 / 输出 LED 指示灯、可选配件、传感器输出接口、检修口等构成。某船所使用的大部分 PLC 模块为西门子 S7-200 CN，在减摇鳍、冷水机组、PMS 系统等设备应用。具有模块化紧凑、功能扩展灵活、网络功能强大、编程工具可使用普通计算机等主要特点，适用于本设计。

3.1.2　位移传感器的选择

本方案设计中选择使用 GEERT 直线位移传感器，10V 电源供电，输出（0 ~ 10V）电压信号电路连接（如图 10 所示），量程为 10 ~ 200mm。拥有精度高、KTR 自动复位、使用寿命长的特点，同时可将位移信号便捷输出，功能强大价格也不贵，适用于本设计。

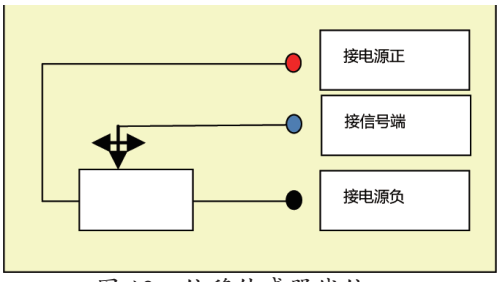


图 10　位移传感器线位

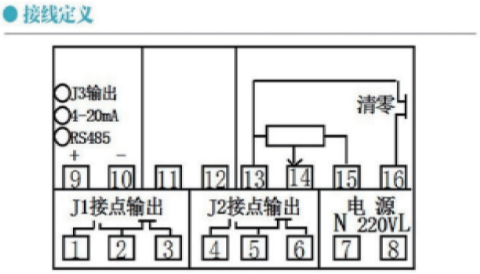


图 11　仪表接线定义

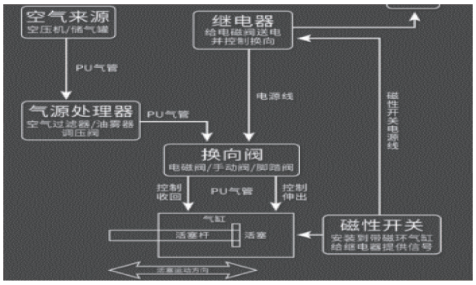


图 12　电磁阀工作流程图

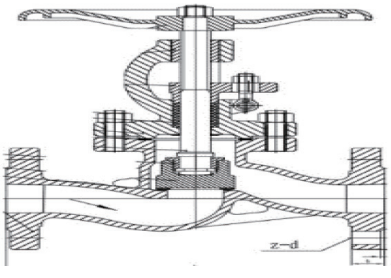


图 13　速关阀结构

3.1.3 显示仪表的选择

本方案设计中选择鸿镁科技的智能仪表，此仪表可用于各类连接控制系统，与位移传感器配合使用，可构成各种量程和规格的位移测控系统，具有万能输入功能（接线定义图 11）、抗干扰能力强、组网控制系统安装方便等特点，适用于本设计。

3.1.4 气动电磁阀

本方案设计中选用的电磁阀采用纯铜的匝线圈，电磁阀长久使用不易发烫。阀体为铝合金，具有重量轻、强度大、耐腐蚀性强的特点。线圈使用高频次先导头，具有换向灵敏、不易卡顿、使用寿命长等优点，（工作流程图 12）适用于本设计。

3.1.5 气动速关阀

本方案设计中选择船用 Φ76 mm 气动速关阀，工作原理是利用压缩空气进入气动执行器带动活塞运动，活塞传力给升降扭轴带动阀杆驱动（结构图 13），实现快速切断。具有结构简单、维修方便、工作行程小、启闭时间短、动作快、密封性能好、使用寿命长的特点。

3.2 程序设计与实现

3.2.1 PLC 模块程序设计

燃油自清滤器开始冲洗后，泄放的燃油经过进舱单向阀，单向阀芯向上抬起带动位移传感器动作，此时位移传感器将采集的 (0-10V) 电压信号持续输入 PLC,PLC 将电压信号进行延时 12 s 处理：若 12 s 内电压信号中断，则说明位移传感器复位，燃油未发生不正常泄漏；若延时 12 s 后，电压信号持续，则说明位移传感器未复位，燃油发生不正常泄漏。

发生不正常泄漏后，PLC 触发报警，同时将报警信号送入集控室机舱检测报警系统，集控室发出警报。PLC 同时输出一路电压到气动电磁阀，打开压缩空气，触发气动速关阀动作，快速切断泄放管路。泄放管路切断后，单向阀芯复位，位移传感器采集的电压信号中断，集控室报警消除（如图 14 所示）。

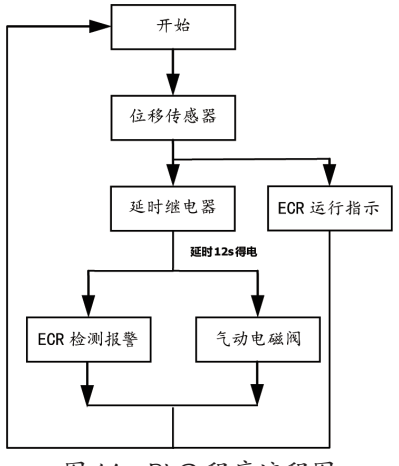


图 14 PLC 程序流程图

3.2.2 PLC 地址表

输入	名称
I0.0	位移传感器正极
I0.1	位移传感器负极
输出	名称
Q0.0	电磁阀
Q0.1	集控室监测报警

3.2.3 PLC 编程语言

采用梯形图（如图 15、图 16 所示），适用于本设计的逻辑控制：



图 15　输入程序

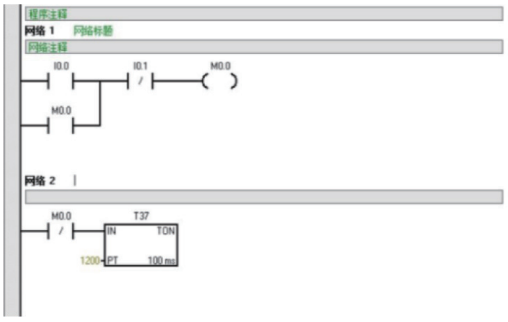


图 16　输出程序

4　功能验证

4.1　模拟验证

按照前文给出的设计，完成对核心功能部件的制作，如图 17、图 18 示：

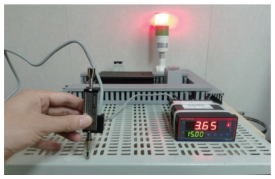


图 17　单向阀关闭模

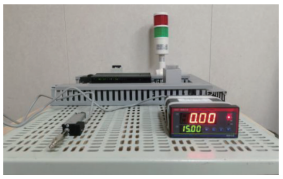


图 18　单向阀开启模拟

手动按下位移传感器模拟单向阀芯向上抬起动作，显示仪表显示位移量，同时 PLC 输入 / 输出 LED 指示灯亮起。延时继电器开始计时，12 s 计时结束后，触发报警灯柱，报警灯亮起（此处模拟气动电磁阀动作）。经核心功能部件的模拟测试，满足设计初始的使用要求。

4.2　实物验证

4.2.1　安装调试

照片、元器件安装位置（局部）（图 19、图 20、图 21、图 22、图 23、图 24 示）



图 19　运行中的 PLC 模块



图 20　集控室机舱检测报警



图 21　位移传感器



图 22　气动速关阀

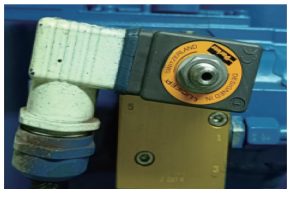


图 23　气动电磁阀



图 24　显示仪表

4.2.2　运行检查

系统安装完之后，航行期间再次发生燃油自清滤器 O 型圈脱落故障，监控系统及时向集控室发出报警同时气动电磁阀打开，气动速关阀快速切断泄放管路，避免燃油大量泄漏。值班人员根据报警信息及时进行处置，避免了引发次生事故。本设计优化已经通过实践检验，满足使用要求。

5 结束语

本次设计以西门子 S7-200 CN PLC 为控制核心，通过对位移传感器的信号采集来实时监控单向阀的打开与否，从而实现对自清滤器冲洗桶阀杆 O 型圈脱落故障的检测报警，同时加装气动速关装置，发生故障后可自动进行快速阻断，杜绝隐患以及次生灾害的发生。该优化系统已经安装于自清滤器泄放系统，经过实践检验，达到理想效果，可推广其他船舶类似设备使用。同时该优化系统结构精巧，造价便宜，也可用于各类泄放管路。

参考文献

[1] 彭陈 . 船舶 MISUZU-BOLL 型燃油自动反冲洗滤器故障分析与排除 [J]. 船舶工程 ,2022,44(11):85-88.
[2] 李海昭 , 朱杰 . 自清滤器在船舶设计中的应用 [J]. 船舶标准化工程师 , 2022, 55 (02): 52-55.
[3] 姜辉 . 全自动反冲洗滤器故障处理 [J]. 中国水运（下半月）.2022,22(5).42-43.
[4] 彭陈 , 赵春生 . 某船主机燃油反冲洗滤器故障分析 [J]. 船海工程 , 2016,45 (04): 134-136.
[5] 朱飞 . 燃油自清滤器工作原理及故障实例 [J]. 航海技术 , 2022,(4).58-60.
[6] 庞宏伟 . 波尔自清滤器故障分析及技术改进 [J]. 航海技术 , 2021,(6).50-53.
[7] 余培文 , 孔建华 . BOLL & KIRCH 燃油自清滤器故障实例 [J], 航海技术 .2020,(4).55-57.
[8] 鲁森 . BOLL6.50 型燃油自动反冲洗滤器原理及故障分析 [J]. 航海技术 .2017,(6).39-41
[9] 陈东 , 许德勤 , 孙猛 . CB/T 4466-2017《船用全自动反冲洗油滤器》标准介绍 [J]. 船舶标准化与质量 , 2019,(2).
[10] 张海平 . 液压螺纹插装阀 [M]. 北京 : 机械工业出版社 ,2011.
[11] 图说帮 . PLC 编程 [M]. 北京 : 中国水利水电出版社 , 2021.
[12] 李林涛 . 西门子 S7-1200/1500PLC 从入门到精通 [M]. 北京 : 机械工业出版社 , 2014.
[13] 向晓汉 , 刘摇摇 . PLC 编程从入门到精通 [M]. 北京 : 化学工业出版社 ,2019.
[14] 王前进 , 马小平 , 张守田 . PLC 软冗余在通风机监控系统中的应用 [J] . 工矿自动化 ,2014,40(01):93-96.
[15] 陈明兴 . 船舶燃油自清滤器管理要点 [J]. 航海技术 ,2017,(4).46-48.
[16] 丁亚委 . 基于云重心评判法的主机供油单元健康状态评估方法研究 [D]. 大连海事大学 , 2019.
[17] 王云刚 , 陈文燕 . 基于 MCGS 和 PLC 的水位自动控制系统设计 [J] . 测控技术 ,2014,33(01): 96-98+103.
[18] 聂春 , 竹本善博 , 叶丹青 , 等 . 塑料机油集滤器的设计与应用 [J]. 汽车工艺与材料 .2010,(5).47-49
[19] 边童 . 船用燃油系统及其控制设备的建模与仿真研究 [D]. 大连海事大学 , 2019.
[20] 齐文征 . 油反冲洗式燃油自清滤器的维护管理 [J]. 航海技术 .2012,(6).46-49.

作者简介：

袁彦伟，中国卫星海上测控部工程师，研究方向：电气工程及其自动化，（E-mail）3790769699@qq.com，15601519360

基于 AHP-FCE 模型的福姜沙北水道引航风险评价研究

陈　壮　乔邦阳　唐仁康

（长江引航中心靖江引航站，江苏靖江　214431）

摘 要：福姜沙北水道通航环境复杂，引航操纵困难，据相关资料显示，福姜沙北水道是长江江苏段船舶事故最多的水道之一。本文通过 AHP-FCE 模型开展长江江苏段福姜沙北水道引航风险评价研究，从而全面、客观地评估福姜沙北水道引航风险的大小和分布情况，为相关部门制定风险管控措施提供科学依据，并提出相关安全建议，有利于进一步提升引航及海事等相关机构的管理水平，保障福姜沙北水道通航安全。

关键词：福姜沙北水道；AHP-FCE 模型；引航风险；安全建议

中图分类号：U698

文献标识码：A

福姜沙北水道作为长江江苏段十分重要的水上运输通道，其引航安全对于保障整个水上运输系统的顺畅运行具有重要意义。但福姜沙北水道通航环境复杂，引航操纵难度大，引航过程中面临人为因素、水文气象、船舶交通流量复杂、船舶自身缺陷等多种风险，对船舶、生态环境以及人民财产安全造成严重威胁。因此，对福姜沙北水道引航风险进行评价研究，制定相关风险管控措施，对于提高水上运输的安全性和稳定性具有重要意义。

近年来，国内外学者在风险评价领域进行了广泛研究，提出了多种风险评估方法和模型。其中，AHP-FCE 模型作为一种综合性的风险评价方法，具有操作简便、结果直观等优点，被广泛应用于各个领域的风险评价中。本文将 AHP-FCE 模型应用于福姜沙北水道引航风险评价中，深入分析福姜沙北水道引航风险的来源、类型、特点和影响，构建全面、合理的风险评价指标体系，利用 AHP 模型确定各指标的权重，再利用 FCE 模型进行风险评价，从而全面、客观地评估福姜沙北水道引航风险的大小和分布情况，为相关部门制定风险管控措施提供科学依据。

1　福姜沙北水道概述

1.1　地理位置及水文气象条件

地理位置：福姜沙北水道位于福姜沙和民主沙北侧，如图 1 所示，水道上界为长江 56# 左右通航浮与长江 57# 黑浮连线，下界为长江 44-1# 左右通航浮与长江 43# 黑浮联线。

潮汐潮流：福姜沙北水道位于感潮河段，属于不规则半日浅海潮，枯、洪水期潮位相差较大，落潮历时大于涨潮历时。洪水期水位上涨，落水流较大，涨潮时，涨水不明显。枯水期，涨水明显，涨水时间较长。通常情况下，每日有两涨两落的变化。水流流态复杂，落潮流最大（平均）流速为 3.6 kn，涨潮流平均流速为 2.6 kn，落潮流速大于涨潮流速，福北航道受到涨潮流、落潮流相互作用经常出现淤浅。



图 1　福姜沙北水道地理位置

风：航道内年平均风速 3.7 m/s。全年最大风速为 16.2 m/s。风力 8 级以上大风日多年平均为 8.4 天，7-9 月受台风影响时最大阵风在 10 级以上。

雾：水道内年平均雾日为 33.5 天，多出现在春夏和秋冬交替之际，多为蒸发雾和辐射雾。

1.2　福姜沙北水道引航风险来源

1.2.1　航道条件

福姜沙北水道航道条件较差，航道弯曲狭窄，水深变化频繁，航道内浅点浅滩多而杂，水道北岸多为码头、船厂、河口及港池，南岸多为锚地和停泊区，河口水域就有 16 处。航道最窄处仅 260 m，尤其在 FB#7 红浮至 FB#13 红浮水域，航向变化达 70 多度，复杂的航道条件进一步增加了航行风险。

1.2.2　船舶活动规律

根据《长江江苏段船舶定线制规定（2021 年）》，福姜沙北水道供船长 110 m 以下的上行船舶过境通过及进出福姜沙北水道作业的船舶使用，所以水道内船舶密度大，小船活动十分频繁。尤其是重点航段焦港河口附近，多股船舶流在此交汇，横越现象频繁，属于碰撞、搁浅事故高发领域。根据潮汐潮流情况分析，水道内落水流明显，小型船舶下行时受流推压，落弯现象明显，导致上行船舶可航行水域不断被压缩。福姜沙北水道每日涨水时有两次小型船舶上行高峰流，此股高峰流船舶密度大，持续时间长，多船并行时占据整个航道，导致福姜沙北水道航行的大型船舶经常遇到无路可走的局面。

此外，水道上下口也是船舶交汇水域。水道上口有 5 股船舶流交汇，水道下口有 9 股船舶流在此交汇，由于船舶流股数较多，交叉会遇情况复杂，避让关系不明，航行风险较大。

1.2.3　被引船特点

根据《长江江苏段船舶定线制规定（2021 年）》，上行进入福姜沙北水道作业的船舶应沿福姜沙北水道航行，因此靠泊福姜沙北水道的大型海轮都需要沿福姜沙北水道上行。据调查显示，靠泊福姜沙北水道的船舶大型化趋势越来越明显，其中主要以 5 万、7 万吨级散货船以及大型油船为主，且进口靠泊海轮通常是重载进港，操纵性能相对较差，航行风险增加。本文通过分析近年来长江引航中心靖江引航站所引领船舶可知，航经福姜沙北水道的船舶多为老旧木材船以及载运煤炭船，此类船舶船龄较大，船况相对较差，操纵性能差，不确定性风险多，航行风险高。

2　引航风险评价指标体系的建立

在构建引航风险评价指标体系时，充分考虑该水道引航风险的来源和特点。该水道作为重要的水上交通要道，面临着复杂的自然环境和人为因素带来的风险。因此，在指标体系中，我们设置了包括人员、环境、船舶、管理等多个方面的指标，以全面反映福姜沙北水道引航风险的全貌。风险指标体系表见图 2。

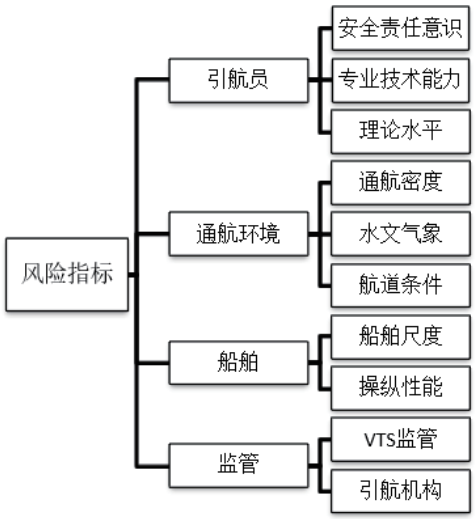


图 2　风险指标体系图

3　利用 AHP 模型确定指标权重

AHP 模型，即层次分析法，是将复杂的决策问题通过两两对比的方式，分解为多层次、多因素，从而确定各因素的相对重要性。在确定福姜沙北水道引航风险评估指标权重时，采用 AHP 模型，选取熟悉福姜沙北水道的 10 名引航专家（其中长江引航中心靖江引航站 6 名，南通引航站 2 名，持证管理高级引航员 2 名）发放问卷调查，以分析福姜沙北航道引航风险，并处理所得数据，确定各项指标权重。具体流程和步骤如下：

3.1　建立层次结构模型

本文当中层次分析法分为三个层次，分为目标层、准则层、指标层，具体层次框架如图 3 所示：

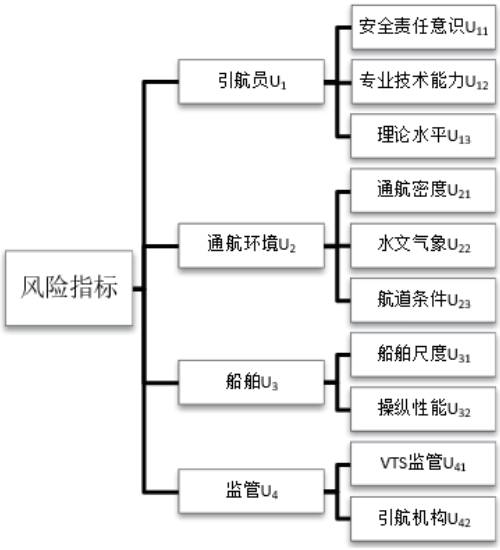


图 3　层次框架图

3.2　准则层权重计算

首先计算准则层的权重，请 10 位引航专家按照评分刻度对指标进行打分，从而构造判断矩阵，由于参与打分的专家数量较多，选取专家 1 对准则层打分进行说明，通过专家 1 对准则层的打分得到判断矩阵及计算结果，如表 1 所示：

表中 λ max 为矩阵的最大特征值；CI 为一致性指标；CR 为一致性指标 CI 和平均随机一致性指标 RI 的比值。

表 1　专家 1 对准则层的打分判断矩阵及计算结果

影响因素	U_1	U_2	U_3	U_4	λ max	CI	CR
$_U$1	1	1/3	6	2	4.0767	0.02556	0.0287
U_2	3	1	7	5			
U_3	1/6	1/7	1	1/2			
U_4	1/2	1/5	2	1			

由表 1 可知，专家 1 对准则层的打分判断矩阵 CR=0.0287<0.1，则说明一致性检验通过，同以上方法，在确保 10 位专家判断矩阵均满足一致性要求（CR<0.1）后，将 10 份判断矩阵进行矩阵集结（几何平均法），集结后的矩阵见表 2。

表 2　判断集成矩阵

影响因素	U_1	U_2	U_3	U_4
U_1	1	0.9603	2.0419	1.4012
U_2	1.0414	1	1.8473	1.2422
U_3	0.4897	0.5413	1	0.836
U_4	0.7137	0.805	1.1962	1

对集成矩阵进行权重和一致性计算，计算结果如下：

（1）根据表 3.2，得到判断集成矩阵。

$$\bar{A}=\begin{bmatrix} 1 & 0.9603 & 2.0419 & 1.4012 \\ 1.0414 & 1 & 1.8473 & 1.2422 \\ 0.4897 & 0.5413 & 1 & 0.836 \\ 0.7137 & 0.805 & 1.1962 & 1 \end{bmatrix}$$

（2）的元素按行相乘得一新向量 B。

$$B=\begin{bmatrix} 2.7475 \\ 2.3897 \\ 0.2216 \\ 0.6873 \end{bmatrix}$$

（3）将 B 的每个分量开 4 次方，得到特征向量 M。

$$M=\begin{bmatrix} 1.2875 \\ 1.2433 \\ 0.6861 \\ 0.9105 \end{bmatrix}$$

（4）将向量 M 归一化即为权重向量 W。

$$W=\begin{bmatrix} 0.3119 \\ 0.3012 \\ 0.1662 \\ 0.2206 \end{bmatrix}$$

（5）计算最大特征值 λ max。

$$\bar{A}W=\begin{bmatrix} 1 & 0.9603 & 2.0419 & 1.4012 \\ 1.0414 & 1 & 1.8473 & 1.2422 \\ 0.4897 & 0.5413 & 1 & 0.836 \\ 0.7137 & 0.805 & 1.1962 & 1 \end{bmatrix}\times\begin{bmatrix} 0.3119 \\ 0.3012 \\ 0.1662 \\ 0.2206 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1.2497 \\ 1.2072 \\ 0.6665 \\ 0.8846 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{\max}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left[\bar{A}W\right]_i}{W_i}=\frac{1}{4}\left(\frac{1.2497}{0.3119}+\frac{1.2072}{0.3012}+\frac{0.6665}{0.1662}+\frac{0.8846}{0.2206}\right)=4.0082$$

6）判断矩阵的一致性检验 CI。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} = \frac{4.0082 - 4}{4-1} = 0.0027$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.00275}{0.89} = 0.0031 < 0.1$$

CR<0.1，一致性检验通过，所有权重指标合理，因此确定准则层权重如表 3 所示：

表 3　准则层指标权重计算结果

准则层	权重
引航员 U_1	0.3119
通航环境 U_2	0.3012
船舶 U_3	0.1662
监管 U_4	0.2206

3.3　指标层权重计算并汇总

根据准则层相同计算步骤，对指标层的判断集成矩阵与权重进行计算，将各层级指标之间的权重汇总，见表 4。

表 4　权重汇总表

目标层	准则层	相对权重 W1	指标层	相对权重 W2	综合权重 =W1*W2
风险指标	引航员 U_1	0.3119	安全责任意识 U_{11}	0.4294	0.1339
			专业技术能力 U_{12}	0.3991	0.1245
			理论水平 U_{13}	0.1715	0.0535
	通航环境 U_2	0.3012	通航密度 U_{21}	0.4053	0.1221
			水文气象 U_{22}	0.2096	0.0631
			航道条件 U_{23}	0.3851	0.1160
	船舶 U_3	0.1662	船舶尺度 U_{31}	0.5000	0.0831
			操纵性能 U_{32}	0.5000	0.0831
	监管 U_4	0.2206	VTS 监管 U_{41}	0.6806	0.1501
			引航机构 U_{42}	0.3194	0.0705

为了更直观地比较准则层和指标层的相对权重大小，在柱状图 4 和 图 5 中分别作如下表示：

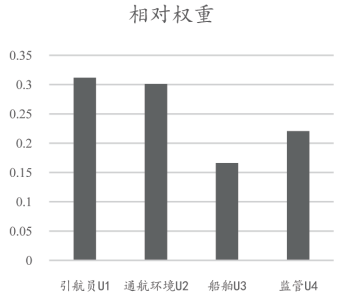


图 4　准则层相对权重示意图

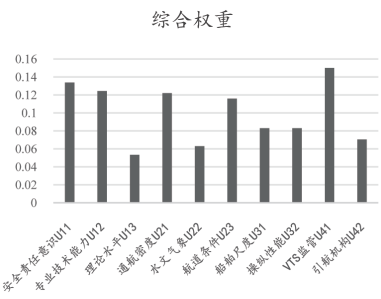


图 5　指标层综合权重示意图

综上分析，准则层中，引航员及通航环境权重较大；标准层中，安全责任意识、专业技术能力、通航密度、航道条件、VTS 监管综合权重较大。

4　利用 FCE 模型进行风险评价

FCE 模型，即模糊综合评价，是基于模糊数学理论的一种综合评价方法，可用于处理具有模糊性质的多指标、多因素评价问题。本文对引航风评价构建步骤按以下进行：

4.1 建立模糊评价权重集

将由 AHP 模型计算得到的相对权重转为权重集，如表 5 所示：

表 5 评价指标权重集

评价权重集	集合元素
目标层权重集	W={0.3119，0.3012，0.1662，0.2206}
准则层权重集	W_{U1}={0.4294，0.3991，0.1715}
	W_{U2}={0.4053，0.2096，0.3851}
	W_{U3}={0.5，0.5}
	W_{U4}={0.6806，0.3194}

4.2 建立评价集

本文为量化福姜沙北水道引航风险评价结果，将该水域引航风险划分成 5 个等级。设定对指标的评语集 V={ 危险，较危险，一般，较安全，安全 }，各评价等级分别对应分值为 {1,3,5,7,9}, 本文采取评分区间确定目标评语的评价结果，见表 6。

表 6 评价等级分值区间表

指标	危险	较危险	一般	较安全	安全
分值区间	[0-2]	(2-4]	(4-6]	(6-8]	(8-10]

4.3 隶属度计算

为确定各指标层的评价等级，邀请 10 位引航专家对指标层进行再次评价，在专家提交调研问卷选择表之后梳理调研问卷结果，结果见表 7。

表 7 指标层等级汇总表

指标层	危险	较危险	一般	较安全	安全
U_{11}	0	1	1	5	3
U_{12}	0	1	3	5	1
U_{13}	0	1	2	5	2
U_{21}	1	5	4	0	0
U_{22}	0	1	5	4	0
U_{23}	2	5	2	1	0
U_{31}	2	4	3	1	0
U_{32}	1	3	5	1	0
U_{41}	0	1	5	3	1
U_{42}	0	0	2	7	1

通过指标层等级汇总，每个指标评价人数除以引航专家总人数 10，可以得到指标评语隶属度，见表 8。

表 8 指标层隶属度表

指标层	危险	较危险	一般	较安全	安全
U_{11}	0	0.1	0.1	0.5	0.3
U_{12}	0	0.1	0.3	0.5	0.1
U_{13}	0	0.1	0.2	0.5	0.2
U_{21}	0.1	0.5	0.4	0	0
U_{22}	0	0.1	0.5	0.4	0
U_{23}	0.2	0.5	0.2	0.1	0
U_{31}	0.2	0.4	0.3	0.1	0
U_{32}	0.1	0.3	0.5	0.1	0
U_{41}	0	0.1	0.5	0.3	0.1
U_{42}	0	0	0.2	0.7	0.1

根据指标层隶属度矩阵和层次分析法所得到的相对权重，可以计算出准则层模糊评价结果如下：

对准则层 U_1 进行模糊评价，其模糊矩阵和权重集分别为 F_{U1} 和 W_{U1}，如下：

$$F_{U1}=\begin{bmatrix}0 & 0.1 & 0.1 & 0.5 & 0.3\\ 0 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.1\\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2\end{bmatrix}$$

$$W_{U1}=\begin{bmatrix}0.4294 & 0.3991 & 0.1715\end{bmatrix}$$

计算 U_1 的隶属度：

$$Z_{U1}=F_{U1}\times W_{U1}=\begin{bmatrix}0 & 0.1 & 0.197 & 0.5 & 0.203\end{bmatrix}$$

计算 U_1 的得分：

$$Y_{U1}=Z_{U1}\times V=\begin{bmatrix}0 & 0.1 & 0.197 & 0.5 & 0.203\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}1\\3\\5\\7\\9\end{bmatrix}=6.61$$

同样的计算方法分别对准则层 U_2、U_3、U_4 进行模糊评价，并汇总上述准则层的隶属度结果，见表 9。

表 9　准则层隶属度表

指标层	危险	较危险	一般	较安全	安全
U_1	0	0.1	0.197	0.5	0.203
U_2	0.1176	0.4162	0.3439	0.1224	0
U_3	0.15	0.35	0.4	0.1	0
U4	0	0.0681	0.4042	0.4278	0.1

4.4　标层模糊综合评价

通过准则层隶属度汇总，可以得到目标层的模糊综合评价矩阵，其模糊矩阵 F_S 和权重集 W_S 如下：

$$F_S=\begin{bmatrix}0 & 0.1 & 0.197 & 0.5 & 0.203\\ 0.1176 & 0.4162 & 0.3439 & 0.1224 & 0\\ 0.15 & 0.35 & 0.4 & 0.1 & 0\\ 0 & 0.0681 & 0.4042 & 0.4278 & 0.1\end{bmatrix}$$

$$W_S=\begin{bmatrix}0.3119 & 0.3012 & 0.1662 & 0.2206\end{bmatrix}$$

计算目标层的隶属度

$$Z_S=F_S\times W_S=\begin{bmatrix}0.0604 & 0.2297 & 0.3207 & 0.3038 & 0.0854\end{bmatrix}$$

计算目标层的得分

$$Y_S=Z_S\times V=\begin{bmatrix}0.0604 & 0.2297 & 0.3207 & 0.3038 & 0.0854\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}1\\3\\5\\7\\9\end{bmatrix}=5.25$$

4.5　模糊综合评价结果

将各级指标的模糊综合评价结果进行汇总，如下：

准则层对应评语和得分见表 10。

表 10　准则层对应评语和得分

准则层	最终得分	评价标准
引航员 U_1	6.61	较安全
通航环境 U_2	3.94	较危险
船舶 U_3	3.90	较危险
监管 U_4	6.12	较安全

指标层对应评语和得分如表 11 所示：

表 11　指标层对应评语和得分

指标层	最终得分	评价标准
安全责任意识 U_{11}	7	较安全
专业技术能力 U_{12}	6.2	一般
理论水平 U_{13}	6.6	较安全
通航密度 U_{21}	3.6	较危险
水文气象 U_{22}	5.6	一般
航道条件 U_{23}	3.4	较危险
船舶尺度 U_{31}	3.6	较危险
操纵性能 U_{32}	4.2	一般
VTS 监管 U_{41}	5.8	一般
引航机构 U_{42}	6.8	较安全

目标层对应评语和得分见表 12。

表 12　目标层对应评语及得分

目标层	最终得分	评价标准
福姜沙北水道引航风险	5.25	一般

综上所述，福姜沙北水道引航风险模糊评价最终得分为 5.25 分，根据设定对指标的评语集 V={危险，较危险，一般，较安全，安全}，即 V={1,3,5,7,9}，本次得分接近于一般标准，由此可见，福姜沙北水道的引航风险相对较高，相关部门应引起重视。

5　基于评价结果的风险防控措施及建议

通过以上层次分析和模糊评价，我们可以发现影响福姜沙北水道引航风险重要的因素是引航员的安全责任意识、专业技术能力、航道条件、通航密度以及船舶尺度。本文针对以上分析结果提出了具体的防控措施和建议。

5.1　引航机构方面

根据本文的 AHP 模型分析可知，引航员所占权重较大，同时在引航事故中，人的因素是导致事故发生的重要原因。作为引航机构，要进一步加强安全管理，提高队伍素质，切实做好引航安全工作。

（1）加强引航员的技能培训教育，包括严格的升级晋档考核规定、定期的知识培训以及常态化的技术研讨会等。从而进一步强化引航员专业理论水平、船舶操纵水平以及应急应变处理能力；

（2）加强引航员安全意识培训教育，包括日常的安全信息提醒、引航行为监督、典型事故案例分析会等，从而进一步强化引航员的安全责任意识；

（3）加强船舶动态管理，建立健全船舶信息数据库，尤其对福姜沙北水道航行的大型海轮作为重点监控，制定安全措施，尽量避免上行小船高峰流时段航经福姜沙北水道，必要的情况下采取拖轮或护航艇等安全措施。

5.2　航道部门及海事监管方面

根据本文分析可知，航道自身条件、船舶密度以及船舶尺度是影响福姜沙北水道引航风险的主要因素，航道部门和海事部门应加强对航道实况和船舶的安全监管，落实落细各项安全检查和安全措施。

（1）航道管理部门通过合理利用航道资源、拓宽航道、降低船舶通航密度、合理设置小型船舶锚地和停泊区等措施，进一步推进航道整治工作，从而提高通航效率，降低航行风险；

（2）海事部门强化船舶动态管理，督促船方落实落细各项安全措施，包括福姜沙北水道航行备双锚、派人了头、主机换轻油、规范的船舶信号及声号等；

（3）严控老旧船舶、带病船舶以及低标准船舶进入福姜沙北水道航行，发现船舶存在安全隐患时，要督

促船舶按照要求及时整改；

（4）加强对小型船舶的监管，及时对船舶流进行疏通，对不按规定航行的船舶要及时提醒纠正和处罚，必要时派海巡艇进行现场指挥，确保在航船舶交通流处于有序状态；

（5）制定相关措施对航经福姜沙北水道的大型海轮进行分流，如进口靠泊靖江港新港港区的大型重载海轮，可沿航道条件更优良的福姜沙中水道上行，待航经长江 #54 黑浮后，向北转向靠泊靖江港各码头，从而减轻福北水道通航压力，降低通航风险。

6 结束语

本文以区间层次分析法和模糊综合评价法相结合，构造出福姜沙北水道引航风险评价模型，实现了对该水域引航风险的客观评价。结果表明，福姜沙北水道引航风险相对较高，本文针对评价结果提出针对性风险防控措施及建议，供相关机构参考，确保福姜沙北水道的引航安全。

参考文献

[1] 杨莎 . 福姜沙水道船舶交通流量特征与疏浚施工避让方案研究 . 东南大学 .2020,5:6-7.

[2] 王梦 , 马浩森 . 层次分析和模糊评价法在工程方案比选中的应用 . 工程管理学报 .2023,10.

[3] 詹建辉 . 港口船舶引航风险与控制措施 . 珠江水运 .2023,12:20-21.

[4] 陈德晓 . 深圳港船舶引航风险综合评估 . 西南交通大学 .2015,12.

[5] 何欣强 , 袁卫军 . 江阴大桥桥区水域引航风险研究 . 中国水运（下半月),2019,6.

[6] 王方金 . 航道通航风险评估模型的研究 [D]. 大连 : 大连海事大学，2012.

[7] 胡业林 , 孟子筠 . 基于 AHP -- FCE 的通信系统风险评估 . 科学技术与工程 .2022,10.

[8] 肖峻 , 罗凤章 , 王成山 . 区间层次分析法权重计算中的概率分布分析 [J]. 天津大学学报（自然科学与工程技术版）,2005,38（3）,189-194.

[9] 符建华 , 李进 . 基于证据理论的长江江苏段引航安全评价研究 . 中国水运（上半月）.2020.5.DOI :10.13646/j.cnki.42-1395/u.2020.05.025

[10] 方诚 , 胡甚平 , 方泉根 . 港口船舶引航风险预测 [J]. 中国航海 ,2008,31(4):388-391.

[11] 张则浩 . 船舶航道航行安全综合评价的研究 [D]. 大连海事大学 ,2015.

作者简介：

陈壮，船舶初级，（E-mail）931122560@qq.com

乔邦阳，工程中级，（E-mail）381006196@qq.com

唐仁康，船舶高级，（E-mail）375524980@qq.com

基于 WOS 核心数据库的海洋文化文献计量研究

张金艳

（江苏海事职业技术学院，江苏南京　214500）

摘 要：为了解全球海洋文化研究的现状与热点，笔者以 Web of Science 核心数据库收录的近 20 年的 259 篇 SCI, SSCI 文献为研究对象，利用文献计量方法，通过可视化文献计量网络软件 Visualizing Scientific Landscapes(VOSviewer) 和文献题录信息统计分析工具 Statistical Analysis Toolkit for Informetrics（SATI）对该研究的文献发表趋势、期刊分布情况、发文机构、研究内容和主题进行统计分析。结果表明 : 研究文献数量呈现波动增长，总体上呈逐年上升发展态势；相关高质量文献主要发表于 Journal of Coastal Research,Journal of Maritime Archeology,Marine Policy 等学术期刊上；主要研究学者来自于 Ulster University、International Institute for Environment and Development (IIED)、University of Southampton、Bulgarian Academy of Sciences、CNRS、Leiden University、Queens University Belfast、Swansea University、Tohoku University、UCL。当前海洋文化五大研究主题 : 海洋空间规划、海洋考古学、海洋经济、海洋政策和管理以及中国。研究空白在于海洋空间规划和文化生态系统服务。在未来的海洋文化研究中，学者们可以通过展开跨学科互动和交流，创新研究方法，多学科整合海洋文化研究，使该领域的研究成为多学科综合的重要领域。

关键词：海洋文化；文献计量；时间序列；共词分析；时序分析

作为人类文化的重要组成部分，海洋文化记录了人们探索和利用海洋资源的历史，同时，在不同文化中，海洋文化也得到了交流和融合。近年来，随着全球化进程的加快和海洋资源开发的日益重要，海洋文化研究逐渐成为一个多学科交叉的研究热点。为反映全球学术界在海洋文化领域的研究状况，预测未来海洋文化的研究趋势与空白领域，本文在 Web of Science 以时间段 1985-2024 为检索条件，通过筛选和数据清洗后，发现 1985—2006 年之间的论文相关度极低，第一篇与本研究相关的核心论文出现在 2007 年。因此本文的研究对象是 2007 年至 2024 年的 259 篇 SCI/SSCI 论文文献。本文通过采用文献计量学方法，对海洋文化领域的研究现状和发展趋势进行了系统梳理和分析。通过分析文献数量的变化趋势、研究机构和国家的分布、主要研究主题和关键词、高被引文献等方面，全面揭示海洋文化研究的发展现状和前沿热点。

1　材料与方法

1.1　数据来源

为确保数据来源的准确性、权威性和全面性，本研究的文献数据来源主要为（Web of Science (WOS) 核心数据库)；以“海洋文化”为主题词，检索式为：“主题 =Maritime Culture*And 时间跨度 =ALL year And Document type=Journal Article And Language =English”，共得到（905）类期刊中的相关文献信息，覆盖考古学、生态学、历史学、环境科学等众多学科领域和研究方向。在此检索结果上，借助 Excel 软件对数据进行严格清洗，

剔除重复数据、报告、会议、约稿启示、书评、新闻报道等非研究类文献以及缺乏摘要、关键词等关键要素的相关文献，最终保留 259 篇期刊题录作为研究对象，操作时间为 2024 年 6 月 15 日。

1.2 研究方法

文献计量学作为文献统计分析的主流方法，以数学与统计学方法为依托，相关信息材料为对 象，通过数量统计与分析，对样本所呈现的数量 特征进行描述，由此评价样本在某一阶段的发展历程 [1]。本研究利用文献计量软件 Vosviewer 和 SATI 绘制并呈现海洋文化主题文献的文献发表年度变化、期刊分布及机构，主要研究作者的研究状况 , 关键词共现的时间序列图谱，探索海洋文化领域 2007-2024 年的研究热点和主题。

2 结果与分析

2.1 文献分布规律分析

2.1.1 时间分布规律

年度文献分布状况是衡量科研成果的一项重要指标 [2]。将获得的文献数据运用计量软件 进行年度划分后（图 1 海洋文化主题研究文献量年度变化 2007-2024）发现，海洋文化研究成果呈现波动增长，总体上呈逐年上升发展态势。借用一阶线性齐式差方程 (Nonhomogeneous Difference Equation) 进行阶段性划分，划分点常数值 a 借助公式来推算 (t 为年份 , Pt 为截至年份 t 已累积发表文献数量) [3], 将年来该领域的研究大致划分为 3 个阶段。

波动起步期 : 2007 年 -2009 年。此阶段主题文献研究数量处于波动上升发展期，a 值徘徊在 [1.5 ~ 2.17] 内。2007 年和 2008 年的发表数量较少。2009 年，发表数量显著增加，比 2008 年的累计总数增加了一倍以上，研究产出出现了激增。

稳步增长期 : 2010 年—2019 年。每年的论文发表数量在 4 到 13 篇之间，存在一些波动。a 值主要处于徘徊在 [1.10 ~ 1.37]，每年有适度的增长。年均发表文献 9 篇。这一时期文献数量显示出稳步增长，偶尔出现高峰和下降。由 a 值所示的增长率保持相对稳定，反映了持续的研究活动。这一阶段表明，海洋文化研究进入了一个相对成熟和稳定的发展阶段，研究活动和成果逐渐增多。

显著增长期：2020 年—2024 年。论文发表数量在 2020 年激增到 52 篇。在 2021 年至 2024 年间，发表数量有所下降，但增长率仍然保持在 1 以上。虽然 2021 年 -2024 年的论文增长速度与 2020 年相比，增长较慢，但研究仍在持续。

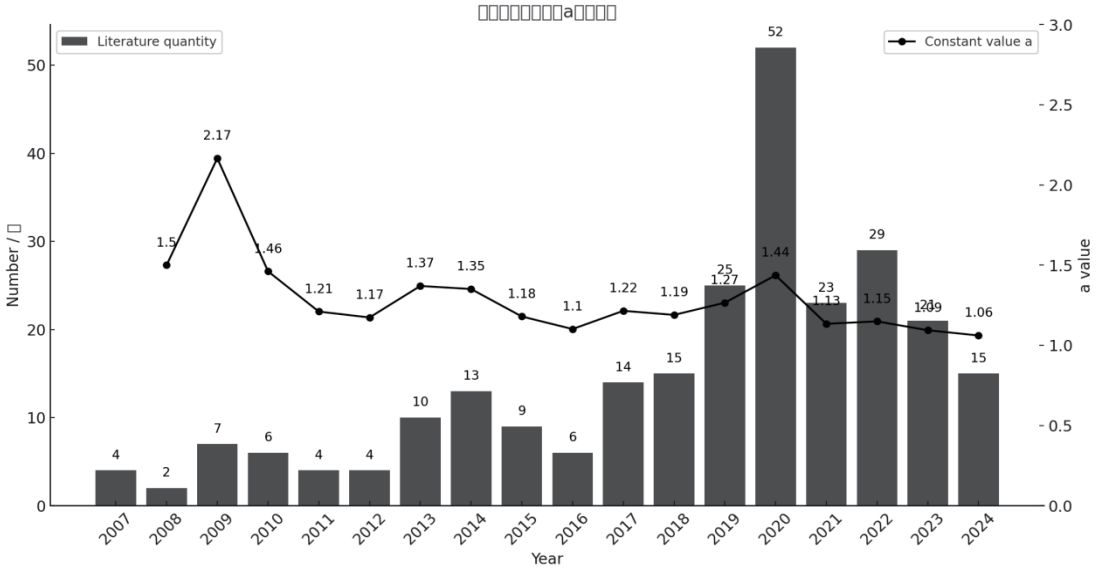


图 1 海洋文化主题研究文献量年度变化（2007–2024）

2.1.2 空间分布规律

通过借助 Excel 软件对样本文献进行归并统计，笔者共得到 143 种期刊，刊载文献情况如表 1 所示。其中 Journal of Coastal Research，Journal of Maritime Archaeology 和 Marine Policy 近年来发文量最多，分别为 23 篇、20 篇、15 篇，占样本总量的 8.8803%,7.722% 和 5.7915%。而期刊杂志作为重要的学术交流信息平台，影响因子反映了其质量与影响力[4]。当前刊载“海洋文化”研究主题科研论文的高影响力专业期刊，相关期刊影响因子都很高，发文量前 15 位的期刊中，有两本因为统计原因还未公布影响因子，其余 13 本复合影响因子超过 2.0 的有 8 本；超过 1.0 的有 2 本；超过 3.0 的有三本，分别是 Ocean &Coastal Management，Marine Policy 以及 Quaternary Science Reviews，复合影响因子分别为 4.8、3.5 和 3.2, 说明当前国外学术主流期刊一直关注着该领域的研究。

此外，对发文机构进行统计 (见表 2), 在发文量最多的前 15 所机构中 , 海洋科学与环境研究高校占据了 3 所，环境与发展研究高校有 3 所，海洋考古学与文化遗产研究高校占据 6 所，地区与文化研究有 2 所高校，微生物与生物技术研究 1 所高校。

这些具有代表性的高校和研究机构在海洋文化研究中的共同参与，说明了海洋文化研究的重要性和广泛性。跨学科、多地域、多方法的研究使得海洋文化研究成为一个丰富且具有挑战性的领域，通过国际合作和科技创新，海洋文化研究将继续发展和深化，为全球海洋文化遗产的保护和传承做出重要贡献。

表 1 海洋文化研究样本文献期刊发文统计表

期刊	发文量	所占比例	影响因子	国家
Journal of Coastal Research	23	8.8803	N/A	美国
Journal of Maritime Archaeology	20	7.722	0.7	澳大利亚
Marine Policy	15	5.7915	3.5	英国
International Journal of Nautical Archaeology	13	5.0193	0.6	英国
International Journal of Maritime History	8	3.0888	0.2	加拿大
Frontiers in Marine Science	5	1.9305	2.8	瑞士
Maritime Studies	5	1.9305	2.2	荷兰
Gems& Gemology	4	1.5444	1.6	美国
Ocean&Coastal Management	4	1.5444	4.8	英国
American Antiquity	3	1.1583	2.7	美国
Environmental Science and Pollution Research	3	1.1583	N/A	德国
Heritage	3	1.1583	2	瑞士
Island Studies Journal	3	1.1583	1.7	加拿大
Quaternary Science Reviews	3	1.1583	3.2	英国
African Archaeological Review	2	0.7722	2	美国

表 2 样本文献中海洋文化研究活跃的机构名称

机构	国家	频次	比例
Ulster Univ, Sch Geog & Environm Sci, Coleraine	英国	5	0.8711
Int Inst Environm & Dev IIED, London, England.	英国	3	0.5226
Univ Southampton, Dept Archaeol, Southampton	英国	3	0.5226
Bulgarian Acad Sci, Stephan Angeloff Inst Microbiol,Lab Appl Biotechnol	保加利亚	2	0.3484
CNRS, Prehist & Technol, Paris	法国	2	0.3484
Guangxi Univ, Sch Marine Sci, Nanning 530004	中国	2	0.3484
Leiden Univ, Fac Archaeol, Leiden	荷兰	2	0.3484
Queens Univ Belfast, Sch Nat & Built Environm, Belfast	英国	2	0.3484
Swansea Univ, Swansea, W Glam	英国	2	0.3484
Tohoku Univ, Ctr Northeast Asian Studies, Sendai	日本	2	0.3484
UCL, Inst Archaeol, London	英国	2	0.3484
Univ Aveiro, Dept Econ Management Ind Engn & Tourism, GOVCOPP Res Unit Governance Competitiveness & Pub	葡萄牙	2	0.3484
Univ Brest, IFREMER, CNRS	法国	2	0.3484
Univ Dar Es Salaam, Dept Archaeol & Heritage Studies,Dar Es Salaam	坦桑尼亚	2	0.3484
Univ Highlands & Isl, West Highland Coll, Ctr Recreat & Tourism Res	英国	2	0.3484

2.1.3 主要研究学者分析

从作者合作关系时间演化图（图 2）和主要作者发文量（表 3），我们可以得知海洋文化研究的学者之间存在着良好的合作网络，特别是在特定的集群内频繁合作。在近十年间，各个研究领域的研究产出一直稳定，并且有所增加，例如海洋文化研究的重要中心英国南安普顿大学，以及发挥了重要作用的美国杰克逊维尔大学。在海洋文化研究领域有着重要贡献和潜在的影响力的 Blue, Lucy 和 Delgado, James P 这样的知名学者在发表量方面处于领先地位。

以上数据分析突显了海洋文化研究中的动态且合作的研究环境，领先机构和研究人员在推动该领域发展中发挥了重要作用。

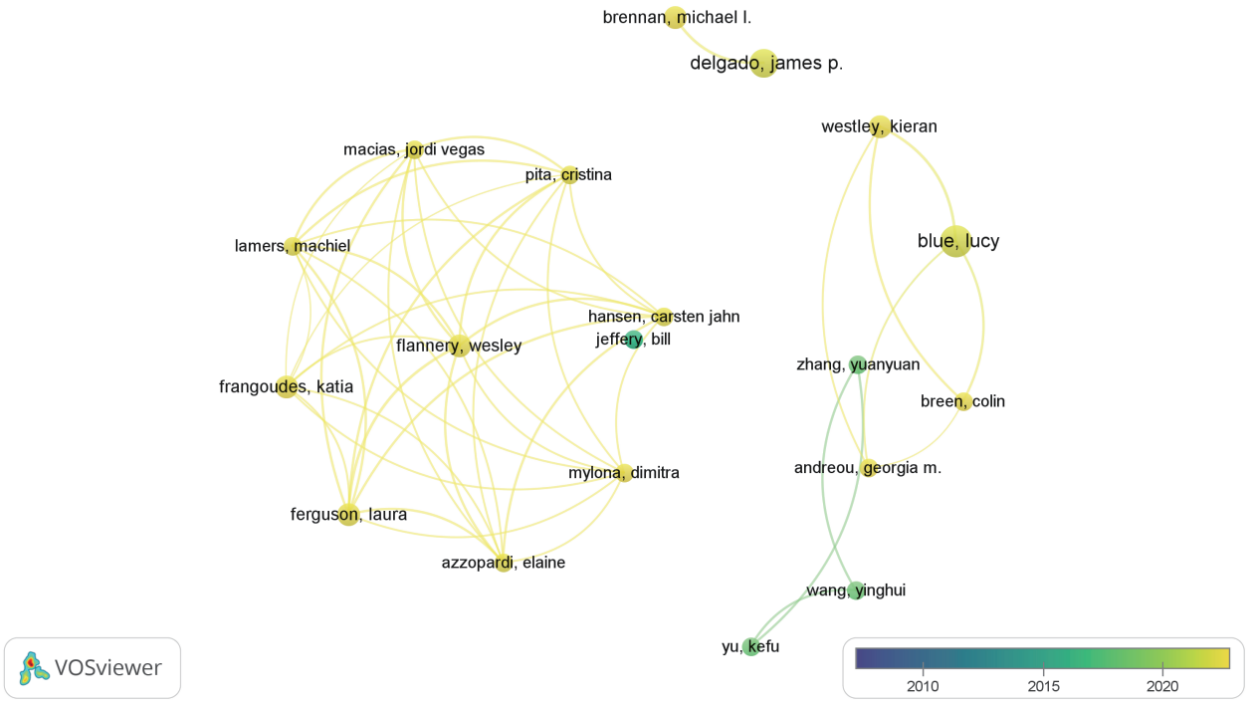


图 2 作者合作关系时间演化图

表 3 海洋文化研究主要作者发文量 (2007–2024)

顺序	发文量	作者	机构	国家
1	7	Blue, Lucy	Univ Southampton	UK
2	6	Delgado, James P.	Jacksonville Univ	USA
3	4	Brennan, Michael L.	Jacksonville Univ	USA
4	4	Ferguson, Laura	Queens Univ Belfast	UK
5	4	Flannery, Wesley	Queens Univ Belfast	UK
6	4	Frangoudes, Katia	Univ Brest	France
7	4	Westley, Kieran	Ulster Univ	UK
8	3	Andreou, Georgia M.	Univ Southampton	UK
9	3	Azzopardi, Elaine	Univ York	UK
10	3	Breen, Colin	Ulster Univ	UK

2.2 高频关键词分析

科学研究前沿代表了某一领域的研究热点、难点与发展趋势，这一热点主题可以通过关键词进行归纳分析[5]。笔者借助可视化软件 SATI 对样本文献中的出现频率排名前 15 名的关键词进行分析并生成了关键词频率时间序

列（图 3）。在图中，横轴表示年份，从 2007 年到 2024 年；纵轴表示关键词的出现频率 / 频次。这 15 个关键词用不同的颜色和线条来表示。

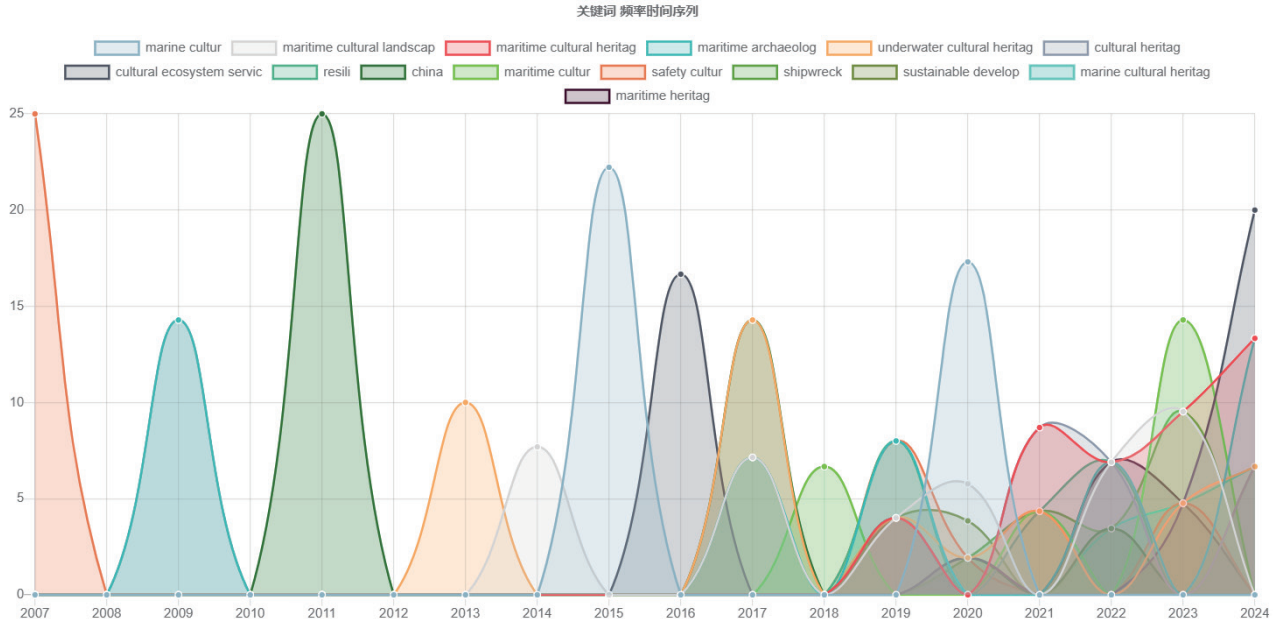


图 3 关键词频率时间序列

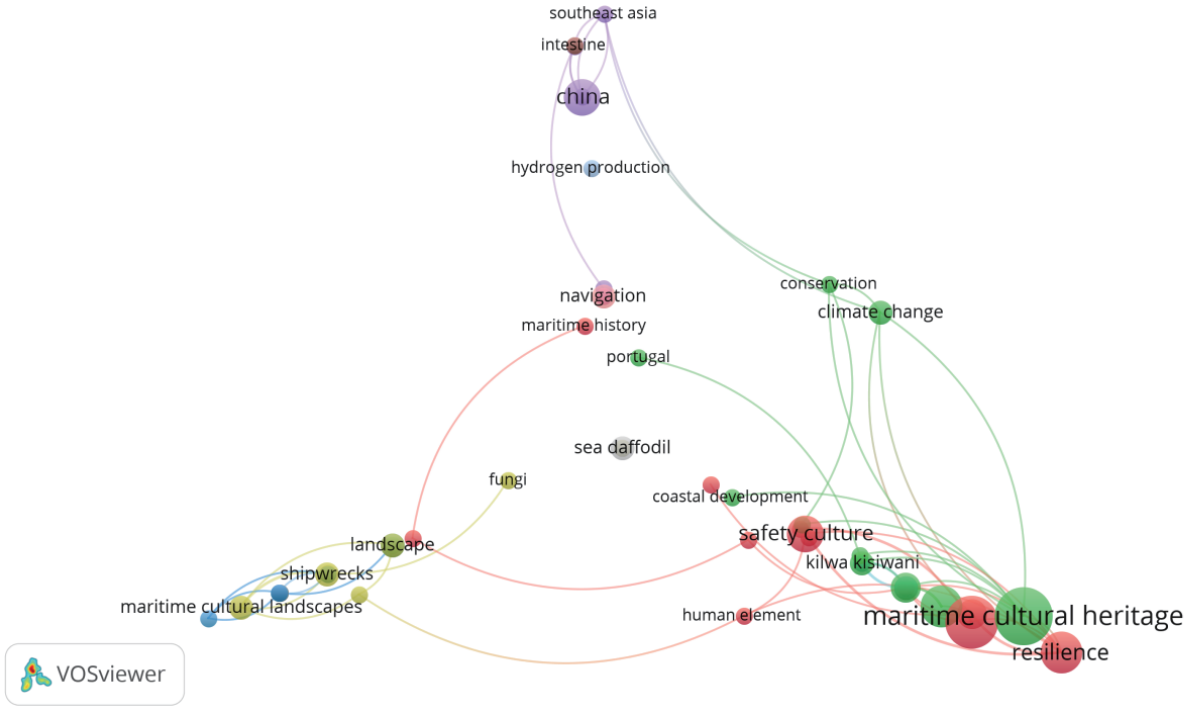


图 4 高频关键词可视化聚类图谱

从对两幅图中的关键词出现频率可以看出，关键词“China”（中国）一直是海洋文化的研究热点，高峰研究时段分别为 2010-2012 年，2016-2018 年，2019-2023 年，其中在 2010-2012 年出现频率五位 25 次。“Maritime Archaeology”（海洋考古学）的研究在 2008 年成为研究热点，在 2009 年达到研究高峰，2010 至 2016 之间没有研究成果出现，后续从 2017 年至今又成为研究热点后，今年的研究热度超过了 2008 年。同样“Underwater Cultural Heritage”（水下文化遗产），“Maritime Cultural Landscape”（海洋文化景观）”Cultural Ecosystem

Services”（文化生态系统服务），“Maritime Spatial Planning”（海洋空间规划）都是 2016 年至 2024 年的研究热点，目前研究热度最高的是“Cultural Ecosystem Services”（文化生态系统服务）。

从总体趋势上看，海洋文化早起的研究集中在海洋考古学，中期的研究热点较为分散，关键词没有明显的高峰，研究主题多样化。在近期，研究热点为转移到对文化生态系统服务，和海洋空间规划方面。

2.3 研究主题聚类分析

笔者通过 VOSviewer 软件得到关键词聚类图（图 2 高频关键词共现分析），259 份样本数据主要产生 5 个聚类，这 5 个聚类在一定程度上代表了当前海洋文化学科领域的基本研究内容。结合各聚类中的关键词并分析相关文献可知，目前海洋文化的研究集中在开发和应用新技术，提高海洋空间规划的有效性；塑造海事文化景观与历史，提供了对当代海事文化景观管理的指导；合理规划水下考古，保护和利用水下文化遗产，使其实现可持续发展；开发和推广可持续海洋水产养殖，保护蓝色经济；以及中国五个主要研究领域。

3 结论

3.1 海洋文化研究越来越受到重视

首先 , 从主题文献年度分布情况来看 ,2007 年至 2024 年的 SCI,SSCI 的海洋主题文化研究整体呈上升态势 , 尤其 2016 年后各个国家和机构的研究数量不升反降。其次 , 从期刊分布情况可以发现 , 海洋文化主题文献主要发表在海洋学、考古学、海洋政策、环境保护等相各类期刊上 , 涉及的期刊种类越来越多，文献的引用率增加，期刊的影响力较大。再次 , 从作者及机构分布情况来看 , 相关专家学者来自国外各大海洋高校和科研院所 , 特定集群范围内的学者和机构之间的互动和合作很紧密，并且在近几年非常活跃。这些都说明海洋文化研究的深度、广度、影响力都在逐年提升 , 需要引起相关中国海洋文化研究者的重视。

3.2 海洋文化研究需多学科互动和交流

目前对于海洋文化的研究显现于海洋科学、考古学、经济学、政治学等多学科领域 , 各学科间的研究缺乏互动交流。研究主题呈现多样化，但是过于分散，没有形成系统的研究体系，使研究缺乏连贯性，以至于无法形成统一的理论框架和指导原则。另外，海洋文化研究的广度和深度也因为跨学科合作和交流不足而受到了限制，尤其是需要多学科多视角的研究方面表现尤为明显。

3.3 海洋文化研究方法有待创新

目前海洋文化研究的方法定量研究不足，因海洋文化目前研究的跨学科和交叉领域的特点，单一的研究方法无法进行深入探究，影响研究成果影响力和实用性。目前的研究方法主要有历史文献法、考古法、社会学和人类学等研究方法；在未来的海洋文化研究英采取多学科、多方法的研究，在以上方法的基础上，结合数字化技术、气候变化研究，跨文化和跨学科合作等研究方法，以深入理解海洋文化的多样性和复杂性。

3.4 海洋文化的研究空白与研究趋势

未来的海洋文化研究空白首先是数字化和大数据在海洋文化研究中的应用还不够广泛 [5]，对海洋文化遗产在应对气候变化和促进可持续发展中的作用研究不足 , 特别是如何利用历史数据来理解和应对当前的环境挑战 [6]; 海洋教育和培训的内容尚未充分涵盖可持续发展和跨文化理解的必要技能，未来海洋专业人员在应对全球化和技术变化时准备不足 [7]。未来的研究趋势应是趋于多学科整合，采用先进的数字技术，更新海洋教育与培训，关注海洋生态与可持续性发展，并保护和推动蓝色经济的健康发展以填补目前的研究空白。

3.5 本研究的局限与展望

在文献年度分布情况来看，单单只以 WOS 数据库的核心论文作为数据样本，数量上颇显不足；在研究内容方面，虽然对每个主题聚类和关键词共现进行了数据可视化和分析阐述，但因为高频关键词较多，且存在不同时间段的交叉融合，对高频关键词的阶段性变化阐述不够系统；从研究的方法来看，本研究采用了

Vosviewer 结合 SATI 的文献数据可视化的方法来揭示研究的整体趋势和研究热点，但是未能深入探讨具体的实证案例和实践经验；从文献数据的来源方面，因为海洋文化研究存在的领域极其广泛且分散，可能存在数据收集不完整的情况，且数据中没有收集中国知网 CNKI 的文献，对于我们国内的海洋文化研究没有进行分析，延吉不够全面，这些不足都会在后续的研究中予以改正和加强。

参考文献

[1] 李德元. 海疆迷失 : 对中国传统海疆观念的反思［J］. 厦门大学学报 (哲学社会科学版)，2006(2):57-64.

[2] 刘金立，陈新军. 世界大洋性鱿钓渔业研究评述［J］. 上海海洋大学学报，2019，28(3):331-343.

[3] 陈莹，徐鑫. 改革开放四十年我国编辑出版学教育研究的 理论分析——基于中国学术期刊 (网络版) 全文数据库 (1978—2018) 的文献统计 [J]. 现代出版，2018(4):54- 62.

[4] 史庆华 . 影响因子评价专业学术期刊的科学性与局限性 [J]. 现代情报 ,2006(1):35-36,40.

[5] 陈仕吉 . 科学研究前沿探测方法综述 [. 现代图书情报技术 ,2009(9):28-33.

[6] Claramunt, C., Ray, C., Camossi, E., Jousselme, A., Hadzagic, M., Andrienko, G., Andrienko, N., Theodoridis, Y., Vouros, G., & Salmon,L.(2017).Maritime data integration and analysis: recent progress and research challenges.,192-197. https://doi.org/10.5441/002/edbt.2017.18 .

[7] Wright, J. (2016). Maritime Archaeology and Climate Change: An Invitation. Journal of Maritime Archaeology, 11, 255-270. https://doi.org/10.1007/S11457-016-9164-5 .

[8] Simanjuntak, M., Zuriyati, Z., Utami, S., Rahmat, A., & Setiadi, S. (2023). Fostering Intercultural Understanding and Environmental Consciousness in Maritime Education. BIO Web of Conferences. https://doi.org/10.1051/bioconf/20237906004.

[9] Li, T., Chen, Q., Xi, Y., & Lau, Y. (2023). A 40-Year Bibliometric Analysis of Maritime English Research: Insights and Implications. Sustainability. https://doi.org/10.3390/su15054348.

[10] Hasanspahi´c, N.; Vuji˘ci´c, S.; Fran˘ci´c, V.; ˘Campara, L. The role of the human factor in marine accidents. J. Mar. Sci. Eng. 2021, 9, 261.

作者简介：

张金艳，江苏海事职业技术学院讲师，专业领域：英语教育，（E-mail）yuyan1224@126.com，025-86176224，18551851609

基于智能视频监控的船载危险货物安全监管

彭树林　薛建军　陈　诚　孙　文

（南通海事局，江苏南通　215600）

摘 要：2023 年，南通海事局积极推动辖区载运危险货物船舶和危化品码头安装智能视频监控系统，探索运用信息化手段防范化解船舶载运散装液体危险货物和装卸作业各环节的风险。以南通港为例，介绍智能视频监控的推广及使用情况，总结基于智能视频监控的船载危险货物安全监管特色做法和新的监管模式，针对存在的问题提出改进建议，以期为进一步加强船载危险货物安全监管提供参考。

关键词：船载危险货物；智能视频监控；风险识别

0　引　言

近年来，随着石化、能源等产业的飞速发展，通过长江干线运输的化学品、油品等危险货物量也不断增加。江苏省 90% 的石化产业分布在沿江地区，该地区已成为江苏省化工产业发展的核心区，每天约有 500 余艘危险货物船舶（过境船舶除外）在长江江苏段活动。一旦发生危险品运输事故，轻则影响生产、造成一定的经济损失，重则造成人员伤亡、破坏生态环境。

然而，当前船载危险货物安全监管信息化发展仍然相对滞后，仍然以传统的“人防”手段为主，主要表现在以下三方面：一是信息化管理水平参差不齐，各港口码头、航运公司岸基监控不足，岸基监控运行空转、流于形式的现象普遍存在；二是风险防控方面的科技手段欠缺，大多码头安全风险评估仍然依赖传统的经验判断和主观评估，缺乏科学性和精确性；三是岸基监控系统建设滞后，视频监控设备更新换代不及时，信息采集、处理效率低，缺乏完整的系统架构和统一的数据标准，监管机构难以统一集中监管。在此背景下，交通运输部长江航务管理局印发了《长江干线船舶运输危化品全过程智慧监管能力提升行动方案》，明确提出 2023 年散装液体危险货物航运企业船岸智能视频监控系统覆盖率不低于 30%，江苏段危化品港口企业码头智能监控系统覆盖率不低于 30% 的工作目标。

1　智能视频监控系统及其在南通港的应用

1.1　系统概况

智能视频监控系统是指利用计算机视觉技术对船舶运营期间拍摄的船员活动视频信号进行处理、分析和理解，在不需要人为干预的情况下，通过对序列图像自动分析对监控场景中的船员活动进行定位、识别和跟踪，并在此基础上分析和判断船员的行为，在异常情况发生时及时发出警报或提供有用信息，由视频监控设备、智能视频监控设备和应用服务器组成的系统。该系统在船载危险货物监管领域主要用户为危化品码头及航运公司。告警大屏如图 1 所示。



图 1　告警大屏

1.2　系统主要功能

（1）实时监控

系统重点监控船岸界面、船舶驾驶台、货舱甲板面、货控室、机舱等关键位置，岸基可实时查看监控区域影像，具备视频数据存储及历史图像回访等功能。

（2）不安全行为识别与告警

利用人工智能深度学习技术，对船舶及码头各工作场景进行动态检测，自动识别船舶航行、作业与停泊过程中人员或者机械违反相关安全规范规定的不安全行为或风险，标识并截取影像数据，发送告警信息。

根据用户类型，目前船舶告警场景分为常态监管、船舶驾驶室、机舱、集控室、甲板 5 类，主要包括吸烟、明火、无工作人员值班、长时间玩手机、人员久坐、疲劳驾驶、人员倒地、未定期巡查、未穿工作服或救生衣、未戴安全帽、违规使用手机、舱盖打开、管汇区消防器材未布设、船员落实、上高作业、货物溢漏等。码头告警场景分为常态监管、码头、装卸作业三部分，重点包括吸烟、明火、未定期巡查、未戴安全帽、吸烟、人员非法闯入、无水手瞭望、未穿救生衣、作业时未放置消防器材、船岸通道未安全布设等。

（3）船舶定位

实时定位船舶位置，查询船舶历史轨迹、平均航速和航行时间。

（4）统计分析

自动统计分析各工作场景及区域的历史告警信息，可对告警处理状态、告警场景分布、告警类型、告警频率、确警和处置时效进行统计分析，指导企业发现管理短板，提升岸基监控质量。

1.3　智能视频监控在南通港的应用

南通港区登记散装液体危险货物船舶以供油船为主，截至 2023 年 8 月，南通港区 32 家供油单位，88 艘供油船以及 13 家散装液体危险货物码头已全部安装智能视频监控系统，提前完成了《长江干线船舶运输危化品全过程智慧监管能力提升行动方案》2023 年工作目标。预计 2023 年底实现散装液体危险货物码头和航运企业智能视频监控 100% 全覆盖。

2　基于智能视频监控的船载危险货物安全监管

2.1　搭建集中管理平台

如何掌握船舶动态是各危化品航运单位普遍关心的问题，虽然此前各危化品航运公司已普遍安装了视频监控，但视频监控类型不一，覆盖区域也难以保证，部分公司甚至只是应对上级主管机关要求而安装，视频监控未实际发挥作用。

南通海事局联合系统开发设计单位建立了南通港区智能视频监控管理平台“巡查卫士”，并为码头、航运公司等用户以及海事主管部门开通了账号。在企业端，码头和航运公司可在监控中心实时查看智能视频监控覆盖区域影像，通过设置告警模型对不安全行为进行智能识别并告警，岸基人员及时处置反馈。海事监管端，同步对接各码头和公司监控视频，实时查看告警处置情况。平台兼具统计分析功能，可按告警等级或类型对单位时间内告警及其处置情况进行统计分析，帮助主管单位和企业发现船载危险货物运输、装卸过程中存在的风险隐患和管理短板，结合原因分析提出针对性的建议。

智能视频监控的推广统一了视频监控要求，明确视频监控区域应覆盖码头前沿、驾驶室、货控室、机舱、管汇区域等关键位置。同时该系统具备视频资料在线传输岸基及回放功能，岸基在实时掌握危化品码头及船舶动态的同时，也可随时追溯人员不安全行为，便于公司评估船舶状况和工作人员动态，大大提升了对码头和船舶的调度管理工作效率。从主管机关而言，该系统的使用将对船舶的监控方式由传统的 AIS 船位监控拓展到对各个船舶具体区域的实时画面监控，监控的内容更广、方式更具象，进一步增强了主管机关的管控能力。

2.2 创新船载危险货物监管新模式

2.2.1 推动船载危险货物监管由人防向智防转变

智能视频监控的出现推动船载危险货物监管排查由传统人防向智防转变。之前，航运公司对船舶风险的识别主要依据 ISM 规则，由岸基远程监控结合每季度现场登轮检查开展。在航运公司现场检查的基础上，辅以智能视频监控系统智能识别，使风险识别方式更加系统和立体，增强了不安全行为的防控和纠正能力。同时主管机关对航运公司主体责任的检查也由过去的纸质台账向系统抽查延伸，对解决公司体系管理和台账“两张皮”的现象有重要的促进作用，有利于主管机关掌握航运公司体系运行实际。

危化品船舶与码头均可以实现基于现有监控系统的接入，通过实时流抓拍并录制不安全行为。该功能推动企业排查风险由低效的人为排查转变为系统自动排查，在监控效率和监控覆盖率上实现了双提升。从南通海事局体系审核发现，南通港区供油单位的海务和机务在开展岸基监控时，往往存在监控质量低、部分显性缺陷未及时发现等共性问题。智能视频监控在一定程度上承担了岸基监控功能，大大有助于企业及时发现风险隐患和管理上的问题短板，及时消除不安全因素，大大减少险情事故发生概率。

2.2.2 建立信用管理机制

建立“系统提醒 + 海事通报 + 综合惩戒”的信用管理机制，公司可在巡查卫士的告警管理模块添加告警处置和超时确警联系人，识别到不安全行为后通过预设短信或邮箱提醒联系人及时确警，在限定时间内未进行确警的，向公司管理层发送提醒短信，督促其及时处置告警信息。南通海事局每月通报预警处置结果，对使用情况不佳或处置率不达标的予以首次警告，对拒不整改的，采取限制作业等熔断措施。告警分级推荐设置见表 1。

表 1 告警分级推荐设置

设置项目	一级告警	二级告警	三级告警	四级告警
确警时限	0.5 小时	1 小时	2 小时	4 小时
处置时限	1 小时	1 小时	2 小时	2 小时
超时提醒联络人	主要负责人	指定人员或码头安全生产部门主管	海务 / 机务或相关负责人	海务 / 机务或相关负责人
告警提醒联络人	岸基值班人员	岸基值班人员	岸基值班人员	岸基值班人员

2.2.3 督促管理对象完善管理制度

制定管理运行手册，分别以码头和航运公司为对象，从制度建立、人员管理、设备维护、功能实现、告警处置 5 方面明确运行管理要求，指导帮助企业建立健全岸基智能监控方面管理制度，合理划分告警模型等级，对不安全行为实行长效预防机制。

南通海事局推广智能视频监控的目的主要即是指导企业落实安全生产主体责任。智能视频监控通过将安全生产责要求的各类风险行为实时上报，以系统规范化的流程推进各级责任主体履行管理责任，使企业全面掌握

公司及其所属船舶安全管理状况，迅速整改问题隐患，将事故消灭在萌芽之中。智能视频监控具备丰富的数据统计功能，实现以不同等级、不同维度的告警统计分析。大数据分析的支持可帮助企业从整体上对公司安全管理状况进行评估，为企业进一步完善安全管理制度提供依据，对重复高频次出现的问题采取针对性举措，有利于本质安全水平的提升。目前，南通港区 32 家供油单位均已将智能视频监控纳入公司管理，并适情将智能视频监控发现问题纳入不符合以进一步优化管理制度。

2.2.4 提升使用效果

制定操作使用手册，随时随地以在线指导的方式为用户提供操作指导。采用线上集中培训和线下针对性培训相结合的方式，对航运公司和码头用户开展系统培训，确保有关人员熟练操作相关功能。由南通海事局、危化品码头、系统开发单位三方开展后评估工作，系统开发单位至码头现场逐项测试告警成功率，及时调试相关告警参数，确保有关不安全行为及时发出告警，消除风险隐患。

2.3 监管效果

系统自 2023 年 5 月上线以来，共产生预警 10 973 条，误报警 1 993 条，未确警 58 条，纠正 6 928 个不安全行为，预警准确率为 78%，预警处置率 99%。

通过智能识别与告警通知，帮助企业针对具体事件进行处理跟进，降低岸基监控的人员成本投入。该设备三年约 18 000 元，航运体系公司通常负责监控的海务或指定人员每月工资普遍大于 12 000 元，与人力成本相比，智能视频监控代替人员远程监控在经济上更有优势。同时智能视频监控可优化企业行政资源配布，防止因为人力资源紧张、人员疲劳等问题造成岸基监控流于形式，促进管理效率提升，从长远来看节省企业在安全生产投入的必要成本。[1] 根据危化品码头反映，智能视频监控的使用可有效节省对现场作业监控的人员投入，将人员分散于各个泊位监控转化为监控室集中处置预警风险，推动码头管理由粗放的分散式管理改为高效的集约式管理。

3 智能视频监控使用存在的问题

3.1 视频断流问题

南通海事局日常检查发现，部分码头和供油单位智能视频监控存在短暂无法读取监控画面的视频断流问题，经排查断流问题的发生一是系单位原有的视频监控设备除对接智能视频监控外还同时对接海关等其他主管部门的多个系统，存在视频画面被短暂截流无法显示的客观情况；二是部分摄像头品牌如海康等未对系统开发单位授予足够权限，视频信号传输存在延迟。

3.2 误报警偏高

早期安装智能视频监控的单位普遍反映误报警偏高，影响了其他用户安装智能视频监控的积极性。尽管系统开发单位持续优化模型算法，但因不同环境及具体模型算法限制，误报警问题始终存在。且智能视频监控需要一个训练过程，如果使用单位未建立针对误报警的再训练再优化制度，仅将其作为视频监控功能使用，误报警率可能长期保持高位。

3.3 部分告警实用性不强

南通海事局现场检查发现，尽管智能视频监控告警模型覆盖种类众多，但告警触发仍集中在救生衣和安全帽穿戴、违规使用手机、明烟明火等几种不安全行为。导致该原因一是部分告警触发条件较为苛刻，如闲置输液软管未密封，该模型需摄像头高清晰度对准货物管线，但码头安装的摄像头并不具备此条件；二是部分告警需要码头结合实际对参数进行调整才能有效触发，如人员闯入需划定警戒区，未定期巡查需提前设定巡查周期等。

3.4 告警处置不及时

智能视频监控在南通港区使用初期，南通港区预警处置率仅为 40%，导致该问题原因一是部分单位对智能视频监控不了解，仅当作一项任务进行安装，未打算长期使用；二是单位未建立相关使用管理制度，未明确处

置告警的相关责任人员，智能视频监控监控流于形式；三是系统安装初期未制定完善的操作使用手册，也未开展相应培训，智能视频监控使用人员对如何处置告警缺乏经验，不熟悉系统操作。

3.5 部分公司未建立相关管理制度

据了解，智能视频监控已在江苏各地推广，但各公司对智能视频监控的重视程度参差不齐，部分公司并未建立智能视频监控相关管理制度，仅将其作为主管机关的要求进行安装，未实际用智能视频监控来提升安全管理水平，智能视频监控的风险防控起不到实际作用。

4 改进建议

4.1 进一步加强系统推广应用

一是做好宣传，让更多的航运公司和载运危险货物船舶安装智能视频监控系统。二是系统开发单位持续完善系统功能。三是使用单位应将智能视频监控使用纳入体系中岸基监控相关要求，建立相关管理制度，明确处置流程，对屡次出现的问题要建立长效预防机制，以智能视频监控倒逼公司体系完善。四是明确岗位职责，将智能视频监控的使用落实到具体部门和个人，对不安全行为应建立相应的奖惩机制，建议效仿南通港区智能视频监控，通过设置告警联系人和超时处置联系人，确保有关人员收到相关告警信息，未及时处置时公司高层予以足够重视。五是建议系统开发单位应效仿南通港区目前做法采取统一组织网络培训或线下开展实地指导，确保码头熟悉告警处置操作。

4.2 建立后评估制度

建议效仿长江南通段危化品码头做法，要求各使用单位在使用一个月后组织系统开发单位对智能视频监控开展后评估验收，模拟不安全行为逐项测试告警，对无法准确告警的由系统开发单位现场调整模型参数设置，对不能现场整改的，后续研究后对用户予以指导。用户应结合现场实测情况，合理调整告警等级及告警启停条件，及时向系统反馈误报警信息，对智能视频监控进行再训练，不断完善系统功能，提升告警成功率。

4.3 构建考评体系

主管机关应建立风险考评体系，对各单位智能视频监控使用成效进行评估，由定性考评向定量考评拓展，推动管理精细化。以船舶入网率、船舶在线率、数据合格率、告警处置及时率和告警处置有效率为评价指标，采用评分机制方式量化评估风险，以考评分数作为信用分级管理依据。

5 结 语

智能视频监控系统目前仍处于探索应用阶段，长江南通段的先行先试为该系统在船载危险货物安全监管领域的推广普及提供了借鉴。从目前该系统在长江南通段的推广成果来看，该系统对增强企业岸基监控能力，提升安全本质水平，推动船载危险货物安全风险从“人防”向“智防”转变有着重要意义，有着良好的推广应用前景。

参考文献

[1] 周剑敏 , 王捷 . 基于 AIS 数据的智能船舶动态视频监控系统设计 [J]. 上海海事大学学报，2009(4）.

作者简介：
彭树林，南通海事局，局长
薛建军，南通海事局，副局长
陈诚，南通海事局危管防污处，副处长
孙文，南通海事局危管防污处，四级主办

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）

岗位级别	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
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，结果见表3。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，硕士，船长，研究方向：船舶安全保障、船员心理学等，（E-mail）MaoXD@nbmc.com.cn

安天圣，硕士，研究方向：船舶安全保障等，（E-mail）ants@nbmc.com.cn

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

中图分类号：U663

文献标识码：A

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 kPa）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 [1]，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 [2-3]。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[4] 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 [5] 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 [6] 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 [7] 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 [8]，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。

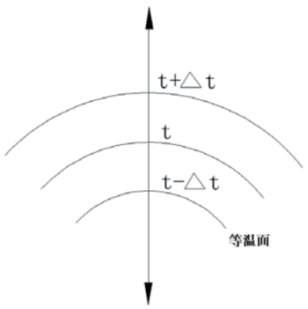


图 1 温度梯度矢量示意图

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

$$\lambda = \frac{dQ}{dt} \Big/ \frac{\partial T}{\partial n}\frac{1}{S} \tag{1-8}$$

由此可知热通量 q 的大小为：

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \tag{1-9}$$

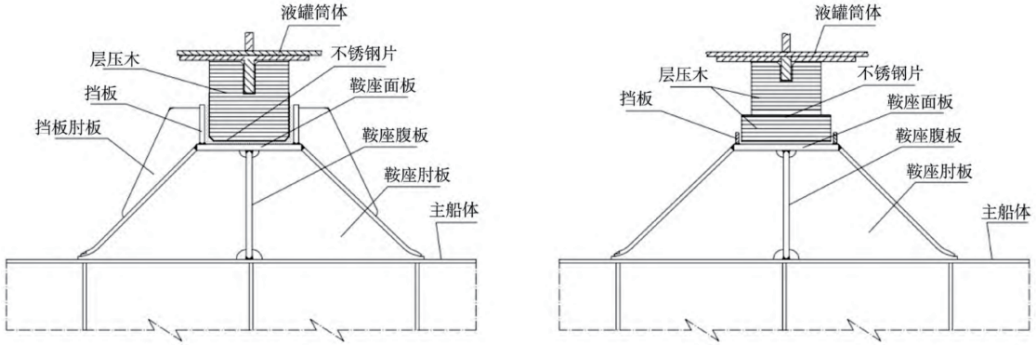
热通量在 x,y,z 轴上的分量分别为：

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \tag{1-10}$$

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

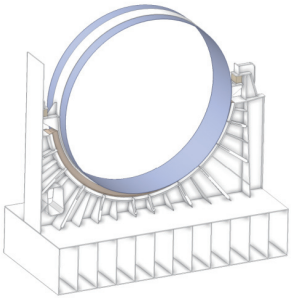


图 3　滑动端鞍座局部模型

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。

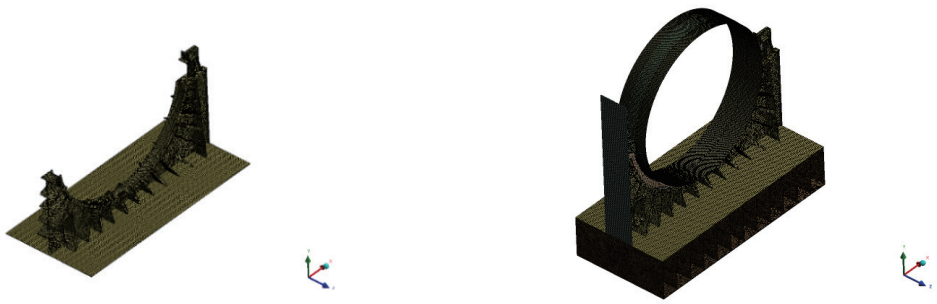


图 4 LNG 燃料罐有限元模型及局部放大图

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。各材料的热学性能见表 1。

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。

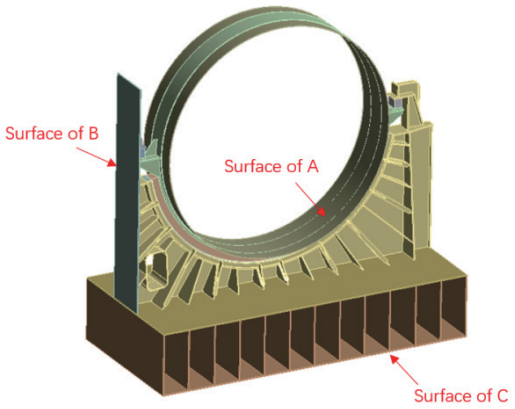


图 5　温度边界条件

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。

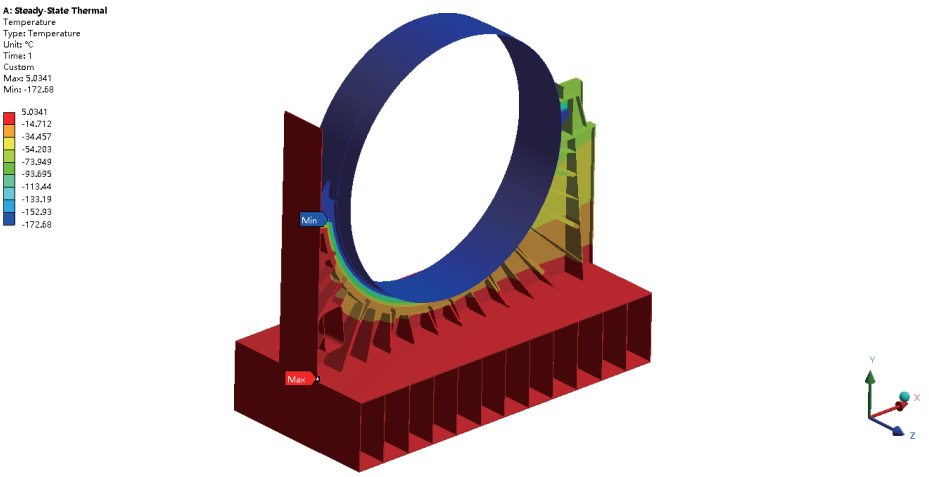


图 6　整体模型温度分布

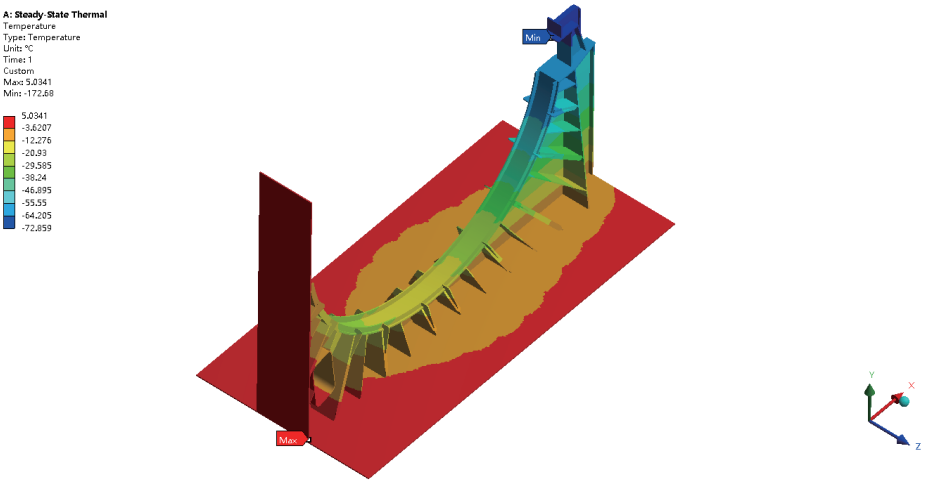


图 7　鞍座温度分布

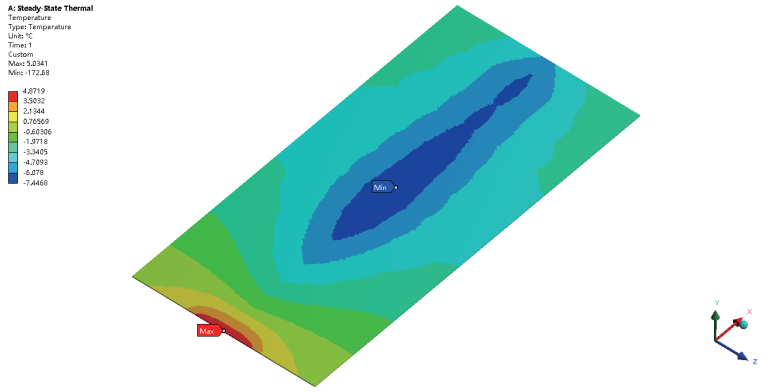


图 8　鞍座底板温度分布

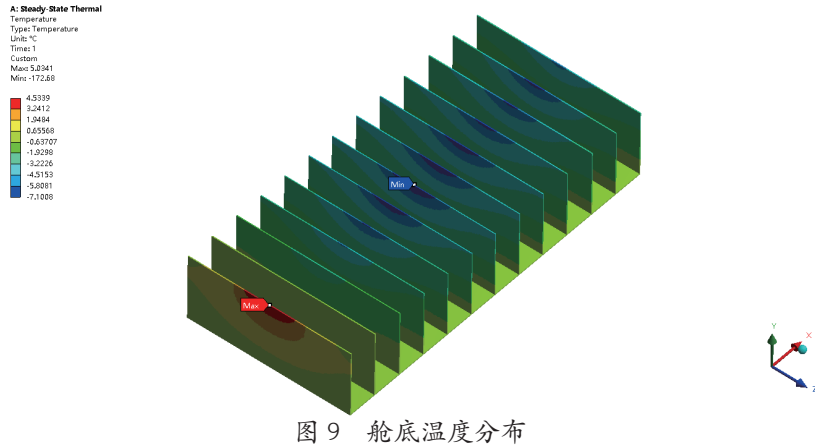


图 9　舱底温度分布



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见表 2。

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 ,2022,3 2(01):38-41+1-2.DOI:10.15910/j.cnki.1007-6247.2022.01.007.

作者简介：

温小飞，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，（E-mail）wenxiaofei@zjou.edu.cn，13735018281

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，浙江杭州　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 NO_x 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

文献标识码：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，实验台架如图 1 所示。

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	± 0.1 × 10^{-3}
HORIBA　MEXA-1600DS 排气分析仪	NO_x 体积分数	0~5000 × 10-6	± 10 × 10^{-6}
	CO_2 体积分数	0~16000 × 10-6	± 50 × 10^{-6}

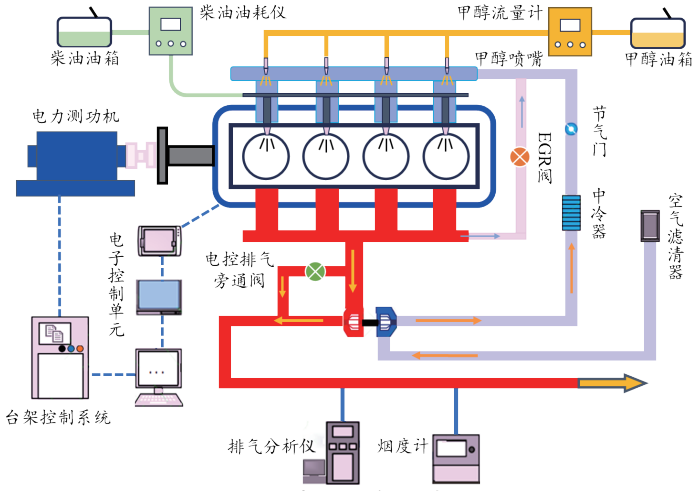


图 1　实验台架示意图

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。

$$m_{dual} = m_D + \frac{h_M}{h_D} m_M \tag{1}$$

$$\gamma_M = \frac{m_M h_M}{m_M h_M + m_D h_D} \times 100\% \tag{2}$$

$$I_{BSFC} = m_{dual} / P_e \tag{3}$$

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。

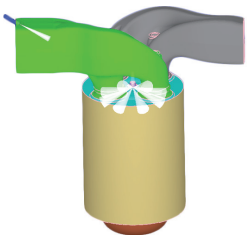


图 2　进排气歧管和燃烧室几何模型

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。

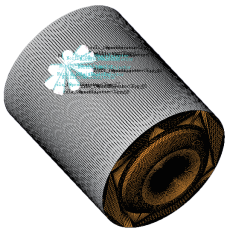
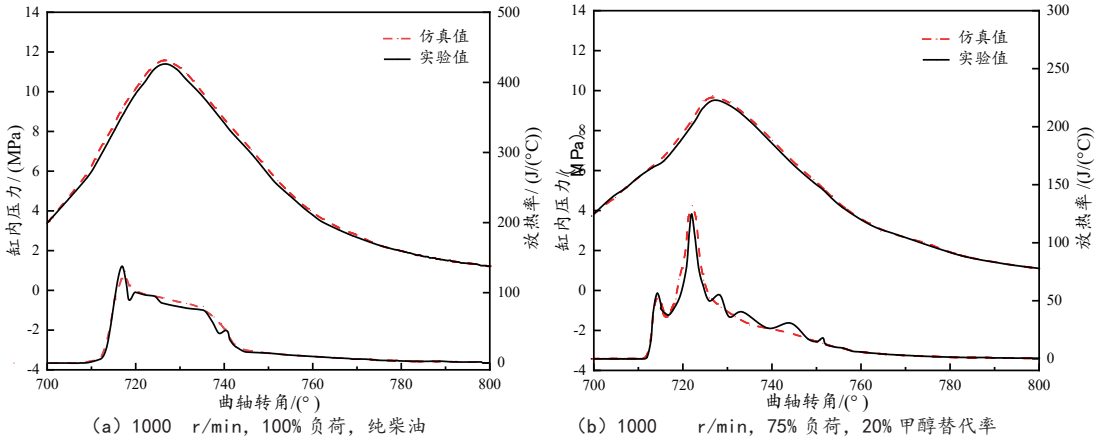


图 3　燃烧室与喷嘴网格模型

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。



（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

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。

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°
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。

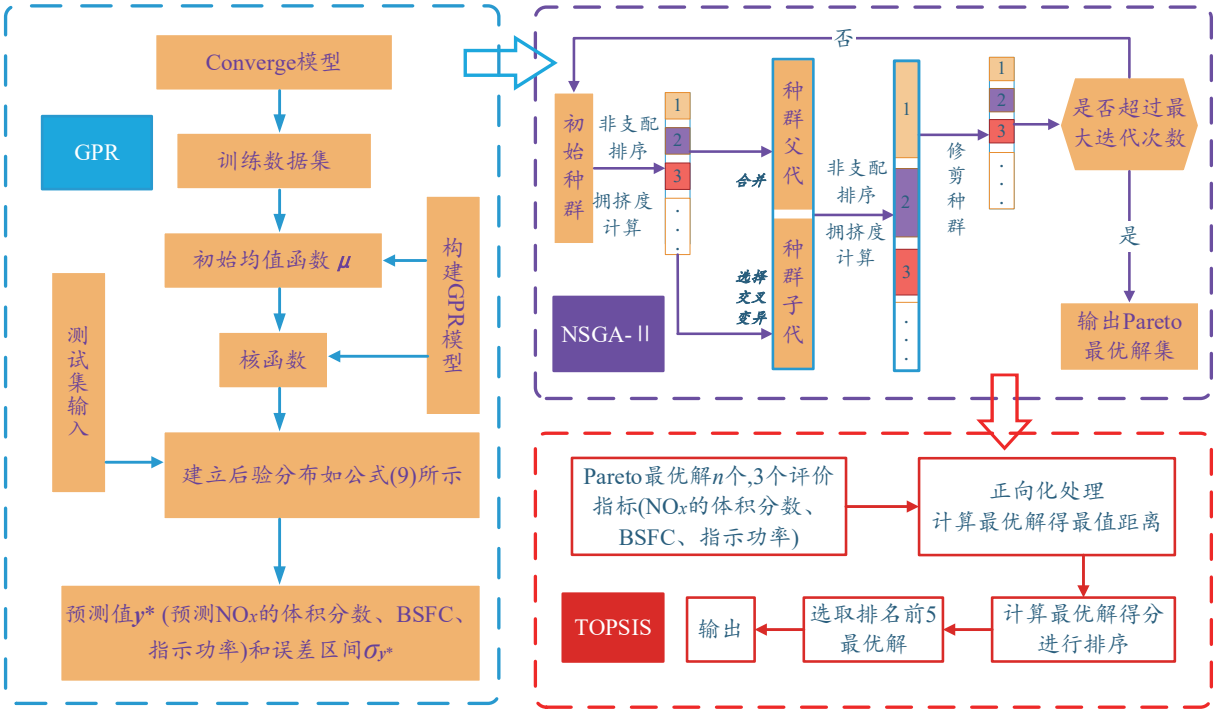


图 5　DMCC 发动机整机性能优化流程图

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 $\boldsymbol{\sigma}_{y^*}$。GPR 模型由均值函数 $\mu(\boldsymbol{x})$ 和协方差函数 (核函数)$\ominus k(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}')$ 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：

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

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

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

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：

$$p(f \mid \boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) \propto p(\boldsymbol{y} \mid \boldsymbol{x}, f)\, p(f) \tag{9}$$

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：$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}^*,\ominus\boldsymbol{x})=\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x},\ominus\boldsymbol{x}^*)$ 为预测集的协方差矩阵；$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}^*,\ominus\boldsymbol{x}^*)$ 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：

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

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

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。

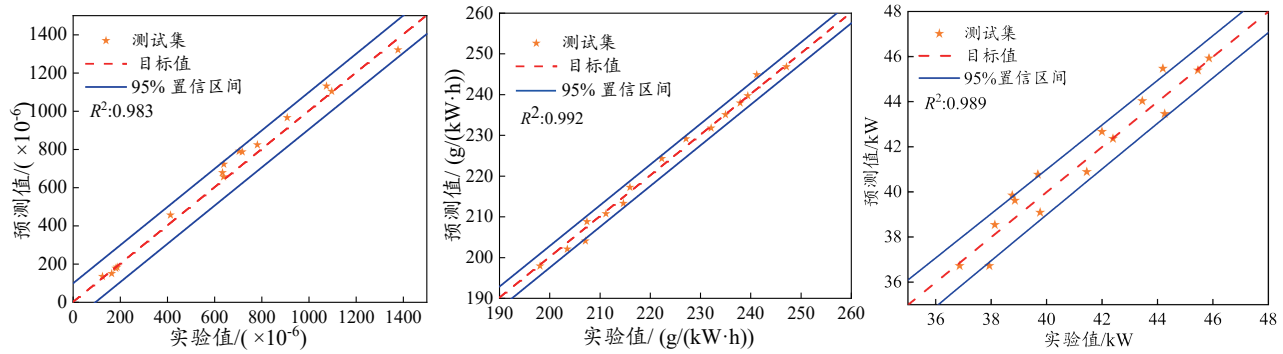
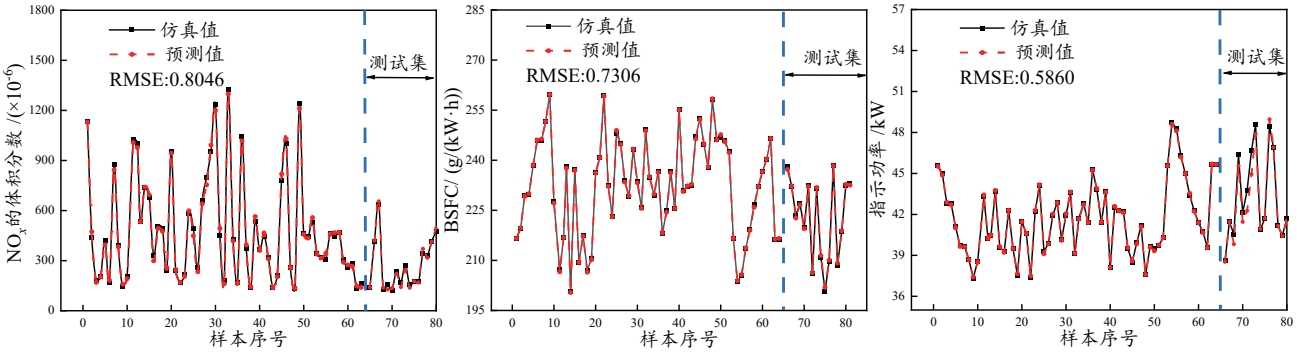


图 6　NO_x 的体积分数、BSFC 和指示功率预测模型一致性验证



(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：

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

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

$$P_1 \leqslant 1.01 P_{0.75} \tag{15}$$

式中：X=(甲醇替代率，EGR 率，进气压力，喷油提前角)；P_1 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。

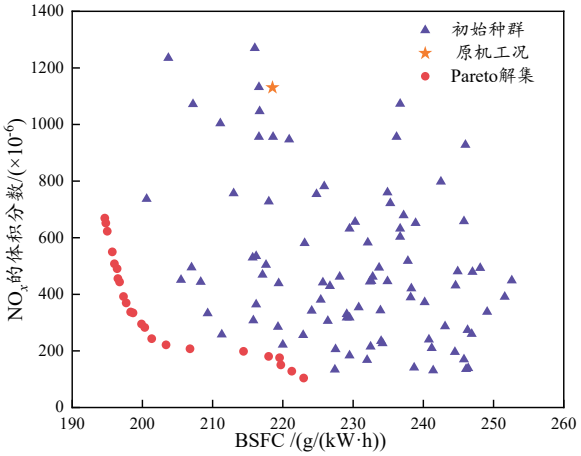


图 8　Pareto 最优解集和初始种群对比

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。

$$\boldsymbol{Z}^+=(I_{NO_x}^{\min}, I_{BSFC}^{\min}, P_I^{\max}) \tag{16}$$

$$\boldsymbol{Z}^-=(I_{NO_x}^{\max}, I_{BSFC}^{\max}, P_I^{\min}) \tag{17}$$

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

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

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

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

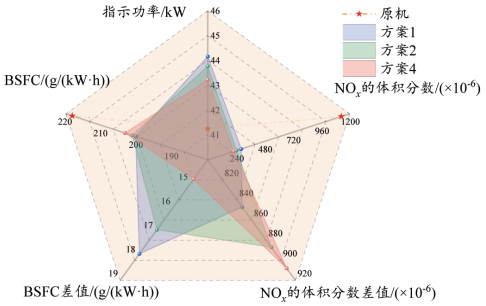


图 9　不同方案发动机性能比较

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。

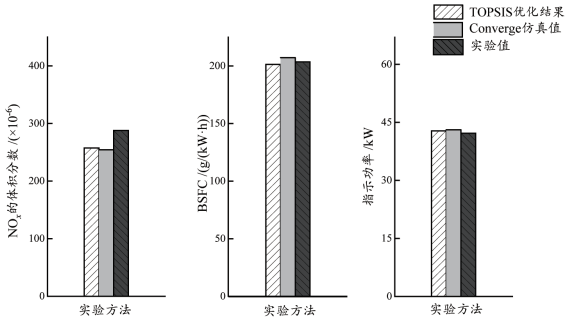


图 10　TOPSIS 优化结果、Converge 仿真值和实验值对比图

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/(kWh)，已完全符合 IMO 规定的 Tier- Ⅱ 排放限值 8.18 g/(kWh)，与 Tier- Ⅲ 的排放限值 2.08 g/(kWh) 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, CH2O, and CH3OH 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.

基金项目：福建省自然科学基金资助项目（2022J01812）

作者简介：

蒋更红，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

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。通过不同航线的安全风险评价分析，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

1　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特色水上旅游产品格局初步形成，钱塘江夜游等精品航线均成为杭州航区水上旅游新的增长点[2]。同时也存在诸多的安全风险和限制条件。为保证客运航线夜航有序运行，对不同航线的各因素安全风险进行分析，并进行通航与安全管理研究，有助于提高安全运行效果。

2　夜航客运航线概述

截至2024年6月，杭州航区内开展客运航线夜航活动涵盖天然渠化航道（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：

2.1　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，杭州航区夜航客运船舶动力类型分布情况见表1。

2.2　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%

2.3　船舶使用年限

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。

2.4 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%。

3 夜间通航环境分析

夜间通航环境主要是对夜航活动所涉及的桥梁、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。

3.1 桥梁

杭州航区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。 杭州航区夜航活动涉及桥梁数量见表 2。

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。

3.2 两岸灯光

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。

3.3 助导航设施

夜游航线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），但部分桥梁标志标牌设置存在错误。

3.4 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。

3.5 船舶交通流量

京杭运河船舶流量为 759 艘 / 天；钱塘江 217 艘 / 天。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。

4 客运航线夜航活动风险评价

4.1 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 [3]。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。



客运航线安全风险评价指标体系

4.2 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。

4.3 客运航线夜航安全风险评价

根据上述对杭州航区客运航线夜航活动的安全风险评估整个杭州航区客运航线夜航活动总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风险进行高低排序，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 存在问题

客运航线和客运船舶在实际运营过程中，主要在夜间通航自然环境、夜间船舶交通、VHF 通信和船舶条件等方面存在问题，具体如下：

5.1 夜间通航自然环境问题

夜间，客运航线沿线桥梁通航孔上方设有景观灯光，水面反光严重，部分桥梁标志标牌设置不全或不正确，对夜航客运船舶驾驶员对桥涵标和过往船舶的辨识造成困难。湘湖水域越王桥等三座桥梁通航孔净空尺度较小，富余宽度小，与航道存在较大的夹角，转向过桥时易碰撞桥梁。

钱塘江涨落潮、潮涌、洪水和台风易产生明显的水流流速和流向的变化，对夜航客运船舶存在较大的影响。当新安江大坝发电期间，上游航道流速较快。小型夜航客运船舶设备简陋，在危急情况下难以应对与自救。新安江在特定天气条件下江面易形成蒸发雾，千岛湖突发性强对流天气对夜航客运船舶带来较大安全隐患。

5.2 夜间船舶交通问题

钱塘江过往船舶受过闸调度和潮汐的双重影响，主航道船舶交通流具有时间集中、船舶密度大的规律性。受限于西兴大桥下游水域可航水域的限制，客运夜航船舶须在航道内完成掉头作业，与进出闸船舶存在碰撞危险。钱塘江西兴大桥将拆除重建，建设期间新增的客运轮渡将会对客运夜航船舶和主航道航行船舶的通航安全带来重大影响。京杭运河航道较狭窄，船舶流量大，航道弯曲半径小，夜航客运船舶与过往船舶碰撞概率较高。

5.3 VHF 通信和船舶条件问题

部分船舶未按照规定配备船载 VHF 设备，少数船舶未按规定值守，客运夜航船舶与过往货船之间避让沟通不畅，容易引发船舶碰撞等事故风险。

部分夜航客运船舶驾驶台与客舱未隔离，舱内灯光影响船舶驾驶员安全驾驶。同时部分夜航客运船舶设备老旧，出现舵机失灵等故障，影响航行安全。夜航客运船舶驾驶台仪器设备屏幕和船艄外侧景观灯过亮，影响船舶驾驶员视线。部分夜航客运船舶景观灯（红色）及带状（黄色或彩色）灯带与左右舷灯冲突，影响舷灯效能，易出现误判，存在船舶碰撞风险。

6 安全对策

6.1 针对夜间通航和自然环境问题。一是夜航客运船舶在横越、掉头、靠离泊前应主动向途径船舶通报动态并主动避让顺航道行驶船舶。二是钱塘江夜航客运船舶尽量选择在观光区、码头前沿水域和开阔水域掉头；若掉头区水深不足时，夜航客运船舶与航道内在航船舶协调一致的前提下，可以占用航道水域掉头。三是复核白沙大桥等桥梁标志设置，在湘湖越王桥上下游合适位置设置水上桥区标，引导船舶及时调准船位及航向，慢速安全通过桥区；四是桥梁运维单位应调整景观灯光的亮度和照射范围，防止出现影响航标效应的灯光污染。

6.2 针对夜间船舶交通问题。一是夜航客运船舶最大航行速度控制在 10 公里每小时以内，同类船舶不追越、不齐头并进，不在主航道内淌航、锚泊。二是夜航客运船舶前往三堡船闸过程中，在航行至三堡钱 21 号航标后主动避让出闸船舶。三是夜航客运船舶在收到涌潮警报后，应按规定停止营运，驶入安全水域避涌潮，不得顺潮冒险航行。避潮时，不得并绑，不得妨碍它船行动。四是新安江大坝发电放水期间，小型夜航客运船舶应停止运营，防止在发生主机故障、舵机失控等危急情况下酿成严重事故。当能见度小于 300 m，夜航客运船舶应停止营运。

6.3 针对 VHF 通信和船舶条件问题。一是夜航客运船舶应保持甚高频无线电话（VHF）开启，保持 VHF6 频道和 VHF16 频道守听船舶避让信息。二是船舶、船公司、主管部门建立夜航客运船舶突发性强对流天气应对预案，并加强演练，提高应对能力。三是妥善处理夜航客运船舶驾驶台仪器屏幕和外侧景观灯，避免影响船

舶驾驶员视线。四是有关部门应关注夜航水域内夜间游泳和渔船的停泊、作业，不应妨碍夜航客运船舶的正常航行。五是遮蔽影响夜航客运船舶号灯的其他灯光及无关设施。

7 建 议

钱塘江夜航水域通航条件复杂，在钱塘江八堡船闸到之江大桥之间水域可借鉴海上船舶交通管理系统（VTS）的安全监管理念，逐步尝试构建船舶报告制度和 AIS 跟踪制度，保障水上交通安全。

夜航活动营运企业建立岸基支持系统，掌握水文、气象、航行安全等信息，发生突发情况时能及时与船长沟通和监控，并应及时按应急预案处置。应定期开展船舶故障、火灾、人员落水、灾害天气、触碰、搁浅等应急救援演练。夜航活动营运企业应根据人员、岗位等变动情况及时更新安全质量管理体系，确保体系有效运行。

鉴于锂电池的安全特性，经营单位应根据有关规定，组织船员开展电池动力船舶常识和应急应变等内容的专项培训，确保新能源船舶运营安全。

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] 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.

作者简介：

周鹏翔，本科，主要研究方向：水上交通安全，（E-mail）zhoupengxiang@163.com，13388605309

急流场中甲板驳船稳泊研究及应用

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，甲板驳船稳泊技术对于桥梁单孔主跨超过 200 m 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驳船进行横向受力分析，锚泊定位和拖船推力综合计算，确定载有超长节段钢箱梁甲板驳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；甲板驳船；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 7 000 m。在主跨跨中设置 90 m 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 6 m 钢混结合段，结合面往混凝土箱梁侧长 2.0 m，往钢箱梁侧长为 4.0 m）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重量 720 t、宽度 11.75 m 和长度 82 m 的超长钢箱梁装在甲板驳船上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。

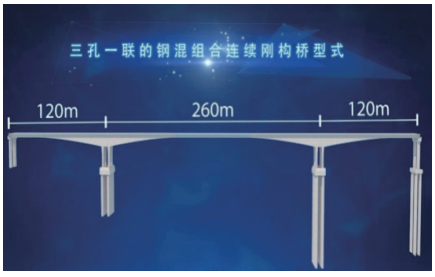


图 1　主桥布置



图 2　船舶横向定位吊装实景

1　急流场

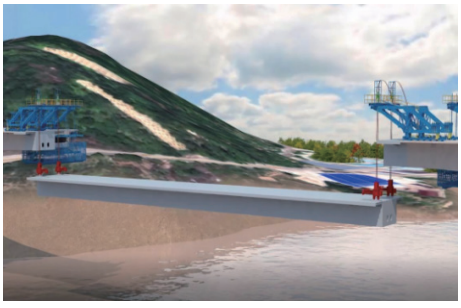


图 3　超长钢箱梁吊装模拟



图 4　急流场桥址位置

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 202 km，流域面积 6 590.71 km^2，上游段称永安溪（长 138.5 km）和始丰溪为山溪河流，河势弯曲、坡陡流急；中游段称灵江（长 44.7 km）为感潮河流，河势弯曲、河宽变化大，本工程新建桥址位置见图 4，处在灵江中游；下游段称椒江（长 18.8 km）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。新建桥址江段为急流场，恰为弯道处，流态复杂，流速较急（涨潮最大流速 1.77 m/s，平均流速 1.17 m/s；落潮最大流速 1.54 m/s，落潮平均流速 0.78 m/s）。除了台汛期下泄洪水落水流大增外，一般情况下，落潮流小于涨潮流 。

2 船舶资料

1）甲板驳船主要船舶参数

总吨位 1 964，净吨位 1 099，载货量 3 041 t，总长 98.0 m，其中甲板装在长度 84.5 m, 型宽 17.5 m，装载艉吃水 2.5 m，艏吃水 2.5 m，设计航速 10.0 kn，龙骨以上最大高度 20.3 m，水线以上最大高度 17.8 m，卸空后空载吃水 2.3 m，水线以上最大高度为 18.0 m , 见图 5 和图 6。



图 5　甲板驳船

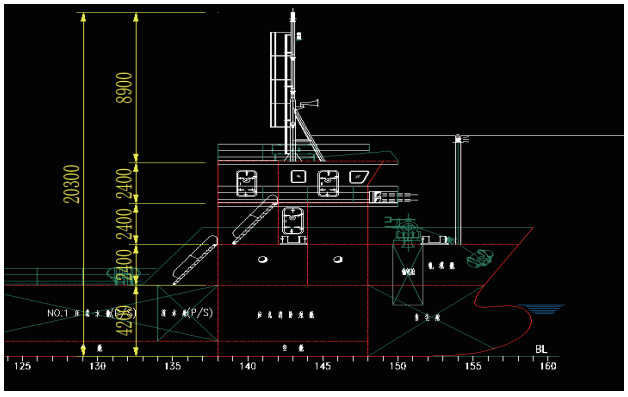


图 6　甲板驳船侧面尺寸

2）拖船主要船舶参数：

拖 1：总长 37.7.0 m , 型宽 10.0 m, 类型 Z , 功率 4 800 hp, 吃水 3.7 m(系于船尾部，距船中约 19m)。

拖 2：总长 40.0m ，型宽 9.6 m, 类型 FPP，功率 3 000 hp, 吃水 3.0 m(系于船首部，距船中约 45 m)。

3 超长节段钢箱梁甲板驳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

甲板驳船需要在桥位线中心横向精准定位才能按设计要求吊装超长节段钢箱梁，吊装时将占据整个双向通航水域，航道将进行临时双向封航。需要解决两个问题：一个需要核算定位甲板驳船的受力，是否能安全横向定位稳泊，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，甲板驳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驳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船，科学确定有足够系缆力、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驳船偏荡及走锚影响吊装施工，配备拖船协助横向稳泊定位，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、缆和拖船布置方案。

甲板驳船需要用锚和拖船来横向定位，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：甲板驳船定位时要精准，既能根据需要左右前后微调，又要保证所布置缆链达到最

大受力效果，经综合考虑后，上游侧艏部设 1 只斯贝克锚（2 t）和 1 只 AC-14 大抓力锚（2.75 t），出绳（链）方向与水流方向夹角约分别为 14° 和 10° ；艉部设 1 只 AC-14 大抓力锚（3.5 t），出绳方向与水流方向夹角约为 10° ，艉部设 1 根 Φ34 mm 钢丝绳，系固于岸基系船柱处，出绳方向与水流方向夹角约为 65° 。下游侧，艏部布置 1 只斯贝克锚（2 t），出绳方向与水流方向夹角约为 14° ，原计划在艉部也布置 1 只斯贝克锚（2 t）或下游岸上设系船柱，由于水域限制而未抛，下游岸上也没有合适的系船柱，经计算通过上游系船柱钢丝绳可以弥补，拖船在甲板驳船下游侧顶推协助稳泊。初步稳泊布置方案需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。根据本工程甲板驳运输的目的，甲板驳船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，船舶艏部（三只）和艉部（一只）向四周抛出四只锚及配置相应锚索，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 本工程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，甲板驳船和拖船的最大吃水为 3.7 m，则所需最少海图水深为 4.4 m。桥梁所在基准面位于 85 国家高程下 1.316 m，本工程吊装施工桥位处在海图水深 5 m 等深线附近，海图水深在 4.46 ~ 11.1m，满足甲板驳船和拖船全天候作业水深要求。

3.2.3 计算及选型

根据本工程位置特点，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）甲板驳船船受力计算 [2]

侧向受力：$F_y=F_{wy}+F_{cy}+F_{mdy}$

F_{wy} 风力采用下式计算， $F_{wy}=0.613\Sigma（C_sC_hA_i）V_w^2$

式中：C_s- 形状系数，实取 C_{s1}=1（主船体）；C_{s2}=1.1（甲板驳船室群）；C_{s3}=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_{i1}=115 m^2（主船体）；A_{i2}=44 m^2（甲板驳船室群）；A_{i3}=344 m^2（大节段）；V_w- 有效风速，计算按 6 级风最大风速取。$V_w=0.6V_{10}+0.4V_t=0.6\times12.4+0.4\times1.2\times12.4=13.39$ 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， $F_{cy}=72.37SV_c^2$

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， $Fmdy=0.13C_{mdh}B^2LH_S^2$

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 $F_{mdy}=0.13\times0.68\times17.50^2\times95.50\times2^2=10.34$ kN。

综上所述， 侧向受力 $F_y=（59.55+528.04+10.34）\times10^3=598$ kN。

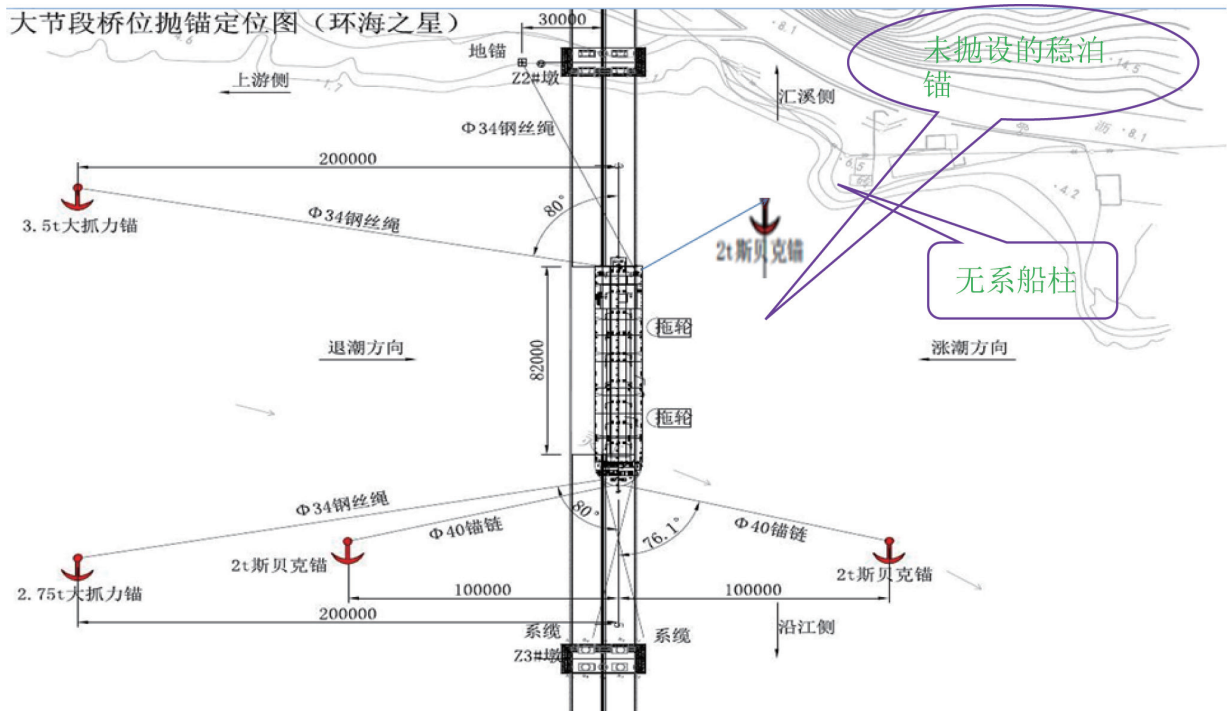


图 7　甲板驳船船稳泊定位示意

（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（2 t），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，系固于岸基系船柱处，钢丝绳破断拉力大于 625kN，Φ450 系船柱安全工作负荷 SWL=382kN，计算考虑安全余量，取系船柱安全工作负荷 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（2 t），配 Φ40mm 锚链。锚链破断拉力大于 896 kN（退潮不计下游）。初始方案在艉部设 1 只斯贝克锚（2 t）或在下游岸上合适的系船柱带一根缆绳，因为所在水域限制锚链较短，未抛这个锚，下游岸上也没有合适的系船柱，实际操作中，通过上游系船柱上大角度系缆调整，稳泊还是精准可控的。

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），系船柱的安全工作负荷为 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 $F_{(AC\text{-}14\ 锚\ 1)}$=22 × 9.81 × cos10° =213 kN，$F_{(AC\text{-}14\ 锚\ 2)}$ =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：$F_{总绳}=F_{(AC\text{-}14\ 锚\ 1)}+F_{(AC\text{-}14\ 锚\ 2)}+F_{(斯贝克锚)}+F_{缆}$=740.2 kN；

（3）拖船推力计算 [3]

2 艘拖船在逆水侧顶推辅助定位。考虑到已选用 2 艘拖船船龄较长，顶推力按主机额定功率 80% 取值，参照表 1 进行估算。

$F_{拖}=F_{拖\ 1}+F_{拖\ 2}$=48 × 9.81 × 1.5 × 0.8+30 × 9.81 × 1.0 × 0.8= 800.5 kN。

表 1　拖船类型与拖力

拖船推进器类型	拖力（t/100hp）	后退 / 前进 ×100%	本次选用拖船
VSP	0.95	88%	
Z	1.5	91%	拖 1
FPP	1.0	82%	拖 2
CPP	1.35	54%	

为发挥拖船最大效用，拖 1 和拖 2 顶推位置分别距船中 19m 和 45m。

综合计算结果，锚泊及拖船提供得总约束力：

$F_{总}=F_{总绳}+F_{拖}$=740.2+800.5=1540.7kN ＞ 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 2.75 t，配 Φ34 mm 钢丝绳；1 只斯贝克锚，重量 2.00 t，配 Φ40mm 锚链；（2）艉部：1 只 AC-14 大抓力锚，重量 3.5 t，配 Φ34mm 钢丝绳； 1 根 Φ34 mm 钢丝绳，系固于岸基系船柱（SWL 不小于 382 kN）；（3）钢丝绳拉锚用：2 根 6×37S+IWR-34mm，钢丝绳，长度不小于 250 m；系泊用：1 根 6×37S+IWR-34 mm 钢丝绳，长度不小于 250 m。下游艏部：1 只斯贝克锚（2t），配 Φ40 mm 锚链（退潮时不计受力仅稳泊用）。

综上所述，甲板驳船船在 2 艘拖船辅助下，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；施工前落实好拖船、警戒船、锚标及其他安全保障措施，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船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 200 m 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，（E-mail）693514161@qq.com，13566887397

“铭浩”轮进石浦港区的引航操纵

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。本文以 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，并结合引航实践，总结出进港航法、操纵要领及注意事项，为大型空载船舶（船长 170 ~ 190 m，单船载重吨 3.5 万吨级，以下称为大型船舶）进石浦港区操纵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

0　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 5 000 吨级双向航路，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的经验，还未有大型船舶从下湾门进口的先例。

目前，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，并派员到现场考察制定进口操纵方法，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 3 m 以上，最大潮差可达 6.08 m，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 ~ 50 cm/s 之间，涨、落潮流方向与等深线方向基本一致。

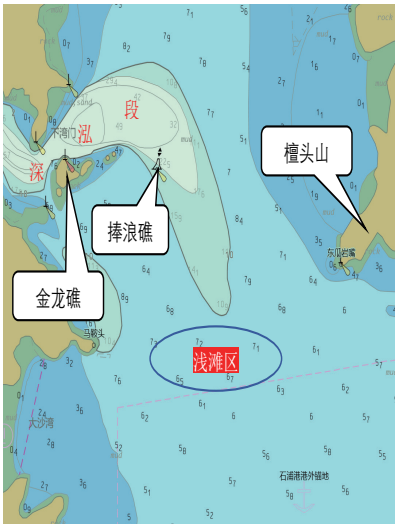
1.2　锚地概况

石浦港区港内锚地位于石浦港内，底质为泥底，水深 5 ~ 15 m；石浦港区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 ~ 7 m；石浦港区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 ~ 10 m，东到东南风时风浪较大。

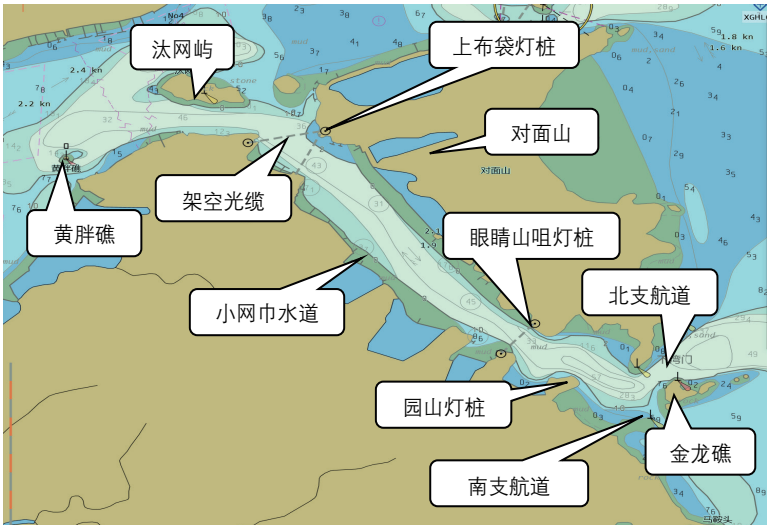
1.3　航道概况

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 2 nm；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 ~ 50 m；港外锚地北边线至深泓段有大面积浅滩，水深 7 ~ 8 m。

下湾门航道是万吨级船舶进出石浦港区的唯一航道，全长为 5 nm，可分为 3 个航段，北段为汰网屿南侧航道，宽度为 150 ~ 200 m，水深 30 m 以上；中段为小网巾水道，宽度为 200 ~ 450 m，水深 20 m 以上，航道内有一架空光缆，位于汰网屿东南侧、转向点南侧；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”形，最窄处宽度约为 150 m（10m 等深线），两侧宽广，西侧有直径约 0.2 nm 的旋回水域（10 m 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 181.6 m，船宽 31.4 m，首尾吃水 0.8/7.6 m，方形系数 C_b 为 0.75，K' 为 0.88，T' 为 0.40，总载重吨 31 583 t，净空高度 33.67 m（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易受横风影响，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艏

右转，但会导致船体向北漂移，过于靠近右侧岸线。

（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），单向航道有效宽度 W 由航迹带宽度和船舶与航道底边间的富裕宽度组成，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 31.4 m；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 181.6 m；γ 为风、流压偏角，取 10°。

经计算，“铭浩”轮可通过的单向航道通航有效宽度 W 为 145.3 m，航道最窄处为 150 m，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 7.6 m，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 33.17 m，设计最高通航水位为 4.42 m（85 国家高程），合计高程为 37.59 m。经计算，“铭浩”轮通过船艉压载和放倒主桅等措施，可满足 2 m 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：

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

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

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

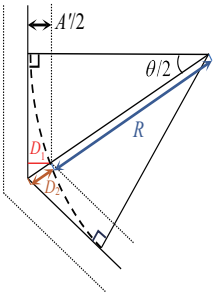


图 2　航道弯曲半径示意图

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 416 m。

“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 4 kn、5 kn、6 kn 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 1 kn 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 4 kn）的新航向距离为 325 m，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 拖船及警戒艇的配置

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

3.3 引航人员安排

由于“铭浩”轮是石浦港区有史以来最大尺度的进口船舶，引航站指派 4 名经验丰富的引航员共同完成引航作业，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 6 n mile，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。

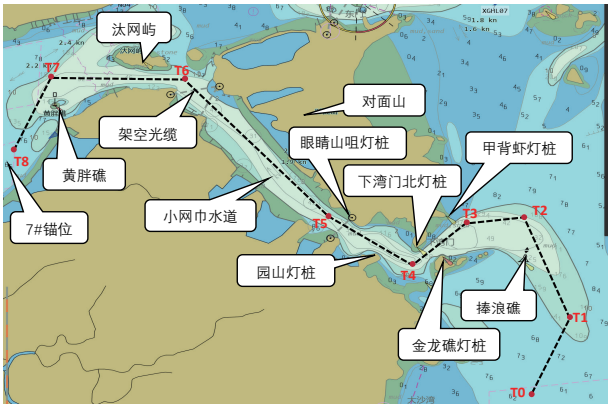


图 3　航线设计图

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，石浦港低潮时间为 1349，潮高为 0.76 m，经计算，1230 时潮高约为 1.15 m，“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船（东和拖 9）出发，于 1200 抵达石浦港外锚地西北角处，登轮前核实船艉吃水为 7.6m，其具体航法如下：

1215 准备起锚。

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

1240 航行至 T1 转向点，改航向至 330°，航道落流明显，船艏对准铜瓦门附近，航速达到 5kn。

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

1255 航行至 T3 转向点，改航向至 230°，船艏对准北支航道中心线附近，航速约 4.2 kn，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 220v，航速 5.3 kn，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，把定航向 300°，航速 6 kn，前进一。

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

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

1340 黄胖礁左正横，横距为 0.15 n mile。

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，令其中一艘拖船（甬港拖 26）系于左舷船艏，用于协助转向；另一艘（甬港拖 18）系与船艉巴拿马孔处，用于制动（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；汰网屿东南侧 T6 转向点最佳施舵点位置为船中过架空光缆。

（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，按计划准时抵达两处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 ~ 4.5 kn，其余航段不宜超过 6 kn，航速过快时可通过船艉拖船制动来控制航速，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，必要时使用拖船协助。

（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 30 m 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，右舷船艏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为 5.5 m，而且石浦港潮差较大，低潮时段潮高较低，但大型船舶进港的最大吃水通常大于 7 m。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）“铭浩”轮进港时为压载，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

“铭浩”轮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，正确配置和使用拖船，事后对操纵中碰到的问题和困难加以分析和总结，为以后石浦港区船舶进口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，深化浙江参与“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：

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

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

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，浙江舟山　316021；2. 舟山引航站，浙江舟山　316000；
3. 中化兴中石油转运（浙江舟山）有限公司，浙江舟山　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

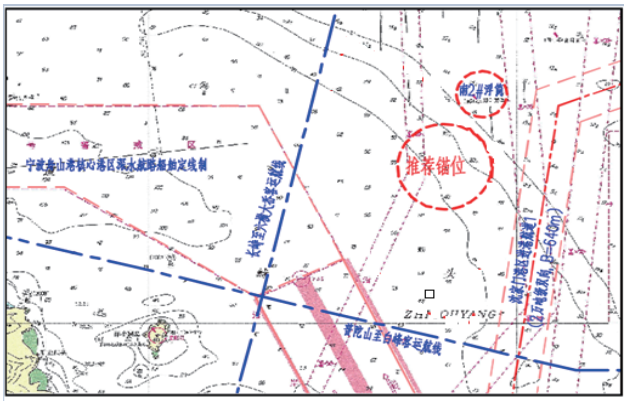


图 2　岙山应急锚位布置方案

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。

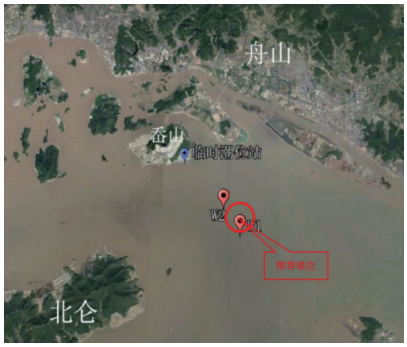
表 1　岙山站风速、风向统计表

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	流向
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 99 cm/s、104 cm/s，最大落潮流速分别为 108 cm/s、97 cm/s；中潮汛时，W1、W2 测站垂线平均的最大涨潮流速分别为 72 cm/s、78 cm/s，最大落潮流速分别为 81 cm/s、96 cm/s；小潮汛时，W1、W2 测站垂线平均的最大涨潮流速分别为 64 cm/s、66 cm/s，最大落潮流速分别为 70 cm/s、75 cm/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

为了解香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、香山的船舶轨迹，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。

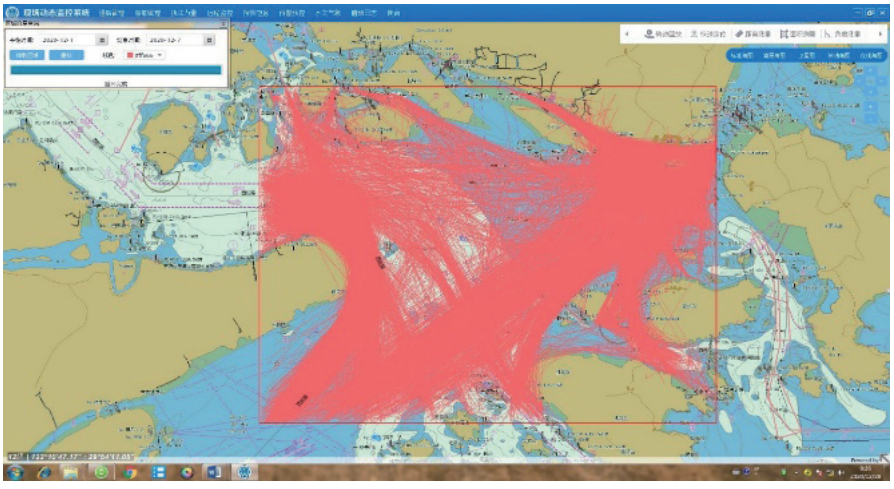


图 4　应急锚位及附近水域的交通流船舶航迹

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。

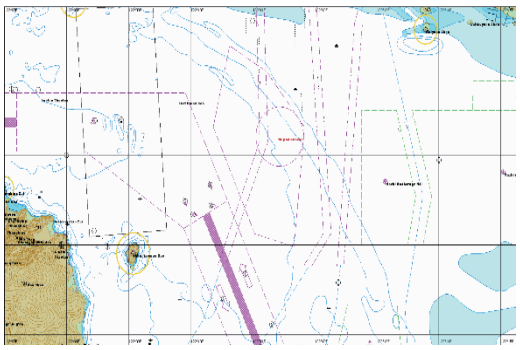


图 5　应急锚地附近电子海图

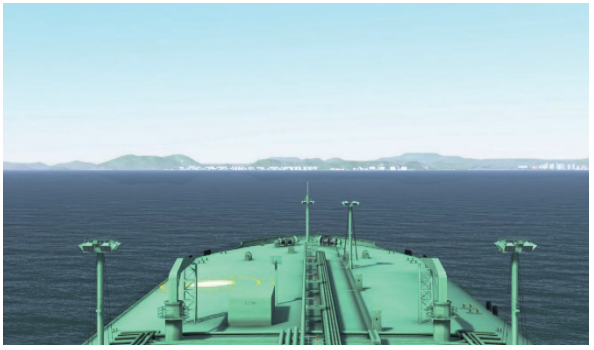


图 6　锚位水域附近三维视景图

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、0.2 m 和 0.7 m；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 1.06 m/s，流向 307°，落潮流流速约为 1.37 m/s，流向 129°。

交通流设置，分别设置 3 条交通流：

（1）香山至六横交通流；

（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

编号	风		潮流			试验船型	备注
	风向	风级（蒲氏）	涨 / 落	流速（m/s）	流向（°）		
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		香山泊位至锚位
3		8	落	1.37	129		进港航道至锚位
4		8	落	1.37	129		香山泊位至锚位
5	NW	8	涨	1.06	307		锚位至香山泊位
6		8	落	1.37	129		锚位至香山泊位
7	SE	8	涨	1.06	307		进港航道至锚位
8		8	涨	1.06	307		香山泊位至锚位
9		8	落	1.37	129		进港航道至锚位
10		8	落	1.37	129		香山泊位至锚位
11	SE	8	涨	1.06	307		锚位至香山泊位
12		8	落	1.37	129		锚位至香山泊位

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 3 n mile，初始航速 5.6 kn，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。

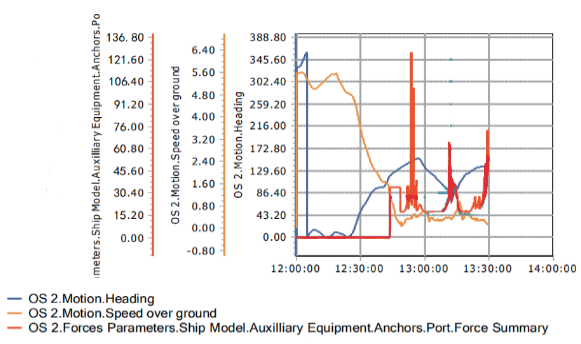


图 7　船舶参数变化及锚链受力变化

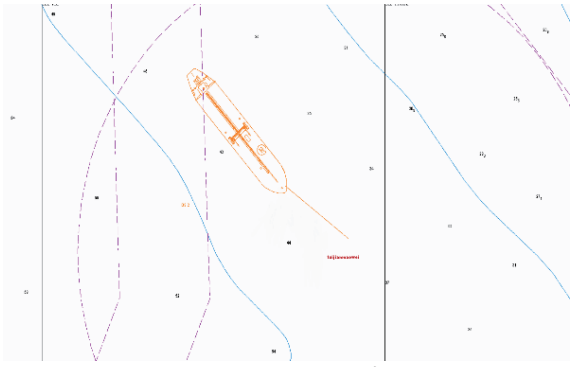


图 8　船舶抛锚状态图

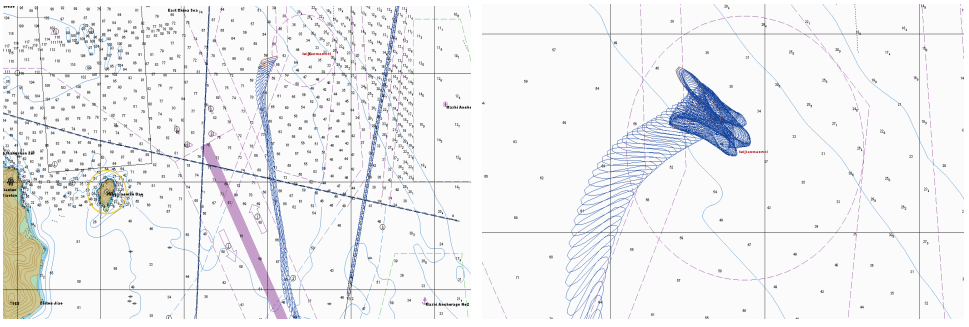


图 9　大潮涨潮流、西北风 8 级工况下船舶航迹图

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 kn，受力 128 t。

（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 5.6　kn，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。

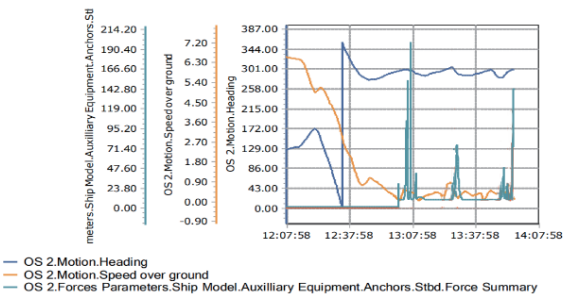


图 10　船舶参数变化及锚链受力变化

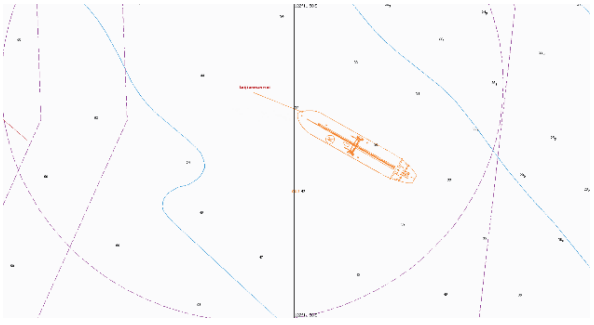


图 11　船舶抛锚状态图

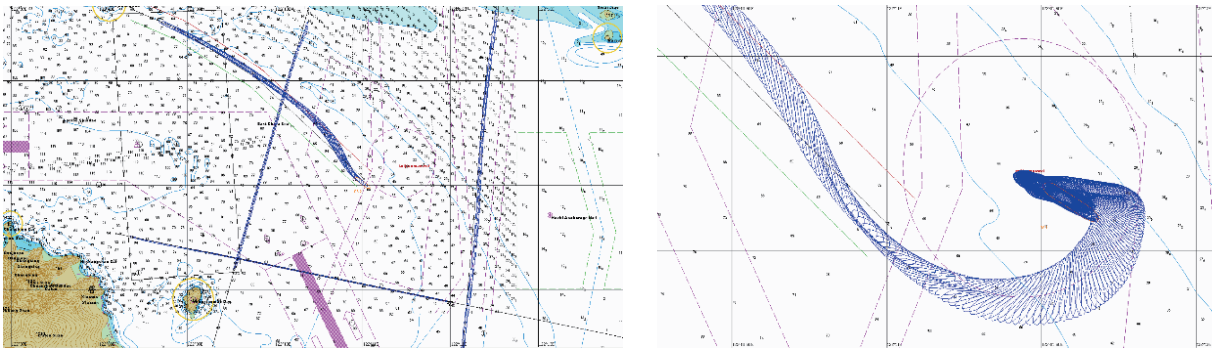


图 12　大潮落潮流、西北风 8 级工况下船舶航迹图

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 kn，受力 131 t。

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 kn 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 0.3 kn 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，（E-mail）408187256@qq.com，18969257066

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

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　325000）

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

0　引　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。

1　案例分析

1.1 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，见图 1。

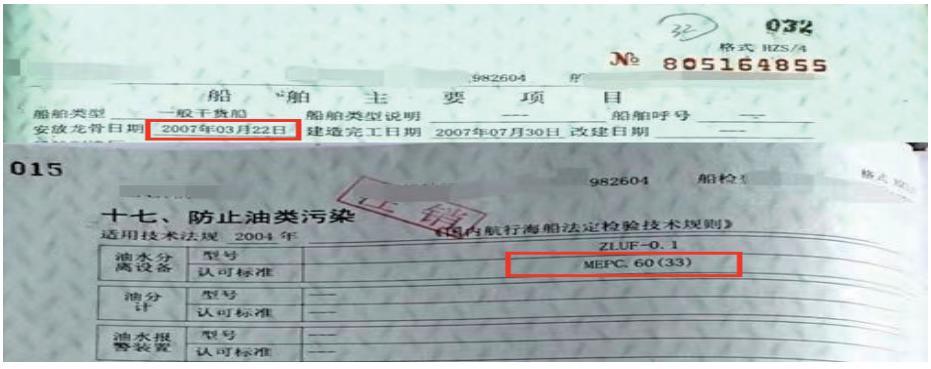


图 1　《国内航行海船安全与环保设备记录》HZS/4、HZS/6

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。

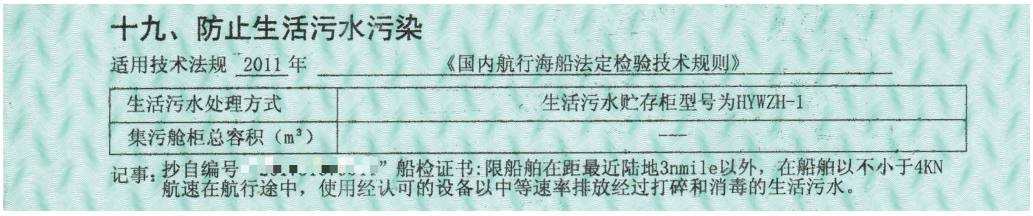
案例启示：国内航行海船油水分离设备执行标准与该设备装船时间相关，且区别于国际航行船舶。根据船舶法定检验技术规范梳理见表 1：

表 1　油水分离设备执行标准

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》

1.2 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”，见图 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（m³）	——

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 3 n 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”。

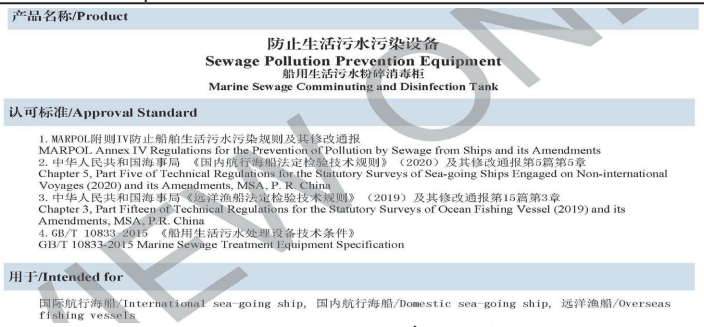
规范要求：根据“标准”及规范要求，该船采用生活污水贮存柜处理生活污水，故仅允许距最近陆地 12 n mile 以外，以不少于 4 kn 船速在航行途中，以中等速率进行排放或收集并排入接收设施。

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 12 n 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 12 n mile 以外；如需要在距最近陆地 3 n 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。

表 2 《船用生活污水处理系统技术条件》

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》


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

用于/Intended for

国际航行海船/International sea-going ship, 国内航行海船/Domestic sea-going ship, 远洋渔船/Overseas fishing vessels

图 3 船用生活污水粉碎消毒柜型式认可证书

3. 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。

4. 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。

2 相关建议

1）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，见表 4，为船员提供指导。

表 4　生活污水处理型式及记事栏说明

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

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。

2）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。

3）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 3 n 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。

4）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。

3　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.

[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，温州市港航管理中心船检处处长，（E-mail）646999@qq.com，13505779736

基于特征增强的实例级船舶识别

程　静[3]　王荣杰[1]　林安辉[1,2]　蒋德松[1,2]　王亦春[1,2]

（1. 集美大学轮机工程学院，2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室，福建厦门　361021；
3. 集美大学轮机工程学院，福建厦门　361021）

摘　要：实例级船舶识别在目标侦察，海洋监管以及海面态势感知等民用和军事领域具有应用价值。然而，目前的船舶识别研究主要集于粗粒度或细粒度分类，有关实例级船舶识别的研究很少。由于海洋环境的特殊性以及船舶的刚性特征，导致不同视角或尺度下船舶外观差异显著，增大实例级船舶识别的难度。针对以上问题，以 RetinaNet 为基础模型，提出了一种基于特征增强的实例级船舶识别方法，首先设计了注意力感知金字塔网络用于增强船舶显著性特征以及融合注意力引导的多层特征，然后设计细节信息增强模块用于细化融合后的多尺度特征以提高模型泛化性。在自制数据集上对所提方法和其他三种经典目标检测模型进行性能评估与对比，实验结果表明所提算法能够有效提高目标在视角变化和尺度变化的识别精度，同时提高检测速度。最后通过消融实验进一步验证了所设计模块的有效性。

关键词：意力机制；特征增强；实例级识别；多尺度特征图

0　引　言

船舶作为人类在海洋活动中的重要载体，实例级船舶自动定位和识别机制在海上交通管理和海洋监测等民用和军事领域均有重要应用价值[1]，能够为海上救援、航迹分析和目标侦察等需要获取指定船舶信息的海洋任务提供依据。因此，实例级船舶识别 (Instance-level ship recognition, ISR) 能够辅助人员进行海上交通管理，海洋监测以及其他海洋任务的实施。

目前，基于深度学习的船舶检测方法已有很多，主要集中于粗粒度或细粒度分类，即简单地区分船舶目标和非船舶目标，或者将船舶分为军舰、客船、渔船、油轮等类别[2-4]。目前有关实例级船舶识别的研究还很缺乏。一个细粒度类别包含多个实例，每个实例在不同场景下变化不同，这使得实例级分类更加复杂[4]。实例级船舶识别作为海洋监测的一项重要技术，主要面临以下挑战：

视角变化引起外观特征变化。由于船舶的刚性特性，具有相同类别、颜色等特征的不同船舶实例外观相似，相同船舶实例在不同视角下外观差异很大，实例间差异小、实例内差异大，增大了实例级船舶的识别难度。

尺度变化大。随着观察距离的变化，相同船舶实例在图像中有不同尺度，不同船舶尺度也各不相同，在检测大尺度目标时，小尺度目标易被漏检，目标的尺度变化影响检测模型的性能[5-6]。

针对以上挑战，本文提出了一种基于特征增强的实例级船舶识别方法 (feature enhanced RetinaNet-based for ISR, FERISR)，有效提高了对多视角和多尺度船舶实例的识别精度和速度，增强了网络模型对低能见度场景的泛化性。本文主要贡献如下：

提出了一个注意力感知金字塔网络 (Attention-aware Pyramid Network, APN)，通过引入卷积块注意力模块 (convolutional block attention module, CBAM) 使网络在空间维度和通道维度上更加关注有效信息，并增加了一

个跳跃乘积层 (skip product layer, SPL) 增强特征交叉，缓解视角变化对模型检测性能的影响。为了解决目标尺度变化的问题，通过 RetinaNet 的特征金字塔网络 (RFPN) 融合注意力引导的判别性特征来获得多尺度特征，极大限度地利用多层特征并减少信息冗余。

设计了一种细节特征增强模块 (Detail Feature Enhancement Model, DFEM)，用于细化融合后的多尺度特征，通过增强船舶实例的显著性特性和图像细节信息来进一步提高模型在多尺度场景中的泛化性。

1 方法论

1.1 总体框架

FERISR 是一个基于 RetinaNet 的端到端单阶段网络，主要由主干网络，注意力感知金字塔网络 (APN)，细节信息增强模块 (DFEM) 以及检测头四个模块组成。主干网络采用 ResNet50[7] 提取特征， APN 包含带有跳跃乘积层的 CBAM[8](CBAM with skip Product Layer, SPLCBAM) 和 RFPN[9] 两部分，其中 SPLCBAM 被用来引导网络更加关注有效信息和提高网络在低能见度环境下的泛化性能，RFPN 用于融合多层特征以及挖掘更深层的语义信息。DFEM 用于细化特征信息，进一步提高网络的识别精度。检测头由 RetinaNet 的分类子网和回归子网组成。FERISR 的总体结构图如图 1 所示。首先利用主干网络获取输入图像的特征图 Ci (i =3, 4, 5)，再通过 APN 引导网络更加关注 Ci 的有效信息和增强特征交叉，以及获取多尺度特征 Fj(j=3,4,5,6,7)，进而通过 DFEM 对 Fj 细化细节特征，增强船舶特征以提高模型在视角变化，尺度变化以及低能见度场景下对实例级船舶的识别精度。

本文研究实例级船舶识别，自制的 DISR 背景多变，且相同细粒度类别的实例级船舶特征差异小，区分难度大。为了使模型更好地关注难区分样本以解决传统目标检测器中前景与背景类别不平衡问题，本文以 Focal Loss 作为损失函数。

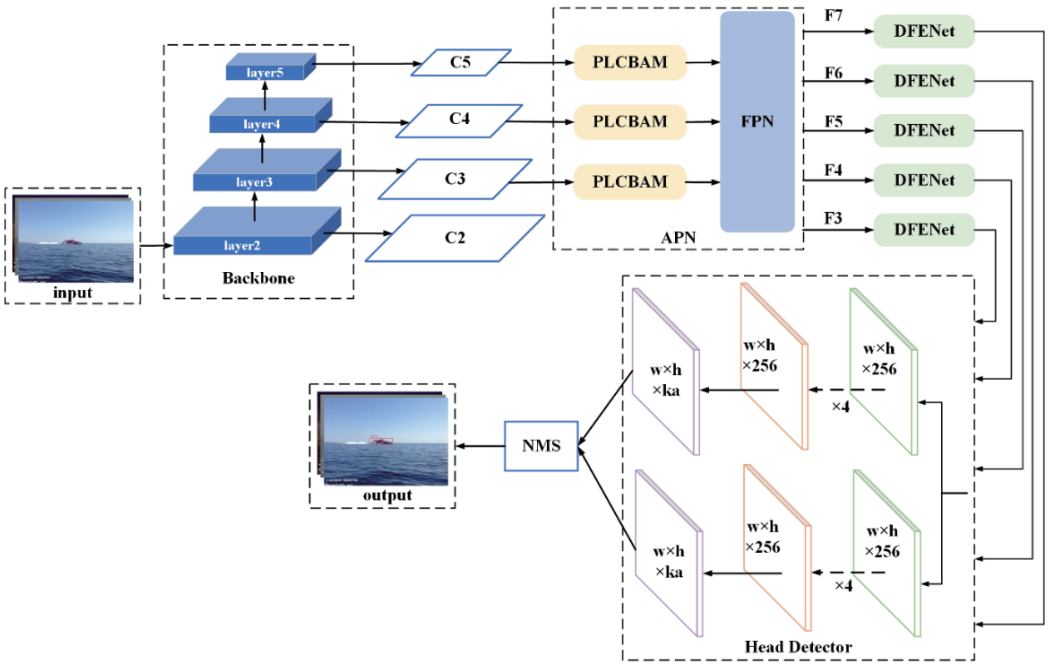


图 1　FERISR 总体网络结构图：w, h 分别表示特征图的宽度和高度，k 为类别数量，a 为生成的锚框数量，ka 为特征图的通道数

1.2 注意力感知金字塔网络

为了增强不同实例船舶的显著性特征，提高模型的识别能力和泛化性能，设计了一个注意力感知金字塔网

络 (APN)，该网络由 SPLCBAM 和 RFPN 组成，APN 的具体结构如图 2 所示。首先在主干网络后引入了 CBAM，引导网络模型关注图像中最重要的区域来提高性能。CBAM 包含通道注意力模块 (Channel Attention Model, CAM) 和空间注意力模块 (Spatial Attention Model, SAM) 两部分，在 CAM 中，为了方便计算核尺寸和步长，将沿着输入特征图 Ci(i =3, 4, 5) 的空间维度并行进行的全局平均池化和全局最大池化替换为自适应平均池化 (AdaptiveAvgPool, AAP) 和自适应最大池化 (AdaptiveMaxPool, AMP)，获取两种不同类型的空间上下文信息。为了不限定输入图像尺寸，利用 1 × 1 的卷积层代替多层感知器的全连接层。对由 AAP 和 AMP 获得的两组特征图进行元素求和操作，通过 sigmoid 激活函数在通道维度上生成权重 W^i_{ch}来衡量每个通道的重要性，将 W^i_{ch} 作用于 Ci 上来增强特征响应，进而获得通道维度需要关注的区域特征 F^i。在 SAM 中，获取 F^i 在空间维度上的加权权重。在通道维度上对 Fi 并行进行平均池化 (AvgPooling) 和最大池化 (MaxPooling)，并在通道维度上连接池化后的特征图，并在通道维度上连接。经过 2-D 卷积和 sigmoid 激活函数获得空间维度的权重 W^i_{sp}。最后与 F^i 相乘，获得输出特征 F^i_{cbam}。为了增加模型的非线性能力，提高模型对船舶实例的识别精度，在 CBAM 的基础上增加一个跳跃乘积层 (product layer)，将输入特征图 Ci 与输出 F^i_{cbam}进行按元素乘 (element-wise product) 操作，增强网络的特征交叉能力。SPLCBAM 的结构如图 3 所示。整个过程可以表示为：

$$\mathbf{W}^i_{ch} = \sigma_1\left(f_{1\times1}\left(\sigma_2\left(f_2\left(\mathrm{AAP}(Ci)\right)\right)\right)\oplus f_{1\times1}\left(\sigma_2\left(f_2\left(\mathrm{AMP}(Ci)\right)\right)\right)\right) \tag{1}$$

$$\mathbf{F}^i = \mathbf{W}^i_{ch}\mathrm{g}Ci \tag{2}$$

$$\mathbf{W}^i_{sp} = \sigma_1\left(f_{3\times3}\left(\mathrm{cat}\left(\mathrm{Avgpool}\left(\mathbf{F}^i\right),\mathrm{Maxpool}\left(\mathbf{F}^i\right)\right)\right)\right) \tag{3}$$

$$\mathbf{F}^i_{cbam} = \mathbf{F}^i\mathrm{g}\mathbf{W}^i_{sp} \tag{4}$$

$$\mathbf{PC}^i = Ci\otimes\mathbf{F}^i_{cbam} \tag{5}$$

其中 σ_1 和 σ_2 分别表示激活函数 sigmoid 和 ReLU。f 表示 2-D 卷积函数，1 × 1 和 3 × 3 表示卷积核尺寸。cat(·) 表示在通道维度上的连接操作，PC^i 表示 PLCBAM 的最终输出特征。

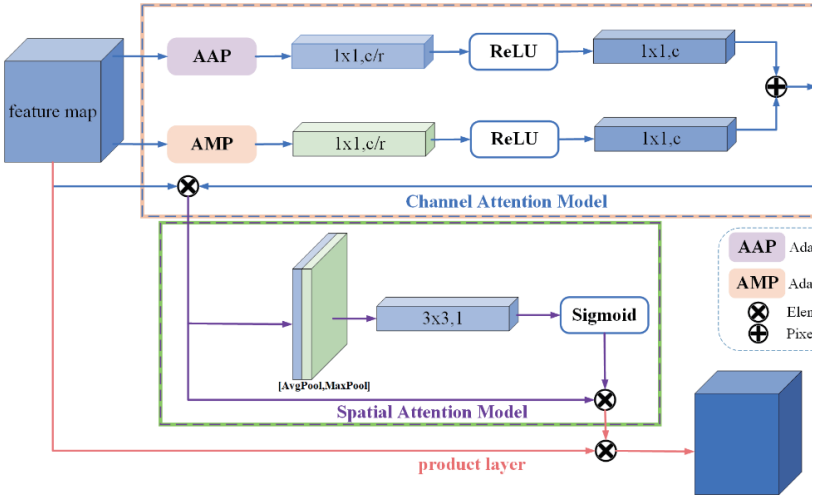


图 2　SPLCBAM 模型图 . 图中 c 表示通道数，r 表示缩减比

1.3　细节特征增强模块

相同类型船舶具有相似的外观，不同视角下的相同船舶实例外观差异很大，目标特征不明显，视角变化和尺度变化增大了实例级船舶识别难度。为了进一步提高识别精度，通过 DFEM 细化多层特征 Fj(j=3,4,5,6,7) 以增强实例船舶的显著性特征，其结构图如图 3 所示。首先对 Fj 进行三次卷积操作以挖掘更深层的语义信息 SFj，进而与 Fj 进行像素级相乘获得交叉特征 CFj，最后通过跳跃连接保留浅层特征，进一步增强模型性能。所述过程可以表示为：

$$\mathrm{SF}j = f_{3\times3}\left(f_{3\times3}\left(f_{3\times3}\left(\mathrm{F}j\right)\right)\right) \tag{6}$$

$$CFj = Fj \otimes SFj \tag{7}$$

$$DFj = Fj \oplus CFj \tag{8}$$

其中 $\otimes$ false 表示像素级乘 (Pixel-level Multiply)，$\oplus$ false 表示像素级求和 (Pixel-level Summation)，DFj 为 DFEM 的最终输出特征。

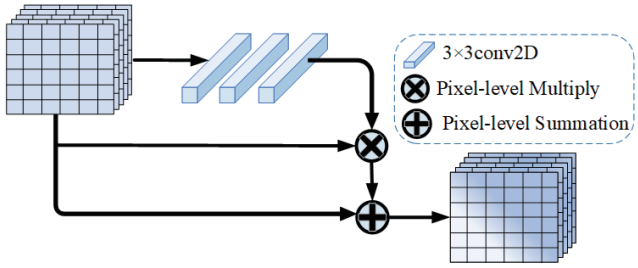


图 3　DFEM 结构图

2　实验与分析

2.1　数据集

由于目前缺乏实例级船舶识别的公共数据集，本文以 ReidDataset[10] 为基础数据集，进一步划分到实例级，制作成实例级船舶数据集 (Instance-Level Ship dataset, DISR)，图 4 描述了实例级类别的概念。实例级类别分为客船 i 号，(i=1, 2, ⋯, 21)，记作 p#i；货船 j 号 (j=1, 2, ⋯, 22)，记作 c#j；油轮 k 号 (k=1, 2, ⋯, 23)，记作 c#k；军舰 m 号 (m=1, 2, ⋯, 27)，记作 w#m，共 93 类。为了增强数据集的多样性将原图像按照不同比例缩小。图 5 展示了 DISR 的部分图像，其中图 5(a) 和图 5(b) 分别为相同实例级船舶在不同视角和不同尺度下的图像。

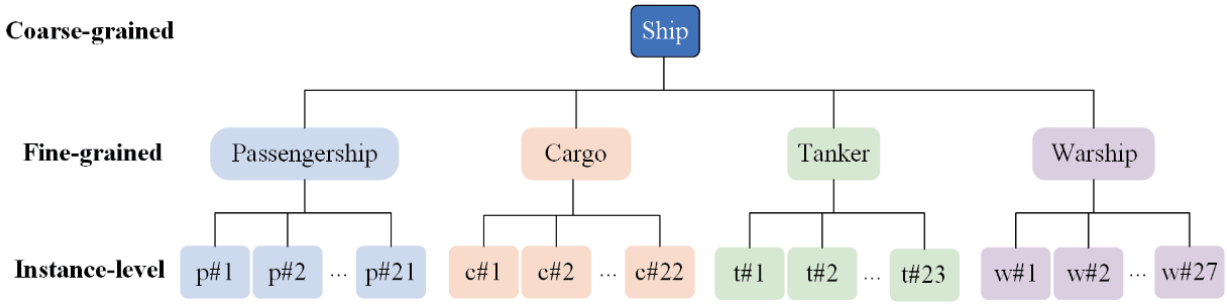
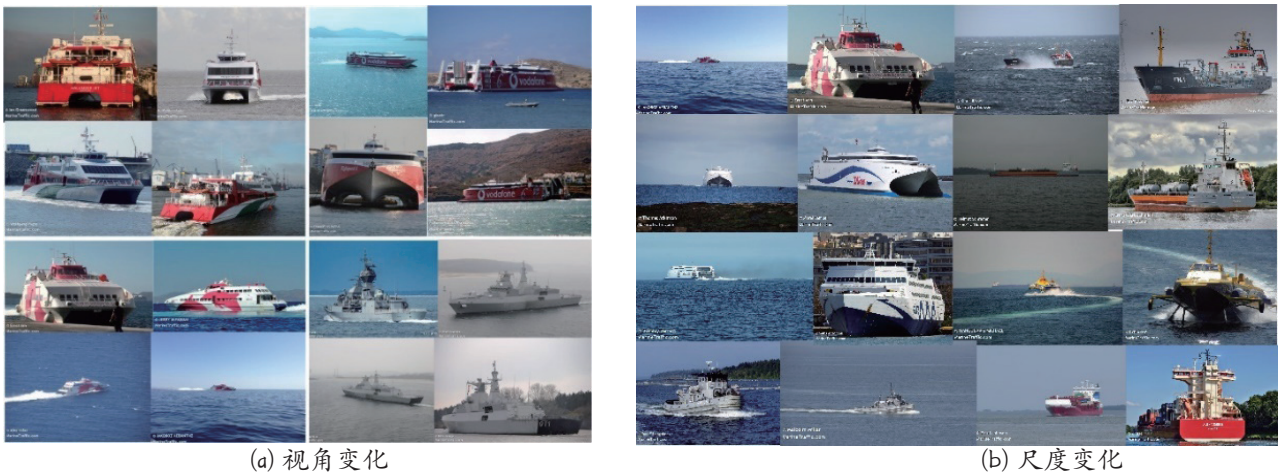


图 4　DISR 类别划分



(a) 视角变化　　(b) 尺度变化

图 5　DISR 中视角变化、尺度变化的图像示例

2.2 实验设置

实验环境：本文在开源的神经网络框架 Pytorch(3.8.13) 上实现了所提模型 FERISR，实验环境配置为 NVIDIA GeForce RTX 3080 GPU，64GRAM。

实验设计：在训练阶段随机地将图像水平翻转和垂直翻转以增加数据。使用 adam 优化器，初始学习率设置为 1×10^{-4}，最小学习率设置为 1×10^{-6}，使用余弦更新策略更新学习率，模型迭代 100 次。其他参数设置如表 1 所示。将 DISR 按照 8:1:1 的比例划分为训练集、验证集和测试集，测试集分为只包含视角变化 (Multi-view Testing, MVT) 以及包含视角变化和尺度变化 (Multi-view-scale Testing, MVST) 两类。

表 1　网络模型中的参数

参数	数值
k	9
α_t	0.25
γ	2
r	8
β	0.1
A	0.5

2.3 评价指标

精度 (precision) 和召回率 (recall) 是图像分类任务中常用的评价指标，其中精度是指检测出的所有样本中正样本的比例，召回率是指正样本被正确检测到的比例。高精度可能伴随着大量的漏检，而高召回率可能伴随着许多误检。因此，选择平均精度（Average Precision, AP）和平均 AP（mean AP, mAP）来分别评价所提出的模型对每个类别的识别性能和总体性能。选用每秒帧率 (Frame Per Second， FPS) 评估模型的检测速度。

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \tag{11}$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{12}$$

$$\text{AP} = \int_0^1 P(R)dR \tag{13}$$

$$\text{mAP} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} AP_i. \tag{14}$$

式 (11) 和式 (12) 中，*TP*, *FP*, *FN* 分别表示正样本被正确识别的数量，误检的负样本数量，漏检的正样本数量。式 (14) 中 *n* 是目标类别数。

2.4 对比实验

为了验证本文方法的有效性，将其与 Faster R-CNN，YOLOv7 和 RetinaNet 三种目标检测模型在 DISR 上进行实验对比。Faster R-CNN 是经典的两阶段目标检测方法，通过区域建议和感兴趣区域池化进一步提高了两阶段目标检测性能。YOLO 是单阶段目标检测模型的代表，而 yolov7 是 yolo 系列中性能得到认可的最新一代。RetinaNet 也是一个单阶段检测模型，在保持检测速度的同时提升了检测精度。本文利用 MVT 和 MVST 分别测试 Faster R-CNN，YOLOv7，RetinaNet 以及 FERISR 的 mAP，FPS 和 AP，为了便于比较，mAP 和 AP 保留到小数点后两位，FPS 保留到小数点后三位。

如表 2 所示，FERISR 在两类测试集上的 mAP 和 FPS 均高于 Faster R-CNN，YOLOv7 和 RetinaNet，且 mAP 分别达到了 93.77%，95.20%，FPS 到达了 33.487 帧 / 秒，表明本文所提方法能够有效缓解由视角和尺度变化导致检测精度下降的问题，而且在保证检测精度的同时有效地提高了检测速度。

表 2　两类测试集在四种模型上的 mAP 和 FPS

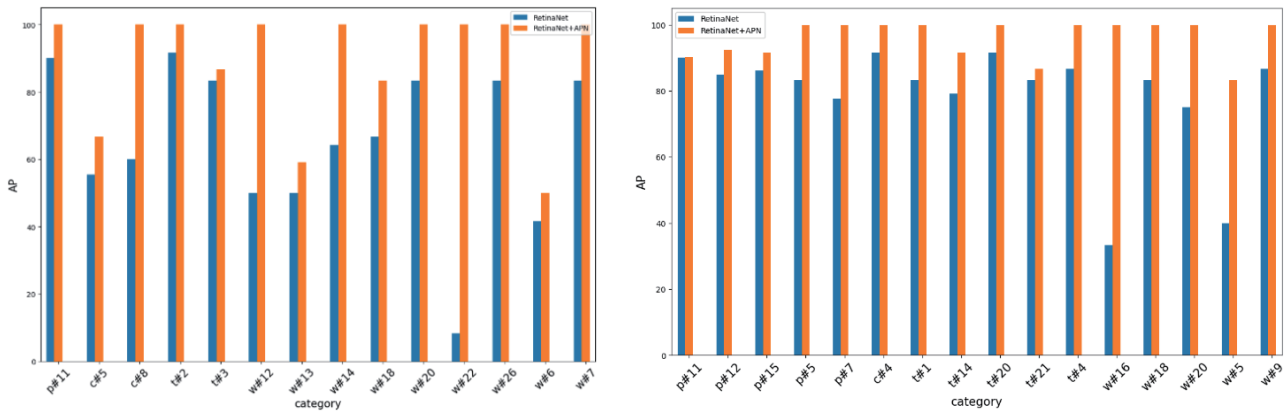
Method	mAP(%)		FPS (frames/s)
	MVT	MVST	
Faster R-CNN	91.76%	95.00%	17.926
YOLOv7	80.57%	79.98%	26.986
RetinaNet	91.57%	93.73%	19.260
FEILVRNet	93.77%	95.20%	33.487

2.5　消融实验

为了探讨 APN 和 DFEM 对 FERISR 识别实例级船舶的影响，以 RetinaNet 为基线，通过消融实验测试 APN 和 DFEM 在 MVT 和 MVST 两类测试集上的 mAP。表 3 显示在三类测试集上，将 RetinaNet 中的 FPN 替换为 APN 使得 mAP 分别提高了 1.39%，0.44%；在 RetinaNet 中增加 DFEM 使得 mAP 分别提高了 1.47%，0.63%；在 RetinaNet 中同时增加 APN 和 DFEM 后，即本文所提方法，mAP 分别提高了 2.20%、1.47%。

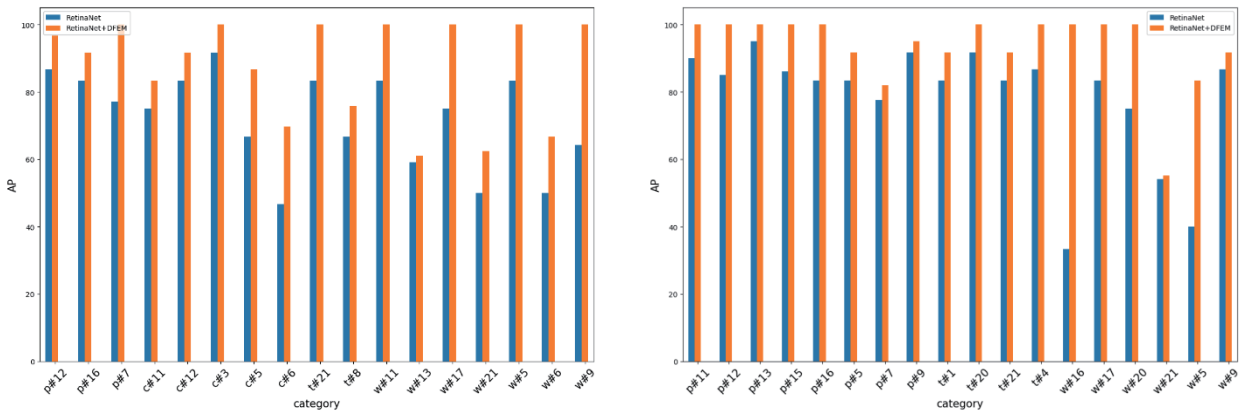
表 3　在不同测试集上的消融实验结果

Method	mAP(%)	
	Multi-view Testing	Multi-view-scale Testing
RetinaNet	91.57%	93.73%
RetinaNet+APN	92.96%	94.17%
RetinaNet+DFEM	93.04%	94.36%
RetinaNet+APN+DFEM(FERISR)	93.77%	95.20%



(a) 在 MVT 上的识别结果　　(b) 在 MVST 上的识别结果

图 6　将 RetinaNet 中的 FPN 替换为 APN 后 AP 有提升的类别 .(a) 测试集为 MVT. (b) 测试集为 MVST.



(a) 在 MVT 上的识别结果　　(b) 在 MVST 上的识别结果

图 7　在 RetinaNet 中的增加 DFEM 后 AP 有提升的类别 (a) 测试集为 MVT. (b) 测试集为 MVST.

图 6 和图 7 分别显示了相较于 RetinaNet，RetinaNet+APN 和 RetinaNet+DFEM 在两类测试集上 AP 有提升

的类别，如图 6(a)，图 6(b)，图 7(a) 和图 7(b) 所示，在视角变化和尺度变化场景下 APN 和 DFEM 均在不同程度上提升了模型对实例级的客船、货船、油轮、军舰的识别精度。在视角变化场景下 APN 和 DFEM 主要提升了对实例级军舰的识别精度，而在视角和尺度同时变化的场景下对实例级货船识别精度的提升较弱。主要原因在于在 DISR 中客船图像分辨率高，对经典模型性能影响低。

3 总 结

本文提出了一种基于特征增强的实例级船舶识别的方法，通过注意机制和细节特征增强模块提取有效特征，缓解由视角变化和尺度变化导致的模型性能下降的问题。考虑到实例级船舶数据集的缺乏，将用于船舶重识别的 reidDataset 划分到实例级，以视角变化 (multi-view testing) 以及视角和尺度同时变化 (multi-view-scale testing) 的图像为训练集训练模型，通过仿真实验对比分析了 FERISR 相较于其他方法在实例级船舶识别方面的性能。实验结果显示，在视角变化以及视角和尺度变化场景下，FERISR 的 mAP 分别提高了 5.80%，5.63%，FPS 平均提高了 12.096frames/s。因此，所提方法能够有效提升实例级船舶识别效率以及精度。

参考文献

[1] Cao Xiufeng, Gao Shu, Chen Liangchen, et al. Ship recognition method combined with image segmentation and deep learning feature extraction in video surveillance[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(13-14): 9177-9192.

[2] Qiao Dalei, Liu Guangzhong, Dong Feng, et al. Marine Vessel Re-Identification: A Large-Scale Dataset and Global-and-Local Fusion-Based Discriminative Feature Learning[J]. IEEE ACCESS, 2020, 8: 27744-27756.

[3] 姚婷婷 , 张波 , 柳晓鸣 . 特征增强全卷积网络下的船舶检测 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报 , 2022, 34(07): 1028-1036.

[4] Kang Kai, Pang Gangming, Zhao Xun, et al. A New Benchmark for Instance-Level Image Classification[J]. IEEE ACCESS, 2020, 8: 70306-70315.

[5] Zhang Wen, He Xujie, Li Wanyi, et al. A Robust Deep Affinity Network for Multiple Ship Tracking[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-20.

[6] Oksuz Kemal, Cam Baris Can, Kalkan Sinan, et al. Imbalance Problems in Object Detection: A Review[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(10): 3388-3415.

[7] He Kaiming, Zhang Xiangyu, Ren Shaoqing, et al. Deep Residual Learning for Image Recognition[C]. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016: 770-778.

[8] Hu Jie, Shen Li, Albanie Samuel, et al. Squeeze-and-Excitation Networks[C]. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2018: 7132-7141.

[9] Lin Tsung-Yi, Dollar Piotr, Girshick Ross, et al. Feature Pyramid Networks for Object Detection[C]. 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2017). 2017: 936-944.

[10] Zeng Guangmiao, Wang Rongjie, Yu Wanneng, et al. A transfer learning-based approach to maritime warships re-identification[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 125: 106696.

作者简介：

程静，就读于集美大学轮机工程专业，博士在读，专业为船舶电子电气与海洋信息化工程，研究方向：智能图像处理与目标检测，（E-mail）hxjn1403@163.com，17637329542

基于 VR 的船舶基本安全防火灭火实训系统教学设计与场景实现

戴官全[1]　王宗开[1]　辛勤芳[2]　张泽慧[1]

（1. 泉州师范学院交通与航海学院，福建泉州　362000；
2. 泉州师范学院数学与计算机科学学院，福建泉州　362000）

摘 要：传统的船舶基本安全实训中，防火灭火训练成本高、危险性大。本文基于 2021 版《培训大纲》的实践技能与要求，结合 VR（虚拟现实）技术，设计了 7 个实训项目场景，应用 3ds Max 三维建模工具、Unity 虚拟现实引擎及虚拟现实头盔设计等关键技术，实现各种场景的虚拟仿真，开发沉浸式船舶基本安全防火灭火实训系统场景，可节约成本、降低风险、提高实训效果。

关键词：防火灭火实训；VR 技术；虚拟仿真 ; Unity

0　引　言

根据交通运输部数据显示，截至 2022 年底，我国的注册船员总数是 190 万余人，其中海船船员 90 万人、内河船员 100 万人。《国际海上人命安全公约》（International Convention for Safety of Life at Sea，简称 SOLAS）和《海员培训、发证和值班标准国际公约》（International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers，简称 STCW 公约）的规定，所有人员在上船任职前都必须经过海上“基本安全”项目的培训，经评估合格并取得《基本安全》证书（编号：Z01），才有资格从事海上工作。因此，我国每年大约有 10 万人次进行该项目的培训。然而传统的实验方法存在诸多弊端，如无法模拟船舶火灾的各种真实场景；时间、场地、人员受到限制；实验器材消耗大、甚至污染环境等。随着虚拟现实技术（Virtual Reality Technology，简称 VR 技术）的逐渐成熟，已广泛应用于航空、军事、医疗、教育等领域[1]。沉浸式学习（Immersive Learning）在“VR+ 教育”[2]的模式下快速发展，已经成为当下最热门的新型教育方式。因此，如何基于 VR 开发一套交互性好、沉浸感强、可反复试验的船舶基本安全防火灭火实训系统，对节约成本、降低风险、提高教学质量具有很强的现实意义。

1　虚拟现实技术及其应用简介

虚拟现实技术[3]（Virtual Reality Technology，简称 VR 技术）是指综合运用计算机图形技术、人机交互技术、传感器技术等多种学科技术，能够模拟产生并给予用户听觉、视觉以及触觉等感官的三维交互场景的技术。

国内外对 VR 技术的研究主要偏重于虚拟仪器实现、本机仿真及实验演示。现阶段 VR 技术在航海教育上的应用主要体现在航海模拟器上，驾驶台资源管理（Bridge resources management，简称 BRM）、机舱资源管理（Engine- room Resource Management，简称 ERM）、电子海图显示与信息系统（Electronic Chart Display and Information System，简称 ECDIS）、全球海上遇险与安全系统 (global maritime distress and safety system，

GMDSS）等课程已经先后使用了模拟器教学，并获得主管单位的认可。由于航海的不确定性及船舶的特殊性，虚伪仿真技术在航海科学研究上的应用也取得了较大的成果。加拿大的 MARS 系统是将虚拟现实仿真技术应用到深海开阔水域的操作训练中，美国的 VESUB 工程则利用这一技术开展项目训练。蒋效彬 [4] 等提出了一种在船用锚机交互仿真系统中应用虚拟现实技术的方法。王海全 [5] 等已经研究出船舶机舱虚拟现实仿真系统。姚鹏飞 [6] 等设计了基于 Unity3D 的绞吸式挖泥船虚拟仿真系统。张如凯 [7] 等提出了一个航海类专业船舶虚拟仿真实训平台的建设方案。刘晶晶对多平台的船用罗经仿真交互及评估系统进行研究，开发了一套在 PC、Android、iOS 及浏览器上运行的罗经仿真系统。涂婉丽等设计了基于 Web 的船舶动力装置虚拟操作训练系统。目前为止，还未出现较为成熟的基于 VR 技术的船舶基本安全防真实训系统。

2　实训内容与场景设计

2.1　实训内容与场景

根据 STCW 公约有关合格证课程的要求，结合《海船船员培训大纲（2021 版）》“基本安全培训”中职能 2：防火与灭火的实践技能与要求，梳理出防火与灭火实训内容。如，使用各种船用灭火器及消防器材进行灭火，检查并穿着消防员装备并进入充满烟雾的封闭场所实施营救等。根据虚拟仿真系统的特点，将实训内容细化为 26 个主要知识点，并用七个功能场景涵盖实现，如图 1 所示。

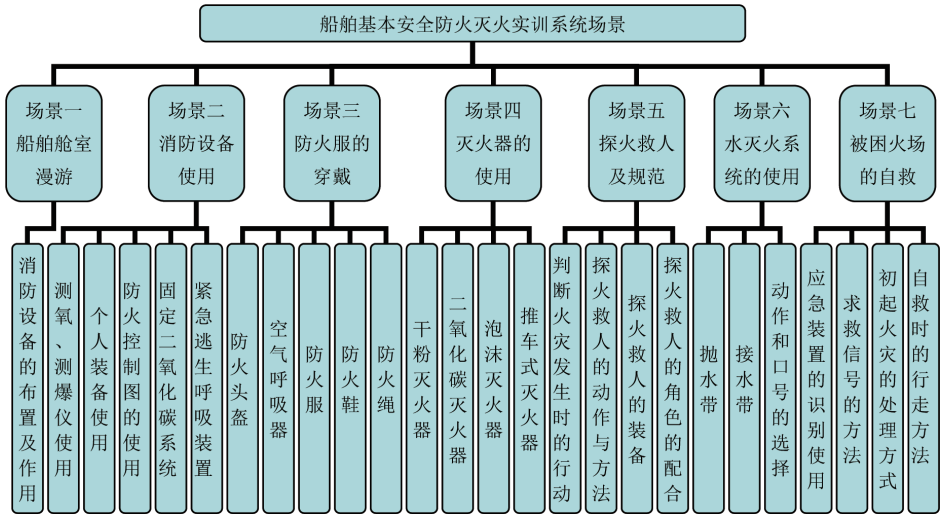


图 1　船舶基本安全防火灭火实训系统场景

2.2　主要实训方法

为实现所有实训内容，在运行过程中主要采用以下四种方法：

（1）交互式实验：实验者通过人机交互的方式，实现一边学习、一边练习；一边练习、一边调整。系统具有错误提示、正确操作提示和自动评价的功能，使实验者的操作错误和不足之处及时得到改正或补充。

（2）沉浸式实验：学生进入虚拟的船舶舱室，形象直观、立体生动地体验、感知与领略船舶各类物理环境的空间、布局和结构；掌握舱室灭火器、个人救生设备、应急设备的存放位置和使用方法。

（3）问答式实验：实验指导老师可以针对该实验者的实验场景设置问题，实验者进入练习环节后，与线上教师进行互动提问与答疑；也可与虚拟各类材料和物体实时互动，进行操作练习。

（4）自主式实验：实验设置两个模式，一是学习模式，一是考核模式。在学习模式下有特别录制的语言讲解，引导实验。在练习模式下，实验者自主操作，最终给出综合评价，针对操作过程的不足提出建议，有针对性地进行实验练习。

2.3 实训场景设计

本实训的核心在于实验流程及场景的仿真模拟。重构课程实训内容，以每个场景为单位进行场景设计，以场景七（被困火场的自救）为例，其场景设计见表 1。

表 1 被困火场的自救场景设计

出现场景 7	被困火场的自救
场景设置	现场有一舱室着火，周围浓烟滚滚，能见度极低，有一船员（模拟人）被困舱室。
场景材料	3D 虚拟人物、火焰、舱室、浓烟、EEBD、毛巾、水。
场景设计要求	可操作、移动 3D 模拟人，行动自如。
原则要求及目标	按照火场的自我救助行动规范和自救原则，选择自我救助动作、完成火场逃生自救。
实验行动规范	◆现场观察火情，寻找自救设备。用户控制人物前进，打开抽屉，找到 EEBD（全称 Emergency Escape Breathing Device，紧急逃生呼吸装置），并按要求控制人物穿戴好 EEBD，随后人员转化为穿戴 EEBD 后的状态，继续寻找出口。 ◆找出口时人物只能低姿势沿着墙壁走，若不是低姿势沿着墙壁走，显示错误或弹出弹框显示（违反的对应的求生原则）。 ◆找出口中间弹框显示 EEBD 气压不足，选择应对措施。此时卫生间门把手高亮，打击门把手后厕所门打开，毛巾高亮，点击毛巾后，操控人物开启水龙头将毛巾打湿。选择正确继续下一步，选择错误后重新进行选择。 ◆人物当前为捂着湿毛巾状态，用户控制人物低姿势扶着墙壁前进，继续寻找出口。 ◆用户控制人物到达大门后，点击开门，操纵人物开门时弹窗显示大门故障（若没有故障，则开启大门后逃生实验结束），无法开启。然后弹出应对措施进行选择，控制人物返回卫生间并关闭厕所门，开启淋浴水龙头（背景声音播放喷水声音），等待救援，弹出弹框显示实验结束。未关闭厕所门可弹出弹框提示。

3 系统开发与实现

3.1 系统流程设计

船舶基本安全防火灭火实训系统采用计算机虚拟现实技术、三维建模仿真技术、多媒体技术、项目管理技术和网络管理技术为依托，面向服务的软件架构开发，集实物仿真、创新设计、智能指导、虚拟实验结果和教学管理于一体[9]，以实现有指定区域内的真实场景再现，进行人机实时交互操作。

整个实训流程分为两种模式：一是学习模式，一是考核模式。在学习模式下，学员在实训过程中会有提示和说明，引导学员完成实训。而考核模式下，实验者需要全程自主操作，以考核其实训步骤和操作，系统会根据实验者的表现和实验过程自动给出实验分值。以上两个模式，最终都会有一个综合实验结果，实验结束后形成一个实验报告，实训项目流程如图 2 所示。

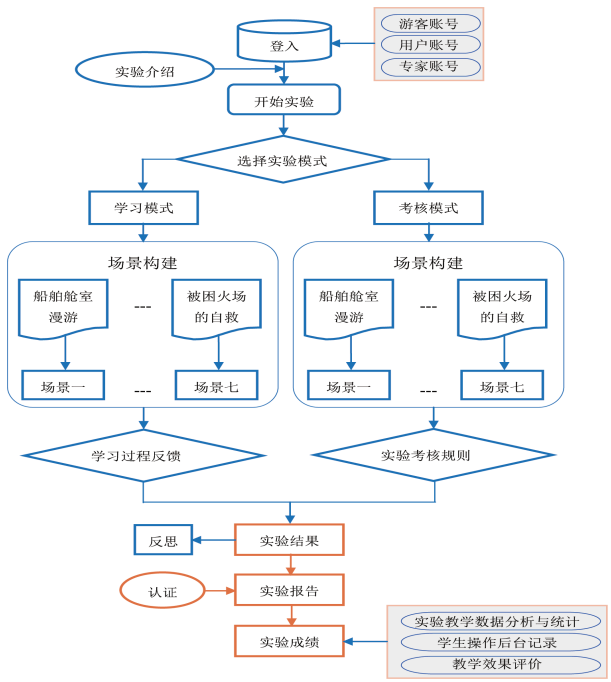


图 2 实训项目流程框架示意图

3.2 系统场景仿真与实现

VR 虚拟仿真系统场景制作是一个复杂的过程，主要涉及需求整理、场景设计、代码编写、系统测试 [10] 等多个环节，流程如图 3 所示：

（1）首先根据实训需要的场景编写详细的脚本，然后采集三维实体模型，利用 3ds Max 建模，为构建虚拟场景做准备。

（2）将建好的模型进行贴图处理，并导入 Unity3d 模型库备用。

（3）用 Unity 进行交互代码的编写，制作交互动画，并加入图片、音频、视频、flash 等媒体文件，实现虚拟场景的交互。

（4）连接虚拟现实头盔、控制手柄等硬件，导入 VR 系统，完成制作。

（5）系统调试成功则导入实训平台使用，否则重新修改代码。

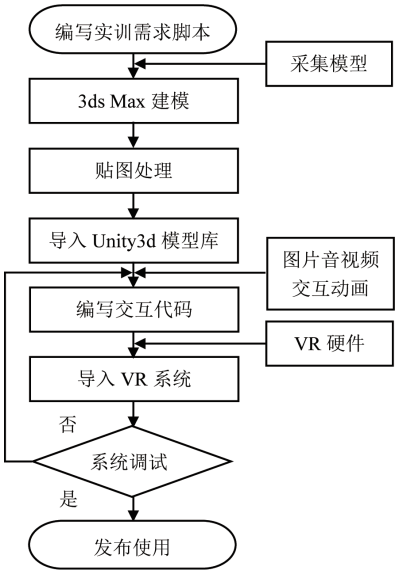


图 3　虚拟现实场景仿真制作流程

3.3 系统场景实现效果

通过软件测试和专业师生的试用，系统较为流畅，普遍认为火场体验感较好，学生即可以反复操作保证实训操作的熟练度，又能身临其境体验火灾的真实场景，充分调动学生参与的积极性和主动性，有利于实训效果的提升。但也提出虚拟操作与实物操作的感觉有一定差距，火灾的视景制作效果还有待提高，运行效果如图 4、图 5 所示。



图 4　探火服的穿戴效果



图 5　被困火场的自救场景效果

4　结论与展望

随着 VR 技术的不断成熟，基于 VR 的应用研究将越来越广泛。本文通过对船舶基本安全实训项目系统分析，

整理出主要的 26 个知识点、设计了 7 个场景涵盖 2021 版《培训大纲》基本安全防火灭火的实践技能与要求，并通过 VR 相关技术开发出船舶基本安全防火灭火实训系统。结果表明，系统沉浸式教学的体验感较好，可以提高实训教学效果。与传统的基本安全实训相比，还具有节约成本、降低风险的优势。然而，如何解决虚拟操作的真实感和精细度、提高视景制作效果，将是以后的重点研究方向。

参考文献

[1] Exploring the user experience of three-dimensional virtual learning environments[J] . Dong-Hee Shin,Frank Biocca,Hyunseung Choo. Behaviour & Information Technology . 2013 (2).

[2] 黄奕宇 . 虚拟现实 (VR) 教育应用研究综述 [J]. 中国教育信息化 ,2018,1:11—16.

[3] 张量 , 金益 , 刘媛霞 , 等 . 虚拟现实（VR）技术与发展研究综述 [J]. 信息与电脑 ,2019,17:126—128.

[4] 蒋效彬，谭家万，任鸿翔，邱绍杨 . 基于虚拟现实技术的船用锚机交互仿真系统 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版). 2019,38(6):12-16.

[5] 王海全 , 谭银朝 , 刘胜 . 船舶机舱虚拟现实仿真系统研究 [J]. 现代信息科技 . 2019,3(7):85-86+89.

[6] 姚鹏飞，陈正鸣 , 童晶 , 钱丽娜 . 基于 Unity3D 的绞吸式挖泥船虚拟仿真系统 [J]. 系统仿真学报 . 2016, 28(9):2069-2075+2084.

[7] 张如凯，陈永利，代广树，吴泽亮 . 航海类专业船舶虚拟仿真实训平台建设 [J]. 实验室研究与探索 . 2018, 37(7):118-121.

[8] 3D Surface Painting in VR using Force Feedback[J] . Minyoung Kim,Young J. Kim. Journal of the Korea Computer Graphics Society . 2020 (2)

[9] 马文中 , 邹国享 , 张洪文等 . 高分子材料注塑成型模具的安装与调试虚拟仿真实验教学系统建设 [J]. 中国现代教育装备 , 2021, (17): 19-21. DOI:10.13492/j.cnki.cmee.2021.17.006.

[10] 袁东斌 . 船舶制造仿真实训系统设计与开发 [J]. 辽宁大学学报 (自然科学版), 2021, 48 (03): 229-235. DOI:10.16197/j.cnki.lnunse.2021.03.004.

基金项目：福建省中青年教师教育科研项目（JAT210308、JAT190542）；福建省 2021 年大学生创新创业项目（S202110399030S）；泉州师范学院教育教学改革研究项目（JGX2021062）。

作者简介：

戴官全，讲师，硕士，主要从事航海技术及航海教育研究，（E-mail）240838365@qq.com

具有工况适应性的船舶综合能源系统能量管理

司玉鹏[1,2]　王荣杰[2*]　刘亚杰[1*]

（1. 国防科技大学 系统工程学院，湖南长沙　410073；2. 集美大学轮机工程学院，福建厦门　361021）

摘 要：针对动态工况下船舶综合能源系统能量优化调度问题，提出一种基于深度双 Q 网络算法的船舶综合能源系统可迁移能量管理策略。该策略采用深度双 Q 网络以最小化系统运行成本为目标，运用历史航行数据高效学习最佳调度策略，并利用模型参数迁移方法，将历史工况的策略网络参数转移到新工况，使新工况的策略网络快速收敛。实船数据模拟船舶航行试验结果表明，该策略能够有效提升系统对动态工况的适应性。

关键词：新能源船舶；工况；深度双 Q 网络；能量管理

0　引　言

我国是海洋大国，拥有长达 1.8 万多公里的海岸线，300 多万平方公里的海洋面积，东部沿海拥有全球 10 大港口中的 7 个，2020 年港口货物吞吐量更是居世界首位[1]。图 1 展示了在我国沿海区域作业的船舶数量统计及其分布情况[2]。

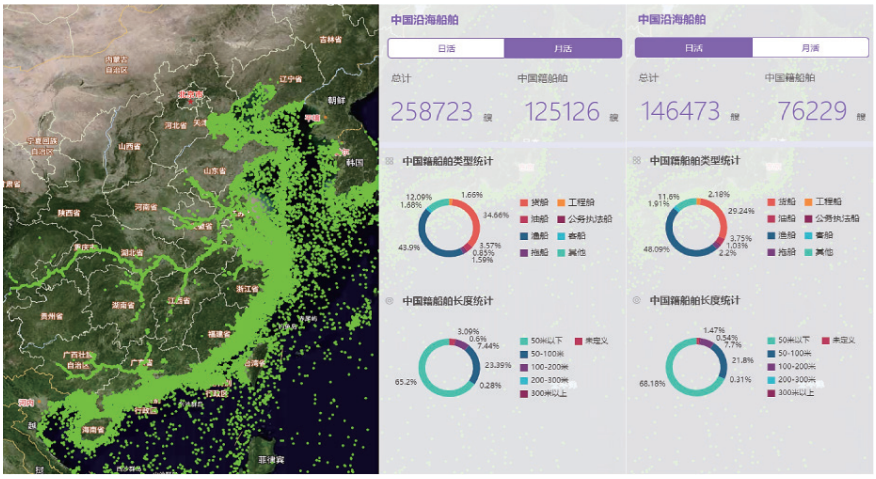


图 1　我国沿海区域作业的船舶数量统计及其分布情况

如此庞大的海洋运输体系对我国的经济发展具有巨大的推动作用，但同时也意味着巨大的污染排放。尽管典型的近海船舶尺寸相比于远洋运输船舶小很多，但是近海船舶的排放量在全球船队总排放量中占据相当大的比例。据估计，全球 70% 的航运排放物产生于海岸线 400 km 以内[3]。依据《IPCC 国家温室气体清单指南》，我国航运业的年温室气体排放量约为 4 200 万 t，其中包括国内航行的近海船舶年温室气体排放量约 3 400 万 t，以及全球航行的国际船舶在我国港口间的年温室气体排放量约 800 万 t[4]。根据《中国移动源环境管理年报 (2021)》中的数据，2020 年我国领海基线 12 n mile 内船舶氮氧化物排放量高达 127.2 万 t，占我国非道路移动源氮氧化物排放量的 27.5%，占我国移动源氮氧化物排放总量的 11.7%[5]，这对占全国人口 45% 的沿海地区的空气质量造成

严重影响。硫氧化物排放会损害人体呼吸系统，并且通过形成酸雨对敏感的生态系统造成破坏[6]。长期暴露于氮氧化物可导致呼吸道和肺癌死亡[7]。根据 Sofiev 等人[8]的研究，即使运用更加清洁的船用燃料，每年仍有大约 25 万人死亡和 640 万儿童哮喘病例与船舶的 PM2.5 有关。由此可以看出，航运业面临的节能减排问题亟待解决，特别是在近海水域作业的船舶。

新能源具有丰富、可再生、清洁等优势，成为船舶向绿色化转型的绝佳选择[9]。因此，在常规能源系统中引入新能源发电设备的船舶综合能源系统，是船舶实现高输出、低能耗、少污染可持续发展目标的一种有效方式。但新能源出力的间歇性、航行环境的不确定性，船舶作业的多样性，使得新能源船舶电力系统的运行工况复杂多变，而当前的能量管理策略无法满足船舶综合能源系统运行工况多样化的需求，系统的能源管理面临着极大的挑战。因此，需要开展安全高效的能量管理策略研究，以满足船舶综合能源多样化运行工况的需求。

现有的能源管理策略包括三大类 : 基于逻辑门限规则的能量管理策略、基于优化算法的能量管理策略以及基于机器学习的能量管理策略。基于确定性规则的能量管理策略，因其设计简单、可靠性高、可读性强且技术相对成熟，目前已成为船舶电力系统广泛采用的一种控制策略，该策略根据预先设定的逻辑规则和阈值参数实现船舶综合能源系统的能量分配及协调控制。逻辑规则主要由研究人员根据船舶的动态性能需求以及各类型供电设备的运行特性进行合理设计[10-12]。控制阈值则需要进行大量的仿真和实船实验反复标定。因此，该策略普适性较差。此外，由于规则的设定固定不变，在实时响应和能源利用率方面也存在一定的局限性。

相较于基于规则的能量管理策略，基于优化的能量管理策略在响应速度方面的表现显著提升，该策略利用实时数据和模型预测，结合优化算法实现对能源系统的智能控制，从而最大化能源系统的效益和可靠性，同时最小化能源消耗和排放[13-15]。正因为该算法的控制决策变量仅针对当前时刻系统的状态信息，不考虑全运行周期的工况信息，使得局部最优的累计无法保证全局最优。并且该方法需要建立准确的系统模型，但用建模求解优化问题的方法并不总是适用的[16-20]。

以强化学习为代表的类脑智能技术的逐渐兴起，将强化学习与能量管理策略交相融合的绿色智能技术受到高度关注。文献 [21] 考虑到推进负荷的波动和高能脉冲负荷的间歇性对船舶电力系统能量管理的影响，提出一种基于深度 Q 网络算法的船舶综合能源系统能量管理方法，该方法无需对系统不确定性进行精确建模，便可获得综合能源系统的能量优化调度序列，实现对发电机组和储能系统充放电状态的实时控制，保证全电船综合能源系统的安全经济运行。文献 [22] 提出了一种基于深度 Q 网络的混合储能系统多目标优化调度方法。该方法在考虑能量管理成本的同时，引入负荷损失期望 (LOLE) 指标来评价系统的可靠性，实现纯电动渡轮零排放且具有经济效益的能源管理。文献 [23] 提出了一种基于 DDQN 算法的能量管理策略，旨在实现混合燃料电池和蓄电池推进系统的最优控制，进而降低系统的成本、提高能源利用率并减少环境污染。文献 [24] 采用物理模型和经验模型相结合的集成机器学习方法对主机的能源效率进行回归分析，以实现船舶能源效率的全面评估。并提出了一种基于分段回归的新型修正优化方法，帮助船舶运营商判断主机和船舶工作状况，并采取适当的控制策略以降低主机的能源消耗。由此可以看出，基于机器学习的能量管理策略能够根据环境信息自适应地学习和调整策略网络参数，以适应不同运行工况下的负载需求，有效地提高了能源利用率和系统性能。并且该方法可以实现“边决策边学习”的增量学习，非常适合解决新能源船舶电力系统的优化调度问题。但是该方法对数据的依赖性较强，且机器学习的过程难以解释，学习到的策略难以得知。

综上所述，将新能源发电技术引入船舶电力系统可以明显提高能源利用率、减少污染排放量，但是新能源船舶电力系统多能融合的复杂性，为系统的能量管理带来了新的挑战。构建适用于船舶综合能源的能量优化调度方法，使各类型设备相互协调配合以平抑系统波动，成为新能源应用于船舶的关键。因此，开展具有工况适应性的船舶综合能源系统能量管理策略研究符合国家“双碳”战略的需求，对于推动船舶能源装备发展和绿色

航运转型具有极其重要的意义。

1 船舶综合能源系统理论模型

本文研究的船舶综合能源系统基本架构如图 2 所示，包含分布式发电单元（光伏发电单元、风力发电单元、燃料电池、柴油发电机），相关负荷和储能系统。

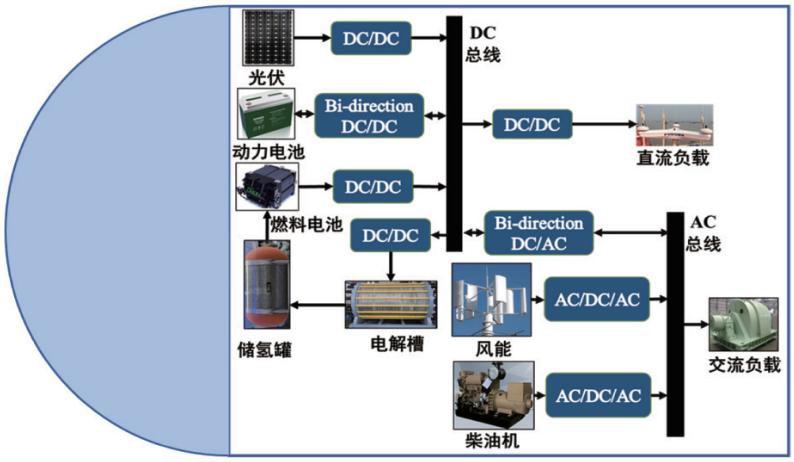


图 2 船舶综合能源系统示意图

新能源船舶综合能源系统以孤岛模式运行，其中以风力发电模块和光伏发电模块为主要供电单元，燃料电池和柴油机为辅助供电单元，储能模块和储氢模块作为储能单元。当风力发电以及光伏发电无法满足负载需求时，储能单元将弥补电力短缺。同时，当清洁能源输出功率高于负载需求时，多余的能量将存入蓄电池或用于电解水产生氢气供后续使用。在缺电时段，储存能量将被用于满足负荷需求，提高了系统的可靠性和能源的可持续性。

1.1 清洁能源发电模块

（1）光伏发电模块

单个光伏发电板 t 时刻的输出功率由公式 (1) 描述。

$$P_{pv}(t)=\mathrm{P}_{max}\times(\frac{\mathrm{I}(t)}{\mathrm{I}_{\mathrm{r}}})\times[1+\alpha_{\mathrm{T}}(T_{\mathrm{c}}(t)-\mathrm{T}_{\mathrm{r}})] \tag{1}$$

式 (1) 中，$P_{pv}(t)$ 为单个光伏发电板 t 时刻的输出功率；P_{max} 为单个光伏发电板的最大输出功率；$I(t)$ 为 t 时刻太阳的辐射强度；$T_c(t)$ 为光伏组件 t 时段的运行温度；I_r 光伏组件辐射强度参考值； 为功率温度系数；T_r 为标准测试条件下光伏组件的运行温度。

单个光伏发电板 t 时刻的运行温度由公式 (2) 描述。

$$T_C(t)=T_e(t)+\left[\frac{\mathrm{NCOT}-20}{800}\right]\times I(t) \tag{2}$$

式 (2) 中，$T_e(t)$ 为 t 时刻的环境温度；NOCT 为光伏发电板的额定运行温度。

光伏发电单元 t 时刻的输出功率由式 (3) 描述。

$$P_{pv}(t)=N_{\mathrm{pv}}\times P_{\mathrm{pv}}(t) \tag{3}$$

式 (3) 中，$P_{pv}(t)$ 光伏发电单元 t 时段输出总功率；N_{PV} 为系统中光伏发电板的总数。

（2）风力发电模块

风力发电模块的输出功率主要取决于风力机轮毂高度处的风速大小。风能经过风力发电机组之后，一部分机械能将会转化为电能。风力发电机的二次功率输出模型由式 (4) 描述。

$$p_{\mathrm{WT}}(t)=\begin{cases}0 & v_t \le v_{\min} \,\|\, v_t \ge v_{\max} \\ \dfrac{\mathrm{P_{r_WT}}\times[v(t)^3-\mathrm{v_{min}}]}{(\mathrm{v_r})^3-(\mathrm{v_{min}})^3} & v_{\min}<v_t<v_{\mathrm{r}} \\ \mathrm{P_{r_WT}} & v_{\mathrm{r}}<v_t<v_{\max}\end{cases} \tag{4}$$

式 (4) 中，v_t 为 t 时刻的风速；v_r 为风机的额定风速；$\mathrm{P}_{r_\mathrm{WT}}$ 为额定风速所对应的风机额定功率；$\mathrm{v_{min}}$ 为风机的启动风速；$\mathrm{v_{max}}$ 为风机的预警风速。当风速小于切入速度 $\mathrm{v_{min}}$ 时，无电能输出。在切入速度和额定风速 ($\mathrm{v_{min}}$~v_r) 之间时风力机输出功率与风速的立方直接相关。当风速超过额定值时，需要将输出功率限制在固定值。当风速高于预警速度 $\mathrm{v_{max}}$ 时，风电系统将停止运行，以保护系统部件，这样发电机和相应的电力电子设备才不会损坏。

风力发电模块输出的总功率由公式 (5) 描述。

$$P_{\mathrm{WT}}(t)=N_{\mathrm{WT}}\times p_{\mathrm{WT}}(t) \tag{5}$$

式 (5) 中，$P_{\mathrm{WT}}(t)$ 风力发电模块 t 时刻输出总功率；N_{WT} 为系统中风机的总数。

1.2 质子交换膜燃料电池 _ 以氢气为主要能量源的质子交换膜燃料电池的输出功率由公式 (6) 描述。

$$p_{\mathrm{FC}}(t)=\mathrm{E_{low_H_2}}\times\eta_{\mathrm{T}}\times\mathrm{U_f}\times\eta_{\mathrm{FC}}\times\frac{\mathrm{C_{H_2}}}{\Delta\mathrm{t}}\times\left(\frac{L_{\mathrm{H_2}}(t)-\mathrm{L_{min_H_2}}}{100}\right) \tag{6}$$

式 (6) 中，$\mathrm{E_{low_H_2}}$ 为氢气的低热值 ($\mathrm{vE_{low_H_2}}$=33.35kWh/kg)；$L_{\mathrm{H_2}}(t)$ 为 t 时刻储氢罐中的氢气量；η_{T} 为热力学效率（在 25℃时为 0.98）；$\mathrm{U_f}$ 为燃料利用率；η_{FC} 为燃料电池的效率；$\mathrm{C_{H_2}}$ 为储氢罐的容量； $\mathrm{L_{min_H_2}}$ 为储氢罐中最低储氢量。

燃料电池单位时间内氢气的消耗量由公式 (7) 和 (8) 描述。

$$F_{\mathrm{FC}}(t)=a_{\mathrm{FC}}\times p_{\mathrm{FC}}(t)+b_{\mathrm{FC}} \tag{7}$$

$$q_{\mathrm{H_2}}(t)=\frac{F_{\mathrm{FC}}(t)}{\mathrm{E_{low_H_2}}\times\eta_{\mathrm{T}}\times\mathrm{U_f}\times\eta_{\mathrm{FC}}} \tag{8}$$

式 (7) 和 (8) 中，$F_{\mathrm{FC}}(t)$ 为 t 时刻氢气的消耗； a_{FC} 和 b_{FC} 为燃料电池堆栈运行时的线性化系数；$q_{\mathrm{H_2}}$ 为 t 时刻储氢罐释放的氢气量。

质子交换膜燃料电池的效率由式 (9) 描述。

$$\eta_{\mathrm{FC}}=\frac{P_{\mathrm{FC}}}{m_{\mathrm{H_2}}\times\mathrm{HHV_{H_2}}} \tag{9}$$

式 (9) 中，$\mathrm{HHV_{H_2}}$ 为氢气的高热值 (120-140MJ/kg)；$m_{\mathrm{H_2}}$ 为氢气的流量。

1.3 储能模块

作为新能源船舶可控单元之一，储能装置需考虑功率输出的约束，同时储能荷电状态还受前一时刻的充放电功率影响，具有时序性的约束。储能装置需根据负荷和可再生能源盈缺情况选择合适的充放电时机，以实现经济运行和削峰填谷的优化目标。优化储能充放电策略可实现更有效的能量利用和经济运行。同时，在新能源不足时，储能装置可提供备用能源，保证船舶安全可靠运行。因此，充分利用储能装置可提高新能源船舶的整体性能和运行效率。

（1）电解槽和储氢罐

电解槽中氢气的产生量与所需功率关系由式 (10) 描述。

$$q_{\mathrm{g_H_2}}(t)=\frac{P_{\mathrm{E}}(t)\times\eta_{\mathrm{E}}}{\mathrm{HHV_{H_2}}} \tag{10}$$

式 (10) 中，$P_E(t)$ 为 t 时刻电解槽消耗的功率； $q_{g_\mathrm{H_2}}$ 为 t 时刻电解槽产生的氢气量；η_{E} 为电解槽效率。

储氢罐中氢气量由式 (11) 描述。

$$L_{H_2}(t)=\left[1-\frac{q_{g_H_2}(t)-q_{FC}(t)}{C_{H_2}}\right]\times 100\% \tag{11}$$

式 (11) 中，$L_{H_2}(t)$ 为 t 时刻储氢罐中剩余氢气量。

（2）蓄电池

混合能源系统中光伏发电和风力发电等清洁能源发电模块的功率输出随光照、风速等环境条件的变化而变化，且电力负载具有突变性。因此，为了提高整个系统的稳定性，在系统中配备响应速度快的蓄电池。电池最大储存能量 e_{max_batt} 与最小储存能量 e_{min_batt} 的关系由式 (12) 描述。

$$e_{min_batt}=(1-DOD)\times e_{max_batt} \tag{12}$$

式 (12) 中，DOD 为电池最大放电深度；如果计系统中配备的蓄电池数为 N_{batt}；则蓄电池组的最大电能容量为 E_{max_batt}=Nbatt $e_{ma\times_batt}$；最小电能容量为 $E_{min_batt}=N_{batt}\times e_{min_batt}$。

蓄电池一般作为辅助供电单元使用，在风力发电与光伏发电产生的电能之和大于负载需求时，对蓄电池进行充电，此时蓄电池的电能变化由式 (13) 描述；若风力发电与光伏发电产生的总电能不能满足负载需求时蓄电池将放电，此时蓄电池的电能变化由式 (14) 描述。

$$E_{batt}(t)=E_{batt}(t-1)+\left(P_{avail}(t)-\frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}}\right)\times\eta_{batt_c} \tag{13}$$

$$E_{batt}(t)=E_{batt}(t-1)+\left(P_{avail}(t)-\frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}}\right)/\eta_{batt_d} \tag{14}$$

式 (13) 和 (14) 中，$E_{batt}(t)$ 为蓄电池组在 t 时刻储存的总电能；$P_{load}(t)$ 为 t 时刻负载对蓄电池电能的需求量；η_{niv} 为逆变器转换率；η_{batt_c} 为电池组充电效率；η_{batt_d} 为电池组放电效率。

蓄电池的荷电状态由式 (15) 描述。

$$SOC(t)=\left(1-\frac{E_{batt}(t)}{E_{max_batt}}\right)\times 100\% \tag{15}$$

式 (15) 中，SOC(t) 为 t 时段蓄电池的荷电状态。

则蓄电池 t 时段的放电功率由式 (16) 描述。

$$P_{batt}(t)=\frac{E_{batt}(t)-E_{min_batt}}{\Delta t} \tag{16}$$

式 (16) 中，$P_{batt}(t)$ 为 t 时刻蓄电池组的放电功率。

则储能模块 t 时段的放电功率由式 (17) 描述。

$$P_s(t)=P_{FC}(t)+P_{batt}(t) \tag{17}$$

1.4 柴油发电机模块

若 t 时刻风力发电、光伏发电以及储能模块的电能之和不能满足负载需求，则启动柴油机，所需柴油机的输出功率由式 (18) 描述。

$$P_D(t)=\frac{P_{load}(t)}{\Delta t}-P_{PV}(t)-P_{WT}(t) \tag{18}$$

式 (18) 中，$P_D(t)$ 为柴油机在 t 时刻的输出功率；$P_{load}(t)$ 为 t 时刻的负载。

柴油发电机的输出功率由油耗所决定，柴油机的功率输出与燃油消耗率的关系由式 (19) 描述。

$$f_D(t)=\mu_D\times P_{rate}+v_D\times P_D(t) \tag{19}$$

式 (19) 中，$f_D(t)$ 为柴油机 t 时段的燃油消耗量；P_{rate} 为柴油机的额定输出功率；参数为 μ_D 燃油曲线截距系数；v_D 为燃油曲线斜率。

1.5 船舶综合能源系统能量管理马尔科夫决策过程建模

船舶综合能源系统的运行过程是一个随机过程，因此可以基于马尔可夫决策过程对船舶综合能源系统能量管理问题进行建模。然后，采用深度强化学习智能体与环境反复交互的经验调整能量优化调度策略。MDP 通常由状态空间 S，动作空间 A，奖励函数 R 和值函数 $\Re$ 进行描述。

状态：描述当前时刻 t 系统的状态信息。在本文最优能量管理问题中，由风光发电系统输出功率、负荷需求、储氢罐中的氢气量和蓄电池的荷电状态组成，t 时刻环境状态 s_t 由式 (20) 描述。

$$s_t = [P_t^{\mathrm{PV}}, P_t^{WT}, P_t^{\mathrm{load}}, P_t^{d}, T_t^{\mathrm{H_2}}, SoC_t^{batt}] \tag{20}$$

式 (20) 中，P_t^{PV} 表示当前时段光伏发电系统的输出功率；P_t^{WT} 表示当前时段风力发电系统的输出功率；P_t^{load} 表示当前时段船舶的电力负载需求；P_t^{d} 表示当前时段柴油机的输出功率；$T_t^{H_2}$ 为当前时段储氢罐中氢气量；$SoC_{\mathrm{t}}^{\mathrm{batt}}$ 为当前时段蓄电池的荷电状态。

动作：给定状态 s_t，智能体通过采取与系统状态相关的动作 a_{t} 与环境进行交互。在本研究中，智能体采取的动作用于调整每个时间步内可控发电设备的输出功率。船舶综合能源系统中，可控的能源设备包括蓄电池、燃料电池系统以及柴油机。在 t 时刻的动作 at 可由式 (21) 描述。

$$a_t = [O_t^{\mathrm{batt}}, O_t^{\mathrm{FC}}, O_t^{\mathrm{d}}] \tag{21}$$

式 (21) 中，O_t^{FC}、O_t^{d} 和 O_t^{batt} 分别表示当前时刻 t 燃料电池、柴油机和蓄电池的控制动作，其中燃料电池系统和蓄电池包括放能、储能和空闲三种状态。

由于 DDQN 网络只能处理离散的动作，若将上述决策变量全部作为 DDQN 网络的动作，会出现动作空间组合数量大，神经网络输出维数高，训练难度大的问题。根据能量守恒定律可知，动作空间 A 中的任何变量都可以通过其它两个变量计算获得，从而可以将动作空间简化为 t 时段蓄电池的输出功率，以及燃料电池和柴油机的动作优先级组成。故 t 时刻的动作 a_{t} 由式 (22) 描述。

$$a_t = [P_t^{batt}, \psi_t] \tag{22}$$

式 (22) 中，ψ_{t} 等于 0 或 1，表示燃料电池和柴油机的动作优先级，若 ψ_{t}=0，柴油机优先动作，即当清洁能源发电设备和蓄电池的能量不能满足负载需求时，由柴油机优先供电；若 ψ_{t}=1，首选设备为燃料电池，当风光发电系统和蓄电池的输出功率不能完全满足载荷需求时，优先使用燃料电池，若仍无法满足负荷需求，剩余的能量将自动由柴油机提供。

回报：本文制定的回报函数由四部分组成。第一部分为储能系统超过相关约束条件进行惩罚，惩罚函数由式 (23)、(24) 和 (25) 描述。

$$r_s^p(t) = r_{\mathrm{H_2}}^p(F_{\mathrm{H_2}}(t)) + r_b^p(P_{\mathrm{batt}}(t)) \tag{23}$$

$$\begin{aligned} r_{\mathrm{H_2}}^p(F_{\mathrm{H_2}}(t)) = \mathrm{C}_{\mathrm{H_2}} \times [&\max(SoC_{\mathrm{H_2}}(t+1) - SoC_{\mathrm{H_2}}^{\max}, 0) + \\ &\max(SOC_{\mathrm{H_2}}^{\min} - SoC_{\mathrm{H_2}}(t+1), 0)] \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned} r_b^p(P_{\mathrm{batt}}(t)) = \mathrm{C}_{\mathrm{batt}} \times [&\max(SoC_{\mathrm{batt}}(t+1) - SoC_{\mathrm{batt}}^{\max}, 0) + \\ &\max(SOC_{\mathrm{batt}}^{\min} - SoC_{\mathrm{batt}}(t+1), 0)] \end{aligned} \tag{25}$$

式 (23)、(24) 和 (25) 中，$r_s^p(t)$、$r_{\mathrm{H_2}}^p(t)$ 和 $r_b^p(t)$ 分别表示当前时段 t 储能系统、蓄电池和储氢罐的越限惩罚；$F_{\mathrm{H_2}}(t)$ 表示为当前时段 t 燃料电池消耗的氢气量；$P_{\mathrm{batt}}(t)$ 表示当前时段 t 蓄电池的输出功率；$\mathrm{C}_{\mathrm{H_2}}$ 和 $\mathrm{C}_{\mathrm{batt}}$ 分别表示储氢罐和蓄电池的越限惩罚系数。

第二部分为了提高清洁能源发电系统的电能利用率，减少“弃电失衡”现象，引入“弃电”惩罚和“失衡”惩罚，由式 (26) 和式 (27) 描述。

$$r_c^p(P_{exc}(t)) = \mathrm{C}_{exc} \times P_{exc}(t) \tag{26}$$

$$r_{ub}^p(P_{ub}(t)) = \mathrm{C}_{ub} \tag{27}$$

式 (26) 和式 (27) 中，r_c^p 表示当前时刻 t 的弃电惩罚，r_{ub}^p 表示当前时刻 t 的失衡惩罚，$P_{\mathrm{exc}}(t)$ 表示当前时刻 t 的弃电功率，表示当前时刻 t 的失衡功率，C_{exc} 表示“弃电”惩罚系数，C_{ub} 表示“失衡”惩罚系数。

第三部分为了降低船舶综合能源系统的能耗。引入燃料消耗成本，包括柴油机的燃油成本、燃料电池燃氢成本和电解槽制氢收益，由式 (28) 描述。

$$r_f^p(t)=\mathrm{C_d}\times Fu_{\mathrm{d}}(t)+\mathrm{C_{H_2}}\times(M_{\mathrm{H_2}}^c(t)-M_{H_2}^g(t)) \tag{28}$$

式 (28) 中，$r_f^p(t)$ 表示当前时刻 t 的燃料消耗成本，C_d 和 C_{H_2} 分别表示柴油和氢气的单价，$Fu_d(t)$ 表示当前时刻 t 柴油机的燃油消耗量，$M_{\mathrm{H_2}}^c(t)$ 和 $M_{\mathrm{H_2}}^g(t)$ 分别表示当前时刻 t 系统消耗和产生的氢气量。

第四部分为了降低船舶的污染气体排放量，引入污染治理费用惩罚，由式 (29) 描述。

$$r_{po}^p(t)=Fu_d(t)\times(\mathrm{C_C}\times\mathrm{O_c}+\mathrm{C_N}\times\mathrm{O_N}+\mathrm{C_S}\times\mathrm{O_S}) \tag{29}$$

式 (29) 中，$r_{po}^p(t)$ 表示当前时段 t 系统污染物治理成本，C_c、C_N 和 C_S 分别表示碳氧化物、氮氧化物和硫氧化物的治理成本单价，O_C、O_N 和 O_S 分别表示柴油燃烧产生的碳氧化物、氮氧化物和硫氧化物排放量系数。

综上，当前时刻 t 的回报函数由式 (30) 描述。

$$r^e(t)=r_s^p(t)+r_c^p(t)+r_f^p(t)+r_{po}^p(t) \tag{30}$$

式 (30) 中，$r^e(t)$ 表示当前时刻 t 环境的回报函数。

值函数：本文以总体运营费用的期望最小为目标，寻找最合适的能量管理策略 π，实现船舶综合能源系统的能量优化调度。其目标函数由式 (31) 描述。

$$\min\Re(\pi)=\mathrm{E}_\pi[\sum_{t=0}^{T-1}\gamma^t r(t)] \tag{31}$$

1.6 船舶综合能源系统运行约束

船舶综合能源系统以孤岛模式运行，无外部电源辅助供电，故为保证船舶综合能源系统的安全可靠运行，船舶综合能源系统运行过程中应保持实时的供需平衡，由式 (32) 描述。

$$P_{avail}(t)+P_d(t)+P_{batt}(t)+P_{Fc}(t)=P_{load}(t) \tag{32}$$

柴油发电机实时能量输出相关约束由式 (33) 和式 (34) 描述。

$$P_d^{\min}\le P_d(t)\le P_d^{\max} \tag{33}$$

$$-\mathrm{D}_d\Delta t\le P_d(t+\Delta t)-P_d(t)\le \mathrm{D}_u\Delta t \tag{34}$$

式 (33) 和 (34) 中，$P_d^{\min}$ 和 $P_d^{\max}$ 分别表示柴油机的最大最小输出功率，D_d 和 D_u 分别表示柴油发电机的向下和向上爬坡速率。

对于储能系统，过充过放都将影响设备的使用寿命，为了在保证船舶电力系统安全可靠运行的前提下，提高储能系统的寿命，蓄电池和燃料电池的实时输出功率约束由式 (35) 描述，对蓄电池的荷电状态进行约束，由式 (36) 描述。

$$\begin{cases}P_{batt}^{\min}\le P_{batt}(t)\le P_{batt}^{\max}\\ P_{Fc}^{\min}\le P_{Fc}(t)\le P_{Fc}^{\max}\end{cases} \tag{35}$$

$$SoC_{batt}^{\min}\le SoC_{batt}(t)\le SoC_{batt}^{\max} \tag{36}$$

式 (35) 和式 (36) 中，SoC_{batt}^{min} 和 SoC_{batt}^{max} 分别表示蓄电池荷电状态的上下限，分别为 0.1 和 0.9；P_{batt}^{min} 和 P_{batt}^{max} 分别表示蓄电池的最大最小输出功率，P_{Fc}^{min}和 P_{Fc}^{max}分别表示燃料电池的最大最小输出功率。

2 基于 DDQN 算法的船舶综合能源系统可迁移能量管理策略

2.1 深度 Q 网络算法

在 Q-learning 中，Q 函数的更新迭代公式根据 Bellman 方程以递归方式描述，如式 (37) 所示。

$$Q_\pi(s_t,a_t)\leftarrow Q_\pi(s_t,a_t)+\\ \mu[r_{t+1}+\gamma^t\min_{a_{t+1}}Q_\pi(s_{t+1},a_{t+1})-Q_\pi(s_t,a_t)] \tag{37}$$

式 (37) 中，μ 表示学习率，a_{t+1} 为 s_{t+1} 状态下可以执行的动作。Bellman 方程表明，Q 值可以通过自举方式进行更新，即我们可以通过使用 Q 的当前估计来改进 Q 的未来估计。一般情况下，强化学习算法可以基于智能体与环境的相互作用对价值函数进行迭代优化，使价值函数最大化，从而得到最优的动作策略集 π^*。然而，对于要解决的船舶综合能源系统能量优化问题，由于值函数的状态空间是连续的，所以不能以状态传递函数或表的形式计算。因此，值函数应该用函数逼近法表示，这样强化学习算法才能用于解决具有复杂不确定性的系统优化问题。

为了规避基于表格的 Q-learnin 高纬计算困难问题，采用基于 Q 网络的深度强化学习算法，通过深度神经网络逼近值函数，即 $Q(s,a)\approx Q(s,a|w)$，每个值函数对应一组参数 $Q(s,a|w)$。在神经网络中，参数 w 是每个网络层的权值。使用状态值作为神经网络的输入，输出为每个状态 - 动作对的 Q 值。此时，更新值函数 Q 实际上就是更新参数 w，使用平方误差 MSE 作为误差函数，由式 (38) 描述。

$$L(s_t,a_t,s_{t+1}\mid w)=[r_t+\gamma^t\times\min_{a_{t+1}}Q_\pi(s_{t+1},a_{t+1}\mid w)\\ -Q_\pi(s_t,a_t\mid w)]^2 \tag{38}$$

式 (38) 中，用 $r_t+\gamma^t\times\min_{a_{t+1}}Q_\pi(s_{t+1},a_{t+1}\mid w)$ 表示目标 Q 值，用 $Q_\pi(s_t,a_t\mid w)$ 表示动作对应的动作 Q 值。

由于强化学习收集的数据是由智能体与环境之间的交互产生的，这意味着这些数据之间存在相关性，使用这些数据来训练网络参数会使深度神经网络的性能不稳定。因此，为了降低数据之间的相关性，提高深度神经网络训练的稳定性，DQN 算法引入了一种经验重放机制。该方法将数据存储在重放缓冲区中，然后采用随机抽样的方法批量从重放缓冲区中提取数据来训练神经网络，可以降低采样数据的时间相关性。

由于在目标 Q 值函数和动作 Q 值函数中都存在参数 w，因此采用小批量半梯度下降的方式更新参数，假设抽取 n 个样本作为对期望值的采样估计，更新公式由式 (39) 和式 (40) 描述。

$$w_t\leftarrow w_t-\alpha\nabla_w L(s_t,a_t,s_{t+1}\mid w) \tag{39}$$

$$\nabla_w L(s_t,a_t,s_{t+1}\mid w)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(r+\gamma\max_{a_{t+1}}Q(s_{t+1},a_{t+1}\mid w)-\\ Q(s_t,a_t\mid w))\nabla Q(s_t,a_t\mid w) \tag{40}$$

式 (39) 和 (40) 中，∇ 为梯度计算函数。通过误差函数 L 对参数 w 进行反馈更新，使网络的实际输出值函数 Q 接近目标值。由式 (40) 可以发现，神经网络参数的输出目标值会继续参与网络参数 w 的训练，这会导致 Q 网络训练不稳定。因此，为了降低数据之间的相关性，提高神经网络训练的稳定性，DQN 算法引入了固定目标参数机制。采用目标网络和评价网络两个独立的网络，实现参数的迭代更新，减小目标值与评价值之间误差函数的损失值，获得最优输出 Q 值。用于计算值函数的动作评价网络参数 w 在每一步中更新一次，而目标网络参数在固定数量的步骤后更新。

此外，强化学习算法需要在探索和利用之间保持平衡，以选择 agent 的动作。通过探索的过程，agent 可以获得更多关于未知环境的信息，利用过程使 agent 能够根据当前信息做出最佳决策。因此，为了避免算法陷入局部最优，获得全局最优策略 π^*，本文采用 ε- 贪心策略选取策略 π。其具体选择方法如式 (41) 所示，即智能体在动作空间 A 中随机选择任意动作的概率为 ε。并且 ε 值随着算法的迭代逐渐衰减，保证了神经网络参数在强化学习后期趋于稳定，值函数 Q 能快速达到最优值，提高了算法的训练效率。

$$\pi(s)=\begin{cases}\forall a(a\in A), & \text{rand}(1)<\varepsilon\\ \arg\min_a Q_\pi(s,a\mid w), & else\end{cases} \tag{41}$$

2.2 深度双 Q 网络

本研究利用深度双 Q 网络 [25]（Q 学习的一种变体）来学习船舶综合能源系统的最佳能量优化调度方案。

DDQN 算法相关伪代码见附录 C-1。DDQN 在不向 DQN 引入额外神经网络的情况下，通过解耦目标 Q 值动作的选择和目标 Q 值的计算来消除过度估计问题。深度双 Q 网络不再是直接在目标 Q 网络里面找各个动作中最大 Q 值，而是在当前 Q 网络中先找出最大 Q 值对应的动作，然后利用选择出来的动作在目标网络中计算目标 Q 值，如式 (42) 所示。

$$y_j = r_j + \gamma Q\left(s_{j+1}, \arg\max_a\left(Q\left(s_{j+1}, a \mid w\right)\right) \mid w'\right) \tag{42}$$

最后，在深度神经网络训练完成后，可以对其网络参数进行存储，方便直接调用训练后的模型来实现船舶综合能源系统能量的优化调度。

2.3 策略网络模型参数迁移

当航行周期改变时，神经网络将需要重新训练，这是一项耗时费力的任务。本文将深度强化学习与迁移学习相结合，提出一种基于 DDQN 算法的船舶综合能源系统可迁移能量管理策略，该策略将一个领域的知识作为先验经验转移到另一个新领域，使新领域的网络快速达到收敛值。

模型参数迁移是目前应用最为广泛的一种迁移学习方法。其基本思想为通过源域训练好的模型与目标域的模型实现参数共享 [26]。因此，我们运用模型参数迁移思想，构建适用于不同航行周期的深度强化学习能量管理决策智能体，不仅节省了模型的训练时间，还使模型的鲁棒性和泛化能力得到明显的提高。深度强化学习能量管理迁移过程中将不同工况下获取的数据集分别作为源域和目标域，该方法具体步骤如下。

Step1：保存源域 (工况 1) 数据集训练好的 DDQN 策略网络参数。

Step2：在目标域 (工况 2) 构建同源域相同结构和超参数的 DDQN 策略网络，并将保存的源域策略网络参数迁移至目标域，作为经验用于目标域策略网络的训练。

Step3：运用少量样本对目标域策略网络模型进行微调。

Step4：完成目标域 DDQN 能量管理决策智能体的构建。

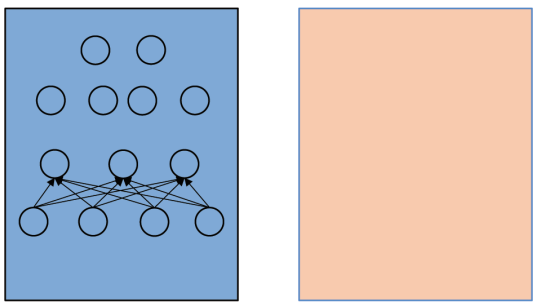


图 3　能量管理策略网络迁移模型

3　具有工况适应性的船舶综合能源系统能量管理实现流程

基于 DDQN 算法的船舶综合能源系统可迁移能量管理策略流程图如图 4 所示，步骤如下。

Step1：分别搭建目标网络和评估网络，并初始化两个网络的权重参数 w 和 w'。

Step2：获取船舶综合能源系统的初试状态 s_1。

Step3：在每个控制时段 t，智能体基于当前状态 st (式 20) 和策略 $\pi_w(a|s)$，输出每种动作对应的 Q 值，并根据 *ε-greed* 策略选择动作 a_t(式 22)。

Step4：环境基于当前智能体选择的动作 a_t 改变环境中各类型设备的状态 s_{t+1} 并获得回报 r_t(式 23)。

Step5：将经验 (st, at, s_{t+1}, r_{t+1}) 存储到经验回放池。

Step6：通过随机小批量抽取 N 个经验样本 $(s_n, a_n, r_{n+1}, s_{n+1})$，n=1，2，…，N，利用式 (32)、(33) 和 (34) 计算损失函数，并更新网络参数 w。

Step7：每隔固定时间间隔步长 T，将评估网络权重复制到目标网络 $w'=w$，对目标网络进行更新。

Step8：该段航行周期是否终止，否则返回 Step3。

Step9：判断是否达到训练终止条件，如果是，保存能量管理决策智能体网络模型的权重参数，否则返回 Step2。

Step10：利用基于 DDQN 的能量管理决策智能体确定最佳的能量优化调度动作。

Step11：若船舶的航行周期发生改变，将能量管理决策智能体学习到的一个领域的最佳网络权重参数复制到另一个新领域作为先验知识，提高新领域决策网络训练的收敛速度。

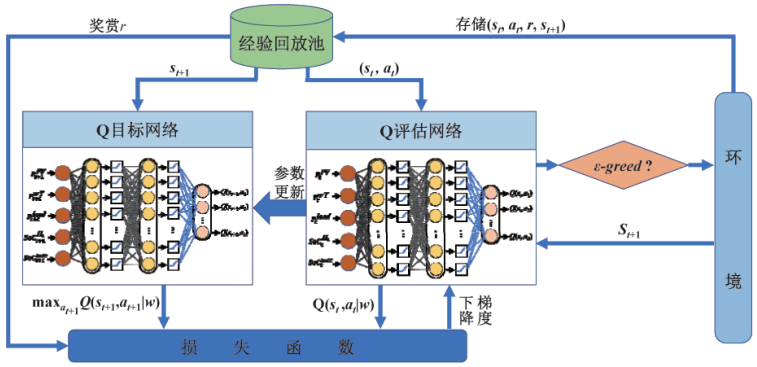


图 4　DDQN 算法流程图

4　算例仿真与分析

4.1　算例设置

本文提出的基于 DDQN 算法的船舶综合能源系统可迁移能量管理策略使用的编程语言基于深度学习包“Tensorflow 1.15.0 和 keras”编写，语言环境为 Python 3.7。使用深度强化学习工具包 OpenAI Gym 来实现船舶综合能源系统的模拟仿真。仿真环境的计算机配备 Intel Core i7-11700 CPU, 16GB RAM, 英伟达 GeForce GTX 3060 GPU。

搭建一个四层的 DDQN 决策智能体网络模型，Q 网络的输入是一个包含光伏模块输出功率，风力发电模块输出功率，柴油发电机输出功率，蓄电池荷电状态，储氢罐氢气量和负荷需求的五维特征向量 $s_t=[P_t^{\mathrm{PV}}, P_t^{WT}, \mathrm{P}_t^{\mathrm{load}}, T_t^{\mathrm{H_2}}, \mathrm{SoC}_t^{batt}]$，Q 网络有两个隐藏层，每一层有 100 个神经元。隐藏层的激活函数都是 ReLU 函数，输出层未应用激活函数以允许负值动作的输出，Q 网络的输出是蓄电池动作对应的 Q 值，以及能量不足或能量过剩条件下，指定燃料电池或柴油机优先级动作对应的 Q 值，根据蓄电池的功率约束条件，蓄电池动作可以离散为 [-1，-0.8，-0.6，-0.4，-0.2，0，0.2，0.4，0.6，0.8，1]×(1-DOD)×Emax，优先级动作可以离散为 [0，1]，动作空间表示为 3 种可控发电设备的 22 种动作组合，因此，输出层是由 22 个线性神经元组成的全连接层。DDQN 决策智能体网络模型超参数见表 1。

表 1　DDQN 决策智能体网络模型超参数

参数	值	参数	值
学习率 α	0.00025	经验回放池大小 D	10000
迭代更新步数	3000	小批量数据采样大小 N	128
Ɛ-greed 的初始值	0.8	目标网络更新间隔步长 T	50
Ɛ-greed 的最小值	0.001	评估 Q 网络优化器	RMSprop
Ɛ-greed 每个训练步衰减大小	0.000125		

4.2 仿真试验及结果分析

为验证本文提出的船舶综合能源系统能量管理策略的有效性，运用预处理后的航行数据，对基于 DDQN 算法的可迁移能量管理策略进行训练及验证，该船冬季采集到的历史航次信息见表 2。以航线二到航线九的数据作为训练集对智能体进行训练。

表 2 冬季部分航次信息

航线	始发港	到达港	港口作业时间 (h)	码头作业时间 (h)	航时 (h)
1	曹妃甸	莆田	41	41	149
2	莆田	秦皇岛	30	21	151
3	秦皇岛	阳江	237	34	377
4	阳江	湛江	26	26	35
5	湛江	江阴	79	45	188
6	江阴	曹妃甸	129	34	198
7	曹妃甸	阳江	163	35	301
8	阳江	湛江	73	55	84
9	湛江	广州	83	64	112

在航行过程中，智能体将接收到来自环境的风光发电系统输出功率，蓄电池的荷电状态，储氢罐中的氢气量，负荷需求以及动作回报。然后，DDQN 能量管理决策智能体基于回报值来调整策略网络模型的参数，直到获得最小回报。为了使模型训练更加平稳的收敛，对船舶综合能源系统的环境回报作缩放处理。图 5 展示了基于 DDQN 算法经过 3 000 次训练的船舶综合能源系统累积回报的平均值收敛曲线。

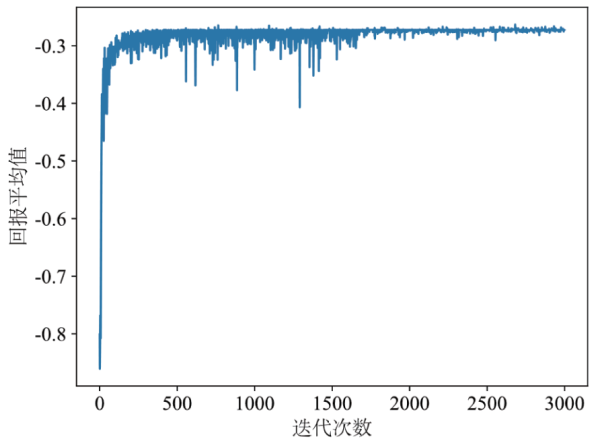


图 5 DDQN 能量管理决策智能体累计回报的平均值收敛曲线

由图 5 可以看出，在训练初期，由于智能体对环境信息不熟悉以及每个航线的输入数据的差异性，使得训练过程中环境的回报不断振荡，且无法选择可靠地动作以获得较高的回报。然而，随着智能体与环境交互次数的增加，学习样本达到一定程度时，智能体根据 Q 值不断改善控制动作，最终 DDQN 算法的累计回报值逐渐收敛到一个稳定的目标回报值，从而获得最佳的能量管理控制策略。

基于 DDQN 算法的船舶综合能源系统能量管理策略经过 3 000 次的优化迭代后，智能体可获得理想的能量管理策略，以航线 2—航线 9 的合成连续工况数据作为输入对其进行验证，获得该航程中各供电设备的出力情况如图 6 所示。

从图 6 可以看出，利用提出的基于 DDQN 算法的能量管理策略能够根据各类型设备的状态信息，做出合理的能量优化调度方案，每小时的负荷需求得到了完全供应，且能够满足各供电设备的约束条件。

由于能量管理策略旨在用于未来的航程，而未来的航程不会有预先确定的数据，因此 DDQN 策略应用一组验证航程数据（航线一作为验证航程，该航程数据不包括在训练数据集中），以检测智能体在未知工况的性

能。图 7 展示了验证航程下 DDQN 智能体的功率分配情况。

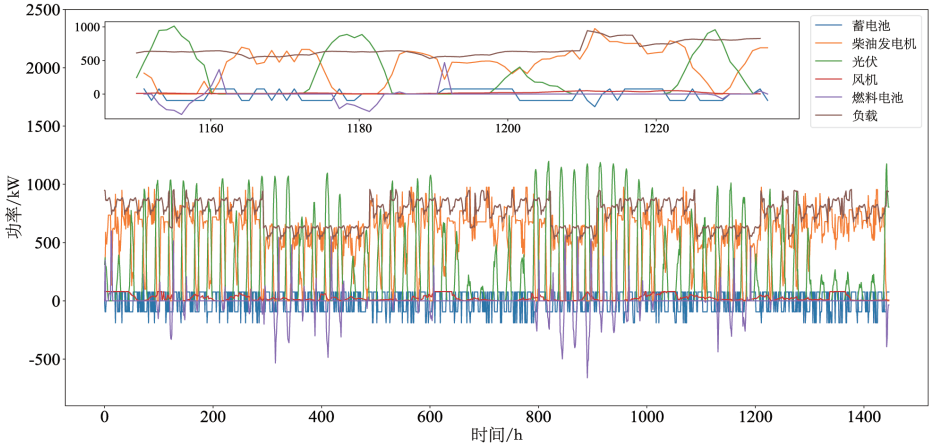


图 6　航程 2–9 中各供电源的出力情况

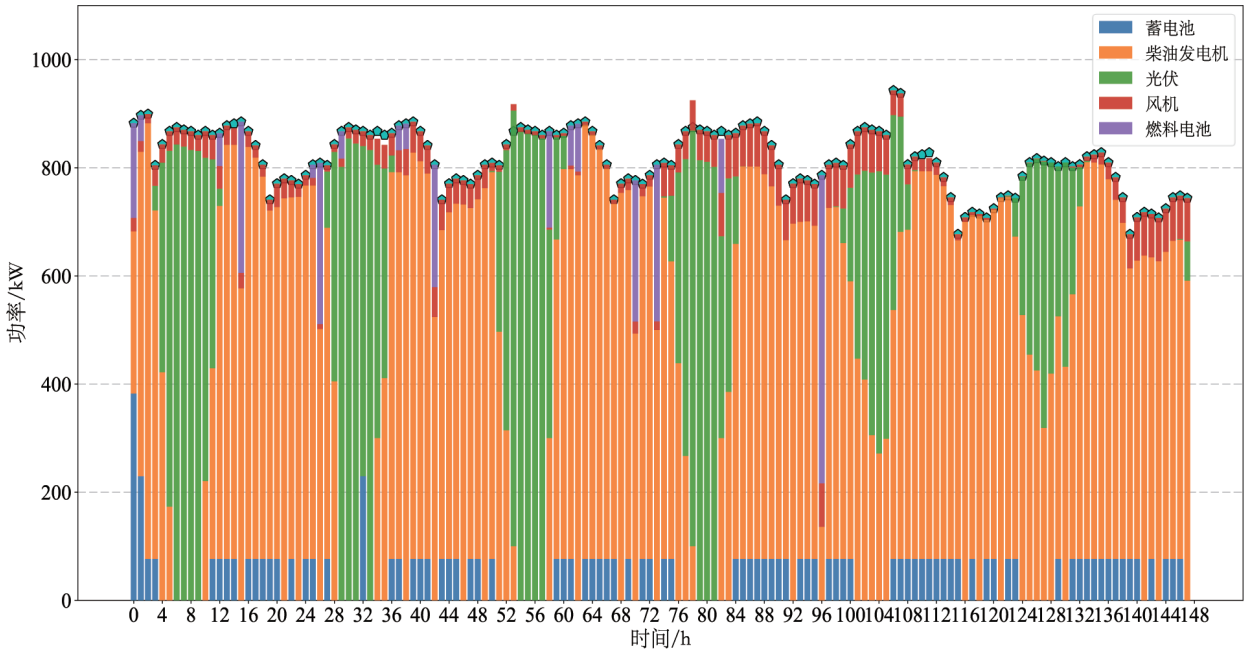


图 7　航线一中 DDQN 智能体的功率分配情况

由图 7 可以看出，当清洁能源模块输出功率处于低谷期时，船舶载荷主要由柴油发电机提供，清洁能源模块的输出功率充足时，电池充电、电解槽电解水生成氢气。由此可知，外部环境对清洁能源模块最大输出功率的影响会辐射到整个船舶综合能源系统，间接影响到不同时期各供电设备的运行状况，供电设备与负荷之间的良性互动保证了船舶综合能源系统的稳定运行。在第 52 时和 78 时，系统的供能大于负载需求，出现弃电现象，这是因为此时储能设备受约束条件限制无法吸收多余能量。

该航次燃料电池的功率变化以及储氢罐中氢气的含量如图 8 所示。蓄电池的功率变化以及荷电状态如图 9 所示。

图 8 中，F-L 表示燃料电池为负载供电的输出功率，D-F 表示柴油机为电解槽的供电功率，P-F 表示清洁能源发电设备为电解槽供电的输出功率。图 9 中，B-L 表示蓄电池为负载供电的输出功率，D-B 表示柴油机为蓄电池充电的输出功率，P-B 表示清洁能源发电设备为蓄电池充电的功率。

由图 8 可以看出，DDQN 智能体能够充分利用燃料电池长期储能的特性，能够根据该航次的运行工况信息，

合理规划储氢罐中氢气的释放量，提高了系统中能量的可用性。由图 9 可以看出，DDQN 智能体频繁地调整蓄电池的功率输出，有效避免了柴油机不必要的大幅调整，从而降低柴油机设备的损耗。此外，电池的荷电状态在 10% 以上，在电池的安全运行范围之内，有效地防止电池过度放电。综上，蓄电池和储氢罐的引入降低了清洁能源的不确定性，提高了系统的可靠性。

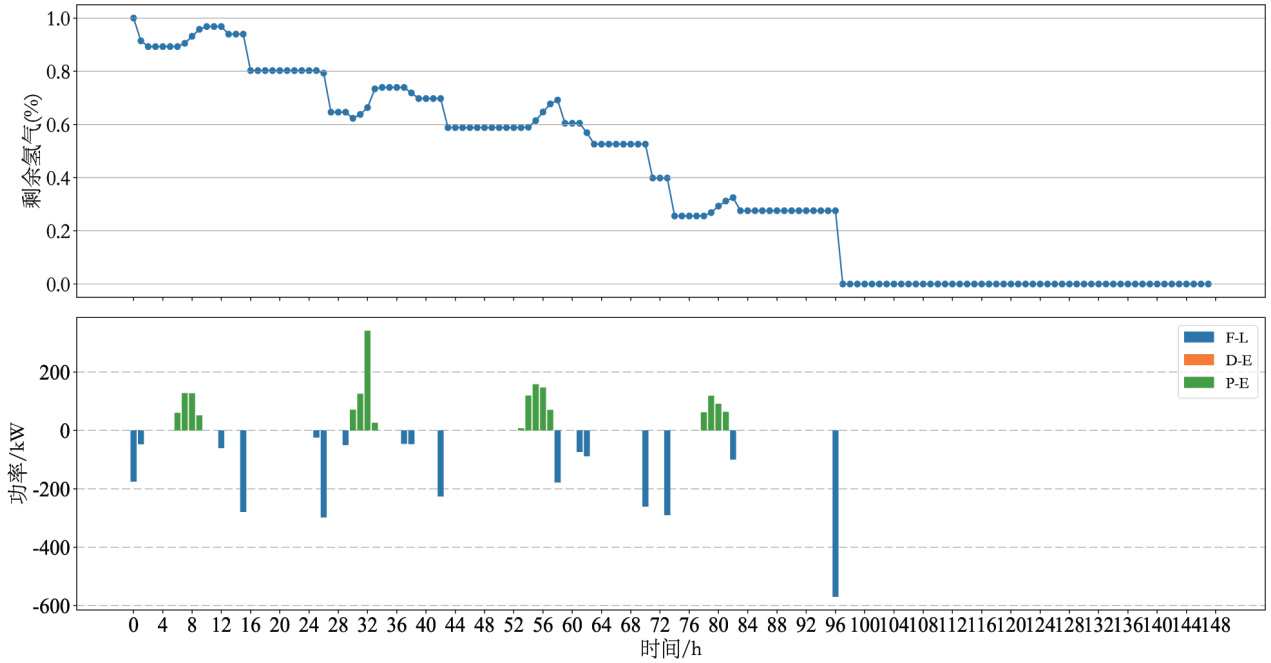


图 8　燃料电池的输出功率以及储氢罐中氢气的含量

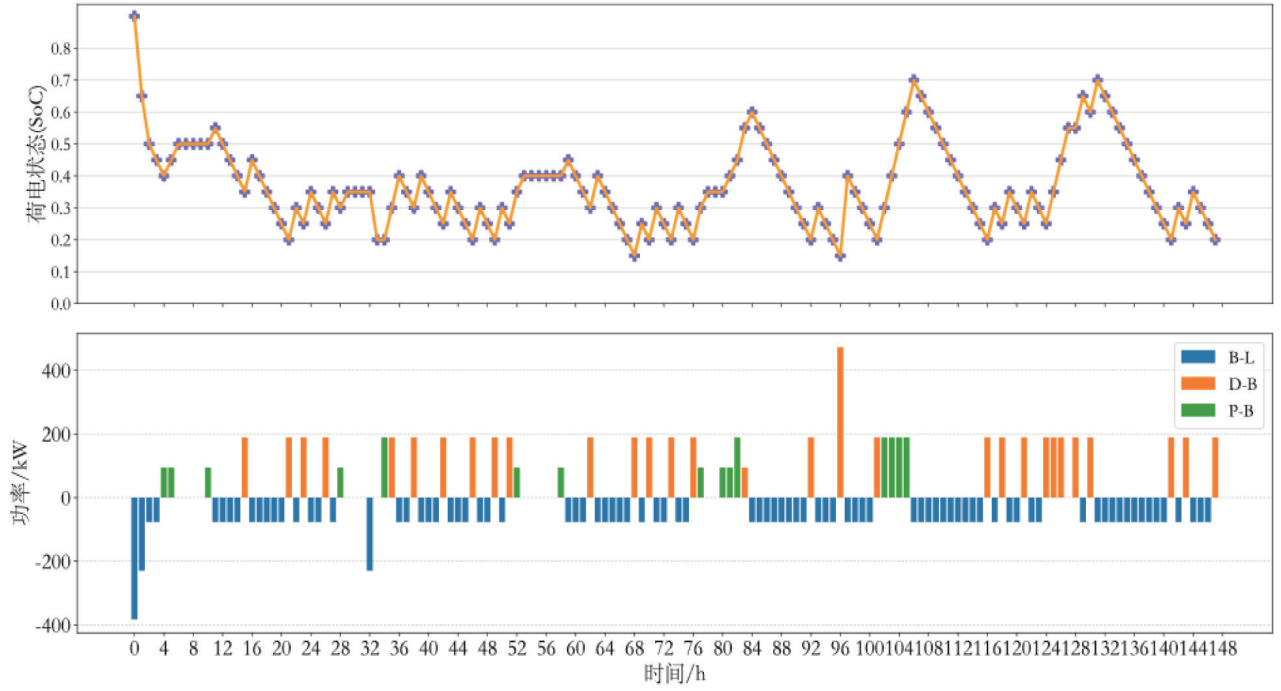


图 9　蓄电池的储能变化及荷电状态

为了说明本文提出的能量管理策略的优越性，与应用基于粒子群优化的能量管理策略的船舶综合能源系统以及柴油机单独工作的系统进行对比。表 3 展示了船舶能源系统运行成本和燃料成本，计算依据文献 [27]；表 4

展示了船舶综合能源系统的污染物排放和治理成本，计算依据文献[28]。

表 3　该航程船舶综合能源系统运行成本和燃油成本

	DDQN	PSO	柴油机单独工作
燃油成本 ($)	4.043×10^4	4.226×10^4	5.206×10^4
总成本 (S)	5.462×10^4	5.628×10^4	6.6715×10^4

表 4　该航程船舶综合能源系统各类型污染物排放量和治理成本

污染物	类型	DDQN	PSO	柴油机单独工作
NO_x	排放量 (lb)	8.280×10^2	9.571×10^2	1.198×10^3
	治理成本 ($)	2.070×10^3	2.392×10^3	2.997×10^3
SOx	排放量 (lb)	17.565	20.303	25.431
	治理成本 ($)	21.96	25.379	31.789
CO_2	排放量 (lb)	5.436×10^4	6.284×10^4	7.872×10^3
	治理成本 ($)	6.687×10^2	7.730×10^2	9.682×10^2

由表 3 可知，经本文提出的能量管理策略优化后，系统燃料成本和总运行成本均显著降低，船舶运行经济性提高。从表 4 可以看出，DDQN 优化后的污染物排放量比 PSO 优化时降低了约 13.49%，比柴油机单独运行时降低了约 30.88%，满足船舶能效运行指数 (EEOI) 的环保要求。有效降低了船舶的废气排放量，符合绿色可持续发展要求。

为了验证该模型的可迁移性，将运用冬季航行数据训练好的策略网络参数转移到新航次（夏季某航次），运用该航次数据经训练 3 000 次获得的累积回报平均值收敛曲线如图 10 所示。

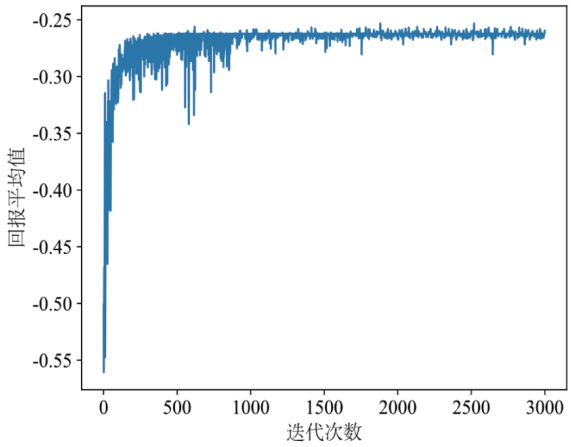


图 10　夏季场景下 DDQN 能量管理策略收敛过程

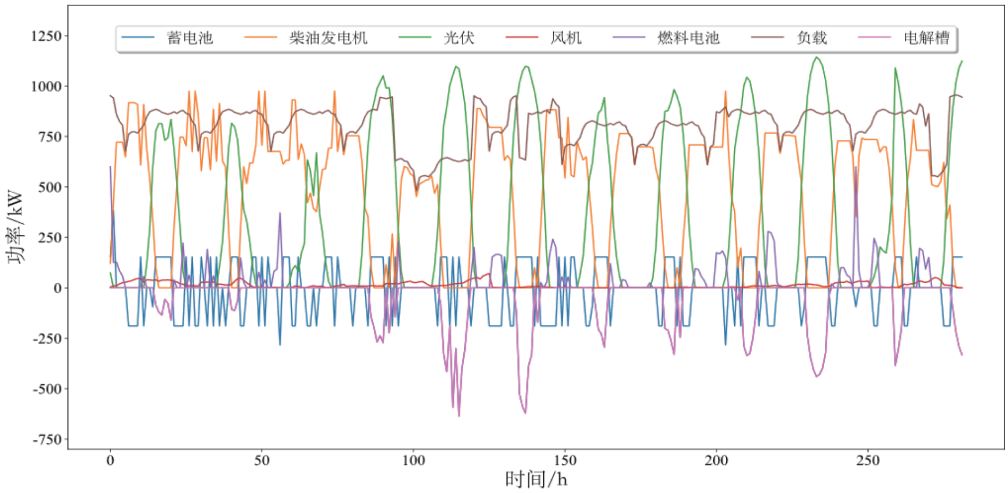


图 11　夏季航行过程中各供能单元的出力情况

由图 10 可以看出，运用夏季采集到的航线数据样本进行迁移试验，训练初始阶段获得的 Q 值已较为接近目标 Q 值，新工况下策略网络的收敛较快，提高了智能体的响应时间。

图 11 展示了夏季航行过程中各供能单元的出力情况。图 12 展示了夏季某航次运行过程中 DDQN 智能体的功率分配情况。

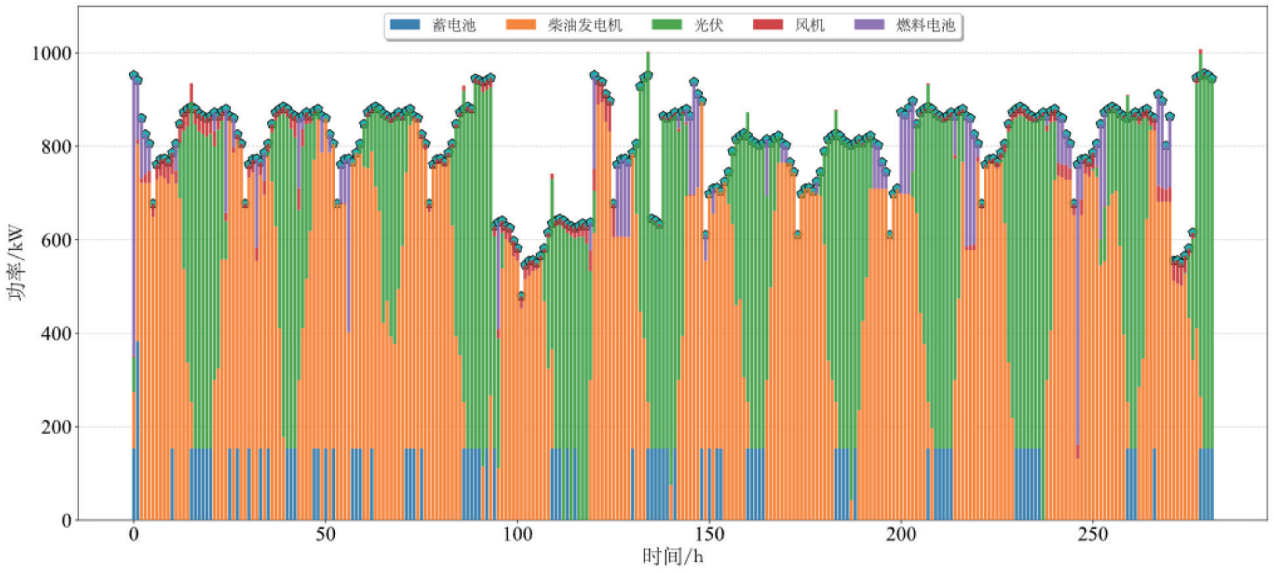


图 12　某航次运行过程中 DDQN 智能体的功率分配情况

由图 11 和图 12 可以看出，在新的运行工况中，DDQN 智能体能够充分地调动各供电源，以满足该场景下船舶的电力需求，且可以在满足各类型设备运行约束的同时合理地分配给类型设备的放电功率。

5　结　语

本文考虑到航行工况变化对发电设备和负载的影响，提出一种具有工况适应性的能量管理策略。由于船舶综合能源系统供给侧和需求侧的随机性，将船舶综合能源系统的优化调度建模为马尔可夫决策过程，然后在连续状态空间和离散动作空间中，采用 DDQN 算法对马尔可夫决策模型进行求解，并与模型参数迁移策略相结合，提高策略网络在新工况下的收敛速度。最后，运用冬季航行实验数据对 DDQN 算法进行训练和验证（DDQN 智能体用航线 2—航线 9 的航行数据集进行训练，随后通过航线 1 的数据进行验证），并采用环境信息变化较大的夏季数据集测试策略的可迁移性。算例仿真结果表明，该策略能够根据船舶综合能源系统输出的功率以及负荷需求信息实现各分布式能量源的调度，相比于基于优化的能量管理策略，目标平均值更优，说明该策略能够很好地适应光伏、风电出力的不确定性。并且可以看出引入模型参数迁移策略后，策略网络在新工况下能够更快地实现收敛，提高了策略的响应速度和工况适应性。

参考文献

[1] 崔源媛 , 张倩茜 . 论港口经营人面临的法律困境与现实出路 - 以 " 两规 " 废止后为视角 [J]. 中国海事 , 2022(7)：48-52.

[2] 全球航运信息服务系统（宝船网）[EB/OL]. https://www.myships.com/index.html, 2022-08-19.

[3] Chen R C, Shi J, Wang Z. Method Study on Establishing of Ship Sewage Pollutants Discharging Inventory Based on AIS[C]//International Conference on Advances in Energy Resources and Environment Engineering. Chengdu, 2019: 022018.

[4] 彭传圣 . 我国航运绿色发展现状与趋势 [J]. 中国海事 , 2022(06): 19-23.

[5] 2021 年中国移动源环境管理年报（摘录二）[J]. 环境保护 , 2021, 49(19): 60-70.

[6] Halkos G, Tsilika K. Understanding transboundary air pollution network: Emissions, depositions and spatio-temporal distribution of pollution in European region[J]. Resources Conservation and Recycling, 2019, 145: 113-123.

[7] Lu X C, Yao T, Li Y, et al. Source apportionment and health effect of NOx over the pearl river delta region in southern china[J]. Environmental pollution, 2016, 212: 135-146.

[8] Sofiev M, Winebrake J J, Johansson L, et al. Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs[J]. Nature Communications, 2018, 9: 406.

[9] Qiu Y C, Yuan C Q, Tang J R, et al. Techno-economic analysis of PV systems integrated into ship power grid: A case study[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 198: 111925.

[10] Xiao NQ，Xu X，Zhou RP. Energy management and control strategy of ship diesel-electric hybrid power system. Journal of Harbin Engineering University，2020，41(01)：153-160.

[11] Zhang ZH，Chen H，Gao HB，et al. Energy management strategies for fuel cell hybrid ships based on real-time wavelet transform. Chinese Journal of Ship Research，2020，15(02)：127-136.

[12] Zhu LS, Han JG, Peng DK, et al. Fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid ship//First International Conference on Green Energy ICGE 2014. Sfax, Tunisia: IEEE, 2014: 107-112.

[13] Vafamand N, Boudjadar J, Khooban MH. Model predictive energy management in hybrid ferry grids. Energy Reports, 2020, 6: 550-557.

[14] Park D, Zadeh M. Modeling and predictive control of shipboard hybrid DC power systems. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(2): 892-904.

[15] Xie PL, Tan S, Guerrero JM, et al. MPC-informed ECMS based real-time power management strategy for hybrid electric ship. Energy Reports, 2022, 7: 126-133.

[16] Zhang YJ, Xue QM, Gao DJ, et al. Two-level model predictive control energy management strategy for hybrid power ships with hybrid energy storage system. Journal of Energy Storage, 2022, 52(A): 104763.

[17] Wang K, Xue Y, Xu H, et al. Joint energy consumption optimization method for wing-diesel engine-powered hybrid ships towards a more energy-efficient shipping. Energy, 2022, 245: 123155.

[18] Zhang ZH, Guan C, Liu ZY. Real-time optimization energy management strategy for fuel cell hybrid ships considering power sources degradation. IEEE Access, 2020, 8: 87046-87059.

[19] Xu L, Wen YT, Luo XY, et al. A modified power management algorithm with energy efficiency and GHG emissions limitation for hybrid power ship system. Applied Energy, 2022, 317: 119114.

[20] Peng X, Chen H, Guan C. Energy management optimization of fuel cell hybrid ship based on particle swarm optimization algorithm[J]. Energies, 2023, 16(3): 1373.

[21] Shang CY, Fu LJ, Bao XQ, et al. Energy optimal dispatching of ship's integrated power system based on deep reinforcement learning. Electric Power Systems Research, 2022, 208: 107885.

[22] Hasanvand S, Rafiei M, Gheisarnejad M, et al. Reliable power scheduling of an emission-free ship: multiobjective deep reinforcement learning. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(2): 832-843.

[23] Wu P, Partridge J, Bucknall, R. Cost-effective reinforcement learning energy management for plug-in hybrid fuel cell and battery ships. Applied Energy, 2020, 275: 115258.

[24] Zeng XM, Chen MZ, Li HF, et al. A Data-driven intelligent energy efficiency management system for ships. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2023, 15(1): 270-284.

[25] Liu Q，Zhai JW，Zang ZC, et al. A survey on deep reinforcement learning. Chinese Journal of computers，2018，41(01)：1-27.

[26] Shao HD, Ding ZY, Cheng JS, et al. Intelligent fault diagnosis among different rotating machines using novel stacked transfer auto-encoder optimized by PSO. ISA Transactions, 2020, 104: 308-319.

[27] Moniruzzaman M, Hasan S. Cost analysis of PV/Wind/Diesel/Grid connected hybrid systems// International conference on Informatics, Electronics & Vision, 2012: 727-730.

[28] Mohamed, FA, Koivo HN. System modelling and online optimal management of microgrid using mesh adaptive direct search. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(5): 398-407.

作者简介

司玉鹏，博士研究生，目前研究方向：储能系统安全管理，（E-mail）syp04061219@163.com,19310195916

复杂场景下的水面漂浮物识别方法

曾广森[1]　王荣杰[2]　俞万能[3*]

（1. 厦门海洋职业技术学院航海学院，福建厦门　361021；2. 集美大学轮机工程学院，福建厦门　361021；
3. 集美大学轮机工程学院，福建厦门　361021）

摘 要：以塑料为主的海洋垃圾已经严重威胁到海洋生态系统的健康，为了提高清洁效率，需要利用无人水面艇进行垃圾清理工作。本文提出了一种融合注意力机制的水面漂浮物识别算法，强化了算法对目标物体的辨识能力，降低了对多种干扰目标的关注度，在光斑反射、光线不足以及存在干扰物的复杂场景下，实现了对目标物体的准确识别。实测实验表明，相对于原始算法，改进后的算法在识别精确率上提高了 1.9%，召回率上提高了 1.6%，且在小型移动设备上满足了实时检测的需求。

关键词：目标识别；小目标；漂浮物；注意力机制；深度学习

0　引　言

海洋垃圾污染已经成为全球性的环境问题，无论是在内陆河流还是在海洋上，都严重威胁着生态环境的平衡。而塑料是全球海洋垃圾的主要组成部分，以中国南海北部海域为例，南海周边国家每年向海洋中输入高达 2.56 ~ 7.08 t 的塑料垃圾，并且它们在距离陆地 100 ~ 200 km 的近海水域中依然存在，研究表明，这些塑料垃圾的数量占南海北部海域海洋垃圾的 72%，此占比与世界上其他地区相比只是中高水平 [1-3]。大部分垃圾一般是由经由大城市的河流运送到海洋中的，在这个过程中，大塑料会被分解成微塑料从而对水生生态系统造成更严重的影响 [4-5]。如果能够将这些塑料垃圾尽可能多的进行清理，就能够减缓塑料对海洋生态的影响，在图 1 中呈现了一些水面垃圾漂浮物以及其对海洋生物造成的影响。



图 1　一些水面漂浮物以及其对海洋生物造成的影响

针对这些海洋垃圾，很多沿海国家都愈发重视并开展了一定程度的清理工作，但依然是以人工清洁为主。面对范围较大且数量较多的海洋垃圾来说，人工清洁的低效率与高成本依然是重要的问题。因此，融合多种传感器的自动清洁方案被设计出来进行垃圾清理工作，其先通过对遥感图像信息进行分析，确定水面漂浮物

的分布范围，进而给出水面不同程度污染情况 [6]，之后再针对污染区域利用无人机进行搜索，并捕获人工难以收集的目标 [7]。对于分布较多数量垃圾漂浮物的区域，可以使用搭载清洁机器人的无人艇前往并进行自主清理作业 [8]。对于水下的垃圾，也可以采用无人水下航行器进行收集 [9]。这些无人设备之所以能够高效地完成工作，离不开近年来飞速发展的深度学习技术，现如今，这项技术已经在海洋环境感知领域得到了较好的发展，无人机器人的智能化技术愈加完善，利用无人设备代替人工进行海洋垃圾清理工作已经成为一种趋势 [10]。

但无论是无人机、无人艇抑或是无人水下航行器，进行目标清理作业的前提是对待清洁目标进行准确识别，这便需要一个可靠的自动识别系统以实现对目标的检测。已在多个领域得到广泛应用的基于深度学习的目标识别技术可以为其提供多个可行且可靠的方案，从而完成对待清洁目标准确实时的检测。

相对于大型水面目标，对于小目标的检测要更加困难。这些小型漂浮物还存在不同的种类如木块、水生植物、塑料瓶、塑料包装袋等，其中只有塑料制品为无人艇需要进行打捞的漂浮物垃圾目标。

本文以水面漂浮物作为研究对象，以塑料瓶为例的小型漂浮物，因其体积较小、颜色透明，易于融入背景中的特点，雷达 [11-12] 几乎无法将其与干扰物进行区分，反而可以利用视觉传感器 [13-14] 进行特征捕捉。因此，需要基于可见光传感器结合视觉信息设计一种目标检测算法，完成漂浮物小目标的识别任务。识别算法不仅要达到高识别准确率，而且需要高运行速度，以满足无人艇进行自主清理作业。

水面环境的复杂多变，如水面的光斑反射、光线不足以及干扰物等等如图 2 所示，这对识别系统的影响较大，导致目标识别准确率降低，所以需要设计一种满足于不同复杂场景下的水面漂浮物小目标识别方法。



(a)　　(b)　　(c)

图 2　复杂背景下的水面漂浮物示例图；

(a) 光斑反射，(b) 光线不足，(c) 干扰物

另外，现如今的小目标识别算法都是基于公共数据集进行研究，如 COCO 数据集 [15] 与 PASCAL VOC 数据集 [16]，但公共数据集中的小目标与水面漂浮物目标的样式依然存在差异，很多优秀的小目标识别算法并未针对水面应用场景进行优化。本文采用 FloW 数据集 [17] 进行训练和测试，这是针对水面漂浮物进行制作的数据集，并通过对多种算法进行对比评估，验证本文所提出算法的优势。

这项工作有以下几方面的贡献：

第一，提出了一种融合注意力机制的水面漂浮物识别算法。

第二，针对不同场景的水面漂浮物进行了识别测试，提高了识别精确率与召回率。

第三，利用离线小型移动平台进行测试，满足了船载平台实现实时检测的需求。

1　相关工作

1.1　海面目标检测方法

目前，在海面目标检测方法中，针对船舶目标检测的方法较多，并且主要是基于两类经典算法进行改进的，即二阶段目标检测算法 Faster R-CNN[18] 和一阶段目标检测算法 Yolo-v3[19] 为主，如将生成对抗网络应用于训练数据增强 [20]、对边界框的锚框和定位不确定性进行优化 [21]、针对数据增强方式进行重新设计 [22] 等等，

这些方法通过对算法网络结构的改进以及输入图像的数据增强，在一定程度上提升了对海面目标的识别准确率。

这些海面目标检测方法不仅有基于无人艇平台进行实现的，同样也存在利用无人机进行海面目标识别的研究，如使用热成像技术结合机器视觉的方法实现对海面目标的检测与跟踪 [23]、使用卫星传感数据结合递归区域聚类的方法实现海面目标检测与轨迹预测 [7] 等等，提高了对远处船舶目标的识别准确率。虽然在海面目标识别方法中，对于漂浮物之类的小目标的研究较少，但对处于同一环境中的船舶目标的检测方法丰富，这对于处于海洋背景环境下的漂浮物识别研究具有一定的借鉴意义。

1.2 小目标检测方法

小目标的准确识别一直以来都是计算机视觉的难点，也是研究人员关注的重点。目前，小目标识别大多将提高识别的准确率作为研究重点。在行人小目标识别方面，针对高空视角下行人目标密集且特征较少的难点，通过将密集裁剪策略和局部注意力机制相结合，提高了的行人目标识别准确率 [24]；在车辆小目标识别方面，针对车辆目标处于阴影且相互遮挡的难点，通过将方向感知旋转边界框与多参数回归模型相结合，提高了车辆目标识别准确率 [25]；在船舶小目标识别方面，针对海面场景存在运动模糊及雾气干扰的难点，通过将图像重建结合分类注意力的方法，提高了船舶目标的识别准确率 [26]。无论是在陆上场景还是水上场景，为了提高了目标识别准确率，其算法往往设计的较为复杂，因此未在计算速度上获得优势。而在水上场景中，对于船舶小目标的识别方法不仅要着重于提高识别准确率，而且对识别速度也需要一定的考量。

在识别目标方面，大部分的水面目标都采用船舶小目标作为研究对象，针对漂浮物小目标的识别算法研究较少。文献 [8] 中提出使用 Yolov3 算法进行水面漂浮物的识别，并部署在无人水面机器人上，实现了高速、高精度的目标检测，但其未考虑户外水面存在的复杂背景（如光斑反射、光线不足以及干扰物等）的情况；文献 [17] 中考虑了水面上存在干扰物的复杂背景状况，并建立了多场景下的水面漂浮物数据集，却未提出复杂场景下可以实现高速、高精度的目标检测算法。因此，设计一种能够在小型无人艇上部署的水面漂浮物检测算法，并同时满足快速、高精度要求的算法是必要的。

2 水面漂浮物检测方法

2.1 网络模型结构设计

水面漂浮物识别算法 Yolo-FC 是在 Yolov7 网络结构的基础上，融入快速空间金字塔池化优化 (SPPFCSPC) 模块、卷积注意力模块（CBAM）得到的，其网络结构示意图如图 3 所示。

图 3 上半部分为整体框架结构图，其中包含主干网络层（Backbone）、注意力机制层（Attention）、特征金字塔层（FPN）和头部网络层（Head），代表着网络结构从浅入深的计算不同阶段的框架结构，后文将分为四个部分依次进行详细阐述。图 3 下半部分为不同结构块的组成方式，其中，CBS 表示卷积块，它们都由卷积层（Conv）、批归一化层（BN）和激活函数 (silu) 组成，CBS 颜色的不同表示卷积层的卷积核 k 和步幅 s 的大小不同；CBM 同样表示卷积块，与 CBS 不同的是，CBM 中的激活函数采用 sigmod 激活函数，两种激活函数的计算方式，如式 1 和式 2 所示。

$$silu(x) = x \cdot \frac{1}{1-e^{-x}} \tag{1}$$

$$sigmoid(x) = \frac{1}{1-e^{-x}} \tag{2}$$

UPS 表示上采样层，采用最近邻插值法 (nearest) 进行计算；ELAN 表示多分支堆叠模块，其中 concat 表示合并连接计算 (concat)，o=i 表示输出通道数等于输入通道数，o=i/2 表示输出通道数等于输入通道数的一半；MP/MP ⊙表示下采样过渡模块，MaxPool 表示最大池化，⊙表示其中的 CBS ⊙块采用 o=i/2 方式进行计算输出。

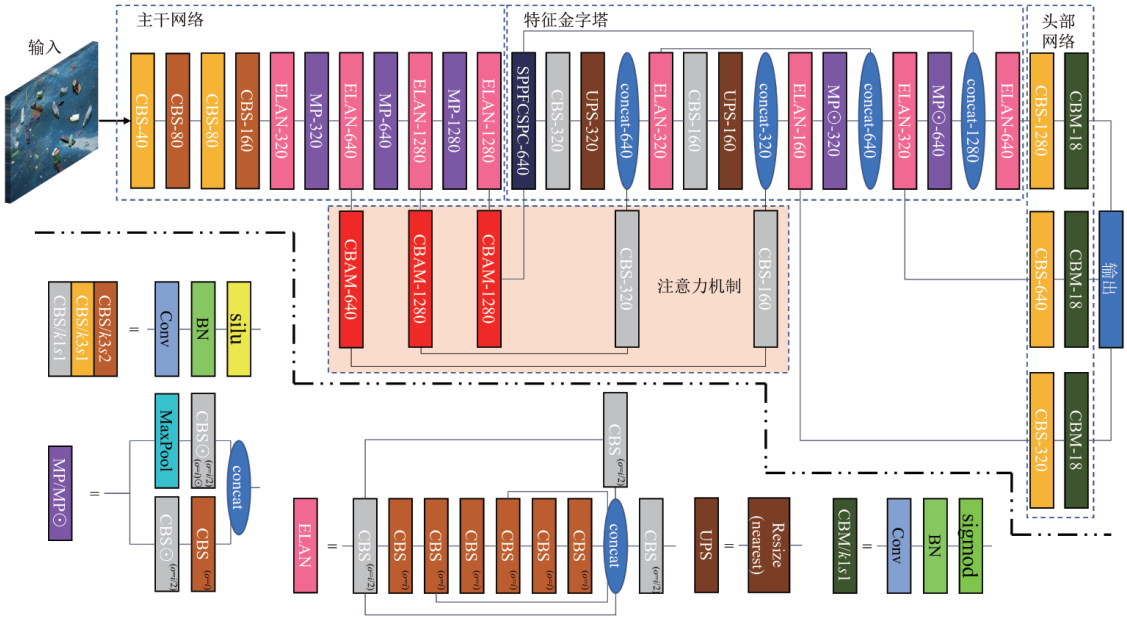


图 3　Yolov7-FC 算法的网络结构图

2.1.1　主干网络层

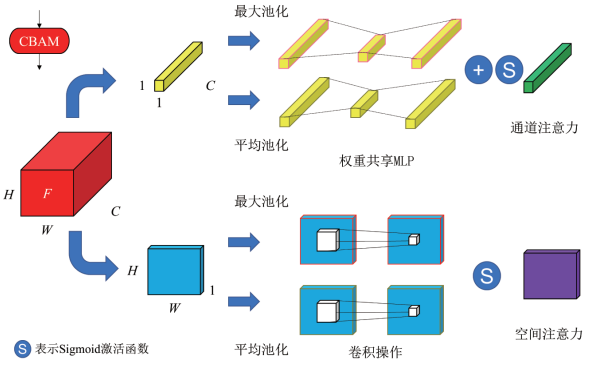
在主干网络中，首先采用 ELAN 模块进行特征提取，再利用过渡模块进行下采样，从而得到三个有效特征层进行下一步网络构建。

在 ELAN 模块中，网络将输入特征分成 5 个分支进行计算，依次为 1 个卷积块、1 个卷积块、3 个卷积块、5 个卷积块和 7 个卷积块的分支，在对其进行 concat 计算后再经过 1 个卷积块进行输出。通过密集的残差结构，能够融合 5 个不同深度的特征，并通过使用合并连接的残差块，减弱了由于网络深度增加而导致的梯度消失问题的影响。

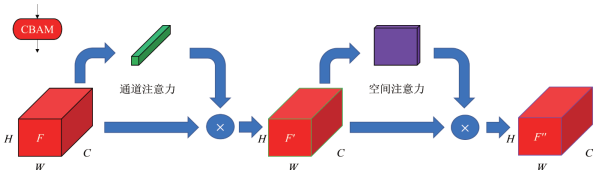
在 MP 模块中，网络将输入特征分成 2 个分支进行计算，第 1 条为最大池化加卷积块，第 2 条为两个卷积核和步幅不同的卷积块，通过将两个分支进行 concat 计算得到后续的输出结果。经过这两个分支的计算，MP 模块将分支 1 和分支 2 的输出通过 concat 操作合并，从而获得了丰富且多层次的特征表示。这样的设计不仅增强了模型对于不同尺度和形态目标的识别能力，还通过合并不同计算路径得到了融合特征，增强了模型的表达能力。

2.1.2　注意力机制层

经过主干网络对输入图片进行特征提取后，网络将利用注意力机制提高对有效特征的关注度，通过卷积注意力模块产生在通道与空间两个维度上的注意力信息，并将其结合后产生新的特征图，CBAM 的网络结构图如图 4 所示。



(a)



(b)

图 4　CBAM 注意力机制的算法流程图

从图 4(a) 中可以看出，对于网络输入特征图 F，分成了上下两个过程，分别生成通道注意力特征图 Mc 与空间注意力特征图 Ms，如式 (3) 至式 (5) 所示。

$$F \in \mathbb{R}^{C\times H\times W} \tag{3}$$

$$M_c \in \mathbb{R}^{C\times 1\times 1} \tag{4}$$

$$M_s \in \mathbb{R}^{1\times H\times W} \tag{5}$$

其中，C、H 和 W 分别表示特征图的通道数、高度和宽度。

图 4(b) 给出了特征图 F 进行运算的过程，首先利用通道注意力算法生成特征图 F'，再利用空间注意力算法图生成特征 F"，如式 (6) 和式 (7) 所示。

$$F' = M_c(F) \otimes F \tag{6}$$

$$F'' = M_s(F') \otimes F' \tag{7}$$

其中⊗表示同位元素对应相乘。

在通道注意力模块中，网络通过对空间维度进行压缩，聚焦于通道维度中对于图像的判别特征，利用平均池化与最大池化两种方法进行特征提取，通过平均池化 Fcavg 获取特征区域的整体特征并结合最大池化 Fcmax 获取特征区域的突出特征，之后利用权重共享的多层感知机 (MLP) 网络进行特征融合，得到最终的通道注意力特征图 Mc，计算过程如式 (8) 所示。

$$\begin{aligned} M_c(F) &= \sigma\left(MLP\left(AvgPool(F)\right) + MLP\left(MaxPool(F)\right)\right) \\ &= \sigma\left(W_1\left(W_0\left(F^c_{avg}\right)\right) + W_1\left(W_0\left(F^c_{max}\right)\right)\right) \end{aligned} \tag{8}$$

$$M_c \in \mathbb{R}^{C/r\times 1\times 1},\ W_0 \in \mathbb{R}^{C/rm\times C},\ W_1 \in \mathbb{R}^{C\times C/rm},\ F^c_{avg} \in \mathbb{R}^{C\times 1\times 1},\ F^c_{max} \in \mathbb{R}^{C\times 1\times 1}$$

其中，σ 表示 sigmoid 激活函数，W0 和 W1 是 MLP 的权重，rm 为 MLP 中使用的降维系数。

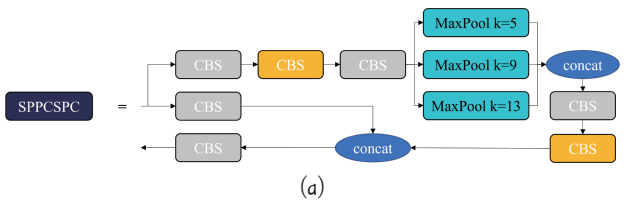
在空间注意力模块中，网络通过对通道维度进行压缩，聚焦于空间维度中对于图像的方位特征，同样利用平均池化与最大池化两种方法进行特征提取，通过平均池化 Fsavg 获取特征区域的整体特征并结合最大池化 Fsmax 获取特征区域的突出特征，之后利用卷积层进行特征融合，得到最终的空间注意力特征图 Ms，计算过程如式 (9) 所示。

$$\begin{aligned} M_s(F') &= \sigma\left(f^{7\times 7}\left(\left[AvgPool(F');MaxPool(F')\right]\right)\right) \\ &= \sigma\left(f^{7\times 7}\left(\left[F^s_{avg};F^s_{max}\right]\right)\right) \end{aligned} \tag{9}$$

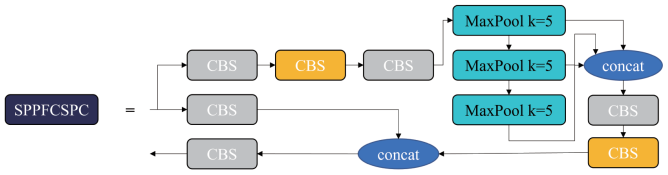
$$M_s \in \mathbb{R}^{H,W},\ F^s_{avg} \in \mathbb{R}^{1\times H\times W},\ F^s_{max} \in \mathbb{R}^{1\times H\times W}$$

其中，f 7 × 7 表示进行卷积核大小为 7 × 7 的卷积运算。

2.1.3　特征金字塔层



(a)



(b)

图 5　SPPFCSPC 模块改进前后的网络结构示意图

(a) 改进前的模块，(b) 改进后的模块

通过注意力机制网络进行特征增强之后，特征图 F" 进入特征金字塔阶段进行处理，通过快速空间金字塔池化优化 (SPPFCSPC) 模块进行特征增强。其相较于空间金字塔池化优化 (SPPCSPC) 模块，改进后的 SPPFCSPC 模块通过对卷积模块使用同一尺寸的卷积核，代替了三种不同尺度卷积核，并通过串联方式重复使用同一种卷积模块结构，使网络结构的效率更高。SPPFCSPC 模块改进前后的网络结构如图 5 所示。

2.1.4　头部网络层

经过特征金字塔模块后可以得到三个加强特征图，每一个特征层都有宽、高和通道数，网络将特征图看作每个特征点的集合，并使用三个不同大小的先验框对这些特征点进行判断。之后根据判断反馈对自身包含的先验框进行调整，并利用非极大值抑制的方法，针对原图中大小不同的目标进行识别，提高神经网络对多尺度目标的整体识别能力。

2.2　网络优化方法

2.2.1　损失函数

Yolo-FC 算法的损失函数包含了三个部分：目标物的回归损失 (Lossreg)、分类损失 (Losscls) 和位置损失 (Lossloc)。如式 (10) 至式 (14) 所示。

$$Loss = \lambda_{\text{conf}} \cdot Loss_{\text{conf}} + \lambda_{\text{cls}} \cdot Loss_{\text{cls}} + \lambda_{\text{loc}} \cdot Loss_{\text{loc}} \tag{10}$$

$$Loss_{\text{conf}} = \sum_{i=0}^{K\times K}\sum_{j=0}^{M} I_{ij}^{obj} Loss_{\text{BCE}}(\hat{C}_i, C_i) - \sum_{i=0}^{K\times K}\sum_{j=0}^{M} I_{ij}^{noobj} Loss_{\text{BCE}}(C_i, C_i) \tag{11}$$

$$Loss_{\text{cls}} = \sum_{i=0}^{K\times K} I_{ij}^{obj} \sum_{k\in classes}^{K\times K} Loss_{\text{BCE}}(\hat{p}_i(k), p_i(k)) \tag{12}$$

$$Loss_{\text{BCE}}(\hat{N}, N) = N\log(N) + (1-N)\log(1-N) \tag{13}$$

$$Loss_{\text{loc}} = \sum_{i=0}^{K\times K}\sum_{j=0}^{M} I_{ij}^{obj} \cdot loss_{\text{CIoU}} \tag{14}$$

其中，λ_{conf}、λ_{cls} 和 λ_{loc} 分别代表了损失函数中三种不同类别损失的权重，识别网络将每一个输入图片先分成 K × K 个单元格，每个网格中产生 M 个锚框，每个锚框经过网络进行前项计算后，会得到调整好的边界框，其总数为 K × K × M 个。I_{ij}^{obj} 和 I_{ij}^{noobj} 用来判断目标物的中心坐标是否在第 i 个网格中的第 j 个锚框中，如果是则前者等于 1 后者等于 0，如果否则反之。C_i 为第 i 个单元格内真实框的置信度，$\hat{C}i$ 为第 i 个单元格内预测框的置信度。$pi(k)$ 表示第 i 个单元格中的真实框包含第 k 个类型的目标的条件概率，$\hat{p}_i$ (k) 表示第 i 个单元格中的预测框包含第 k 个类型的目标的条件概率。

与此同时，在位置损失函数的计算中采用了完全交并比损失 (CIoU)，而不是回归损失与分类损失中采用的二分类交叉熵损失，这能够更准确地对位置信息进行描述。完全交并比损失的计算方式如式 (15) 至式 (19) 所示。

$$loss_{\text{CIoU}} = 1 - IoU + R_{\text{CIoU}}\left(\text{B}, \text{B}^{gt}\right) \tag{15}$$

$$IoU = \frac{\left|B \cap B^{gt}\right|}{\left|B \cup B^{gt}\right|} \tag{16}$$

$$R_{\mathrm{CIoU}}\left(\mathrm{B},\mathrm{B}^{gt}\right)=\frac{\rho\left(\mathrm{b},\mathrm{b}^{gt}\right)}{c^2}+\alpha v_0 \tag{17}$$

$$\alpha=\frac{v_0}{\left(1-IoU\right)+v_0} \tag{18}$$

$$v=\frac{4}{\pi^2}\left(\arctan\frac{w^{gt}}{h^{gt}}-\arctan\frac{w}{h}\right)^2 \tag{19}$$

其中，IoU 为交并比，预测框 $B=(x, y, w, h)$，真实框 $B_{gt}=(x_{gt}, y_{gt}, w_{gt}, h_{gt})$，它们由表示中心点位置的 x, y 坐标与宽高长度的 w, h 坐标组成。$RCIoU(B, B_{gt})$ 为预测框 B 与真实框 B_{gt} 的惩罚项，b 和 b_{gt} 代表 B 和 B_{gt} 的中心点，$\rho(\cdot)$ 表示欧几里得距离，c 为能同时包含预测框与真实框的最小方框的对角线距离。α 为正权衡参数，v_0 为测量长宽比一致性的参数，这使在回归计算时，预测框与真实框重叠区域中的因子相对于非重叠部分具有更高的优先级。

在判断预测框是否为正样本或者负样本时，采用简化最优传输标签匹配策略算法（simOTA）进行决断，通过结合预测框和真实框之间的 IoU 损失 $loss_{reg}$ 与预测框和真实框的类别损失 $loss_{cls}$ 作为代价矩阵 $Cost$，如式 (20) 所示。

$$Cost=loss_{\mathrm{cls}}+\varphi loss_{\mathrm{reg}} \tag{20}$$

其中，平衡系数 φ 设置为 3，以平衡两种损失的识别难度。

从 Cost 代价矩阵中可以看出，真实框与预测框的重合程度越高代价越低，分类越准代价越低，从而自适应地找到与真实框拟合程度最好的几个预测框。

之后，再根据 Cost 的值挑选出 N 个 IoU 最大的候选框，并针对不同的待识别目标分配合适数量 M 的正样本，如式 (21) 所示。

$$M=\left\lfloor\sum_{n=1}^{N}Cost(n)\times IOU(n)\right\rfloor \tag{21}$$

当出现同一候选框匹配到多个真实框的情况时，则选择 Cost 较小的真实框作为唯一匹配目标。

在训练的初期，利用大的学习率可以使网络迅速收敛，而在训练的后期，利用小的学习率更也有利于网络收敛到最优值。因此利用学习率指数衰减策略进行训练，学习率 γ 的计算方式如式 (22) 所示。

$$\gamma=\varepsilon_0^{\tau}\gamma_0 \tag{22}$$

其中，γ_0 表示初始学习率，ε_0 为衰减率，τ 为训练网络的迭代次数。

2.2.2 图像预处理

马赛克图像增强方法可以更好地丰富目标物的背景，防止由于训练集背景相似导致的网络泛化能力降低。但其生成的训练图片与自然图片的分布相差较大，所以需要在 z 次迭代后禁止，使网络加深对自然图片的理解。

本文采用 Mosaic 与 Mixup 结合的方式进行图像数据增强，每次迭代 epoch 是否采用数据增强方法的判断公式如式 (23) 所示。

$$\begin{aligned}Mosaic&=bool\left[rand(0,1)>\theta_1\ \ \&\ \ epoch>z\cdot epoch\right]\\Mixup&=bool\left[rand(0,1)>\theta_2\right]\end{aligned} \tag{23}$$

其中，$bool()$ 表示布尔运算，$\&$ 表示与运算，θ_1 和 θ_2 的值为 0.5，z 的值为 0.7。

3 实验验证与结果分析

本文中用于训练及测试的数据集为 FloW 数据集，其总共包含 2 000 张图像分辨率为 1280×720，5271 个漂浮物，并且以 3:2 的方式进行训练集与测试集进行划分，其中 1 200 张为训练集，800 张为测试集。像素点

小于 32×32 像素的小目标在数据集中有 2996 张图片，超过全部目标数量的 50%。像素点在 96×96 像素与 32×32 像素之间的中目标也有 1974 张，与小目标的数量总和超过 90%，即使是中目标所占的像素点也不超过图片总体的 1%，这对目标识别算法的识别要求有一定的挑战性。数据中的大小目标分布图如图 6 所示。在 COCO 数据集引入时，对 mAP 进行了严格的定义，用在 0.5 到 0.95 之间的多个 IoU 阈值上取平均值来代替之前的方式，更加关注物体定位的准确性，能够对小目标的识别能力进行更准确的评价。

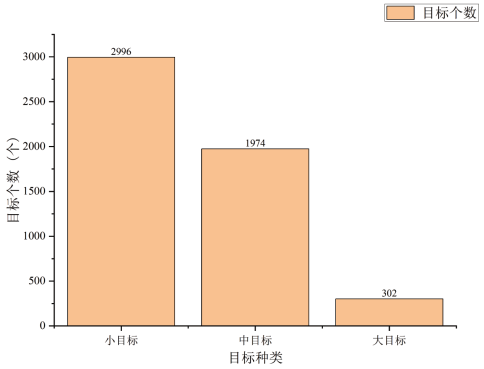


图 6　数据集中不同大小目标的分布图

本文的算法在开源的神经网络框架 Pytorch(1.10.1) 上进行实现。计算工作站配置包含 1 个 GPU(GeForce RTX 3090)，CPU(AMD Ryzen 9 3950x 16 Core/ 3.5 GHz/72 M)，以及 128 G RAM。小型移动测试平台是基于 NVIDIA Jetson Agx Orin 开发板进行搭建。

3.1　实验数据分析

3.1.1　注意力机制对识别准确率的影响

首先，通过在 Yolov7 算法的网络结构中融入注意力增强算法，提高对漂浮目标的关注度，改进前后的算法的测试结果如表 1 所示。在表 1 中，将 CBAM 算法与 ECA 算法分别融入算法结构中，并且比较了神经网络浅层 A 位置与深层 B 位置的对于注意力机制的适用性，其位置如图 7 所示。另外，表 1 中的 MAP 提升率和 MAR 提升率是以未融入注意力机制的 Yolov7 算法在 SGD 优化器上进行优化的测试结果作为基准。

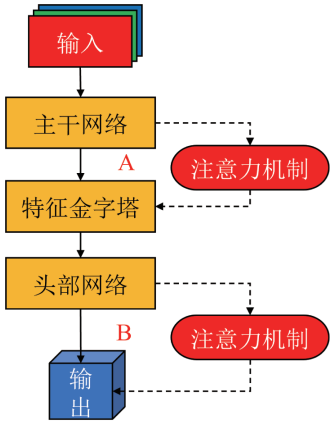


图 7　注意力机制的融入位置示意图

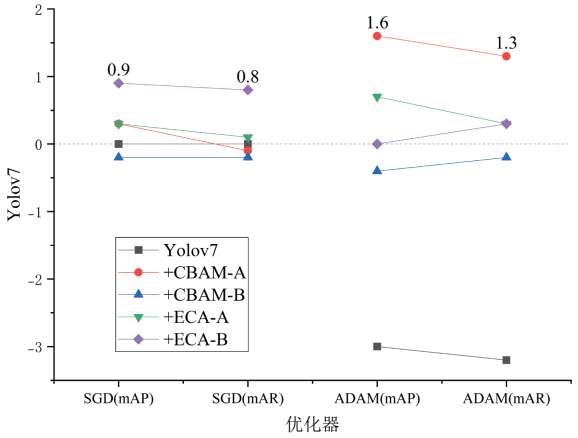


图 8　不同优化器下 Yolov7 算法测试结果对比图

从表 1 中可以看出，识别效果最好的网络结构搭建方式为在 A 位置融入 CBAM 注意力机制并使用 ADAM 优化器进行训练，其次为在 B 位置融入 ECA 注意力机制并利用 SGD 优化器进行训练，测试结果对比如图 8 所示。由图 8 可以看出在几种不同的组合中，将注意力机制于 A 位置融入算法会得到较为优异的性能提升，以及使用 ADAM 优化器进行训练后网络的平均测试结果较好，这在准确率与召回率的指标上都有体现。但是对于未融入注意力机制的原始算法来说，ADAM 优化器的效果远不如 SGD 优化器。

表 1　融入注意力增强方法前后的 Yolov7 算法测试结果对比

算法	位置	SGD	ADAM	mAP	mAP 提升率	mAR:0.5:0.95	mAR 提升率
Yolov7	/	1		42.4	0.0	48.9	0.0
	/		1	39.4	-3.0	45.7	-3.2
+CBAM(Yolo-C)	A	1		42.7	0.3	48.8	-0.1
	A		1	44.0	1.6	50.2	1.3
	B	1		42.2	-0.2	48.7	-0.2
	B		1	42.0	-0.4	48.7	-0.2
+ECA(Yolo-E)	A	1		42.7	0.3	49.0	0.1
	A		1	43.1	0.7	49.2	0.3
	B	1		43.3	0.9	49.7	0.8
	B		1	42.4	0.0	49.2	0.3

3.1.2　快速空间金字塔池化方法对识别准确率的影响

为了进一步提高算法的性能，在融入注意力机制的同时，使用 SPPFCSPC 结构对 FPN 层进行了优化，测试结果如表 2 所示。同样的，将 CBAM 算法与 ECA 算法分别融入 Yolo-F 算法结构中，并且比较了神经网络浅层 A 位置与深层 B 位置的对于此结构的适用性。表 2 中的 MAP 提升率和 MAR 提升率是以表 1 中 Yolov7 算法在 SGD 优化器上进行优化的测试结果作为基准，以此来验证 SPPFCSPC 结构的优势。

表 2　快速空间金字塔池化优化方法前后的 Yolov7 算法准确率对比

算法	位置	SGD	ADAM	mAP	mAP 提升率	mAR:0.5:0.95	mAR 提升率
Yolov7+SPPFCSPC(Yolo-F)	/	1		42.3	-0.1	49.0	0.1
	/		1	42.9	0.5	49.3	0.4
+CBAM+SPPFCSPC(Yolo-FC)	A	1		42.4	0.0	48.9	0.0
	A		1	44.3	1.9	50.5	1.6
	B	1		42.4	0.0	49.1	0.2
	B		1	43.1	0.7	49.2	0.3
+ECA+SPPFCSPC(Yolo-FE)	A	1		42.4	0.0	49.3	0.4
	A		1	43.4	1.0	49.4	0.5
	B	1		42.1	-0.3	48.6	-0.3
	B		1	42.6	0.2	49.3	0.4

从表2中可以看出，在使用SPPFCSPC结构后，之前所述的最优组合在准确率与召回率上面有了额外的提升，所有组合的测试结果对比图如图 9 所示。由图 9 中可以看出，使用 ADAM 优化器进行训练的网络都得到了提升，反观使用 SGD 优化器进行训练的网络虽然在召回率上得到了提升，但在准确率上都有不同程度的下降，因此 SPPFCSPC 结构与 ADAM 优化器的组合效果较好，这一点也可以通过未融合注意力机制的网络上得到体现。

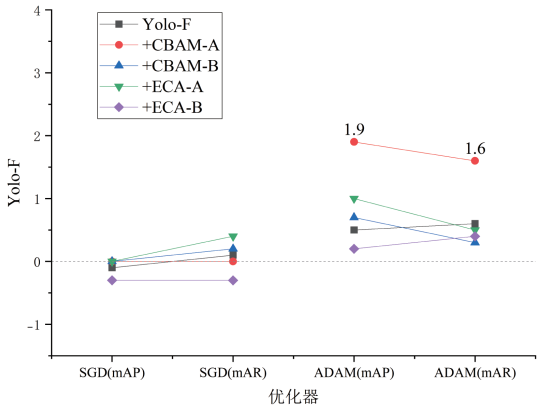


图 9　不同优化器下 Yolov7-FC 算法测试结果对比图

另外，无论在 A 位置还是 B 位置融入注意力机制，此时的测试结果的变化较为稳定，因此，SPPFCSPC 结构对于注意力机制融合的位置并没有造成决定性的影响。表 2 中加粗表示的是识别效果最好的 Yolo-FC 网络，其在识别准确率上实现了 1.9% 的提升，并在召回率上达到了额外 1.6% 的增长。

3.1.3 Yolo-FC 方法与其他优秀识别方法的比较

表 3 给出了改进后的算法与其他算法的测试结果对比值，表 4 给出了小型移动设备上算法的运行速度对比值。

表 3 Yolo-FC 算法与其他算法的测试结果对比

算法	MAP:0.5:0.95	MAP 提升率	mAR:0.5:0.95	mAR 提升率
Yolo-FC	44.3	1.9	50.5	1.6
Yolov7	42.4	0.0	48.9	0.0
Yolov5	42.1	-0.3	48.8	-0.1
YoloX	42.9	0.5	48.3	-0.6
Yolov3	33.5	-8.9	44.0	4.9
Cascade-RCNN[207]	43.4	1.0	/	/
FPN[208]	33.4	-9.0	/	/
RetinaNet[57]	24.9	-17.5	/	/
DSSD[209]	27.5	-14.9	/	/

表 4 在小型移动设备上运行算法的速度对比

算法	在小型移动设备上的运算速度	相对比例
Yolo-FC	9.23	100.0
Yolov7	9.49	102.8
Yolov5	9.04	97.9
YoloX	7.68	83.2
Yolov3	13.10	141.9
Cascade-RCNN[207]	2.20	23.8
FPN[208]	4.17	45.2
RetinaNet[57]	4.29	46.5
DSSD[209]	16.13	174.8

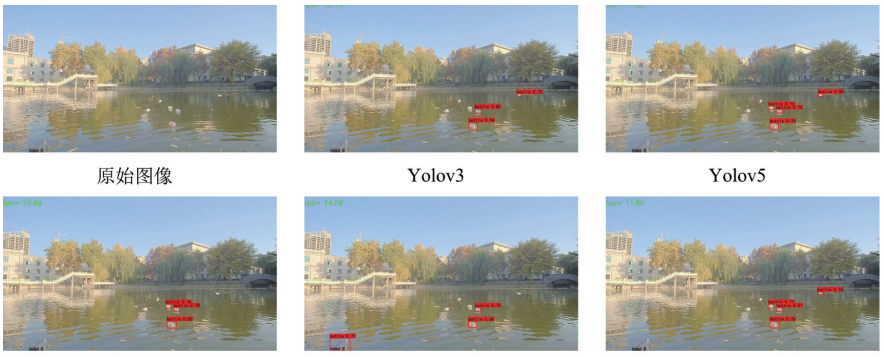
从表 3 中可以看出，改进后的算法在准确率与召回率上都有一定的优势，与在此数据集上表现优异的 Cascade R-CNN 算法相比，依然提高了 0.9% 的准确率。从表 4 中可以看出，Yolo-FC 算法相较于原始算法在总体上增加了结构复杂度，虽然使运算速度降低了 2.8%，但依然满足船载小型移动设备离线实时识别的需求。而准确率表现较好的 Cascade R-CNN 算法仅有 Yolo-FC 算法识别速度的 23.8%，基本无法满足实时运算的需求。对于识别速度较快的 DSSD 算法与 Yolov3 算法，其识别准确率与召回率较低，无法很好的满足漂浮物识别的需求。

3.2 可视化结果分析

图 10 展示了多种算法在不同天气和环境条件下的目标识别效果，提供了一个全面的视角来比较和评估 Yolo-FC 算法在各种情境中的性能优势。

在图 10 (a) 中，可以观察到在远距离且存在干扰物的环境下，大部分算法出现了一定程度的漏检。特别是 Yolov7、Yolov3 和 YoloX，这几种算法的漏检率较高，且 Yolov7 对雷达产生了误识别。然而，经过优化并融入注意力机制的 Yolo-FC 算法，在这一场景中展现出了显著的优越性。

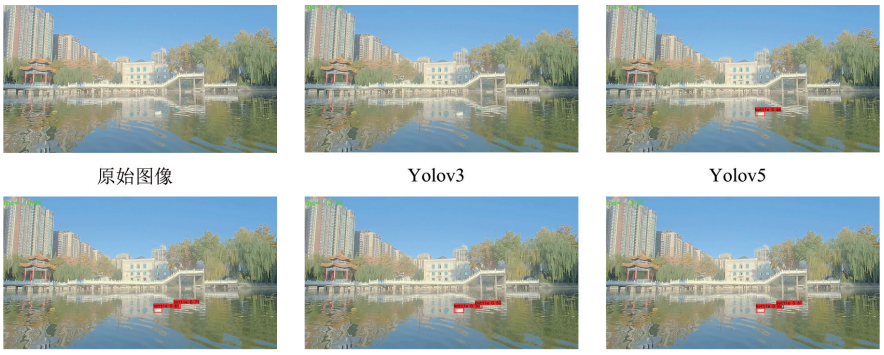
图 10 (b) 进一步加大了识别难度，不仅有干扰物，还有与水面颜色近似的绿色漂浮物目标。在这一情境中，Yolov3 和 Yolov5 在绿色漂浮物的识别上效果不佳。



原始图像　Yolov3　Yolov5

YoloX　Yolov7　**Yolo-FC**

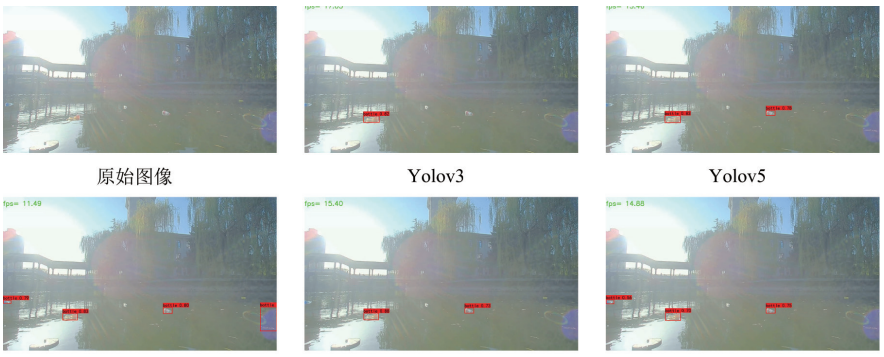
(a)



原始图像　Yolov3　Yolov5

YoloX　Yolov7　**Yolo-FC**

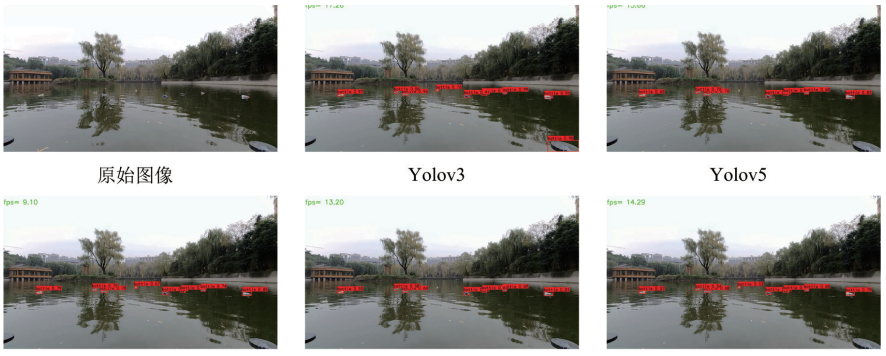
(b)



原始图像　Yolov3　Yolov5

YoloX　Yolov7　**Yolo-FC**

(c)



原始图像　Yolov3　Yolov5

YoloX　Yolov7　**Yolo-FC**

(d)

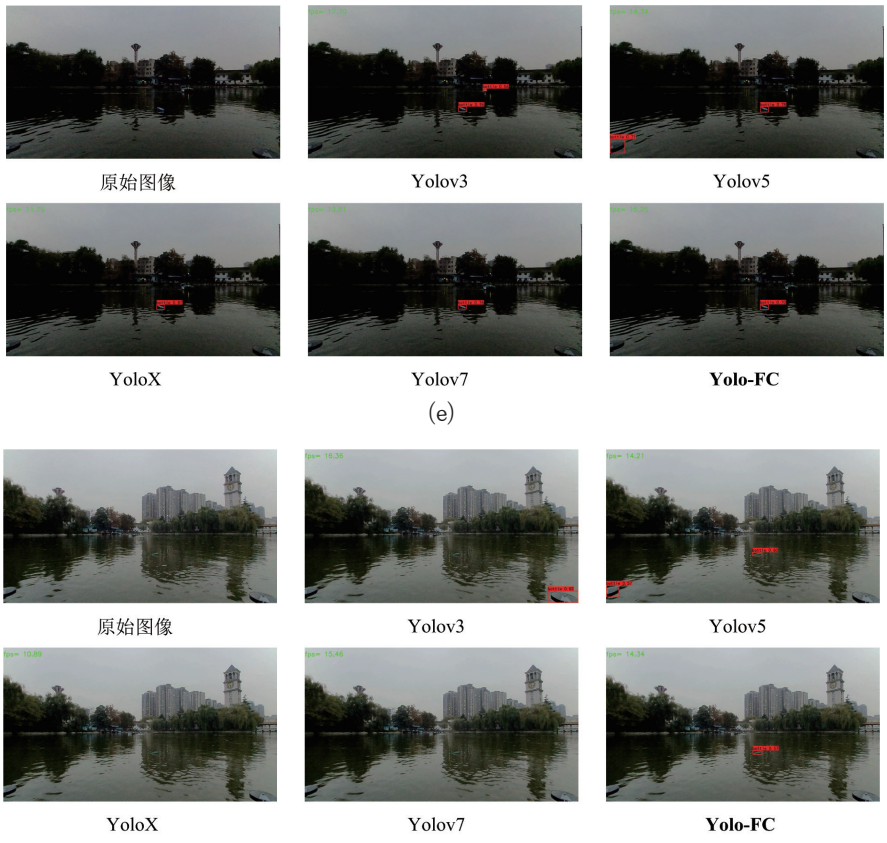


图 10　不同算法在多种场景下的识别效果对比

(a) 目标周围存在多种干扰物 , (b) 目标颜色与水面近似 , (c) 目标处于强眩光环境，

(d) 目标分布密集 , (e) 目标处于昏暗环境 , (f) 目标在昏暗环境下颜色与水面近似

眩光环境是图 10 (c) 的主要特点。在这种环境下，所有算法的表现都大打折扣。然而，值得注意的是，Yolo-FC 和 YoloX 在此情境下依然表现出色，尽管 YoloX 对某些眩光产生了误识别。

图 10 (d) 呈现了一个密集目标场景。得益于当天较好的天气条件和较高的能见度，大多数算法都获得了令人满意的结果，其中 Yolo-FC 和 YoloX 的表现尤为出色，基本识别到了全部的漂浮物目标。

当环境背景变得昏暗，如图 10 (e) 所示，Yolov3 和 Yolov5 算法在某些情况下产生了误识别，Yolov3 算法将远处白色船舶误识别为漂浮物，Yolov5 也将左下角的雷达误识别为漂浮物。

最后，图 10 (f) 展示了在昏暗环境下对颜色与水面近似的目标识别任务。此时，仅有的两种算法能够对目标进行成功识别。Yolo-FC 和 Yolv5 在此场景中的表现相对更佳，但 Yolv5 依然雷达产生了误识别。

综上所示，通过对比多种环境下的识别效果可以得知，眩光环境对识别算法带来的挑战是最大的。在存在干扰物或光线昏暗的背景下，算法能够实现较好的识别效果。对于远距离的小目标，尽管它们对算法的识别能力构成了一定的考验，但在目标与背景有足够对比度时，本文算法仍能达到较高的识别准确率。但值得注意的是，当目标颜色与背景高度相似时，这一点会显著增加识别的复杂性，导致识别准确率和召回率下降。

4　结 论

本文提出了一种融合注意力机制的水面漂浮物识别算法 Yolo-FC，该算法首先通过在空间维度上执行压缩操作，实现了对图像通道维度中判别特征的集中关注，确保了模型对关键识别特征的有效捕获。并采用了快速

空间金字塔池化策略加速模型的计算过程。在测试实验中，与基准算法相比，本文算法在识别准确率上实现了1.9% 的提升，并在召回率上达到了额外 1.6% 的增长。并且在不同背景下，如水面眩光、昏暗背景以及存在干扰物的情况，展现出了更优异的识别性能。进一步的，该算法满足了在艇载小型移动设备上的实时识别要求，证明了其在实际应用场景中的有效性和可行性。

参 考 文 献

[1] Liu M, Lin M, Huang X, et al. Floating macro-litter pollution in the northern South China Sea[J]. Environmental Pollution, 2023, 316: 120527.

[2] Harris P T, Tamelander J, Lyons Y, et al. Taking a mass-balance approach to assess marine plastics in the South China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 171: 112708.

[3] Garcia-Garin O, Aguilar A, Borrell A, et al. Who’s better at spotting? A comparison between aerial photography and observer-based methods to monitor floating marine litter and marine mega-fauna[J]. Environmental Pollution, 2020, 258: 113680.

[4] Cesarini G, Crosti R, Secco S, et al. From city to sea: Spatiotemporal dynamics of floating macrolitter in the Tiber River[J]. Science of The Total Environment, 2023, 857: 159713.

[5] Van Emmerik T, Schwarz A. Plastic debris in rivers[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2020, 7(1): e1398.

[6] Sannigrahi S, Basu B, Basu A S, et al. Development of automated marine floating plastic detection system using Sentinel-2 imagery and machine learning models[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 178: 113527.

[7] Boulares M, Barnawi A. A novel UAV path planning algorithm to search for floating objects on the ocean surface based on object’s trajectory prediction by regression[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 135: 103673.

[8] Kong S, Tian M, Qiu C, et al. IWSCR: An intelligent water surface cleaner robot for collecting floating garbage[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 51(10): 6358-6368.

[9] Xue B, Huang B, Wei W, et al. An Efficient Deep-Sea Debris Detection Method Using Deep Neural Networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 12348-12360.

[10] Lin J, Diekmann P, Framing C E, et al. Maritime Environment Perception Based on Deep Learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022.

[11] Xu S, Zhu J, Jiang J, et al. Sea-surface floating small target detection by multifeature detector based on isolation forest[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 14: 704-715.

[12] Wen L, Ding J, Xu Z. Multiframe Detection of Sea-Surface Small Target Using Deep Convolutional Neural Network[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 1-16.

[13] Liu T, Pang B, Zhang L, et al. Sea Surface Object Detection Algorithm Based on YOLO v4 Fused with Reverse Depthwise Separable Convolution (RDSC) for USV[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(7): 753.

[14] Yang Z, Li Y, Wang B, et al. A lightweight sea surface object detection network for unmanned surface vehicles[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(7): 965.

[15] Lin T Y, Maire M, Belongie S, et al. Microsoft coco: Common objects in context[C]//European conference on computer vision. Springer, Cham, 2014: 740-755.

[16] Everingham M, Van Gool L, Williams C K I, et al. The pascal visual object classes (voc) challenge[J].

International journal of computer vision, 2010, 88(2): 303-338.

[17] Cheng Y, Zhu J, Jiang M, et al. FloW: A Dataset and Benchmark for Floating Waste Detection in Inland Waters[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2021: 10953-10962.

[18] Girshick R. Fast r-cnn[C]//Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015: 1440-1448.

[19] Redmon J, Farhadi A. Yolov3: An incremental improvement[J]. arXiv preprint arXiv:1804.02767, 2018.

[20] Chen Z, Chen D, Zhang Y, et al. Deep learning for autonomous ship-oriented small ship detection[J]. Safety Science, 2020, 130: 104812.

[21] Liu R W, Yuan W, Chen X, et al. An enhanced CNN-enabled learning method for promoting ship detection in maritime surveillance system[J]. Ocean Engineering, 2021, 235: 109435.

[22] Zeng G, Yu W, Wang R, et al. Research on Mosaic Image Data Enhancement for Overlapping Ship Targets[J]. arXiv preprint arXiv:2105.05090, 2021.

[23] Leira F S, Helgesen H H, Johansen T A, et al. Object detection, recognition, and tracking from UAVs using a thermal camera[J]. Journal of Field Robotics, 2021, 38(2): 242-267.

[24] Zhang X , Feng Y , Zhang S , et al. Finding Nonrigid Tiny Person With Densely Cropped and Local Attention Object Detector Networks in Low-Altitude Aerial Images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15: 4371-4385.

[25] Yg A , Yang X B , Sl A . Dense construction vehicle detection based on orientation-aware feature fusion convolutional neural network[J]. Automation in Construction, 2020, 112: 103124.

[26] Guo J, Feng H, Xu H, et al. D3-Net: Integrated multi-task convolutional neural network for water surface deblurring, dehazing and object detection[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 117: 105558.

作者简介

曾广森，讲师，博士，研究方向：为智能信息处理与计算机视觉，（E-mail）gm.zeng@foxmail.com

王荣杰，教授，博士，研究方向：为智能信息处理、盲源分离，（E-mail）roger811207@163.com

俞万能，教授，博士，研究方向：为船舶智能控制及电力推进，（E-mail） wnyu2007@jmu.edu.cn

基于机器学习的海上无线通信网络自适应路由优化研究

蔡家旭

（泉州海洋职业学院，福建泉州　362000）

摘 要：本研究针对海上无线通信网络在动态海洋环境中面临的路由优化挑战，开发了一种创新的自适应路由优化方法。利用机器学习技术，设计和实现了一套优化框架，以增强海上无线通信网络的性能和适应性。通过综合分析海洋环境的复杂性和网络动态性，构建了包含关键网络性能指标的数据集，并通过数据预处理提高了数据质量。重点研究了决策树、随机森林和卷积神经网络（CNN）三种机器学习模型在路由优化中的应用和效果，通过实验验证了随机森林模型在提高通信效率和网络稳定性方面的显著优势。

关键词：机器学习；自适应路由；海上无线通信

0　引　言

随着全球化和科技进步，海洋活动的规模和范围不断扩大，这包括海上运输、海洋探索以及海洋资源的开发利用。这些活动对高效、可靠的海上通信网络提出了迫切需求。海上无线通信网络是实现这一目标的关键技术，它支持海洋数据收集、监测和资源管理等关键应用。然而，海洋环境的特殊性，如动态变化的网络条件、信号衰减、节点移动性等，对海上通信网络的性能提出了极大挑战。传统的海上无线通信网络路由优化方法在稳定的环境中表现良好，但面对海洋环境的高度动态性时，其性能和可靠性常常难以满足需求。随着机器学习技术的快速发展，在其众多领域的应用成功展示了其处理复杂问题的能力。特别是，机器学习提供了一种新的思路和方法，用于优化海上无线通信网络的路由选择，以适应环境的动态变化和不确定性。

1　海上无线通信网络路由优化研究现状

海上无线通信网络是实现海洋数据收集、监测和资源管理的关键技术。随着海洋活动的增加，对于高效、可靠的海上通信网络的需求日益增长。在这一背景下，路由优化作为提高网络性能的重要手段，受到了广泛关注。传统的海上无线通信网络路由优化主要依赖于经典的网络协议和算法。例如：一些研究聚焦于改进现有的路由协议，以适应海洋环境的特殊性。海洋环境的不稳定性，如海流、风浪等因素，对无线信号的传播产生显著影响，这要求路由协议能够适应这种动态变化的环境[1]。此外，海洋传感器网络的能源限制也是一个重要考虑因素，因为能源补给在海洋环境中极为困难。因此，能效成为评估路由协议性能的一个关键指标。

随着机器学习技术的发展，其在海上无线通信网络路由优化中的应用逐渐增多。机器学习方法能够从历史数据中学习和提取模式，预测网络状态的变化，从而实现更加智能和自适应的路由决策。例如，一些研究利用强化学习算法来优化路由选择，这种方法可以在不断变化的网络环境中动态调整路由策略，以提高数据传输的可靠性和效率。然而，将机器学习应用于海上无线通信网络路由优化仍面临诸多挑战[2]。首先，海洋环境的高度动态性和不确定性给模型的训练和预测带来了困难。模型需要能够处理大量的、有时是不完整或噪声较大的数据，以准确预测网络状态。其次，机器学习模型的复杂性和计算需求可能与海洋传感器网络的能源和计算资

源限制相冲突。因此，如何设计能效高、计算效率高的机器学习模型成为了一个关键问题。

2 基于机器学习的海上无线通信网络自适应路由优化框架设计

2.1 数据集构建与预处理

在数据集的构建过程中，本研究综合利用了实地采集的数据和通过网络模拟器生成的数据。实地数据来源于多个海洋无线通信网络节点，涵盖了节点位置、移动轨迹、信号强度、传输延迟和能耗等关键信息。此外，为了增强数据集的多样性，特别引入了模拟数据，以覆盖极端或罕见的网络状态。

数据预处理环节，本研究采取了一系列精确的处理步骤以提升数据质量。数据清洗过程中，通过精确的错误检测和缺失值处理，确保了数据集的准确性和完整性。在数据规范化方面，采用了统一的格式转换和编码方法，使数据适配于机器学习算法的需求。特别地，针对海洋无线通信网络的时空特性，本研究对时间序列数据进行了特别的处理，确保模型能够有效捕捉和利用这些关键信息。

特征选择环节，本研究通过深入分析确定了对路由优化至关重要的特征，如节点的动态性、信号质量和网络拓扑变化。同时，考虑到环境因素对网络性能的显著影响，本研究还纳入了海流、风速等环境参数作为特征。这一步骤的关键在于确保选取的特征能够全面反映网络状态和环境变化，为路由优化提供准确的决策依据。

最后，本研究将数据集划分为训练集和测试集，确保了数据的代表性和多样性。这一划分策略旨在为机器学习模型提供广泛的学习场景，同时保证模型在不同网络条件和环境下的泛化能力。

2.2 机器学习模型选择与训练

针对海上无线通信网络自适应路由优化的需求，本研究综合考虑了模型的预测性能、计算复杂度和适应性，选定了决策树、随机森林和卷积神经网络（CNN）作为主要的机器学习模型。决策树因其简洁性和易解释性被选为基础模型，适合捕捉路由决策的规则性；随机森林通过集成多个决策树提高了模型的稳定性和准确性，适应于处理本研究中的大规模和高维度数据[3]；而 CNN 则利用其在处理时序和空间数据方面的优势，自动学习数据的深层特征，以捕捉海上通信网络中的复杂时空依赖关系[4]。模型训练采用交叉验证方法以评估性能并防止过拟合，同时通过调整超参数来优化模型配置，确保了模型在不同海洋环境条件下的泛化能力和实用性。

2.3 自适应路由优化算法设计

本研究设计了一种基于机器学习的自适应路由优化算法，旨在提高海上无线通信网络在动态变化的海洋环境中的通信效率和稳定性。该算法核心在于利用机器学习模型对网络状态进行实时预测，并据此动态调整路由策略，以应对海洋环境的不确定性和网络条件的变化。首先，算法通过实时监测网络状态，包括节点的位置、移动速度、信号强度以及数据流量等，收集必要的网络运行数据。这些数据不仅为机器学习模型的训练提供了基础，也为路由决策提供了即时的信息支持[5]。接着，利用之前训练好的机器学习模型对网络的未来状态进行预测，包括预测可能的拥塞点、节点的移动趋势以及潜在的通信中断等情况。基于这些预测结果，算法采用一系列预定义的策略来动态调整路由路径，优先选择稳定性高、延迟低的路径，以保证数据传输的可靠性和效率。此外，算法还引入了反馈机制，根据实际的路由效果对机器学习模型进行微调，不断提高预测的准确性。这种基于反馈的学习过程使得路由优化算法能够自我适应于不断变化的网络环境，提高了算法的鲁棒性和通信网络的整体性能[6]。

3 实验与分析

3.1 实验方法与评价指标

本研究的实验环境包括一套专门配置的硬件和软件系统。实验使用的硬件平台主要由多个海上无线通信网络节点组成，每个节点都配备了用于数据收集和传输的传感器。软件环境包括网络模拟器和机器学习框架，用

于生成模拟数据和训练机器学习模型。数据集的构建融合了实地采集数据和模拟生成数据。实地数据涵盖了节点位置、移动轨迹、信号强度、传输延迟和能耗等信息，而模拟数据则用于补充极端或罕见网络状态的情况。整个数据集被划分为训练集和测试集，比例为 70% 和 30%，以保证模型训练和评估的有效性。

为了全面评估基于机器学习的海上无线通信网络自适应路由优化框架的性能，本研究选定了以下评价指标，见表 1。

表 1　模型性能评估指标

指标	描述
准确（Accuracy）	衡量模型预测路由优化决策的准确性
通信延迟（Latency）	评估数据从源节点传输到目的节点所需的平均时间
网络吞吐量（Throughput）	网络在单位时间内成功传输数据的能力
能耗（Energy Consumption）	在执行路由任务过程中，网络节点消耗的总能量
路径稳定性（Path Stability）	考虑到海洋环境的动态变化，评估所选路径在一段时间内的稳定性。

3.2　实验结果分析

本研究分别对决策树、随机森林和卷积神经网络（CNN）三种机器学习模型在海上无线通信网络的自适应路由优化任务中的表现进行了详细比较。实验结果揭示了随机森林模型在通信效率、稳定性以及传输延迟等关键评价指标上，相较于决策树和 CNN 模型，具有显著的优势。例如，在通信效率方面，随机森林模型比决策树和 CNN 模型分别高出 15% 和 10%，这一发现强调了随机森林在处理大规模和高维度数据时的高效性及其集成学习特性带来的稳健性。虽然 CNN 模型在处理时序和空间数据方面展示了潜力，但其相对更高的能耗和计算复杂度在资源受限的海洋通信网络应用场景中成为了限制因素。

表 2 汇总了三种模型在不同网络负载条件下的通信效率对比，明显显示了随机森林模型在各种网络状态下均能保持较高的性能水平。

表 2　不同网络负载条件下的通信效率

网络条件	决策树	随机森林	CNN
低负载	85%	90%	87%
中负载	80%	88%	82%
高负载	75%	85%	78%

3.3　不同算法性能对比

在评估海上无线通信网络自适应路由优化的不同机器学习算法时，研究不仅对比了决策树、随机森林和卷积神经网络（CNN）的性能，还深入探讨了参数敏感性和鲁棒性这两个关键方面，有助于理解各算法在不同条件下的表现以及如何针对特定的海上通信网络场景进行优化。

（1）参数敏感性分析

参数敏感性分析揭示了模型性能对参数选择的依赖性。随机森林的性能显著受到树的数量和深度的影响，而 CNN 模型的性能则极度依赖于学习率和层数的配置。决策树相对较不敏感于参数变化，但树的最大深度会影响其泛化能力和过拟合的风险。这一发现强调了在模型训练过程中进行详尽的参数调优的重要性，以确保在特定的海上通信环境中达到最佳性能。

（2）鲁棒性分析

鲁棒性分析评估了模型在面对网络动态变化时的适应能力，包括节点移动、信号衰减和不同网络负载条件。随机森林模型在这方面表现出了较高的鲁棒性，能够在广泛的环境变化中保持稳定的性能。相比之下，CNN 模型虽然能够捕捉复杂的时空关系，但在极端条件下的性能波动较大，表明其对于环境变化的适应性有待提高。决策树模型则展现了一致的性能，但在极端变化的场景下，其简单性限制了适应性。

4 结 论

本研究通过对决策树、随机森林和卷积神经网络（CNN）三种不同的机器学习算法进行深入分析和实验，探讨了基于机器学习的海上无线通信网络自适应路由优化方法。研究发现随机森林因其出色的通信效率、稳定性和较低的计算复杂度，在海上无线通信网络路由优化中表现最佳。参数敏感性和鲁棒性分析进一步强化了对算法性能深度理解的必要性，指出了在实际应用中进行细致参数调整的重要性。

参考文献

[1] 李海涛 , 黄治华 , 夏洋 . 基于软件定义的海上异构网络信息传输技术 [J]. 舰船科学技术 , 2023, 45 (17): 139-144.

[2] 周雪 , 郭文刚 , 王晓瑞 , 金上玺 , 谢硕 , 韩泽欣 , 任兴元 . 海上无线通信多类型手段融合组网方案与验证 [J]. 中国电子科学研究院学报 , 2023, 18 (01): 80-86.

[3] 冯海龙 . 海域异构网络和资源优化调度关键技术研究 [D]. 大连海事大学 , 2022.

[4] 李家铂 . 基于深度强化学习的海上网络资源分配研究 [D]. 大连海事大学 , 2020.

[5] 贾宗圣 . 基于 IP 网络的海上无线通信控制系统的设计与实现 [J]. 网络安全技术与应用 , 2017, (05): 87+99.

[6] 孙福刚 , 郭日成 , 贺琨 , 杨宇 , 余海瑞 . 海上无线通信网络中的协作传输技术研究 [J]. 数字通信世界 , 2020, (01): 67-69.

作者简介：

蔡家旭，本科，中级职称，研究方向：智能航海、海上通讯与导航设备以及海上救助与求生技术

基于群体智能算法的船用质子交换膜燃料电池参数识别

张　博　王荣杰　蒋德松

（集美大学轮机工程学院，福建厦门　361021）

摘　要：精确估计燃料电池的模型参数对于研究它的系统行为极其重要。本文提出了一种基于改进人工蜂群算法（IABC）的参数辨识方法。受遗传算法和差分进化算法的交叉操作和变异操作的启发，本研究改进了 ABC 在参数寻优过程中的位置更新公式，使 IABC 算法在收敛精度和速度上都得到了提升。将该算法用于识别 3 个典型的标准测试案例，即 250W FC、BCS 500W 和 NedStack PS6 堆栈，并将 PEMFC 测量电压数据和估计电压数据之间的误差平方和（SSE）最小值定义为目标函数。3 个 PEMFC 的 SSE 值分别达到了 0.29686、0.011718 和 2.9848，并且估计得到的模型 I/V 极化曲线与实验测量得到的极化曲线拟合度很高，表明了 IABC 算法识别的准确性。为了验证所提 IABC 算法的优越性，将其与一些优化算法得到的识别结果进行对比以及进行了方差分析，结果证实了 IABC 算法具有较快的收敛速度以及很好的鲁棒性。

关键词：质子交换膜燃料电池（PEMFC）；改进人工蜂群算法；参数识别

0　引　言

质子交换膜燃料电池（proton exchange membrane fuel cell，PEMFC）由于没有复杂的系统，发电原理与原电池相似，氢氧化反应和氧还原反应分别在电解质膈膜两侧的阳极和阴极发生反应，产生的电子通过外部电路对负载做功，而且具有工作温度低、超低污染、无噪声、能量转换效率高等优点引起了广泛关注，并逐渐成为化石燃料的替代品。但是由于用于模拟 PEMFC 工作的模型主要是利用非线性方程描述电池内部的化学反应所建立的数学模型，其中一些方程还包含几个很难使用一些典型的方法进行测量得到的半经验参数 [1-5]。为了保证数学模型的准确性，元启发式算法（MAs）被越来越多的研究者用于 PEMFC 最佳参数的识别 [6-10]。例如粒子群算法优化技术由于原理简单，收敛速度快等优点也被许多研究者应用于识别 PEMFC 的最佳参数 [10-11]。最近，一种称为倭黑猩猩的优化器（BO）被 Das　AK 等人提出，模拟了倭黑猩猩的繁殖方法和社会行为 [12]。Hamdy 等人将原型 BO 算法以及改进后得到的 QOBO 算法应用于 PEMFC 的参数识别问题中，并且将识别结果与其它优化技术作比较，证明了 QOBO 算法的优越性 [13-15]。由于原始 AVO 算法在优化过程中容易出现过早收敛而陷入局部最优，Yongguang Chen 将对立学习（OBL）和 *Le'vy* 飞行策略融入原始 AVO 算法中得到改进的 IAVO 算法，并用于 PEMFC 的参数识别问题 [16]。作者使用 IAVO 用于估计 NedStack　PS6、Horizon　H-12 和 5 kW Ballard Mark V　，得到目标函数值分别为 3.01、1.75 和 0.104。Junlong Zheng 等人在 PEMFC 参数识别研究中提出了黏菌算法的增强版本，解决了传统黏菌算法不稳定和过早收敛的缺点 [17]。

针对综述中应用于 PEMFC 模型参数估计的传统智能算法、改进的智能算法以及混合智能算法中存在的不

足，本研究借鉴遗传算法交叉操作以及差分进化算法的交叉和变异操作更新了传统人工蜂群算法不同阶段的位置更新公式，提出来一种改进的人工蜂群算法（IABC），以实验测量电压值与模型估计电压值之间的误差平方和（SSE）为适应度函数，SSE 值越接近零，说明参数识别效果越好。提出的算法在进行参数辨识后会获得 PEMFC 模型的 I/V 极化曲线，并与实测曲线进行拟合，拟合结果用来验证 IABC 算法的准确性。

本文所做研究的主要贡献可总结如下几点：

• 提出了一种基于改进人工蜂群算法的 PEMFC 参数辨识方法。

• 改进的人工蜂群算法进一步提升了参数识别精度，加快了算法的收敛速度。

• 对三个典型的 PEMFC 堆栈进行测试，并且将测试结果与其它算法比较验证了 IABC 的优越性。

• 进行了其它统计验证，证明本文所提算法的有效性

本文其余部分概述如下：在第二节和第三节阐述了 PEMFC 用到的数学模型以及提出了需要优化实现的适应度函数。第四节解释了本研究提出的算法以及验证了所提算法的性能。第五节对 PEMFC 的实例研究分析进行了描述。最后在第六节对研究进行了总结与展望。

1 数学模型

1.1 PEMFC 数学模型

由于燃料电池内部存在活化损失、欧姆损失、浓度极化损失等电压损失，所以最终电池实际输出电压要低于能斯特电压方程推导出的理论电压 [18]。这些电压降是关于燃料电池负载电流、温度和压力的函数，单电池的输出电压如下 [19-20]：

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{Nernst}} - V_{\text{act(cell)}} - V_{\text{ohm(cell)}} - V_{\text{con(cell)}} \tag{1}$$

而E_{Nernst}由式（2）确定，代表单电池的理论开路电压 [21-22]。

$$E_{\text{Nernst}} = 1.229 - 8.5\times10^{-4}(T_{fc(K)} - 298.15) + 4.3085\times10^{-5}T_{fc(K)}\ln(P_{H_2}\sqrt{P_{O_2}}) \tag{2}$$

其中常数 1.229 是在标准参考温度 25℃下的参考电动势，$T_{ft(K)}$表示燃料电池的工作温度，活化损失和浓差极化损失为负载电流、内部电压和内部运行温度的非线性函数，其相应的计算公式分别对应 [23-26]:

$$V_{act(cell)} = -[\xi_1 + \xi_2 T_{fc(K)} + \xi_3 T_{fc(K)} \times (ln(C_{O_2})) + \xi_4 T_{fc(K)}\, ln(i)] \tag{3}$$

由于上述公式是半经验计算公式，其中ξ_i （$i = 1,2,3,4$）是在建模过程中得到的 4 个经验参数，其值是不确定的，C_{O_2}为燃料电池阴极催化剂界面溶解的氧气浓度（mol/cm^2），计算公式为：

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08\times10^6 \cdot exp(\frac{-498}{T_{fc(K)}})} \tag{4}$$

欧姆电压降：PEMFC 的欧姆电阻包括聚合物膜的电阻、膜和电极之间的导电电阻以及电极的电阻。总欧姆电压降可以利用下式（5）计算得到：

$$V_{ohm(cell)} = i(R_M + R_C) \tag{5}$$

$$R_M = \frac{\rho_M L}{A} \tag{6}$$

$$\rho_M = \frac{181.6\times[1 + 0.03(i/A) + 0.062(T_{fc(K)}/303)^2 \cdot (i/A)^{2.5}]}{[\lambda - 0.634 - 3(i/A)] \cdot \exp[4.18 \cdot (\frac{T_{fc(K)} - 303}{T_{fc(K)}})]} \tag{7}$$

其中 R_C 是电子转移等效电阻，而 R_M 是质子交换膜的等效阻抗；l 是燃料电池中所用质子交换膜的厚度 (cm)；是燃料电池所用质子交换膜的电阻率 $(\Omega\cdot cm)$，λ 是表示质子交换膜的含水量，并且为未知参数，需要进行辨识。

1.2 PEMFC 参数识别的目标函数

本文使用上述数学模型模拟 PEMFC，将燃料电池的实际输出电压和模型输出电压值之间的误差平方和（SSE）作为目标函数。其表达式可以表示如下 [27]：

$$SSE = \min f(x_i) = \sum_{i=1}^{N} (V_{measured(i)} - V_{model(i)})^2 \tag{8}$$

其中，N是样本电压个数，x_i（$i = 1,2,3,\ldots,7$）表示七个需要辨识的未知参数；$V_{measured(i)}V_{measured(i)}$是燃料电池的实际输出电压，而$V_{mode(i)}$是燃料电池优化系统输出电压值，它是关于七个未知参数（ξ_1、ξ_3、ξ_4、λ、R_c、b）的函数 [28-29]。

2 基于改进的人工蜂群算法

2.1 提出改进的人工蜂群算法

对原型人工蜂群算法来说，从蜜源位置更新式中看出，ABC 在执行过程中利用当前蜂群所包含的候选解信息更新得到新的候选解。对原有候选解的选择对新的候选解的质量影响很大，虽然新的候选解依旧保持在整个搜索空间中，避免了 ABC 迭代过程陷入局部最优，但是它在全局最优解的附近时收敛速度变慢。

为了解决上述问题，本文借鉴了遗传算法的交叉操作，对原型 ABC 算法的蜜源位置更新式进行了改进，增强算法的探索能力。按一定的概率选择，让一部分蜂群按原来的搜索方式进行寻优，另一部分则在目前寻找到的全局最优解的附近进行寻优，从而解决算法在搜索过程的最后阶段收敛速度慢的问题，改进后蜂群按下式（9）更新候选解。

$$x^{new}(i,j) = \begin{cases} x_{best}(j) + \varphi_{ij}[x_{best}(j) - x(r_1,j)] & P_i \geq cr \\ x(i,j) + \varphi_{ij}[x(i,j) - x(r_2,j)] & P_i < cr \end{cases} \tag{9}$$

其中：P_i是单个蜂群的适应度占整个蜂群适应度的比例，cr代表交叉概率，在此取值为 0.6。

3 实例仿真和结果

本文旨在利用改进的人工蜂群算法（IABC）对 PEMFCs 堆栈的未知参数进行辨识。为了验证本文所提算法的准确性以及普适性，利用 IABC 对 1 个 PEMFC 进行参数识别，即 250W FC 堆栈。所评估的 PEMFC 类型的参数的真实值、测试操作条件和测量数据来自文献 [24]。所执行的程序在 Intel(R) Core(TM) i5-10400F CPU @2.90GHz 16GB RAM 的设备平台完成。并且对于参数的识别，是在 windows 7-64 位的操作系统中的 Matlab（Matlab 2021b）软件中完成。

PEMFCs 数学模型中需要识别的参数有限制空间，如表 1 所示，算法将在限制空间中进行最优搜索，利用最终得到的最优参数对模型输出电压进行估计，并将估计得到的电压数据与实验得到的电压数据进行拟合 [30]。在整个优化阶段，将实验数据和 PEM 燃料电池堆栈经过辨识后所得估计电压之间的误差平方和（SSE）最小值作为优化目标函数，需要辨识的参数（ξ_1、ξ_2、ξ_3、ξ_4、λ、R_c、b）作为优化变量。

表 1 Search space range of PEMFC parameters to be optimized

PEMFC/Parameters		ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	λ	R_c	b
250 W FC	upper	-0.944	0.005	7.80e-5	-1.88e-5	23	0.0008	0.5
	lower	-0.952	0.001	7.40e-4	-1.98e-4	14	0.0001	0.016
BCS 500 W NedStack PS6	upper	0.8532	0.005	9.80e-05	-9.54e-5	24	0.0008	0.5
	lower	-1.19969	0.001	3.60e-05	-2.60e-4	10	0.0001	0.0136

3.1 1250W-FC 燃料电池堆栈

为了验证所提 IABC 算法的性能，首先用 250W-FC 电池堆栈来搜索堆栈优化参数，考虑算法每次寻优结果的随机性，将所提 IABC 算法以及对比算法 PSO、BO、ABC 分别单独运行 30 次。各个算法得到的最优参数值以及 SSE 最佳值如表 2 所示，并且表中列举了一些参考文献中的数据。从表中数据可以看出，本文所提的改进 IABC 算法与其他方法相比，获得了 SSE=0.2968 的最佳函数值。平均 SSE 值在 0.2968-1.157624 之间，PSO 得到了最差的 SSE 值。图 1（a）展示了利用优化得到的电池参数模拟的 I/V 曲线输出曲线和实测得出的 I/V 曲线可以达到良好的拟合程度，为了进一步表明所提算法的准确性，图 1（d）中绘制了实测电压和估计电压的绝对误差值曲线，可以看出，除了五个点电压点以外，其它电压误差数据点都小于 0.15。这说明文中所提算法可以比较精确地识别

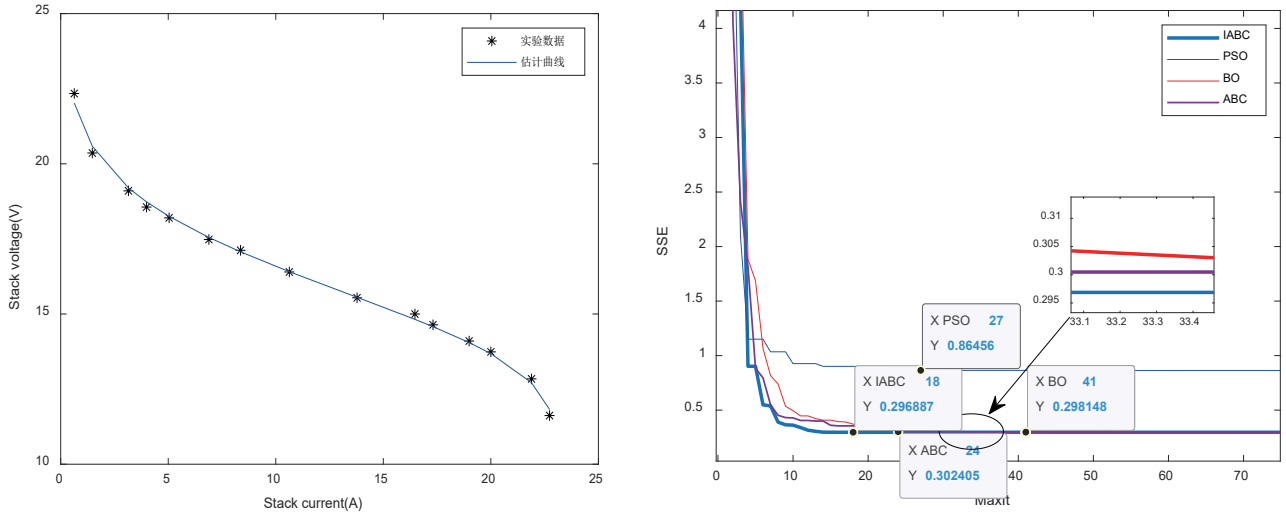
从图 1（b）中的 SSE 收敛曲线可以看出，IABC 算法可以在少于 40 次的迭代过程中达到 SSE（=0.2968）的最小值，而其他三个比较算法（ABC、BO、PSO）收敛速度都比 IABC 算法慢，这说明使用 IABC 算法可以达到快速收敛的目的，从而节约程序的执行时间。

表 1 描述了 IABC 与比较算法的统计比较，从表中数据可以得出 IABC 表现出了卓越的性能。

为了进一步展示所提 IABC 算法的优越性，表 2 总结了参考文献中各种算法对于目标函数的优化统计结果，从表中可以看出，IABC 算法的识别精度较好，可以对 PEMFCs 电池的建模过程起到指导作用。

表 2　250W-FC 堆栈最佳参数比较分析

Algorithm/Parameter	ξ_1	$\xi_2(e-4)$	$\xi_3(e-5)$	$\xi_4(e-4)$	λ	$R_c(e-4)$	b	SSE
IABC	-0.94693	30.4026	7.65563	-1.95049	23	1.000	0.031983	0.2968
PSO	-0.949487	30.5096	7.800	-1.73422	19.8443	0.680757	0.0317513	1.6779
BO	-0.95074	30.4308	7.64857	-1.95046	23	1.000	0.031982	0.9815
ABC	-0.950987	30.5511	7.72478	-1.95419	22.9949	1.000	0.0318735	0.302405
REAL　GA[30]	-0.9506	30.842	7.7524	-1.88	22.99	1.0027	0.0329	16.2746
HABC[31]	-0.9446	30.795	7.800	-1.88	23	1.000	0.0327	15.6673
TLBO[32]	-0.9506	30.842	7.800	-1.88	23	1.000	0.0328	16.2363
STLBO[32]	-0.9506	30.842	7.800	-1.88	23	1.000	0.0328	16.2363
MVO[18]	-0.9447	30.492	7.800	-1.64	16.021	1.200	0.0237	15.1316
VSA　[15]	-0.9499	30	7.773	-2.00	14.369	8.000	0.0205	17.36397
VSDE　[15]	-0.9520	30	7.7826	-2	20.291	1.000	0.0279	7.18066



(a)　　(b)

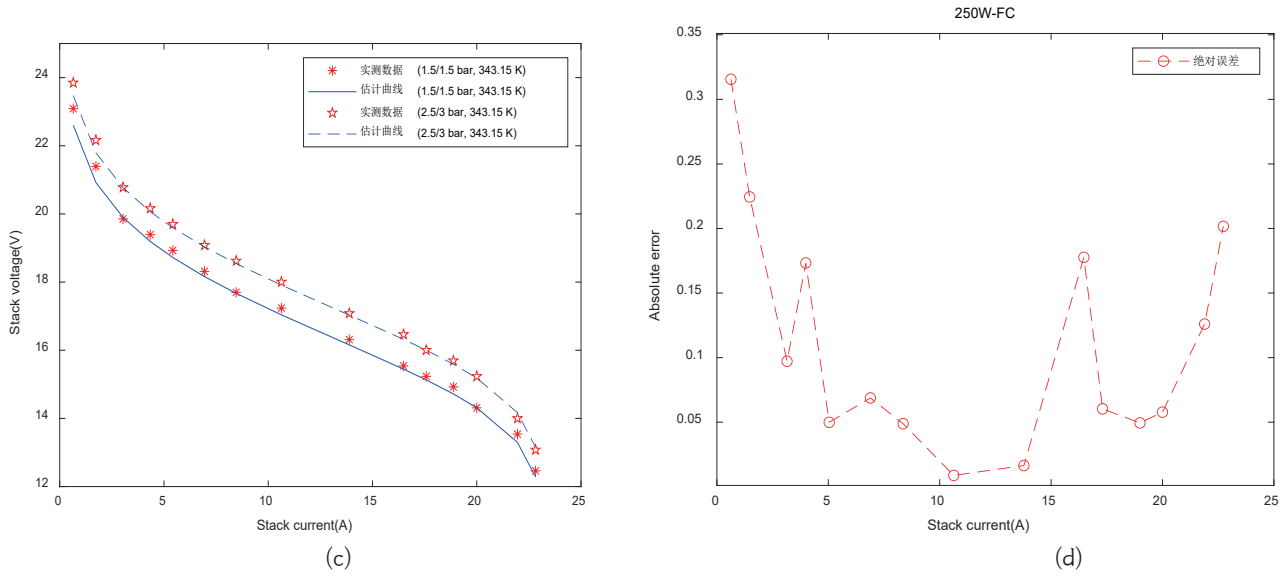


图 1　(a) 250W−FC 模型估计和实验拟合 I/V 曲线，(b) 250W−FC　堆栈算法收敛曲线，(c) 改变 250WPEMFC 的供应压力的拟合曲线，(d) 250W−FC 估计与实验电压数据点间绝对误差

由于 PEMFCs 在不同条件下输出的 I/V 曲线有所不同，为了验证所提 IABC 算法识别参数的准确性，利用所识别的参数进行输出电压拟合，绘制出 250W-FC 电池堆栈在$P_a/P_cP_a/P_c$ (=2.5/3 bar、1.5/1.5 bar)，$T_{cell}T_{cell}$ (=343.15K) 以及$P_a/P_cP_a/P_c$ (=3/5 bar)，$T_{cell}T_{cell}$ (=353.15K) 的条件下的 I/V 曲线；如图 1(b) 所示，可以注意到当 PEMFCs 反应温度恒定时，随着氢气和氧气的供应压力的增高，电池堆栈的堆电压内部的活化过电势快速下降，此外，由于工作电流的增大，浓度差过电势快速下降。而且输出的电压估计曲线可以较好的拟合 PEMFC 堆栈的实测输出电压，说明文中所提出的 IABC 算法的准确性。

4　总　结

本文介绍了一种基于改进人工蜂群算法的 PEMFC 模型最优参数估计方法。该方法借鉴了遗传算法交叉操作以及差分进化算法的变异操作对原始人工蜂群算法的位置更新公式进行了更新，改进了算法的搜索策略从而实现了 PEM 燃料电池参数的快速估计。文中利用 IABC 算法对 250W　FC 电池堆栈进行了参数识别。基于 PEMFC 的实验数据集得到的极化曲线，将电池测量值与模型估计电压数据之间的误差平方和（SSE）的最小值作为适应度函数；结果显示，对于不同的 PEMFC　IABC 算法估计得到的 I/V 极化曲线都可以很好的拟合电池真实的极化曲线。为了进一步验证 IABC 算法的优越性，将其与倭黑猩猩算法（BO）、粒子群算法（PSO）、人工蜂群算法分别运行 30 次得到的数值统计结果进行了比较。进一步验证了本文所提算法的优越性。

参考文献

[1] Ijaodola O S, El-Hassan Z, Ogungbemi E, et al. Energy efficiency improvements by investigating the water flooding management on proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). Energy 2019;179: 246-267.

[2] Mohamed M A, Jin T, Su W. An effective stochastic framework for smart coordinated operation of wind park and energy storage unit. Applied Energy 2020;272: 115228.

[3] Ghiasi M, Ghadimi N, Ahmadinia E. An analytical methodology for reliability assessment and failure analysis in distributed power system. SN Applied Sciences 2019;1(1): 44.

[4] Jin L, He Y, Zhang C K, et al. Novel structure-exploiting techniques based delay-dependent stability analysis of

multi-area LFC with improved numerical tractability. IEEE Transactions on Power Systems 2021;36(5):4194-4211.

[5] Askarzadeh A, Rezazadeh A. A new heuristic optimization algorithm for modeling of proton exchange membrane fuel cell: bird mating optimizer. International journal of energy research 2013;37(10):1196-1204.

[6] Vishnyakov V. Proton exchange membrane fuel cells. Vacuum 2006;80(10): 1053–65.

[7] Alshehri F, Suárez V G, Torres J L R, et al. Modelling and evaluation of PEM hydrogen technologies for frequency ancillary services in future multi-energy sustainable power systems. Heliyon 2019;5(4): e01396.

[8] Papurello D, Silvestri S, Tomasi L, et al. Biowaste for SOFCs. Energy Procedia 2016;101:424-431.

[9] A comprehensive and comparative review on parameter estimation methods for modelling proton exchange membrane fuel cell

[10] Carrette L, Friedrich K A, Stimming U. Fuel cells: principles, types, fuels, and applications. ChemPhysChem 2000; 1(4): 162-193.

[11] Amphlett J C, Baumert R M, Mann R F, et al. Parametric modelling of the performance of a 5-kW proton-exchange membrane fuel cell stack. Journal of Power Sources 1994;49(1-3):349-356.

[12] Y ang B, Wang J, Zhang X, et al. Comprehensive overview of meta-heuristic algorithm applications on PV cell parameter identification. Energy Conversion and Management 2020;208:112595.

[13] Abdel-Basset M, Mohamed R, Mirjalili S. A binary equilibrium optimization algorithm for 0–1 knapsack problems. Computers & Industrial Engineering 2021;151:106946.

[14] Abdel-Basset M, Mohamed R, Mirjalili S, et al. Solar photovoltaic parameter estimation using an improved equilibrium optimizer. Solar Energy 2020;209:694-708.

[15] Baykasoglu A, Ozbakir L, Tapkan P. Artificial bee colony algorithm and its application to generalized assignment problem. Swarm Intelligence: Focus on Ant and particle swarm optimization, 2007, 1.

[16] Meiying Ye, Xiaodong Wang, Yousheng Xu,Parameter identification for proton exchange membrane fuel cell model using particle swarm optimization,International Journal of Hydrogen Energy,Volume 34, Issue 2,2009,Pages 981-989,ISSN 0360-3199,

[17] Sedighizadeh M. , Rezazadeh A. , Khoddam M. , Zarean N. Parameter Optimization for a Pemfc Model With Particle Swarm Optimization. International Journal of Engineering and Applied Sciences. 2011; 3(1): 102-108.

[18] Parameter Optimization for a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Model

[19] Li Q, Chen W, Wang Y, et al. Parameter identification for PEM fuel-cell mechanism model based on effective informed adaptive particle swarm optimization. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2010;58(6):2410-2419.

[20] Xu B, Parameter optimal identification of proton exchange membrane fuel cell model based on an improved differential evolution algorithm. Engineering Village 2021;0438-1157.

[21] Rezk H, Olabi A G, Ferahtia S, et al. Accurate parameter estimation methodology applied to model proton exchange membrane fuel cell. Energy 2022;255: 124454.

[22] Das A K, Pratihar D K. A new bonobo optimizer (BO) for real-parameter optimization[C]//2019 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP). IEEE 2019;108-113.

[23] Sultan H M, Menesy A S, Hassan M S, et al. Standard and Quasi Oppositional bonobo optimizers for parameter extraction of PEM fuel cell stacks. Fuel 2023;340:127586.

[24] Tizhoosh H R. Opposition-based learning: a new scheme for machine intelligence[C]//International conference

on computational intelligence for modelling, control and automation and international conference on intelligent agents, web technologies and internet commerce (CIMCA-IAWTIC’06). IEEE 2005;1:695-701.

[25] Choi C, Lee J J. Chaotic local search algorithm. Artificial Life and Robotics, 1998;2:41-47.

[26] Chen Y, Zhang G. New parameters identification of Proton exchange membrane fuel cell stacks based on an improved version of African vulture optimization algorithm. Energy Reports 2022;8: 3030-3040.

[27] Zheng J, Xie Y, Huang X, et al. Balanced version of slime mold algorithm: a study on PEM fuel cell system parameters identification. Energy Reports 2021;7:3199-3209.

[28] Fathy A, Abd Elaziz M, Alharbi A G. A novel approach based on hybrid vortex search algorithm and differential evolution for identifying the optimal parameters of PEM fuel cell. Renewable Energy 2020;146: 1833-1845.

[29] Miao D, Chen W, Zhao W, et al. Parameter estimation of PEM fuel cells employing the hybrid grey wolf optimization method. Energy 2020;193:116616.

[30] Sun Z, Wang N, Bi Y, et al. Parameter identification of PEMFC model based on hybrid adaptive differential evolution algorithm. Energy 2015;90:1334-1341.

[31] Yang B, Zeng C, Wang L, et al. Parameter identification of proton exchange membrane fuel cell via Levenberg-Marquardt backpropagation algorithm. International Journal of Hydrogen Energy 2021;46(44):22998-23012.

[32] Bankupalli, P. T., Ghosh, S., Sahu, L. K., Dwivedi, A. K. Parameter estimation of PEM Fuel Cell Electrical Equivalent Model using Hybrid Optimization. 8th International Conference on Power Systems (ICPS) 2019; 1-6. doi: 10.1109/ICPS48983.2019.9067573.

作者简介：

张博，河南科技学院电气工程及其自动化专业学士学位，目前正在攻读集美大学轮机工程学院船舶与海洋工程专业硕士学位，主要研究方向：质子交换膜燃料电池和故障诊断与重构，（E-maile）929183636@qq.com

王荣杰，中山大学电气与电子工程专业博士学位，集美大学轮机工程学院的教授和博士生导师，主要研究方向：新型电力系统的智能信息处理和故障诊断，（E-maile）roger811207@163.com

蒋德松，集美大学轮机工程学院副教授，主要研究方向：动力装置总体性能及系统分析和动力装置自动化及测试，（E-maile）jiangdesong@jmu.edu.cn

基于注意力特征融合和多尺度一维卷积的船舶电网系统级故障诊断研究

崔亚波[1]　王荣杰[1,2*]　刘　浩[1]　王亦春[1,2]　林安辉[1,2]

（1. 集美大学轮机工程学院，福建厦门　361021；2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室，福建厦门　361021）

摘 要：由于船舶运行环境恶劣，船舶电网易造成绝缘损伤。因此为了维持供电的可靠性，快速准确的定位和识别故障具有非常重要的意义。针对这个问题本文提出了一种基于注意力特征融合和多尺度一维卷积神经网络的船舶电网系统级故障诊断方法，仅提取电源输出端的三相电流，即可定位故障位置并识别出故障类型。该方法通过引入多尺度一维卷积神经网络，能够有效地捕捉不同尺度上的故障特征，同时为了进一步提高故障诊断的准确率本文还引入了注意力机制，自适应地学习不同特征的权重。此外本文还采用迁移学习策略以适应不同的故障电阻。实验结果表明，在不同故障电阻条件下，本文模型的故障诊断准确率高于 98%，在噪声干扰下也能取得良好的诊断效果。同时与其他方法相比，本文模型直接处理原始信号即可达到更高的故障诊断准确率。

关键词：多尺度一维卷积；注意力特征融合；船舶电网；故障诊断

0　引　言

船舶综合电力系统可以视为一个独立的微电网，由于复杂的系统结构和恶劣的运行环境，相比于陆地电网其发生故障的可能性更大[1-2]。这些故障如果不能及时识别和定位，将会对船舶的运行安全和人员安全产生严重的影响。因此快速准确地识别故障类型并定位故障位置对船舶电力系统安全稳定运行至关重要[3-4]。

随着深度学习的发展，基于数据驱动的故障诊断方法在电网的故障诊断领域得到了广泛应用[5-7]。深度学习具有强大的自主学习能力，能够从大量原始数据中自动提取有助于故障识别的特征[8-9]。文献 [10] 提出了一种基于小波变换和深度神经网络的微电网故障诊断方法，先通过小波变换提取统计特征。文献 [11] 提出了一种基于一维卷积的故障检测方法，该方法对采集的电流数据直接进行特征提取。文献 [12] 提出了一种基于深度金字塔卷积神经网络的故障诊断方法，该方法可以提取长距离文本依赖关系，适用于长文本的场景分类问题。但上述的一维卷积神经网络只能捕捉到单一尺度的局部特征，不能同时考虑到时间序列的局部信息和全局信息。

而多尺度一维卷积可以更全面地捕捉时间序列数据中的不同尺度的特征，从而更好地理解时间序列数据的结构和规律，增强模型的表达能力，使其能够更好地适应复杂的故障模式和变化。

针对这些问题，本文提出了一种基于注意力特征融合和多尺度一维卷积的船舶电网故障诊断方法。通过引入多尺度一维卷积神经来提取不同尺度上的故障特征。其次通过引入注意力机制，自适应地学习和关注故障数据中的重要特征，以提高诊断的准确性和鲁棒性。并且本文还引入了迁移学习策略，使模型能够解决不同接地故障电阻的问题。同时本文提出的方法在噪声的影响下也能表现出优越的故障诊断效果。

1　问题描述

船舶电网的电气故障包括物理故障和测量故障[1]。物理故障包括了短路故障，即线路发生单相接地、相间

短路、两相接地和三相短路等 [4]。图 2 是某船舶交流电网的拓扑结构图 [13]，其中绿色代表等效电源，橙色代表节点负荷，实线代表输电线路，虚线代表联络开关。本文对船舶电网的短路故障进行研究，基于深度学习算法提出了一种故障定位和故障类别辨识的方法。

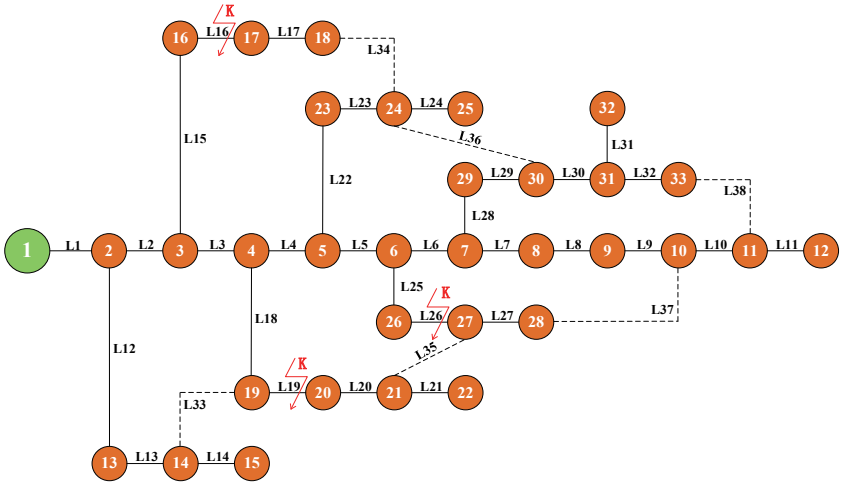


图 1　船舶电网拓扑结构

2　基于 AFF-MS-1DCNN 的故障诊断模型

基于 AFF-MS-1DCNN 的船舶电网故障诊断框架如图 2 所示。该方法主要包括数据采集和预处理、多尺度特征提取、故障识别与定位。该方法可以有效地捕捉不同尺度上的故障特征，并通过注意力机制进行特征融合，仅通过三相电流信号即可辨识故障类型和定位故障位置。

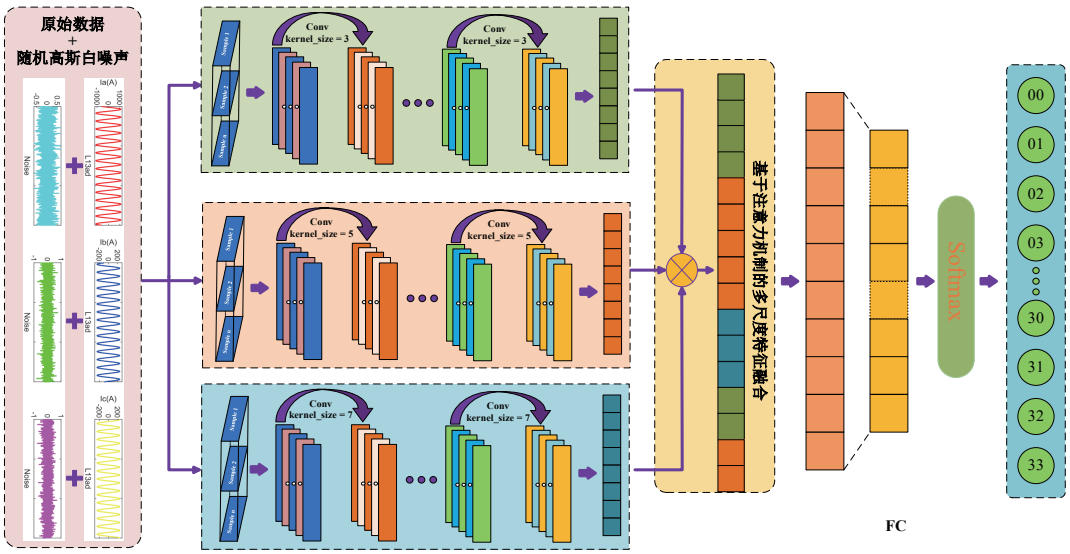


图 2　故障诊断模型

2.1　数据预处理

在实际的信号采集环境中，往往包含不同分贝的噪声，因此我们在采集的故障信号中加入了高斯白噪声来模拟真实的信号采集环境 [14]。在实际的场景中，获取足够数量的数据用于深度网络训练变得相当具有挑战性，因此一个有效的数据增广的方法对于模型的训练至关重要。本文采用了一种随机切片采样的方法来扩充数据，以增加训练样本，过程如图 3 所示。

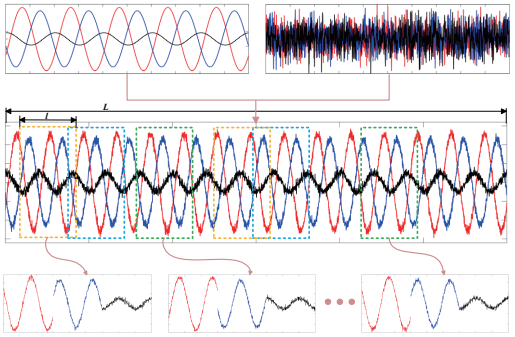


图 3　随机切片采样

2.2　AFF-MS-1DCNN　模型

（1）多尺度一维卷积

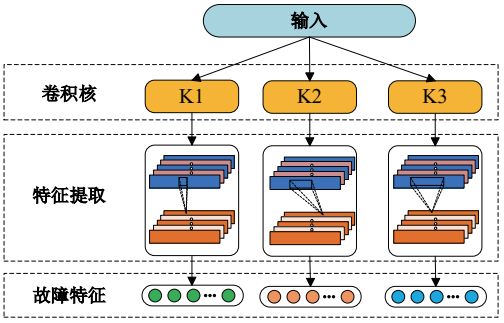


图 4　多尺度一维卷积

多尺度一维卷积网络的结构如图 4 所示，它包括三个并行的卷积通道，每个卷积通道分别使用不用大小的卷积核对输入数据进行不同精细度的特征提取。

（2）注意力特征融合

在特征提取的结果上，我们引入了注意力机制来进行特征融合。使用自注意力机制来计算不同尺度特征之间的相关性，并生成相应的注意力权重。然后通过将每个尺度特征与对应的注意力权重进行加权求和来融合特征。

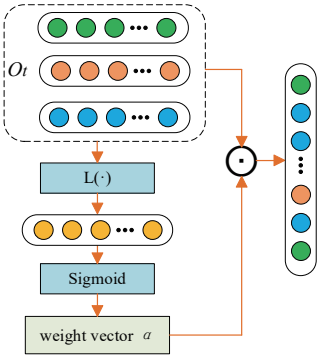


图 5　注意力特征融合

本文所提出的注意力特征融合层如图 5 所示。在这个过程中，对于不同卷积核提取到的特征通过注意力模块进行线性变换得到特征。然后再通过 Sigmoid 函数对中间特征进行非线性映射得到注意力权重向量。最后利用注意力权重向量对特征向量进行逐元素相乘操作得到注意力加权后的特征向量。

2.3　迁移模型实现方法

为了解决不同接地故障电阻的问题，我们采用模型参数迁移的方法来解决。即将已经训练好的模型的参数

应用于新的任务中，以加速模型训练的同时并用已有模型的知识来解决新任务。迁移模型的实现方法如图 7 所示，具体过程如下。

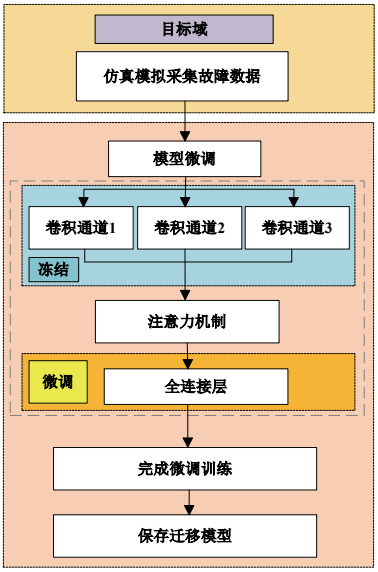


图 6　迁移模型实现方法

第一步：改变接地故障电阻，采集少量目标域数据集。

第二步：采用相同的网络模型，将源域数据集训练好的模型参数作为迁移模型的初始权重。

第三步：冻结模型的特征提取器，利用目标域的数据集微调全连接层的参数。

第四步：完成微调训练，保存适用于不同接地故障电阻的模型。

3　船舶电网故障诊断案例分析

3.1　数据集描述

在 MATLAB/Simulink 环境中搭建了图 1 所示的船舶电网仿真模型，并进行故障模拟实验。图 7 为在 10Khz 采样频率下采集的电源输出端母线的三相电流仿真波形。包括单相接地短路，两相相间短路，两相接地短路，三相短路以及混合故障。本文以线路 13、16 和 26 为例来验证模型的性能。

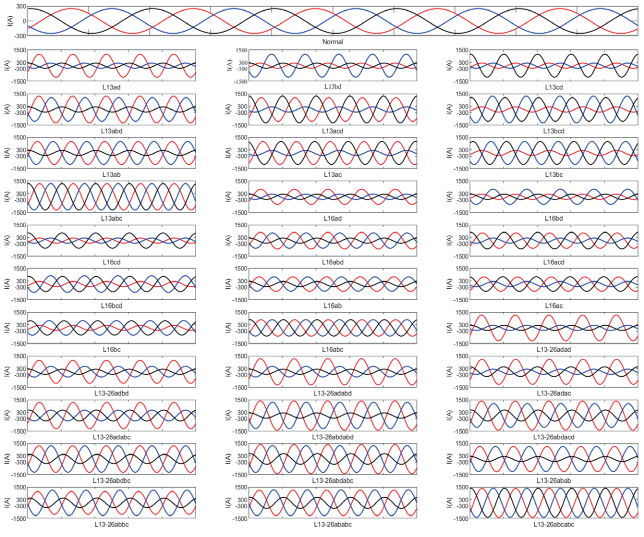


图 7　34 种故障类型的波形

本文对采集的原始数据利用 3.1 节的数据预处理方法进行数据集制作。采样窗口的长度为 300。最后将数据集划分为训练集 (500 个)、验证集 (60 个) 和测试集 (40 个)。其中接地故障电阻为 1 欧姆，相间短路故障为 0.1Ω)。并且本文还采集了接地故障电阻为 2、3、4 欧姆的数据，用于迁移模型。在这 500 个训练集当中，本文随机选取 200 个样本，其中 100 个加入 10 dB 的高斯白噪声，另 100 个加入 20 dB 的高斯白噪声。

3.2 模型性能分析

使用测试集数据对训练好的故障诊断模型进行测试，以此来评估模型的性能。该诊断模型在准确率 (ACC)、精确度 (P)、召回率 (R) 和 F1_score 四个指标下均达到了 100% 的诊断性能。结果表明 AFF-MS-1DCNN 模型能够很好地辨识不同故障特征之间的细微差距，能够准确地定位故障位置并精确辨识故障类型。

为了验证模型在噪声影响下的诊断性能，我们在测试集中加入了 10dB—30dB 的高斯白噪声。图 8 为模型在噪声影响下的故障诊断效果，从图中可以看出，噪声在 20dB 以上时，模型的诊断性能不受影响，噪声在 20dB 以下时，模型的故障诊断准确率下降了不到 1.5%。结果表明，本文提出的方法可以很好地提取到有助于故障识别的特征，剔除噪声信号的影响，具有良好的鲁棒性。

为了进一步验证模型在不同故障接地电阻 (2Ω、3Ω、4Ω) 下的故障诊断性能，本文对目标域的数据进行了迁移实验。首先采集目标域下的训练样本和测试样本，每种故障的训练样本采集 50 个，测试样本采集 40 个。在实验中本文发现，每种故障类别采集 10 个训练样本就能达到 100% 的准确率。结果表明该模型具有很好的泛化能力，在不同接地故障电阻下也不会发生误判。

为了更好地展示本文 AFF-MS-1DCNN 故障诊断模型的性能，在图 9 中，本文对比了本文方法与其他深度学习方法。这些方法的主要参数设置如下：（1）LSTM：网络结构为 900-128-128-34，优化器为 Adam。（2）DNN：网络结构为 1024-512-256-128-64-34，优化器为 Adam，激活函数为 ReLU。（3）CNN：网络结构和 AFF-MS-1DCNN 网络相似，都有七层卷积层和三层池化层。不同的是 CNN 只有一个卷积通道，卷积核的大小为 5。从图中可以看出，本文所提的方法比其他深度学习算法在 ACC、P、R 和 F1_score 四个指标中表现出更好的性能，说明 AFF-MS-1DCNN 模型具有更好的故障识别能力，能够区分具有细微差别的故障特征。

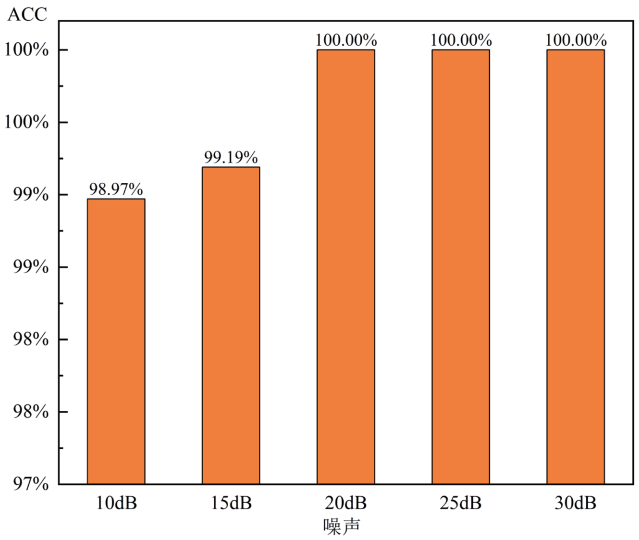


图 8　不同分贝噪声影响下的准确率

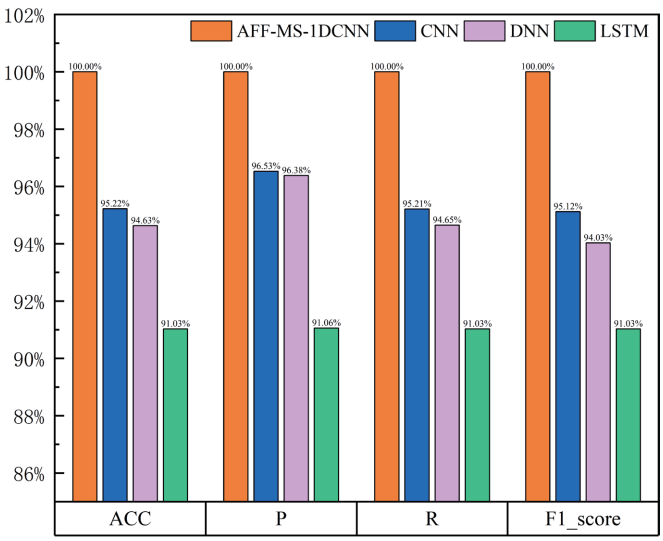


图 9　不同方法的比较

图 10 是对模型特征提取效果 T-SNE 可视化是结果。不同的颜色代表不同类别的特征，从图中可以看出不同类别的特征被很好的分为一类，说明 AFF-MS-1DCNN 模型具有良好的特征提取能力。

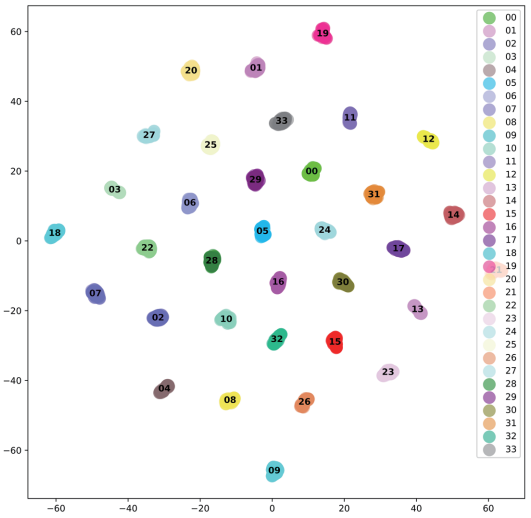


图 10　特征提取可视化

4　结　论

本文以船舶微网为研究对象，提出了一种基于注意力特征融合和多尺度一维卷积的系统级故障诊断方法。该方法仅提取电源输出端母线的三相电流即可定位故障位置并识别故障类型。实验结果表明该方法能够有效地提取有助于故障辨识的特征，同时在噪声的干扰下以及不同故障电阻的情况下仍然能保持较高的故障诊断准确率。与其他方法相比本文的方法在特征提取效果和故障诊断效果也更有优势。

参考文献

[1] K. Satpathi, A. Ukil, and J. Pou, “Short-Circuit Fault Management in DC Electric Ship Propulsion System: Protection Requirements, Review of Existing Technolo-gies and Future Research Trends,” IEEE Trans. Transp. Electrif., vol. 4, no. 1, pp. 272-291, Mar. 2018.

[2] S. Liu, Y. Sun, L. Y. Zhang, and P. Su, “Fault diagnosis of shipboard medium-voltage DC power system based on machine learning,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 124, pp. 10, Jan. 2021.

[3] S. Senemmar, J. Zhang, and Ieee, "Deep Learning-based Fault Detection, Classification, and Locating in Shipboard Power Systems," 2021.

[4] W. L. Li, A. Monti, and F. Ponci, “Fault Detection and Classification in Medium Voltage DC Shipboard Power Systems With Wavelets and Artificial Neural Networks,” Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 63, no. 11, pp. 2651-2665, Nov. 2014.

[5] W. T. Li, D. Deka, M. Chertkov, and M. Wang, “Real-Time Faulted Line Localization and PMU Place-ment in Power Systems Through Convolutional Neural Networks,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 34, no. 6, pp. 4640-4651, Nov. 2019.

[6] L. Wen, X. Y. Li, L. Gao, and Y. Y. Zhang, “A New Convolutional Neural Network-Based Data-Driven Fault Diagnosis Method,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 7, pp. 5990-5998, Jul. 2018.

[7] A. K. Ozcanli, F. Yaprakdal, and M. Baysal, “Deep learning methods and applications for electrical power systems: A comprehensive review,” Int. J. Energy Res., vol. 44, no. 9, pp. 7136-7157, Jul. 2020.

[8] S. Q. Zhang, R. J. Wang, Y. P. Si, and L. B. Wang, “An Improved Convolutional Neural Network for Three-Phase

Inverter Fault Diagnosis,” Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 71, pp. 15. 2022.

[9] N. Zhou, J. Liao, Q. Wang, C. Li, and J. Li, “Analysis and prospect of deep learning application in smart grid,” Automation of Electric Power Systems, vol. 43, no. 4, pp. 180-191. 2019.

[10] J. J. Q. Yu, Y. H. Hou, A. Y. S. Lam, and V. O. K. Li, “Intelligent Fault Detection Scheme for Microgrids With Wavelet-Based Deep Neural Networks,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 2, pp. 1694-1703, Mar. 2019.

[11] Ince, Turker, et al. "Real-time motor fault detection by 1-D convolutional neural networks." IEEE Transactions on Industrial Electronics 63.11 (2016): 7067-7075.

[12] X Zhang, H Zhang, et al. Power grid fault diagnosis based on a deep pyramid convolutional neural network. CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol.9, no.6, pp.2188-2203

[13] Y. Jiang, J. Jiang, and S. Qiao, "Intelligent service restoration of shipboard power network using nature multiobjective evolutionary algorithm." pp. 118-124.

[14] Y. P. Si, R. J. Wang, S. Q. Zhang, W. T. Zhou, A. H. Lin, and Y. C. Wang, “Fault Diagnosis Based on Attention Collaborative LSTM Networks for NPC Three-Level Inverters,” Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 71, pp. 16. 2022.

作者简介：

崔亚波，硕士研究生，研究方向：船舶电力系统故障诊断，（E-mail）cuiyabo1998@163.com，13673758257

王荣杰，教授，博士生导师，主要研究方向：图像处理和新型电力系统故障诊断，（E-mail）roger811207@163.com，13859925862

通过仿真试验探讨三船会遇的避碰方案

朱　帅

（泉州海洋职业学院，福建石狮　362700）

摘 要：本研究运用 NSACA 仿真软件，对三船会遇情况下的避碰策略进行了详尽的仿真实验。实验基于《国际海上避碰规则》的框架，模拟了不同避碰方案在实际海面环境中的应用效果。通过对比分析，发现协商避碰策略在减少碰撞风险和降低燃油消耗方面具有显著优势。此外，研究还探讨了 AIS 短信技术在提高协商效率方面的应用潜力，并评估了其对于提升整体航行安全性的贡献。在实验结果基础上，本文提出了在遵守国际规则的前提下，如何合理运用协商避碰策略以优化航行效率和安全性的建议。

关键词：三船会遇；PIDVCA；NSACA；协商避碰

0　引　言

船舶碰撞事故的发生，不仅危及人身安全，而且造成巨大的财产损失和海洋环境的严重污染。船舶避碰方案的必要性、可行性以及避碰时机是值得研究的课题。

集美大学研究团队在研究自动避碰方面已初步形成了“船舶拟人智能避碰决策”（简称 PIDVCA）理论，PIDVCA 方法是一种将数据分析、机器学习、专家系统原理和知识有机结合起来，以智能程序形式表示的 PIDVCA 模型，来实现的集成人工智能决策方法。

关于三船的交会避碰，《国际海上避碰规则》上没有适用的规定，只能参照两船的航行与驾驶行动规则，以及良好船艺采取相应的避碰措施。借助集美大学和大连海事大学联合开发的以船舶操纵运动数学模型和电子海图为基础的“航行安全及自动避碰 (NSACA) 仿真测试平台”，利用其进行船舶自动避碰过程监控的仿真试验，通过分析试验得出三船交会时的最优避碰方案，从而为驾驶员提供参考，并对船舶智能避碰进行一定的优化。

1　三船交会的特点

三船会遇指的是在 12 n mile 监视范围内，与本船会遇船舶数量为两艘的情况。三船构成碰撞危险时的避让方法，《国际避碰规则》并没有给出具体的规定，且三船会遇，形成碰撞危险时，其实不存在明确意义上的让路船和直航船 [1]。

例 1：1OS-2TS 与 3OS-CAD

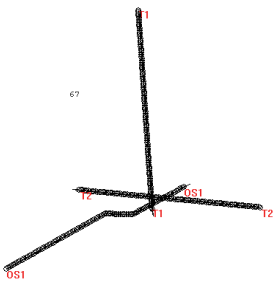


图 1　三船会遇态势

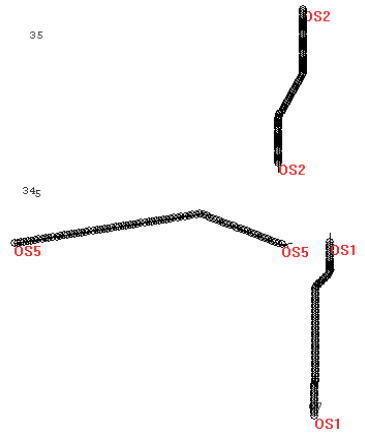


图 2　三船交叉相遇协调避让回放图

遵照《规则》，三船都要尽量避免横越他船的前方。与图 1 的情形相比，图 2 的情形可以说是完全遵循《规则》的规定，但是，是否有最优的避碰方案，从而使整体避碰方案的代价最低？

一般情况下，三船构成碰撞危险时的避碰方法，大多根据海员常规做法，依靠驾驶员经验，再就是根据当时的具体情况协商解决。很多时候，不仅是三船交叉相遇，多船会遇的情形也会经常出现。再有海上地形、海况千变万化，这也是实现无人驾驶船舶或者“单人船桥”船舶的最大障碍之一。本研究运用的 PIDVCA 方法是一种将数据分析、机器学习、专家系统原理和知识有机结合起来，以智能程序形式表示的 PIDVCA 模型来实现的集成人工智能决策方法。目前 PIDVCA 理论已经应用于实验室仿真研究。

其中 NSACA 仿真测试平台的系统控制计算机功能有：(1) 制作编辑各种练习和船舶模型；选择练习类型、海区以及海图号等，海图覆盖中国沿海、马六甲海峡、新加坡水域、英吉利海峡的海图和雷达图；选择本船的船舶类型、名称和装载状态，系统提供包括杂货船、散货船、集装箱船、油船、客船和滚装船在内的 30 余条船舶；设置目标船，包括选择目标船类型、名称、设置目标船速度、转向点位置以及转向点的删除、添加和更改，设置目标船雾号，号型；设置航行环境。(2) 控制系统的运行，对各本船进行监视。(3) 设置各种故障。(4) 记录、重演、打印模拟结果，文本输出各本船的航行、操纵数据。

NSACA 仿真测试平台的本船计算机的主要功能有：(1) 电子海图及本船、目标船的动态图形显示；(2) 模拟雷达显示、具有雷达 ARPA 基本功能；(3) 本船车、舵操作软面板，用于控制本船的航向、速度；(4) 本船操纵数学模型解算；(5) 船舶航行、环境等信息的综合显示；(6) 系统预留接口，能根据自动避碰系统要求实现航行环境数据、本船和目标船航行数据、本船控制数据等的实时交换。用户按照指定的文件格式组织文件，就可以将特定港口的潮流、岸线数据加入系统，从而满足用户进一步在平台基础上开发其他系统、项目论证、工程分析等要求；(7) 向控制计算机发送本船航行及操纵信息等。所以本研究依托此平台，开展完全模拟海上真实情况的三船会遇避碰实验，保证实验结果的可靠性 [2]。

2　三船交会避碰仿真试验结果与分析

2.1　三船交会仿真试验图示与数据分析

图 3 显示的是比较特殊的三船会遇情形，三船之间均构成碰撞危险，图 3 与图 4 中对应的 OS1 航行数据相同，图 3-1 的三船距离分别在 11 ~ 12 n mile，图 3-2 中的三船之间距离分别在 4.5 ~ 6 n mile。从两船之间的交会关系而言，OS1 与 OS2 为对遇关系，两船均为让路船；OS1 与 OS5 为左交叉关系，OS1 为直航船，OS5 为让路船；OS2 与 OS5 为右交叉关系，OS5 为直航船，OS2 为让路船。因此，OS2 仅有让路船身份，其他船舶均具有双重身份。

例 2：1OS-2TS-AC

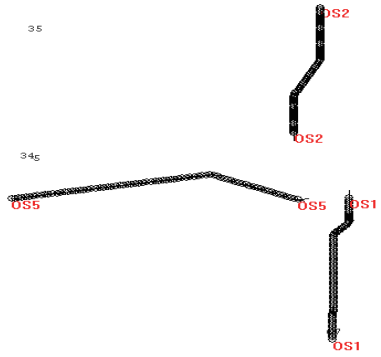


图 3　三船 12 海里交叉相遇

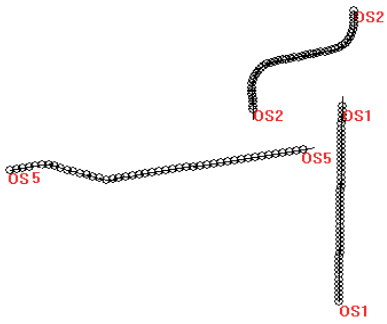


图 4　三船 6 海里交叉相遇

三船避碰方案为：仅让路船身份的 OS2 按照让路船采取避让行动；具有双重身份的 OS5 和 OS1 按照直航船采取避让行动。所以 OS2 先向右改向避让；一旦 OS2 采取措施，其与 OS1 的碰撞危险解除；此时，OS5 对 OS1 而言为让路船，承担让路船的责任，图 3 与图 4 中的 OS5 分别在其最佳初始避让时机到来时，采取向右改向 30° 的避让措施。如图 3 中的 OS1 在 OS5 的改向后，两船之间的交叉相遇情形发生了变化，导致紧迫局面形成，使得 OS1 亦采取向右转向的避碰措施，在复航时机到来时安全复航，OS5 尚未完成复航。如图 4, 因为 OS2 采取了大幅度向右转向避让的措施，OS1 可以保速保向，OS5 采取向右改向 30° 的避让措施后，在复航时机到来时安全复航。

PIDVCA 理论涉及避碰决策自动通报与协商问题，当图 3 中的 OS5 改为没有装载 PIDVCA 软件的 T1 时，且当直航船 OS1 发现让路船 T1 没有履行避让义务时，例如在发现 T1 的最佳避让时机已经错过而尚未采取行动时，OS1 将通过 AIS 短信的形式，自动以点对点的方式向 T1 播发避让请求，例如：“请立即向右避让 30°！谢谢！或 Please STB 30 Immediately! Thank You!”等。如果让路船能及时获悉并采取配合行动，则其避让效果与图 3、图 4 相同。

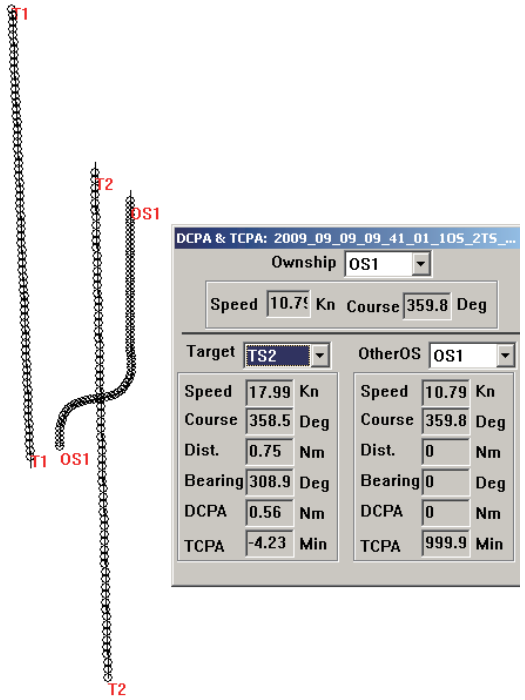


图 5　20 分钟后显示紧迫危险

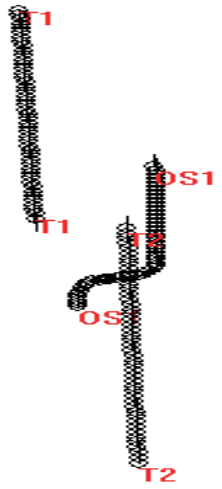


图 6 修改算法后实验未显示紧迫危险

当本船面临对遇和被追越的局面，OS1 对于 T1 和 T2 是直航船，但本例中的两目标船都未采取避让行动。OS1 根据算法要求在其最晚施舵时机到来时采取右让 76°，运行大约 20 min 后，OS1 显现紧迫危险提示。查看实验数据记录发现 OS1 的 ek 保持为 1, 从轨迹图看，左让右让都是有可能的，从 DCPA 和 TCPA 数据看 OS1、TS1、TS2 的数值都比较小，OS1 对 TS2 的 DCPA 是 0.8nm，而对 TS1 是 0.34 nm，根据规则针对 TS1 右让且一起让过 TS2。

分析原因：预测 OS1 与 TS2 的 CPAn=0.33(SDAm=0.32)，这时 ek=1，没有危险，可以复航，但实际小于 0.33，所以出现紧迫危险是正常的。结论：实际值 CPA 与预测 CPAn 不一致，其原因是船舶操纵性影响，即预测 CPAn 是根据 OS1 原航速预测的 Crn 来计算 CPAn，而恢复原航向的改向过程中，因 OS1 速度变小，使其航向稳定后，在开始检测危险时，OS1 速度尚未达到原航速导致 CPA<CPAn，通过修改算法后，OS1 避让成功。

例 3：2OS-1TS-ABD-OS5 无复航

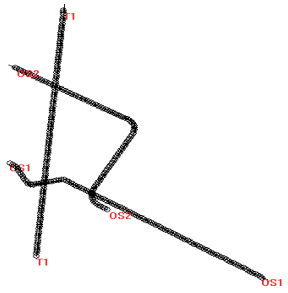


图 7 OS1 多次避让

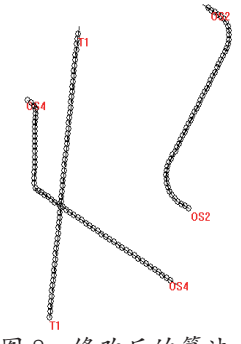


图 8 修改后的算法

图 7 中，OS1 对于 T1 为让路船身份，与 OS2 是对遇关系，互有让路义务，开始时 OS1 按照规则避让 T1，由于算法计算的右让角度过小，在运行一段距离后，发现不能避免碰撞危险，而 T1 又不采取措施，而 OS1 又背离规则左让，后虽复航，但这种可能会出现二次避让，既不经济又不安全。检查修改算法后，在图 8 算法决策中，加大了右让转向角度和延长复航时机，两船都实现了一次避让成功，算法修改有效 [3]。

2.2 避碰方案代价评估

如图 1 所示，根据《规则》第十五条（交叉相遇局面）（Crossing situation）规定：当 2 艘机动船交叉相遇，导致构成碰撞危险时，在本船右舷的船舶应给他船让路，如当时环境许可，还应避免横越他船的前方；所以，目标船 T1 应给本船 OS1 让路，而本船 OS1 应给目标船 T2 让路，同样，目标船 T2 应给目标船 T1 让路，

这就造成了没有明确意义上的让路船和直航船，因为《规则》规定的交叉相遇局面，仅仅针对“2 艘”机动船。如果遵循《规则》规定，三船均应向右转向，如图 2 所示。遵照《规则》，三船还都要尽量避免横越他船的前方。与图 1 的情形相比，图 2 的情形可以说是完全遵循《规则》的规定，是否可以找到最优的避碰方案，从而使整体避碰方案的代价最低?

正如图 1 所示，只有一艘船采取了避碰行动，这样，从整体上看是减少了避碰所付出的代价，但是又有一个问题：如果这 3 艘船都不愿意采取避让措施怎么办？最好的办法就是有一个统一的指挥，笔者的假设是：类似 AIS 这样的设备，船上也必须装载一种自动智能避碰系统，用来综合统一考虑当时的情形，把最优避让方案提供给各个驾驶员，使得各船统一协调行动确保代价最低，当然此假设的前提是尽可能遵循《国际避碰规则》。

3 基于协商船舶的船舶避碰

3.1 协商避碰的必要性

所谓协商避碰是指交叉相遇中，船舶在避碰过程中，存在不确定性，或需背离规则等可能发生非协调行动的情况下，会遇的船舶间针对不确定的具体内容 (如会遇局面，危险程度，避让时机，避让方式等) 和造成背离规则的具体环境因素，进行实时的信息交流与沟通，通过协商达成共识，避免船避间非协调行动，然后依协商结果采取一致行动，以实现安全避让的目标。[4]

按照避碰规则，让路船有义务和责任船进行避让，多数时候让路船往往需要采取大幅度转向措施来避免碰撞。协商避碰的目的，即通过协商，用更小的代价来避免碰撞危险，一般让路船会成为协商的发起者，而整个避碰方案也就是协商主题。在协商过程中，让路船和直航船都有自己偏好的方案，最终协商的目的，是为了得到一个由让路船和直航船共同采取措施的整体避碰方案，该整体避碰方案的代价总和比让路船单独采取避碰措施的代价要小。

此处笔者担心，协商避碰是否只适用于个别特殊会遇情形，例如左前方来船，此时通过协商来进行避碰，这也是目前驾驶员所采取的普遍做法。但是，如果都协商避碰的话，是否不再有一个固定的规则可循，这样岂不会变得很混乱。于是，有时宁愿付出的代价大些，也要清晰明确，按《规则》办事最有助于避碰及安全航行，这才是第一要则。所以协商避碰，第一要遵守《规则》，第二才是求得避碰代价最小的整体避碰方案。

这里笔者要提到，根据自身航海经验和了解得来的情况，目前驾驶员用得最多的无线电设备是 VHF；根据当时的海况船况、地形以及来船等复杂情况进行具体分析，通过 VHF 协商避碰。所以任何智能避碰系统，如果都只是遵循规则和专家经验，而不去根据具体情况具体分析，相互之间进行避碰协商，就是纸上谈兵，并非真正的智能。

3.2 协商避让的可行性

基于雷达和 VHF 的船舶识别和通信方式已显现其局限性，难以满足当今船舶航行安全的需要。船舶自动识别系统（AIS）的出现，有效地解决了船舶间自动识别、信息自动实时获取的问题，为开发自动新型的自动避碰系统，提供了强有力的技术支撑。为解决船舶间行动不协调的难题，充分利用 AIS 短信播发的功能特点，基于 NSACA 仿真测试平台，提出了基于 AIS 短信技术实现避碰决策，自动协商与通报的方法 [5-6]。

3.3 是否违背国际避碰规则

三船会遇局面复杂多样，目前尚无完善的避让方法，《规则》里并没有给出具体的规定。驾驶员在避让过程中，可能由于决策失误或协调不当，导致三船陷入多船会遇的紧迫局面，甚至形成紧迫危险。因此只能根据海员通常做法，经验以及良好船艺，或者参照《规则》里两船的避让规定进行操作。而《规则》中所规定的两船会遇态势下，绝对意义的让路船只有追越船，交叉相遇局面下，本船右舷有船的机动船，以及其他一些特殊情况下的船舶。至于三船会遇的避让措施，只能参照规则里两船避让的规定，以及良好船艺进行操作。然而，

海员通常做法也有违背规则的情况，例如：两船右对右对遇，按规则也都应向右改向过红灯，但是驾驶员不乏各自向左改向过绿灯的。只要进行交流协商避碰，明确各自意图，这样反而更加简便快捷，有助于航行。

4 结 论

本研究通过理论分析与仿真实验相结合的方法，利用 NSACA 仿真测试平台，成功实现了宽水域中三船会遇的避碰仿真模拟，并完成了避碰过程中对各种三船会遇情形的仿真实验。在对仿真实验结果的深入分析中，某些会遇局面下，避碰策略未能完全符合《国际海上避碰规则》的要求，所以在未来的研究中需要进一步优化避碰算法和决策模型，以确保所有情况下都能达到最佳的避碰效果。

此外，AIS 短信技术在提高协商效率方面的应用潜力巨大，其对于提升整体航行的安全性意义非凡。实验结果表明，AIS 短信技术在实际操作中能够有效地促进船舶之间的信息交流，有助于达成更快速、更有效的避碰决策。

尽管本研究取得了三船会遇避碰方案的优化结果，但也存在一定的局限性。例如：实验中未考虑风流影响因素，这可能对避碰策略的选择产生影响。未来的研究应考虑将风速和风向等因素纳入模型，以提高仿真实验的准确性和可靠性。

最后，在遵守《国际海上避碰规则》的前提下，如何合理运用协商避碰策略以优化航行效率和航行安全。在通过不断的实验验证和方法改进后，期望能够为海上交通安全管理提供更加科学、有效的建议。

参考文献

[1] 吴兆麟 . 船舶避碰与值班 [M]. 大连海事大学出版社，2009(2).

[2] 李丽娜 , 孙腾达 , 黄丽卿 . 关于船舶自动避碰仿真方法的研究 [J]. 仪器仪表学报 ,2004,25(4).

[3] 李丽娜，杨神化，熊振南等 . 船舶拟人智能避碰决策理论框架的研究 [J]. 中国航海，2009 年 6 月，第 32 卷，第 2 期 .

[4] 胡巧儿，胡勤友 . 基于协商的船舶避碰仿真系统的设计与分析 [J]. 中国航海，2009,(1): 54-59.

[5] 郑敏杰，杨神化，李丽娜 . 基于 AIS 短信技术的避碰决策自动协商与通报机理研究 [C] . 大连海事大学出版社，2009.

[6] 吴烯，施平安 . 基于 AIS 的船舶间协商避碰研究［J］. 海军广州舰艇学院舰操教研室 ,2004.

作者简介：

朱帅，集美大学航海学院本科，西北师范大学教育学硕士，无限航区 3 000 总吨以上客滚船二副，现任泉州海洋职业学院港口物流管理专业负责人，（E-mail）zhushuai2015@163.com,18859794882

航运业绿色低碳转型趋势与应对建议探讨

初佩林　钟世龙

（中远海运特种运输股份有限公司，广东广州　510623）

摘 要：由于全球气候变化问题日趋严峻，有关航运业减排的国际公约法规相继出台，绿色低碳转型已成为航运业发展的必然选择。为明晰航运业绿色低碳转型趋势，本文梳理了国际海事组织、欧盟及部分国家出台的航运业减排政策，分析了航运业绿色低碳转型的积极实践。针对我国航运业绿色低碳转型存在的问题，从发挥政府在制定总体路径和政策制度方面的主导作用、加速实现船舶替代燃料的规模化应用、深度参与国际合作等三方面给出建议。

关键词：绿色低碳转型；国际海事组织；欧盟碳排放交易体系；欧盟海事燃料法规；替代燃料；节能减排

随着国际海事组织（IMO）减排措施实施步伐的加快，欧盟碳排放交易体系（EU　ETS）已扩展至航运业，有关航运业绿色低碳转型的要求正在不断提高。船舶替代燃料、节能减排设备等绿色低碳技术的快速应用，正逐步将航运业脱碳目标转化为实际行动。

1　航运业绿色低碳相关政策法规日趋严苛

1.1　IMO 减排目标

为有效应对全球气候变化，推动航运业温室气体减排工作，IMO 在 2011 年的 MEPC 62 会议上，分别从技术和运营层面，引入了船舶设计能效指数（EEDI）和船舶能效管理计划（SEEMP）作为提高船舶能效的重要手段；在 2016 年的 MEPC 70 会议上，推行了船舶燃油消耗数据收集系统（IMO DCS），强制要求船舶记录并报告燃油消耗；在 2018 年的 MEPC 72 会议上，通过了《IMO 船舶温室气体减排初步战略》，这是国际航运业首个温室气体减排战略；在 2021 年的 MEPC 76 会议上，新增了现有船舶能效指数（EEXI）和营运碳强度指数（CII）等能效要求；在 2023 年的 MEPC 80 会议上，通过了《2023 IMO 船舶温室气体减排战略》，对国际航行船舶的能效水平和温室气体排放总量提出了量化目标，即以 2008 年为基准年，国际航行船舶 2030 年碳强度要下降至少 40%，2030 年温室气体排放总量要下降至少 20% 并力争 30%，2040 年温室气体排放总量要下降至少 70% 并力争 80%，温室气体排放要尽早实现达峰并在 2050 年前后实现温室气体净零排放。此外，该战略还对温室气体零或净零排放技术、燃料和能源的使用提出了到 2030 年至少达到 5% 并争取达到 10% 的要求。IMO 2023 减排战略的通过和实施，体现出 IMO 为应对气候变化在国际航运业减排的坚定决心，同时也给航运业带来了绿色低碳转型的严峻挑战。

1.2　欧盟碳排放交易体系（EU　ETS）和欧盟海事燃料法规（Fuel　EU　Maritime）

与 IMO 相比，欧盟采取的航运业减排措施更为激进。2019 年 12 月，欧盟委员会发布《欧洲绿色协议》；2020 年 12 月，正式通过《2030 年气候目标计划》；2021 年 7 月，正式发布“Fit for 55”一揽子立法与政策提案，包括 EU ETS、Fuel EU Maritime、可再生能源指令、替代燃料基础设施指令、碳边境调节机制条例（CBAM）等，其中 EU ETS 和 Fuel EU Maritime 对航运业影响程度最大。

作为世界上最大的碳排放交易体系，EU ETS 是欧盟以经济方式减少温室气体排放的关键工具。EU ETS 在今年 1 月 1 日起正式实施，实施对象为 5 000 总吨（GT）及以上的商用货船及客船。船舶在欧盟管辖范围内的港口内及港口之间航行的碳排放按照 100% 的比例计算，欧盟港口与非欧盟港口之间航行的碳排放按照 50% 的比例计算。2024 年和 2025 年为过渡期，分别按 40% 和 70% 的航运排放交纳配额，2026 年起按 100% 的航运

排放清缴配额。2024 年被纳入 EU ETS 的温室气体只有二氧化碳（CO_2），2026 年起甲烷（CH_4）和一氧化二氮（N_2O）也将被纳入其中。航运企业必须在每年的 9 月 30 日之前向欧盟主管当局清缴上年度的 EU ETS 配额，未交出配额的公司会被开出每吨二氧化碳 100 欧元的罚款，并仍有责任在下个履约期内交出所需配额。连续两个或更多报告期不遵守规定的航运公司可能会被禁止在欧盟贸易、航行。

Fuel EU Maritime 旨在限制抵达、停留、驶离欧盟成员国港口的船舶所使用能源的全生命周期温室气体强度，强制在港船舶使用岸电或零排放技术，以推动可再生燃料、低碳燃料和替代能源的使用。航区适用范围与 EU ETS 相似，即欧盟内部航段及港口期间的能源使用量按照 100% 的比例计算，欧盟港口与外部港口航段则为 50%。正式实施时间预计为 2025 年 1 月 1 日，纳入计算的温室气体包括 CO_2、CH_4 和 N_2O。Fuel EU Maritime 法规要求从 2025 年到 2050 年，分阶段减少船用燃料温室气体强度，以 2020 年船舶平均温室气体强度（91.16gCO_2eq/MJ）为参考基线，每 5 年一折减，具体数值如图 1 所示。法规规定超过年度参考值的每单位能量都将被罚款；与年度参考值相比的任何合规盈余部分都可以保存至下一个报告期，也可以转让给同一报告期的另一艘船舶。Fuel EU Maritime 还设定了名为“池化”的规则，即可以选择一个公司或多个公司的船舶进行池化组合去履约，通过利用实际碳强度低的船舶构建联合池优化模型可以有效降低合规赤字船舶的罚款金额。

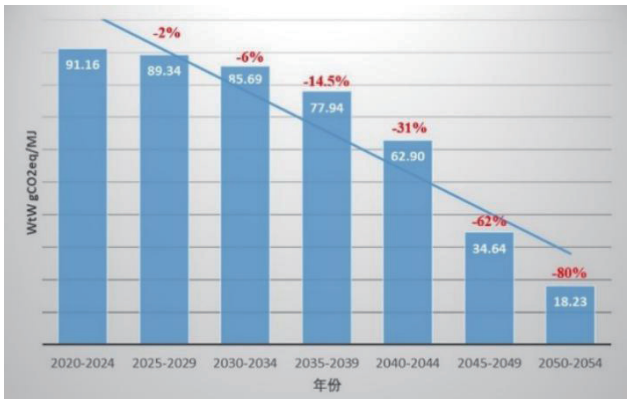


图 1　2020–2054 年 Fuel　EU　Maritime 船舶平均温室气体强度参考基线

1.3　部分国家的航运业减排政策

我国一直积极推进航运业减排进程。国务院发布的《2030 年前碳达峰行动方案》提出了加快发展电动船舶和天然气动力船舶的措施，《“十四五”节能减排综合工作方案》中指出要加强推广船舶清洁能源和扩大碳排放交易市场；国家发改委联合相关部门颁布的《关于大力推进海运业高质量发展的指导意见》中强调要推动清洁能源在船舶中的应用；交通运输部出台的《绿色交通“十四五”发展规划》中提出要积极探索氨燃料、氢燃料动力船舶应用；财政部发布的《财政支持做好碳达峰碳中和工作的意见》中指出公务用船优先采购新能源船舶，并逐步扩大碳排放交易行业范围。中国海事局印发的《船舶能耗数据收集管理办法》为进出我国港口 400 总吨及以上或主推进动力装置功率 750 kW 及以上的船舶能耗数据收集管理提供政策依据。此外，我国支持将航运业纳入地方碳排放权交易试点市场，上海市碳排放权交易试点市场已经纳入，广东省碳排放权交易试点市场拟纳入。除政府部门出台的政策措施外，中国船级社发布了《船舶应用甲醇乙醇燃料指南 2022》、《绿色生态船舶规范》等促进航运业减排的指南和规范。

美国政府颁布了一系列控制船舶温室气体排放的法律法规，例如：由美国环保署（EPA）在 2015 年出台的船舶一般许可（VGP）法规中规定了在美国海域船舶排放氮氧化物的限制 [1]。美国、日本和挪威都制定了船舶碳排放的监测、报告和核查制度来监督碳排放情况。英国政府出台了推动零排放船舶应用的 2020-2030 年的扶持性航运政策，多次拨款用于支持零排放航运和绿色海事技术工作 [2]。此外，英国、日本和挪威制定了对标 IMO 减排目标的国内航运业减排中长期发展规划，包括《英国海事 2050》、《日本航运零排放路线图》和《挪

威绿色航运行动计划》[3]。上述国家还积极与 IMO 合作，推动国际航运业减排政策标准的制定和完善。

2 航运业在绿色低碳转型方面的积极实践

2.1 积极探索应用各类船舶替代燃料

随着未来国内外政策法规对航运业减排要求的不断严格，船舶仅依靠能效提升难以达到温室气体减排目标，应用替代燃料是航运业实现绿色低碳转型的主要手段。替代燃料是指取代传统化石燃料、减少环境污染、具备可替代性的新型能源。目前，主流船舶替代燃料包括生物燃料、液化天然气（LNG）、甲醇、氨以及氢气。近年来，在新船订单中替代燃料船舶所占比例大幅上涨，从 2016 年只占 8% 上涨到 2022 年的 55%，仅在 2023 年略有下降。根据克拉克森数据显示，今年一季度全球共有 155 艘 880 万总吨的新造替代燃料船舶订单，占总计 1 880 总吨新船订单的 46.7%，超过去年全年的 42.2%。

生物燃料是由生物质组成或萃取而成的环保能源，具有低排放、可再生、可生物降解等优点。船用生物混合燃料是由传统燃油和生物燃料进行物理调兑而成，其中 B24 船用生物混合燃料（生物燃料占比 24%）大约可减少 20% 的碳排放。使用船用生物混合燃料无需改变现有船舶动力系统，这为传统燃油动力船舶提供了一种使用替代燃料减排的途径。当前，船用生物混合燃料价格明显高于传统燃油。例如：B24 船用生物混合燃料的价格比 0.5% 低硫燃油高约 200 美元。生物燃料的需求前景将取决于未来生物燃料的价格，以及储存、加注等基础设施在全球范围内的不断完善。

LNG 是由净化后的天然气在常压、超低温（-162 ℃）冷却液化生产的。由于 LNG 发动机技术相对成熟、燃料储运设施较为完善，LNG 动力船应用最为广泛，几乎覆盖所有船型。根据克拉克森的数据，在现有总计 1 800 艘替代燃料船舶中，LNG 动力船共有 1 085 艘，占比达 60.3%。但由于 LNG 是依靠化石原料制成，以及存在燃烧效率不高、甲烷逃逸等问题，只能作为中短期过渡性替代燃料使用 [4]。

近年来，甲醇受到航运业越来越多的关注。甲醇在常温常压下是液体，相比于 LNG、氨和氢燃料更易储存，并且与大多数船舶发动机兼容，传统燃料发动机使用甲醇的改造成本较低 [5]。根据克拉克森的统计数据，截至今年 3 月底，全球共有 31 艘甲醇动力船舶运营；在今年 1 月的替代燃料船舶订单中，甲醇双燃料船数量达 23 艘，位居首位，超过了 LNG 动力船的 10 艘。目前全球许多甲醇供应商正加快产能布局，欧洲绿色甲醇产能预计在 2027 年可达 120 万 t/a，但仍难以满足快速增长的市场需求，全球绿色甲醇制备及供应体系还需进一步健全。

氨具有低碳甚至零碳属性，其在燃烧时不产生碳排放，但产生的 N_2O 会使氨燃料的温室气体排放强度偏高。氨燃料船队发展还处于起步阶段，截至今年 4 月的手持订单共有 13 艘氨燃料船舶。全球海事论坛（GMF）研究报告指出，绿氨动力船舶将会在 2028 年部署在国际“绿色航运走廊”（即“零排放航线”）之一的西澳大利亚—东亚铁矿石贸易航线，届时绿氨的供给及燃料加注等基础设施也会配套到位。

氢燃料船舶还处于探索阶段，截至今年 4 月的手持订单共有 21 艘氢燃料船舶。氢燃料动力分为氢燃料电池和氢内燃机。氢燃料电池适用于内河船舶，可作为小型船舶的主动力，也可作为大型船舶的辅助动力，功率等级相比传统柴油机动力有较大差距。氢内燃机具有对氢气纯度要求不高、无需热机、耐用性高等优点，但由于输出偏软、响应不及时的特点，不适合作为船舶的主动力 [6]。我国氢燃料船舶部分核心配套设备依赖进口，相关配套技术水平与世界先进水平仍存在不小差距。

2.2 积极探索应用船舶节能减排技术

船舶节能减排技术主要包括主机限功率改造、桨前固定导轮、消涡鳍、废热回收、太阳能光伏发电系统、气层减阻、防污减阻油漆和船用碳捕集技术等。对于现有船舶尤其是老旧船舶来说，改变船舶动力系统的成本过高，船舶节能设备加装可以在一定程度上提高船舶能效水平，延长其合规时间且成本相对较低。据克拉克森研究统计，截至 2023 年，船队及手持订单中至少已有 8 850 艘船舶安装节能设备，其中大部分安装在螺旋桨和舵附近。

3 我国航运业绿色低碳转型存在的问题

3.1 相关政策法规有待完善

作为 IMO 的 A 类理事国和 MARPOL 公约的缔约国，我国目前尚未形成对标 IMO 明确统一的中长期温室气体减排实施路径，航运业碳减排规划的前瞻性存在不足。

《船舶能耗数据收集管理办法》的航次适用范围包括挂靠我国港口的上一航次和在港的能耗数据，但没有包括从我国港口驶离到别国港口这一航次的数据。此外，该办法在数据监测和核验方面还有待完善。挂靠我国港口的 5 000 总吨及以上中国籍国际航行船舶的能耗数据的监测、报告和核验工作满足 IMO DCS 和欧盟二氧化碳排放监测、报告、验证机制（EU MRV）的要求，但是 400 总吨及以上国内航行船舶、挂靠我国港口的 400 总吨及以上 5 000 总吨以下国际航行船舶、挂靠我国港口的 5 000 总吨及以上外国籍国际航行船舶的能耗数据仅要求收集和报告，在监测和核验方面还存在不足。

由于碳排放数据监测分析系统的不成熟和体系建设的不完善，目前全国只有上海市将航运业（共 31 家上海航运企业）纳入当地碳排放交易体系，将航运业纳入全国碳排放交易体系的步伐还很缓慢，这导致被纳入上海碳排放交易体系的航运企业在与其他省市的航运企业竞争中处于相对劣势，不利于维护市场的公平公正性。

3.2 船舶替代燃料市场还不成熟

当前船舶替代燃料基础设施条件不足，绿色替代燃料生产难度还较大，相关监管标准不成熟，航运业、供应商和研究机构等各方合作有待加深，航运业内部的绿色低碳转型意愿还需协调。目前替代燃料价格远高于传统燃料，将增加大约 40% ~ 60% 的航运企业运营成本，会削弱企业在原有市场的竞争优势，进而降低了企业主体参与绿色低碳转型的积极性。此外，使用替代燃料的安全风险会更高，例如，甲醇有一定毒性且较传统燃料更易发生火灾，氨燃料发生泄漏会产生有毒气体。关于替代燃料全产业链的安全规范指南需要尽快制定完善。

3.3 国际合作相对不足

近年来，我国积极参与国际航运业绿色低碳公约法规制定，向 IMO 提交了有关建立国际海事可持续基金和奖励机制（IMSF&R）、MARPOL 附则 VI 杂货船定义中“重货运输船”的澄清、CII G5 导则中船舶载运能力取值的澄清等提案，贡献了“中国智慧”，但较欧美国家还有一定差距，在相关国际政策制定的话语权还需进一步提高。同时，我国与其他国家和地区在航运业绿色低碳转型方面的合作有待加强。

4 应对建议

4.1 发挥政府在制定总体路径和政策制度方面的主导作用

要从顶层设计上明确我国航运业中长期总体温室气体减排路径，研究制定“中国方案”，促进我国航运业减排规则与 IMO 规则的融合。各相关政策制定部门要加强沟通协作，围绕我国航运业减排总体路径，规范引导我国航运业加速绿色低碳转型。

要继续完善我国船舶温室气体排放 MRV 制度。建议报告范围增加从我国港口驶离到别国港口 5 000 总吨及以上船舶的能耗数据，为今后对这部分航次纳入碳交易体系打好基础。同时，要加强 5 000 总吨及以上国内航行船舶、挂靠我国港口的 5 000 总吨及以上外国籍国际航行船舶的能耗数据监测和核验力度。船舶碳排放数据质量的高低将会直接影响市场措施的实施，建议开发符合要求的自动化船舶能耗数据采集设备和数字化系统，提高数据质量，也减轻船员工作负担。

在我国船舶温室气体排放 MRV 制度和体系建设成熟后，建议把抵达、位于或驶离我国港口的国内外船舶的温室气体排放纳入到全国碳排放交易体系中，把收取碳排放配额的部分资金用于支持我国航运业绿色低碳转型事业。

4.2 加速实现船舶替代燃料的规模化应用

船舶替代燃料的研发应用涉及到船舶工业与新能源、新材料等多领域交叉。航运业要加强与新能源技术企业、科研院所的合作，整合多行业优势资源，合力突破技术瓶颈。

航运业要扩大与替代燃料供应商的合作，打通替代燃料的生产、运输、存储以及加注等流程，形成具有规模效应的生产集群，进而实现产业的快速迭代升级，大幅降低替代燃料的使用成本，提高我国航运企业的国际竞争力。

航运企业要及时掌握替代燃料市场变化，结合自身实际，规划布局替代燃料船队，以自身替代燃料使用需求撬动上游产业链发展。

鉴于目前替代燃料市场存在高成本、高投资的特性，建议政府制定鼓励替代燃料船舶、替代燃料供应链和配套基础设施协同发展的专项补贴、税费减免等激励机制，增强企业参与投资生产的动力。此外，要完善替代燃料生产加注标准、管理办法等规范性文件，解决国内法规不健全的问题。

替代燃料较传统燃料对操作人员有更高要求，需制定生产、储运、加注和使用替代燃料等各阶段的安全操作指南，对操作人员进行专业化安全培训，有效遏制或减少安全事故的发生。

4.3 深度参与国际合作

我国要加强国际航运业绿色低碳政策的跟踪研究，积极开展相关国际政策提案工作，与其他国家分享经验看法，深度参与国际合作，掌握国际相关标准规范制定的话语权，实现从履约到立约的转变，减轻我国航运企业的履约压力，更好地维护国家利益。

此外，我国要与更多国家和地区建立航运业绿色低碳转型的合作伙伴关系，相互学习分享绿色低碳创新技术和模式，例如：在积极参与正在建设中的“上海港—洛杉矶 / 长滩港”“广州港—洛杉矶港”“天津港—新加坡港”绿色航运走廊的基础上，主动与国外港口搭建更多的绿色航运走廊，探索多国航运企业、港口、燃料供应商、客户和监管机构协同合作推行零排放船舶营运的解决方案，增强我国航运业绿色低碳发展的国际影响力。

参考文献

[1] JOHNSON H, JOHANSSON M, ANDERSSON K, et al. Will the Ship Energy Efficiency Management Plan Reduce CO2 Emissions? A Comparison with ISO 50001 and the ISM Code[J]. Maritime Policy & Management, 2013, 40(2): 177-190.

[2] 郑洁 , 柳存根 , 林忠钦 . 绿色船舶低碳发展趋势与应对策略 [J]. 中国工程科学 ,2020,22(6):94-102.

[3] Koasidis K, Karamaneas A, Nikas A, et al. Many miles to Paris: A sectoral innovation system analysis of the transport sector in Norway and Canada in light of the Paris Agreement [J]. Sustainability, 2020,12(14): 5832.

[4] 许婉莹 , 李仁科 , 饶广龙 , 等 . 船舶节能减排技术应用现状与展望 [J]. 船舶工程 (04):26-41.

[5] 陈弓 , 朱宇 , 韩冰 . 绿色航运能源技术现状及发展趋势分析 [J]. 交通信息与全 .2023,41(2):168-178.

[6] 王东 , 兴王哲 , 赵帆 , 等 . 氢燃料电池动力船舶技术标准现状分析与发展展望 . 交通信息与安全 ,2023,41(2):157-178.

作者简介：

初佩林，中远海运特种运输股份有限公司安质部生态环保管培生，（E-mail）chu.peilin@coscoshipping.com,17753284015

钟世龙，中远海运特种运输股份有限公司安质部生态环保能效监督主管、轮机长，（E-mail）zhong.shilong@coscoshipping.com，13802428515

南海环境污染和生态退化状况

蒋跃进

（国家海洋局南海环境监测中心，广东广州　510300）

摘 要：本世纪以来，在陆海人文活动和全球气候变化影响下，南海环境污染和生态退化并未遏止，营养盐、重金属、农药、油类、放射性核素等传统污染物生态风险不确定性加大，新型污染物如持久性有机污染物、环境激素、抗生素、塑料 / 微塑料 / 纳米塑料等污染风险持续上升。本文综述性分析南海环境污染和生态退化状况，描述环境和生态问题、特点和风险。通过本文，重新认识南海环境和生态对于我国的意义与价值，深入思考工业化、城市化、现代化与海洋环境和海洋生态的关系。

关键词：南海；环境污染；生态退化；状况

南海是我国的海洋南大门，是粤港澳大湾区与桂琼协同发展的国家重大战略要地，与南海北部入海江河流域生态保护与高质量发展江海直达、陆海相通，是我国重要的经济圈和海洋生态屏障。

1　南海概况

南海诸岛、诸礁和暗沙很早就被我国劳动人民发现与开发，是我国领土不可分割的一部分。春秋战国时期南海被称为“朱崖海渚”，西汉东汉时期为“涨海”，唐宋时期把南海诸岛称为“千里长沙”“万里石塘”，明朝时期建立海军南海巡逻制度，清朝时期将南海诸岛标绘在官方地图上，将南海诸岛划分为四大群岛：东沙、西沙、南沙和中沙群岛。历史上南海外海边界分别采用过十一段线、九段线和十段线划分我国海洋疆界。

南海位于我国大陆的南面，是太平洋的边缘海，是半封闭海域，北濒海南、广西、广东、福建和台湾省，东濒菲律宾与加里曼丹，南濒苏门答腊岛和加里曼丹岛之间的隆起地带（邦加岛一带），西濒中印半岛与马来半岛，通过巴士海峡、苏禄海和马六甲海峡等，与太平洋和印度洋相连。南海深邃和辽阔，平均深度超过 1 212 m，最大深度在菲律宾附近为 5 567 m，面积约为 356 万 km^2，远大于渤海（9.7 万 km^2）、黄海（42 万 km^2）和东海（75 万 km^2）面积的总和。注入南海的河流主要分布于北部，主要有珠江、红河、湄公河、湄南河等。南海地处低纬度海域，是我国海区中气候最暖和的热带深海，有南海暖流。南海海水表层水温高 (25℃ ~28℃)，年温差小 (3℃ ~4℃)，终年高温高湿，长夏无冬。南海海流受黑潮影响，南海上层环流具有明显的季节性特征：冬季，整个南海为气旋式环流；夏季，南海北部仍为气旋式环流，南部转变为反气旋式环流。南海盐度最大为 35，潮差 2 m。南海海底地形主要有大陆架、大陆坡和深海盆地。

2　国家法律、规范和标准依据

本文依据《中华人民共和国海洋环境保护法》（1982 年 8 月 23 日通过，1999 年 12 月 25 日修订，2013

年 12 月 28 日修正、2016 年 11 月 7 日修正、2017 年 11 月 4 日修正、2023 年 10 月 24 日修正，2024 年 1 月 1 日实施）、《海洋监测规范》（GB 17378-2007）、《海洋调查规范》（GB/T 12763-2007）、《海水水质标准》（GB 3097-1997）、《海洋沉积物质量》（GB 18668-2002）、《海洋生物质量》（GB 18421-2001）、《渔业水质标准》（GB 11607-1989）。

依据《海水水质标准》（GB3097-1997），按照海域的不同使用功能和保护目标，海水水质分为四类：第一类适用于海洋渔业水域，海上自然保护区和珍稀濒危海洋生物保护区；第二类适用于水产养殖区，海水浴场，人体直接接触海水的海上运动或娱乐区，以及与人类食用直接有关的工业用水区；第三类适用于一般工业用水区，滨海风景旅游区；第四类适用于海洋港口水域，海洋开发作业区。

本文数据主要引自 2000 年 ~2018 年历年《中国海洋环境状况公报》、历年《南海区海洋环境状况公报》等，并经初步统计分析。

3　环境污染状况

3.1　海水水质

广东近岸海域符合第一类、第二类和劣于第四类海水水质标准的海域比例分别为 50% 和 30%，主要污染物是无机氮、无机磷和油类。劣于第四类海水水质标准的海域主要分布在珠江口，以及汕头湾、红海湾、广海湾、水东湾、镇海湾和湛江港等局部海域。北部湾近岸海域符合第一类、第二类和劣于第四类海水水质标准的海域比例分别为 50% 和 20%，主要污染来自无机氮、无机磷和油类。劣于第四类海水水质标准的主要分布在廉州湾、钦州湾和北仑河口等局部海域。海南近岸海域环境状况均符合第三类海水水质标准。南海北部海域海水环境状况均符合第三类海水水质标准。南海中南部中沙群岛及南沙群岛周边海域环境状况均符合第二类海水水质标准。

海水中油类、化学需氧量、无机氮、无机磷、汞、铜、铅、镉、锌、总铬、砷、生化需氧量、666、DDT、狄氏剂等和多氯联苯均检出，监测数据表明：近岸海域水交换能力弱，污染物近岸海域留存时间漫长，近岸局部海域污染依然严重，水体呈富营养化。

3.2　海洋生物体

海洋生物分为海洋浮游生物、海洋自游 / 游泳生物、海洋底栖生物和海洋微生物等。南海海域游泳生物体和底栖生物体中均检出总汞、铬、砷、铜、铅、锌、镉、石油烃、666、DDT 和多氯联苯等。浮游生物和底栖生物不会长距离迁徙洄游、区域性强、活动性小，回避污染的能力远不及游泳生物，底栖生物能较好地反映海洋底质环境质量状况。

海水增养殖区贝类体内石油烃、总汞、铜、砷、铬、666、DDT、麻痹性贝毒均检出；部分增养殖区贝类体内铅、镉及粪大肠菌群等残留量依然较高。增养殖区贝类体内 666 和 DDT 呈逐年降低趋势，其他监测要素含量未见明显年际变化。

3.3　海洋沉积物

广东近岸、北部湾、海南近岸海域沉积物均检出总汞、镉、铅、砷、铜、锌、铬、硫化物、有机碳、油类、666、DDT、多氯联苯。受到污染的主要集中在珠江口海域和钦州湾附近海域，重金属超标的主要为锌、总汞、砷、铅、铜等。

南海北部海域、西沙珊瑚礁海域沉积物检出总汞、镉、砷、铜、锌、铬、硫化物、有机碳、油类，局部海域铅含量劣于海洋沉积物质量标准。

3.4　入海江河与入海排污口

经监测统计，南海北部入海的珠江、东江、榕江、深圳河、南流江、大风江、钦江、防城江和南渡江 9 条河流各污染物年入海量约为：化学需氧量（COD_{Cr}）115.9 万 t、氨氮（以氮计）2.9 万 t，硝酸盐氮（以氮计）

35.0 万 t，亚硝酸盐氮（以氮计）2.9 万 t，总磷（以磷计）3.0 万 t，油类 1.3 万 t，重金属 3 870 t（其中铜 721 t、铅 253 t、锌 2 854 t、镉 34 t、汞 8 t），砷 485 t。

广东广西海南各省各类入海排污口达数千。入海排污口分类为：排污主体明确的工业废水入海排污口、市政污水处理厂排污口、镇村生活污水排污口、禽畜水产养殖农业面源沟渠、排污主体不明确的排污河 / 沟渠等。入海排污口排放的主要污染物是化学需氧量（COD_{Cr}）、无机氮、总磷、悬浮物，等等，陆源入海排污口达标排放率仍然较低。

3.5 海水增养殖

南海海产增养殖的主要品种有鱼、虾、龙虾、蟹、紫海胆、贝类、江蓠、紫菜、羊栖菜等。每年投放商品饲料成千上万吨，日常投放的消毒 / 防病 / 治病 / 促进生长 / 免疫药品的有二氧化氯、高锰酸钾、复方新诺明、石灰、杀灭菌脂、百菌净、林丹、硫丹、狄氏剂、艾氏剂、抗生素、疫苗，等等。

近岸增养殖区海水中化学需氧量、总汞、镉、铅、砷、铬和锌等符合第二类海水水质标准。部分养殖区中粪大肠菌群、pH、溶解氧、无机氮、无机磷和油类超标率较高。沉积物中检出总汞，部分增养殖区铜和油类的超标率较高。生物体中检出总汞、砷、666。部分养殖区生物体石油烃、粪大肠菌群、铅、镉和 DDT 超标率较高。部分养殖贝类检出腹泻性贝毒（DSP），达到警戒标准，有的还检出麻痹性贝毒（PSP）。

3.6 海洋石油天然气开发、海洋倾倒、珠江口海洋矿砂开采与滨海核电站热电厂

南海油气资源丰富，分布有珠江口油气开发区、南海西部油气开发区、涠洲油田开发区等 11 个油气开发区，还有众多石油平台、浮式生产储油轮（FPSO）和陆地终端处理厂。南海海上油气开发区年生产污水排海量约 17 160 万 m^3，水基钻井液排海量约为 16 900 m^3，钻屑排海量约 14 000 m^3。

南海海洋倾倒区 / 倾废区有十多个，其中包括海洋倾倒区与临时性海洋倾倒区，水深介于 - 8 m ~ - 100 m。年接受总倾倒量约 2 800 万 m^3，主要为海洋工程、海岸工程与港口航道建设维护产生的疏浚物。倾倒瞬间，倾倒物挤淤引起的悬沙扩散，悬浮物 / 悬沙、浑浊度急剧上升，倾倒之后，倾倒区海域底栖生物种类数、栖息密度和生物量等下降。

海洋矿砂开采区水质均检出重金属，检出油类劣于第二类海水水质标准。海砂开采，水中悬浮物含量升高，最高达到 150 mg/L。海洋沉积铜和砷含量劣于第一类海洋沉积物质量标准。海砂开采区海洋生物群落结构稳定性较差，生物种类和生物量较少，底栖生物多样性、丰度和均匀度均下降。

滨海核电站热电厂等每年利用数百亿吨海水冷却排放余热 / 废热，导致海洋热污染（物理污染），运用氯气保护排水管道免受海洋生物附着腐蚀，排放余氯（化学污染），邻近海水中余氯检出率较高。

3.7 船舶污染

伴随广东广西海南经济社会发展，繁忙的海洋运输业带来了潜在的船舶污染，而海上交通事故时有发生，沉船、撞船发生时，常导致溢油污染海洋。渔船机舱污水含油量为 120 mg/L，还有渔船生活污水，这些含油污水和生活污水命运归宿在何处？值得深思。

2000 年 11 月 14 日，“德航 298”与“宝赛斯”在珠江口伶仃航道碰撞，“德航 298”沉没，200 t. 重油泄漏；2004 年 12 月 7 日 21 时 35 分，在珠江口担杆岛东北巴拿马籍“HVUNDAIADVANCE”轮（船长 182 m，吃水 10.3 m，21 000 t.，装载 1 660 个标箱）和德国籍“MSCILONA”轮（船长 300 m，吃水 10.9 m，75 500 t.，装载 6 732 个标箱）发生碰撞，两船均受损。“MSCILONA”燃油舱破损，导致燃油大量外泄；2005 年 1 月 26 日凌晨 3 时，南澳七星礁附近海域，油船“明辉 8 号”与货船“闽海 102”发生碰撞，油船碰撞后首先下沉，半小时后完全沉没；2010 年 2 月某日，桂山岛附近海域发生某海轮 2 700 t. 甲醇泄漏入海事故；2013 年 8 月 14 日受台风“尤特”影响，香港籍散货船“Trans Summer”轮（中文名“夏长”轮）在台风袭击过程中，于 1213 时在珠江口小万山岛以南锚泊中船身倾侧沉没，船壳破损导致船上船用重油、轻柴油、润滑油大量泄漏；

2014 年 9 月 16 日凌晨，装载 4950.5 t. 钢材的“浩骏”轮航经粤西海域至横琴岛西南海域时，遭遇台风“海鸥”袭击，在狂风巨浪中货舱舱盖被大浪打坏，海水灌入大舱，导致“浩骏”轮沉没，油污溢出海面。

3.8 海洋大气

珠江口海域海洋大气污染物干沉降中检出铜、铅、锌、镉、砷。珠江口海域的海洋大气气溶胶中铜、铅、锌、硝酸盐的季节性差异表明 2 月和 10 月的平均浓度高于 5 月和 8 月。珠江口海域湿沉降中检出铜、铅、锌、镉、砷、硝酸盐和铵盐，月平均浓度无显著差异。全年降水 pH 值的变化范围为 4.92~7.18，pH 年均值为 5.20；酸雨频率较高，全年酸雨集中出现在 5 月。

3.9 海洋放射性

在运营的大亚湾、台山、阳江、防城港和昌江核电站附近海域进行海水、沉积物和生物体放射性监测表明，核电站附近海域海水中铀、总 β 、氚、锶 -90 和铯 -137 等放射性核素比活度均有检出；沉积物中铀 -238、钍 -232、镭 -226、钾 -40、铯 -137、总 β 放射性核素比活度均有检出；核电站附近海洋生物体内放射性核素比活度均有检出。上述海域的海水、沉积物和生物体中放射性核素水平处于我国南海海洋环境放射性本底范围之内。

南海区我国管辖海域海水中锶 -90、铯 -137、铯 -134、总铀、总 β 、钴 -58、钴 -60、镭 -226、锰 -54、锌 -65，以及沉积物中铯 -137、铯 -134、锶 -90、银 -110m、钴 -58、钴 -60、锰 -54、锌 -65、铀 -238、钍 -232、镭 -226、钾 -40、总 β 监测显示，海水、沉积物中各监测核素放射性比活度未见异常。对珠江口生态敏感区常见鱼类进行铯 -137、铯 -134、锶 -90、钴 -58、钴 -60、锰 -54、锌 -65、铀 -238、钍 -232、镭 -226、钾 -40、总 β 放射性监测，各核素比活度未见异常，处于我国南海海洋环境放射性本底水平范围之内。

海洋天然钚同位素放射性核素活度极低，绝大部分是核武器试验（包括大气层核试验、水下核试验、地下核试验）、核事故与核燃料后处理 / 处置排入海洋环境中。南海南沙海域（接近加里曼丹，水深 1 537 m）海洋沉积物监测表明，南沙海域海洋沉积物钚同位素（$^{239+240}$Pu）活度变化范围接近于南海大陆架北部，小于近岸的南海北部，大于离岸较远水深较深的南海盆地，随离岸距离与水深深度而变化，受颗粒沉积动力学过程影响，受南海暖流冬季沿大陆架向东北方向流动影响。南海南沙海域海洋沉积物钚 -240/ 钚 -239（^{240}Pu/^{239}Pu）原子比平均为 0.193 ± 0.025, 略大于全球大气层核试验沉降平均值 0.178 ± 0.019，小于太平洋核试验场（Pacific Proving Grounds, PPG）值 0.306~0.360，来源于大洋洋流携带和输送而沉积于南沙海域。

3.10 海洋垃圾

南海海洋垃圾来自沿岸海水浴场、滨海旅游渡假区、海水增养殖区、江河入海口、船舶与海上作业平台等。海洋垃圾难以降解，影响岸滩海洋环境与公众亲海体验，损害海洋生物栖息环境，减损海洋生物多样性。观测发现，海面中小块漂浮垃圾的平均密度 455 个 /km^2，平均质量约为 0.2 kg/ km^2；分类统计显示塑料类垃圾最多，占 85.7 %。大块和特大块漂浮垃圾的平均密度为 62 个 / km^2, 其中塑料类垃圾数量最多，占 37.1%。统计结果表明，87.8 % 的海面漂浮垃圾来自陆地。沿岸海滩垃圾的平均密度为 3368 个 / km^2，以聚苯乙烯泡沫占 46.7 %，其次为塑料类、木制品等垃圾，分别占 18.7 % 和 13.1 %；海滩垃圾的平均质量为 306 kg/ km^2，以水泥块等其他人造物的质量密度最大，约为 288 kg/km^2。统计结果显示，海滩垃圾中 91.3 % 来自陆地活动，8.7 % 来自海上活动。南海近岸海底垃圾平均密度为 1 555 个 / km^2，主要为塑料类垃圾，约占 89.7 %；平均质量约为 99.2 kg/ km^2，其中塑料类垃圾的质量密度最大，约为 91.3 kg/ km^2。统计结果显示，75.9 % 的海底垃圾来自陆地活动，24.1 % 来自海上活动。

4 生态退化

海洋生态系统是一个相互联系、相互影响、不可分割的整体，具有高效率的固碳能力与碳转移作用。海洋

生态系统的健康状况分为健康、亚健康和不健康三个级别：

健康：生态系统保持其自然属性。生物多样性及生态系统结构基本稳定，生态系统主要服务功能正常发挥。环境污染、人为破坏、资源的不合理开发等生态压力在生态系统的承载能力范围内。

亚健康：生态系统基本维持其自然属性。生物多样性及生态系统结构发生一定程度变化，但生态系统主要服务功能尚能发挥。环境污染、人为破坏、资源的不合理开发等生态压力超出生态系统的承载能力。

不健康：生态系统自然属性明显改变。生物多样性及生态系统结构发生较大程度变化，生态系统主要服务功能严重退化或丧失。环境污染、人为破坏、资源的不合理开发等生态压力超出生态系统的承载能力。

4.1 生物多样性

南海近岸海水中浮游动物和鱼卵、仔稚鱼密度偏低。例如，多年来珠江口浮游植物多样性指数年际变化幅度较大；浮游动物的数量和多样性指数略呈下降趋势；底栖生物的种类数维持稳定，但栖息密度和多样性指数略呈下降趋势。浮游动物的种类多样性指数呈缓慢下降的趋势。南海生态系统自然属性有所改变，叶绿素 a 及初级生产力变化幅度大。

4.2 红树林

红树林既是森林又是湿地，既有森林的“地球之肺”又有湿地的“地球之肾”功能。我国现有红树林约 22 000 余公顷，其中 90 % 分布在华南广东、广西和海南三省区滨海。红树林复杂的根系为海洋生物提供了理想的栖息环境和丰富的食物来源；红树林是候鸟的越冬场和迁徙中转站，也是各种海鸟的觅食栖息、生长繁殖的天堂；红树林具有防风消浪、促淤保滩、固岸护堤、净化海水和空气的功能；红树林是滨海蓝碳；红树林的工业、药用价值也很高。红树林营造是全国温室气体自愿减排交易市场（自愿碳市场）基础资产（另一为全国碳排放交易市场即强制碳市场）。

基于自然观察，广东、广西和海南三省区红树林群落处于次生演替阶段，天然林受破坏，人工林种植面积增加，但基本结构和固有功能退化，稳定性减弱，生物多样性下降，系统整体生产力降低。红树林植物疫情与红树林病虫害时有发生，害虫主要为广州小斑螟、三点广翅蜡蝉、柚木驼蛾、咖啡豹蠹蛾、吹绵蚧、双纹白草螟、胸斑星天牛和毛颚小卷蛾和蜡彩袋蛾等。红树林受外来入侵物种薇甘菊和互花米草的竞争、本地物种鱼藤和猫爪藤的攀缘覆盖，红树林长势衰退、落叶、枯萎。红树林林地面积、森林面积、森林覆盖率、森林蓄积量远未达到历史最高资源量，红树林质量和林相有待提高。

4.3 海草床

海草是根植在浅海的一类植物，具备根、茎、叶分化，会开花和结果。海草床是由水体、底质、海草和栖息其中的其它生物群落构成的海洋湿地生态系统，具有较高生物量和生产力。海草床生态功能表现在固着底质、稳定潮滩、滨海蓝碳（约占整个海洋生态系统每年固碳量的 15%）、为一些食草动物（儒艮、海龟等）提供食物、净化水体，其中最重要的是为众多鱼、虾、蟹、贝、水鸟等提供多样化的栖息地。

广西北海海草床生态系统呈亚健康状态，海南东海岸海草床生态系统优于广西北海。广西北海海草平均密度约 330 株 /m^2。与以前相比，广西北海海草盖度显著降低，海草床海草生物量、密度和底栖生物生物量均下降。海南东海岸海草平均密度约 987 株 /m^2，海草密度较前下降，但盖度维持稳定。

4.4 珊瑚礁

珊瑚是一种海洋腔肠动物，珊瑚礁由珊瑚新陈代谢产物堆积而成。珊瑚礁生态系统系生物多样性复杂和生产力极高的海洋生态系统，系“海洋中的热带雨林”。珊瑚礁提供了良好的栖息环境，引诱众多海洋生物前来觅食和繁殖。生态学家常把它与热带雨林相提并论，生物固碳巨大，珊瑚礁生态系统是生态系统进化所能达到的上限，于海洋环境和海洋生态系统的优化都具有重要的意义。

受气候变化与海上人文活动影响，我国南海珊瑚礁生态系统处于脆弱状态，珊瑚种群数量锐减，现阶段仍

受海洋工程建设、水质富营养化、不合理捕捞和废弃物排放的威胁。观察分析结果显示，造礁石珊瑚总平均覆盖率仅为 23.60 %，覆盖率处于较低水平。南海主要珊瑚礁分布区珊瑚礁均有一定的衰退趋势，各地活造礁石珊瑚盖度较前均有所减少，其中海南东海岸下降最为明显。西沙群岛活造礁石珊瑚平均盖度多年一直处于较低水平，鱼类密度较前显著降低。

三亚湾珊瑚礁生态系统调查结果表明，三亚湾造礁石珊瑚覆盖率介于 0.3 % ~ 60 %，平均为 24.9 %；近几十年来鹿回头珊瑚覆盖率呈显著的下降趋势，珊瑚群落结构发生了显著的改变，三亚湾珊瑚礁生态系统处在明显的退化状态；海洋工程引起的海水浊度增加和颗粒物大量沉积，是影响三亚湾造礁石珊瑚群落发育最主要的影响因素。白化 / 死亡珊瑚覆盖度 2 %，死亡率分别为 15.1 % 与 8.8 %，局部海域珊瑚出现白化现象。

5 环境与生态风险

南海近岸陆源污染（入海江河与入海排污口、海岸工程）、海洋水产养殖、海洋工程、船舶污染、大气沉降等导致环境与生态保护结构性、根源性、趋势性压力总体上未根本缓解，环境与生态安全形势依然严峻。沿海部分地区人口规模和社会经济发展水平超过海洋的自然环境与生态承载能力，对资源、环境、生态形成复合压力，导致资源供需矛盾突出、环境污染风险加剧、影响生态系统健康，全氟化合物、环境激素、抗生素、微塑料等新污染物问题逐渐显现。受到工业与生活污水排放的影响，海域水质污染，降低了海洋功能区水质达标率。由于海岸工程建设，导致自然岸线大量丧失，破坏了海岸带和近岸海域生境，影响区域海洋生态平衡。

近年来,海洋水产养殖发生了深刻变化,除传统模式外,新型的深海养殖网箱(水体自然交换型,直径为 30 m 的)、全潜悬浮定深高抗台养殖平台、半潜衍架式智能养殖平台（抗风 12 级，抵御 6 m 以上浪高和 1.2 m/s 以上海流流速）、深远海养殖工船（水体自然交换型，船长 155.8 m，宽 44 m，养殖吃水 18 m，养殖水体 8 万 m^3，年养殖产能 3 000 ~ 5 000 t）、风渔一体化养殖平台等正在兴起，以上养殖除生产鱼虾蟹等水产品外，还留下传统污染物和新污染物的环境和生态风险。过度海水养殖 / 超环境容量养殖与过度捕捞一样，增加了对海洋渔业资源和生产力的消耗，导致海域的生态系统自然属性和自然海洋生物资源衰退。

实现国际海事组织设定的 2050 年航运净零碳排放，核能成为航运新选择。2023 年 12 月 5 日 ~12 月 8 日中国国际海事会展上，中国船舶集团江南造船厂 / 江南重工发布全球最大核动力推进集装箱船（24 000 TEU）的概念设计，获挪威船级社（DNV）原则性认可证书。该核动力来自钍基熔盐堆，一回路、二回路为熔盐，加热三回路二氧化碳气体（末端温度 650℃），推动燃气轮机（无燃烧室）发电，这标志着我国系统掌握了钍基熔盐堆设计、制造、建设、调试、运维技术，向绿色低碳转型，降低风险、减少能源消耗和减少排放同时获得最大运营效率。只要民用船舶核动力发展，风险和挑战必然会普遍存在，核技术安全风险和挑战，用核技术手段来解决，航运业核能利用安全问题，应建立健全相关法律法规，推动航运业在合适尺度和明确标准下发展核能利用。船用钍基熔盐堆冷却回路，可源源不断地向海洋获得冷却水，若用海水冷却二氧化碳气体（二氧化碳再循环），由海水带走余热 / 废热，排入海洋环境，可能产生海洋热污染。

域外国家核动力舰船潜艇频繁进入出入南海，引发海洋核安全隐患。2021 年 10 月 2 日下午，美国海军康涅狄格核潜艇在南海潜航时与水下不明物体碰撞，舰体受损，水兵“中度”受伤，上浮返航，是否发生了核事故泄漏，至今仍是个迷。

随着人工智能、物联网技术广泛推进，数据中心算力负荷与日俱增。数据中心存储运算过程中排放大量废热，需耗费大量水或电力制冷降温。目前典型的 CPU 芯片单位体积功率达 1 亿 w/m^3（相当于 100 w/cm^3），而太阳核心的单位体积功率仅 300 w/m^3。美国 Open AI 公司历时三个月训练一次 Chat GPT-4 时，耗费电 2 400 万 kWh，这些电能最终几乎全部转化为热量，可将 20 万 m^3 冰水（约 100 个奥运会标准游泳池的水量）加热到沸腾。2015 年，美国微软公司将 864 台服务器密闭部署在苏格兰北部 50 m 深海床，利用海水自然冷却，该

非商用数据中心能效（PUE）值仅有 1.07。2023 年 3 月，布放于海南陵水清水湾水深 30 m 的全球首个商用海底数据中心正式投入运营（存储数据、提供智能算力服务），水下数据舱由 2 个直径 3.6 m，长 16 m 的罐体组成，重达 1 300 t，如同一个超级“电热水器”，向海洋环境排放废热，导致海洋热污染。向海洋排放废热是一种“隐含的碳排放”。海洋热污染 / 海洋热浪影响海洋生物种的分布、迁徙 / 移动和生存。我国人工智能企业数量已超过 4 500 家，智能芯片、通用大模型、大模型算法加速涌现，数字化车间和智能工厂加速建设，我国数字经济规模已达 50.2 万亿元。平衡人工智能技术的发展与环境和生态的可持续性，是人类未来几年的重要议题之一。技术进步、能源消耗、环境污染、气候变化和生态退化之间的复杂关系，工业化、城市化、现代化与海洋环境和海洋生态的关系，从来没有这么急迫的出现在人类社会面前。

赤潮多发于广东柘林湾、广东深圳南澳、广西涠洲岛和海南陵水新村。华南沿海入海排污导致大量营养盐无机氮和磷酸盐，是导致赤潮、绿潮（浒苔）频繁暴发的关键因子。赤潮暴发期间赤潮生物种成海洋优势种，其它海洋生物种类和数量急剧下降，赤潮生物排放毒素，直接威胁海产食品安全，赤潮生物毒害海洋水产养殖，损害海洋渔业，影响海洋生态安全，阻碍海洋经济发展。绿潮（浒苔）多发于广西钦州湾，对核电站冷却水取水安全形成潜在危害。

6 对策 / 建议

贯彻落实《中华人民共和国海洋环境保护法》（2023 年 10 月 24 日修正，2024 年 1 月 1 日实施），发挥各级政府涉海部门主导作用，陆海统筹、江海 / 河海兼顾、上下联动、协同共治。完善生态与环境分区管控，落实依法治污、科学治污、精准治污，夯实高质量发展的环境与生态基础，对陆源污染源、海基污染源全过程监管，有机结合入海排污准入规则、环境影响评价和排污许可制度，区分工业废水排海、养殖废水排海和生活污水排海等排污类型，分类管理，促进排污与海水水质、海洋沉积物、海洋生物和渔业水质质量标准体系相配套。

减少海洋污染不仅要加强政府主管部门监管，还应发动社会公众积极参与，全面推进环境信息依法披露，保障社会公众知情权，树立生态道德观，拓宽公众对海洋污染的监督途径，积极发动工矿企业、高校、非政府组织和公民参与海洋污染治理，促进社会各阶层发表利益诉求，发挥不同专业与不同视角的长处，使政策制订更科学、合理、经济和安全。

参考文献

[1] 2000-2017 年，《中国海洋环境状况公报》
[2] 2000 年 -2017 年，《南海区海洋环境状况公报》
[3] 中国科学院生态环境研究中心 . 环境化学 [J]. 2023.3.42(03).
[4] 中国科学院生态环境研究中心 . 环境化学 [J]. 2023.12.42（12）.
[5] 人才 . 科技日报 , 2024.4.8（5）.
[6] 晚会·潮人新知 . 羊城晚报 , 2024.4.19（A10）
[7] 要闻 . 科技日报 , 2024.4.19（2）.
[8] 自然资源部 .2023 年全国海水利用报告. 2024.6.

作者简介：
蒋跃进，国家海洋局南海环境监测中心原高级工程师 ,13316037009

船舶货物运输中大件物流风险防范探讨

崔盛建

（深圳远洋运输股份有限公司，广东深圳　518031）

摘 要：普通散装船舶货物运输的主要大件对象是各种设备、风车塔及重量较大的卷钢货物等，在此运输过程中，大件货物的物流风险防范工作非常重要，属于综合性任务。为了保证船舶货物运输作业安全，有效杜绝大件物流风险问题发生。本文中首先解析了船舶货物运输中大件物流的基本概念，分析其中的风险问题，探讨大件物流风险的有效防范举措。

关键词：大件物流；风险防范举措；船舶货物运输；风险问题

船舶货物运输为保障货物安全，做好运输风险防范工作是非常必要的，它不但能够提升运输效率，也能够促进环境可持续向前发展，为行业未来良性发展、提质增效创造条件。为此，有必要首先讨论船舶货物运输中的大件物流相关概念。

1　船舶货物运输的大件物流基本概念

在船舶货物运输过程中，大物件多指代运输管理尺寸相对庞大、重量较重的大型货物，比如大型机械设备、风车塔、卷材等等。这些大物件无法采用常规运输方式进行运输，所以采用船舶运输更为合理，发货人通过货代揽货联系承运货轮承运交给买家，运输过程包括了装载、运输和卸载。考虑到所运输物料尺寸的特殊性，因此预先做好各项规划与准备工作特别重要，这其中也包括了大件物流的运输风险问题[1]。

2　船舶货物运输的大件物流风险问题

船舶货物运输工作中所面临的大件物流风险问题较多，下文主要分析五点：

1）大件货物装卸风险

大件货物首先货物本身较重，尺寸不一，如果船舶在货物运输之前缺乏科学合理的装卸计划，可能导致装卸过程中出现各种混乱以及延误问题。在这一过程中，如果配载不合理及船舶装货过程中使用劣质不合格的垫舱物料及绑扎钢丝、花篮螺丝等绑扎材料，也会导致货物被损坏风险发生，例如货物倾倒、坍塌，造成货物变形甚至被损坏。另外，大件货物在装卸过程中需要配合必要的安全装卸措施，如果缺乏安全装卸措施，也会导致船舶事故发生[2]。

2）运输中货物移动及灭失风险

在船舶运输大件货物过程中也会面临货物移动及灭失风险，这是由于船舶在大洋中横纵摇颠簸所造成，如绑扎不善，大件货物很可能会发生偏移或者脱离固定位置，等等问题，直接导致货物与船舶发生碰撞、相互挤压、最后被损坏或者变形，严重影响大件货物的本体完整性以及运输稳定性。另外，大件货物的分布与固定状

态变化也会导致船舶自身出现重心偏移情况，直接表现就是导致船舶稳性下降，增大倾侧力矩，倾覆风险性大幅度增加。

3）气象不可预知性风险

船舶在运输大件货物过程中会受到不可预知气候因素影响，特别是在海洋上更是如此，大风浪天气、能见度不良现象是时有发生的，此种天气会增加船舶在海洋上航行的危险性。例如，大风浪造成船舶颠簸，货物也会因此而剧烈震动，相互摩擦，绑扎失效最终会导致损坏。所以说，这些不稳定的环境因素导致船舶航行困难，船期也会受到严重影响，很多时候船舶为了减少受风浪涌浪的影响需要改变航线绕行气候恶劣区域以及大风浪区域，这些都会增加船舶运输大件货物的运输成本。

4）环境影响与法律合规性风险

大件物流运输涉及诸多大型货物设备，例如各种化学物质能源，一旦发生泄漏对于海洋河流所造成的污染损坏不可逆转，严重影响水生态系统平衡。就这一点来讲，不同大洲、不同国家地区对于船舶运输大件物流所提出的法律规范不尽相同，他们都充分考虑到大件设备在物流过程中的大规模、大重量等特殊属性，其中所涉猎的法律合规要求比较复杂。如果物流运输方不能遵守法律合规要求，就会出现延误、罚款等法律风险。从物理角度来讲，大件物流运输以及装卸过程都会产生大量噪声和振动情况，其对海洋生物生态系统所造成的干扰损害也很严重。尤其是在某些敏感海洋保护区域中，不能遵守相关法律要求所造成的噪声振动情况也会引发法律合规性风险，必须加以遏制[3]。

5）突发事件风险

所谓突发事件风险主要是自然灾害所造成的，上文已经提到，大风浪天气所造成的风浪会颠覆船舶，导致船舶受损或者船期延误，货物也会因此而锈蚀、损坏灭失，特别对甲板货物运输影响更大。除此之外，船舶在大件物流运输过程中特别对贵重货物很可能遭遇抢劫风险，这一风险相比于气候变化同样不可预知。同样，船舶大舱如装运机械设备，设备本身带有油类，如果管理不善也会造成泄漏，发生火灾或者爆炸等危险事故。如此看来，船舶运输大件物流过程中所经历的突发事件风险是比较复杂的，必须加以注意[4]。

3 船舶货物运输的大件物流风险问题的防范举措

船舶在运输大件货物过程中遭遇各种风险问题是在所难免的，为此运输方必须做到防患未然，同时在处理风险问题时从容冷静，有效应对风险，下文将结合多点来谈：

1）科学严谨包装绑扎衬垫大件货物

大件货物本身在属性特征表现上具有特殊性，因此在上船包装过程中选择适当的包装材料很有必要，尤其是甲板货物，要保证包装材料质量过硬，全方位包装，可以较好抵御甲板上浪及货仓水密不佳货仓进水，海水对货物的腐蚀，同时选择合格的不锈钢绑扎材料，同时合理绑扎，对绑扎钢丝横向纵向走向要合理，能够有效抵御船舶横纵摇对货物的冲击，再一点，衬垫垫木等厚度要足够，木质质量要过关，遵循国际标准规范与行业标准，防止因衬垫质量问题对货物本身造成变形甚至货损等，从而为大件货物运输提供充分的前期保障。

2）科学规划船舶航线

首先，运输大件货物的船舶必须考虑安全稳定性，确保船舶能够在相对恶劣的气候条件下正常航行，航行基本平稳，没有过大过频繁的横纵摇；其次，大件货物在船舶上的装卸工艺特殊，对于局部强度以及货仓空间的要求较高，例如船舶必须为大件货物提供充足的支撑以及固定设备，同时保证船舶局部强度与仓位布局合理。做好上述准备工作后，就可以开始科学规划船舶航线，规划过程中必须充分考虑船舶航行所处的海区以及天气条件，这两项指标都会导致船舶的航线长船期发生变化。船舶要尽量避开恶劣海况以及风暴多发区域，最大限

度保证航行安全。在科学规划船舶航线过程中，需要科学评估航线的时效性、可行性以及安全性，尽可能选择相对安全的航线。为此，船舶在执行运输任务时必须每日接收气象海况信息，岸基也要加强监控，随时考虑调整航线计划，以便于做到应对潜在风险防患未然。在航线规划过程中，也需要与各个目的港码头进行沟通联系，清晰了解不同停靠码头的大件货物装卸能力。考虑到大件货物在物流运输过程中要求特殊，所以发货人提前与收货人做好沟通，保证运输过程中安全稳定，尽量减少意外风险问题发生[5]。

3）定期检查维护船舶与大件设备

某些散装船舶需要在海上航行时间较长，所以针对船舶本体以及船舶上大件设备的定期检查维护是很有必要的，要确保设备与船舶都能正常稳定运行。比如：要检查大件设备的磨损程度与润滑情况，对设备电气系统的安全可靠性进行检查，等等。比如说：要更换船舶中磨损严重的绑扎材料，有效修复电气系统故障问题，采用润滑油润滑船舶设备与大件设备。再一点，根据大件货物的运输环境特点变化进行运输计划调整非常重要，如果出现了恶劣天气海况，则需要考虑到改变航线，并且在改变航线前做好对货物状态的监控工作[7]。

4）设计提出紧急应急预案

要在大件设备运输之前就设计提出紧急应急预案，预案中就包括了各种处理程序以及责任分工内容，同时也要做好各项提前培训工作保证所有船员都能熟悉了解预案内容，不断强化他们的紧急应急意识。通常来讲，运输大件设备的船舶都会标配一套安全设备，而且安全设备都会做好定期维护与更新，在可用性与有效性方面表现出色。在船舶上，有效配备无线电设备是常规操作，同时要配合建立紧急联系人名单，如此就能获得必要的支持指导。在针对各种应急情况时，需要相应制定处理措施程序，对其中的某些应对方案与操作步骤进行调整，同时定期组织救生消防演习演练活动。为此，船舶上所有船员必须拥有过硬的自救以及互救能力，当紧急情况发生时，确保在事后总结与评估工作，找出问题并提出相应改进办法。

5）关注天气条件变化

船舶在运输大件物流工作中，必须时刻关注天气条件变化，要做到第一时间获取可靠准确的天气预报信息，保证通过天气预报信息来做好合理规划，了解船舶路线以及航行时间变化。要尽量避免大风浪等极端天气条件影响，有效应对由于天气条件发生变化所产生的各种极端风险问题。为此，船舶本身要与气导岸基等建立紧密联系，有效评估天气状况变化。如果在面临恶劣天气变化时，则需要严格遵守国际海事组织的官方建议，与港口码头建立联系，形成相互指示关系。当然，在船舶运输航行过程中，对于天气状况的有效持续监测很重要，随时随地调整航向航速，确保有效适应随时变化的天气条件[8]。

再者，针对船舶上相关人员的定期培训工作必不可少，它也要遵循国际安全标准与海事组织所提出的安全运输指南规范及公司安全管理体系，通过提前培训增强工作人员的大件物流运输安全意识，鼓励大家提出各种安全建议，及时发现并解决安全隐患问题。所以说，定期组织开展的安全培训以及演练活动是船舶运输大件物流的必要工作。而货主方面也需要选择信誉度高、运输技术能力合格的航运公司，这是考虑到目前市面上散装运输船舶所提供的服务以及能力水平参差不齐，所以要确保所选择船舶运输公司拥有良好的安全运输历史记录以及丰富的大件物流运输技术经验[9]。

4 总 结

船舶货物运输过程中，针对大件设备的物流运输必然遭遇各种风险问题，其中某些风险问题不可预测。所以船舶运输方只能做到防患未然，积极开展各项安全管理工作，有效更新升级物流运输设备，正确规划航线并随时做出动态调整，保证大件物流运输工作任务安全稳定执行。

参考文献

[1] 李涛 . 船舶货物运输中大件物流风险防范研究 [J]. 船舶物资与市场 ,2023,31(10):7-9.
[2] 郑鹏 . 易流态化货物的物理特性及船舶安全运输研究 [J]. 船舶物资与市场 ,2023,31(8):4-6.
[3] 姜金辉 , 金允龙 . 矿砂运输船货物液化对船舶稳性的影响及对策 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报 ,2022,45(5):1-8.
[4] 天津昱惠工程技术信息咨询有限责任公司 . 水路运输超大货物滚装滚卸时船舶浮力的快速平衡方法 :CN202210506162.7[P].2022-06-21.
[5] 李荣遵 , 荣丽霞 . 大件物流运输方案关键环节分析 [J]. 运输经理世界 ,2023(25):70-72.
[6] 易钶 .《大件运输专用车辆》实施在即大件物流行业发展迎来新机遇 [J]. 专用汽车 ,2021(9):24-26.
[7] 江琪 , 陈美燕 . 大件及重货品类跨境物流服务质量提升研究——以中国跨境电商卖家为视角 [J]. 保定学院学报 ,2022,35(6):11-17.
[8] 肖辽亮 . 物流机车大件货物动态监测系统研究 [J]. 电脑知识与技术 ,2021,17(31):157-159.
[9] 梅中明 , 王应强 , 李大飞 , 等 . 船舶重大件货物绑扎方案研究分析 [J]. 广东造船 ,2021,40(1):40-43.

作者简介：

崔盛建，中远海运散运深圳远洋运输股份有限公司船舶管理二部海务管理室海务主管，通信地址：广东省深圳市福田区深南中路 3027 号嘉汇新城汇商中心 ，邮编：518033，（E-mail）cui.shengjian@coscoshipping.com,0755-28599124,13678884468

浅议企业安全文化中“人的本质安全”作用

李　琳　黄天翔

（中远海运散货运输有限公司，广东广州　511455）

摘 要：安全是发展的前提，发展是安全的保障。必须时刻坚持“人”在安全生产和安全文化建设中的主体作用，大力激发“人”在安全生产中的潜能，充分发挥“人”在安全生产中的作用，以及人在安全文化中的引领作用，坚持以人为本，坚持文化聚力，始终坚守底线、落实责任、深化整改，切实维护好人民群众生命和财产安全，为社会进步、国家发展和民族复兴保驾护航。

关键词：人；安全生产；安全文化；本质安全；引领

“生命重于泰山”是习近平新时代中国特色社会主义思想的重要价值指向。安全工作绝非一蹴而就的一日之功，须持之以恒、一以贯之。党的十八大以来，习近平总书记站在党和国家发展全局的战略高度，围绕安全发展理念、安全生产责任、安全隐患排查整治、安全生产治理体系和治理能力、安全生产常态长效等，对安全生产发表了一系列重要讲话，作出了一系列重要指示批示，从治标与治本相结合、当前与长远相统筹的宽广视角，深刻揭示了现阶段安全生产的规律特点，系统回答了如何认识安全生产、如何做好安全生产工作的重大理论和实践问题。这些重要论述重要指示，是抓好安全生产的根本遵循和行动指南。这其中，“人”的因素尤为关键。人是安全生产的主体，安全生产本身是对人的生命权益的维护。要从深入践行新发展理念和安全发展理念的高度进一步提升政治站位，深刻认识“人”在安全生产中的重要性，把“人”放在安全生产的突出位置，充分发挥“人”在安全文化的主导、建设和引领作用，落实“以人为本”“文化聚力”的管理合力和效应，推动安全生产形势持续向好。

1　人本为先，安全生产要坚持“人”的生命至上

生命至上，安全第一。“人命关天，发展决不能以牺牲人的生命为代价。这必须作为一条不可逾越的红线。”安全是发展的前提，发展是安全的保障。安全生产事关人民福祉，事关经济社会发展大局。以人为本，就是要始终把保护人民生命安全放在首位，始终坚持安全为了人民，从源头上防范化解重大安全风险。

如果没有“以人为本”的思想，见物不见人，必定是忽视人的生命；如果没有“安全发展”的理念，企业高质量发展就落不到实处等等。所以，作为企业管理者应创新思维、更新观念，一方面为全体员工创造良好的安全氛围，建立全体员工能认同、理解、接受、执行的先进安全文化理念。另一方面带头践行安全理念，搞好安全组织管理工作。这一切的出发点和落脚点都是源自“人”这个核心因素，必须从管人的人抓起，必须了解人的思想、心理和行为特征，尤其在实现本质化安全的形势下，更需要塑造本质型安全人。为此，我们要坚持用先进的安全文化理念、理论来教育、引导、培训、培养更多的有理性、有较强安全意识、有良好心理素质、有自觉规范行为的职工，才能落实“以人为本，生命至上”的理念。

2　防患未然，安全生产要落实“人”的风险防范

积祸于忽微，防祸于未萌。海恩法则就揭示了这么一条规律：每一起严重事故的背后，必然有 29 起轻微事故、300 起未遂先兆以及 1000 起事故隐患。尽管许多重特大事故具有突发性、意外性、复杂性的特点，看似防不胜防、难以避免，实则潜藏于日常被忽视的各类隐患之内、萌发在“拖、缓、放”等不负责任的细节之中。以往的经验教训表明，思想上的麻痹大意和心理上的侥幸懈怠，不仅越过了安全生产红线，也触碰了法律制度底线，一次次的“不经意”与“不留心”，成为安全生产的最大“杀手”。

隐患就是事故，预防重于泰山。只有安全上“万无一失”，才能避免“一失万无”。安全隐患通常源于四个因素：人的不安全行为、物的不安全状态、环境的原因和管理的缺失，而人的不安全行为占了很大的比例。只有我们每一个人把预防工作做好，排查关口守好，就是打造安全生产的防火墙。面对任何隐患因素，都要做到见微知著，不能掉以轻心。只有树牢“隐患就是事故”的理念，从思想到行动，不断补齐安全生产短板，不断健全安全防范机制，才能将安全风险降到最低。

居安思危，思则有备。遏制安全事故在未成之初、夯实安全根基在平常之时，重中之重在于行动落实。“人”既是安全法律法规的制定者，也是执行和实施者；既是安全管理的主导控制者，也是被管理对象。因此，要实现“从源头上防范化解重大安全风险，真正把问题解决在萌芽之时、成灾之前”，就务必要牢牢抓住“人”这个因素。“安全为民、安全靠民”，这是杜绝事故隐患、实现“防患于未然”的关键所在。

3　建章立制，安全生产要筑牢“人”的责任防线

道路千万条，安全第一条。安全千万关，责任第一关。实现安全生产，务必要牢牢守住“责任”这个关卡。实践证明，企业主要负责人对安全生产重视和不重视、认真抓和不认真抓，其结果迥然不同。有些企业安全责任没有压紧压实，特别是第一责任人法治意识淡薄、存在侥幸心理、责任落实不到位，是企业违法违规行为屡禁不止、事故易发多发的重要原因之一。比如，2021 年发生的青兰高速甘肃平凉段“7·26”重大道路交通事故，事后查明事故车辆所属企业安全生产管理机构形同虚设，主要负责人长期不在企业，这足以说明主要负责人安全生产责任的重要性。从调查结果看，类似的很多安全事故的发生绝非偶然，不仅暴露出企业生产中潜在的问题，也暴露出相关部门工作中存在的短板。个别企业安全生产主体责任虚化、弱化，没有将安全发展理念真正落实到位，企业第一责任人急功近利，重经济效益、轻安全生产，重眼前利益、轻长远发展，干事不实、履责不实，甚至违法违规、冒险蛮干。惨痛教训警示我们，责重如山，须臾不可懈怠，再怎么强调亦不为过。

新的《安全生产法》对落实安全主体责任、实行全员安全责任制、“三管三必须”等提出更加严格的要求。完善“党政同责、一岗双责、齐抓共管、失职追责”责任体系，制定安全生产职责规定，健全各级负责人、各部门、各岗位安全生产责任制，明确安全生产权力和责任清单全面压实企业安全责任，强化全员安全责任与风险防控意识，推进安全管理有序有效有力衔接，强化安全管理责任落实，严格生产经营全过程安全责任追溯制度。这就要求，各行业和各业务的具体负责人，都要把“安全”置于生产之前、发展之上，要把“安全”当作头等大事来抓。

近年来，从《安全生产法》的修订实施，到《危险化学品安全法》《矿山安全法》《煤矿安全条例》等配套法律规章的陆续出台，我国安全生产法律法规体系不断完善，底线思维不断夯实，监管体制不断健全，“风险即危险”“隐患即事故”的安全意识不断强化，各地区、各行业安全生产改革不断推进。“遵守安全生产法当好第一责任人”是全国第 21 个“安全生产月”的主题。对安全责任的承担和履行，要有法治的“阀门”作前提，更要有人的“执行”作保障。全员要确保安全法律法规、制度体系落实到位，横向到边、纵向到底，通过安全生产责任落实机制和压力传导机制，推动安全生产系统治理、终端治理和常态治理，真正将“发展要安全”的

要求落到实处。

4 文化引领，安全生产要发挥“人”的主观能动

安全文化具有导向、凝聚、辐射和同化等功能，能够通过创造良好的人文氛围和协调的人机环境，对人的观念、意识、态度、行为等产生从有形到无形的影响，从而对人的不安全行为产生控制作用，达到减少人为事故的效果。安全文化的核心在于一个“安”字，其基本内涵就是：安全、安定、安心。要结合企业经营需要，积极营造安全文化氛围，进而实现：构建“安全”屏障，筑牢企业发展基石；创造“安定”环境，增强企业抗风险能力；实施“安心”工程，建设员工精神家园。

首先，要树立正确的安全生产理念，唤起“人”的安全意识，调动“人”参与安全生产的主动性，充分认识安全生产的重要性，从“要我安全”转变为“我要安全”，从“被动参与”转变为“主动实干”，发挥积极的主导作用，构筑安全生产合力。其次，要发挥安全文化引领作用，要主安全文化“内外于心、外化于行、固化于制”，通过不断总结提炼安全理念等特色安全文化，建立安全管理长效机制，打造“安全生产人人关心、安全事故人人防范”的良好局面，通过安全生产风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制，把安全风险管控挺在隐患前面，把隐患排查治理挺在事故前面，实现安全管理关口前移、重心下移，强化安全管理的基础链条。再次，要明确安全生产不是某个部门、某个地方的事，而是全领域、全社会的事。要发挥安全文化中以人为本的力量，“人”的力量是伟大的，安全生产之伟力存在于民众之中，要落实“全员关心、全员参与、全员落实”的要求，通过全员努力，从而使安全隐患无处藏身、令违法违规无处遁形，把事故消灭在萌芽状态、把风险控制在可控范围、把安全生产向纵深推进。

进入新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局，党和人民对安全生产工作提出了更高标准和更高要求。面对新形势与新任务，要高度重视和积极发挥安全文化中“人的本质安全”作用，做到“守有责、护有方”，大力激发“人”在安全生产中的潜能，充分发挥“人”在安全生产中的作用，以最坚决的态度坚守底线，以最严格的要求落实责任，以最严厉的手段深化整改，以最有效的措施保障执行，切实维护好人民群众生命和财产安全，为企业安全稳定和高质量发展保驾护航。

参考文献

[1] 习近平总书记关于安全生产的一系列重要论述

[2] 《中华人民共和国安全生产法》（2021 年修订版）

作者简介：

李琳，中远海运散货运输有限公司高级工程师，通信地址：广州市南沙区凯翔路 1 号，邮编：511455（E-mail），li.lin7@coscoshipping.com,020-84108632,13922350966

黄天翔，中远海运散货运输有限公司高级工程师、注册安全工程师，通信地址：广州市南沙区凯翔路 1 号，邮编：511455，（E-mail）huang.tianxiang@coscoshipping.com，020-84108481，18588606909

强化船舶应急管理 筑牢船员安全防线

汤常明

（深圳远洋运输股份有限公司，广东深圳 518031）

摘 要：安全生产事关民生福祉，事关经济社会发展大局。党和国家高度重视安全生产工作，习近平总书记在多种场合作出一系列关于安全生产的重要论述，统筹强调发展和安全。2023 年 6 月是第 22 个全国“安全生产月”，主题是“人人讲安全、个个会应急。

关键词：船舶；应急；船员；安全

作为世界上最大的航运企业，中国远洋海运集团高度重视安全生产工作，特别强调船舶应急演习管理，平时加强应急演练，提高全员安全意识，筑牢个人安全防线。结合公司管理实际，我们从以下几个方面做好安全管理工作。

1 推进安全管理体系标准化建设，提升隐患排查治理能力

影响船舶安全航行的因素很多，我们要从事实求是的态度和科学的思维方法出发，立足于隐患排查治理，克服错误行为，通过安全管理体系标准化建设来保证船舶航行安全。为了加强对公司、船舶的安全与防污染管理，促进航运业整体素质与管理水平的不断提高，公司努力推进安全管理标注化建设，不断提升隐患排查治理能力，确保船舶、船员能够熟悉公司的要求，保证船舶的安全和效益，驾驶人员首先必须具有正确的工作态度、高度的责任心，了解和掌握当时通航相关的信息，采取合理的措施与行动避免船舶发生事故。同时强调船舶间沟通在船舶安全航行的重要性，突破设备和外界条件的局限性，注重相互间的交流沟通，避免紧迫局面产生。利用团队的力量积极配合和协调，对安全航行具有非常积极的意义。

2 每航次开展安全自查，确保船舶适航、船员适任、货舱适货

船舶在接到航次命令后，应根据所到达的港口国 PSC/FSC 检查、RIGHTSHIP 等其它国际组织的检查、船级社的检验、集团督导组等检查的特点，依据国际公约、公司相应的指导和要求进行全面的自查和准备。船舶的日常维护过程中，船长应监督、检查轮机长、大副组织安排的船舶船体结构和设备的维修保养工作，督导轮机长和大副组织船员进行国际公约、法律法规、操作技能和公司管理体系的培训。轮机长和大副应按照《年度维修保养计划》的安排和说明书要求及船体和设备的实际情况对船舶实施有效的检查和维修保养，使船舶符合国际公约要求。

船舶在抵港前 7 天（两港之间航程不足 7 天的，上一港检查结果依然有效），根据公司相关规定及要求，按照各职务分工进行全面自查，并结合近期 PSC 检查缺陷汇总内容对照进行检查，在抵港前 3 天将检查结果报机务总管。前往美国港口的香港籍船舶，抵达美国第一个港口前，还须按照《香港籍船舶 PSC 检查表》进行自查，及时将自查结果以及香港海事处要求的船舶总体状况的照片报船管部，以便向船旗国主管机关报告。

挂靠其他美国港口之前，船员应再次检查 / 测试常见滞留缺陷关键项目。前往澳大利亚港口的香港籍船舶，还须按照《香港籍船舶 PSC 检查表》进行自查，及时将自查结果报公司，以便向船旗国主管机关报告。前往美国和澳大利亚港口的巴拿马籍船舶，还须按照《巴拿马籍船舶抵港前自查表》进行自查，并按巴拿马主管机关 MMC-393 号通告的要求，抵达美国港口 5 天前，将自查结果报船管部机务总管，以便向巴拿马主管机关报告。

如潜在的问题或机器设备故障在抵港前无法解决，在尽力通过采用恰当的纠正措施或进行临时性修理的同时，船长应及时通知港口主管机关、船旗国和船级社，以争取避免滞留。以上情况应如实地记录到《航海日志》。如潜在的问题或机器设备故障在抵港前无法解决，在尽力通过采用恰当的纠正措施或进行临时性修理的同时，船长应及时通知港口主管机关、船旗国和船级社，以争取避免滞留。以上情况应如实地记录到《航海日志》，船长应备妥船舶证书、船员证书和产品检验证书等。

3 加强船员培训，提高船员业务能力和责任意识

要想让船员满足《STCW》公约的相关要求，我们需要脚踏实地做好船员培训，提高船员业务能力和责任意识。船员工作责任心及工作态度直接决定船舶的航行安全，因此船长要强化驾驶员的工作责任心及工作态度。同时要强化驾驶员不能有麻痹大意、盲目冒进、好胜逞能的人为因素。因为这些人为因素而造成的碰撞事故举不胜举，像前几年有两船的驾驶值班人员因为在高频聊天竟然聊到两船有碰撞危险产生的时候才停止，随后又采取了不协调的避让行动，最终造成两船碰撞的恶性事故。值班水手在航行期间使用自动舵时，是协助瞭望人员，而不是无关人员，应该像驾驶员一样保持正规瞭望。但是现在有个别值班水手在没操舵时就觉得不管自己的事了，放松了警惕，甚至做些无关航行的事，作为当班驾驶员应该明确指出他的问题，并叫他改正。特别是在航道航行期间，一名值班水手在操舵时，另外一名值班水手就离开驾驶台，这些都是严重影响航行安全的因素。当然，有时在航道走的时间很长，副班水手工作强度确实也很累，这我们也能理解，但是安全我们也不能放松。因此，在强化值班水手、舵工的操舵本领外，还有强化他们的工作责任心及工作态度。

4 强化应急演习管理，做到“人人讲安全，个个会应急”

船长要经常组织船舶进行的各种应急培训、应急演习，如在航道里或者在海上时，舵机失灵、主机故障、船舶失电、突遇浓雾时驾驶台班组的处理程序，强化驾驶台班组的应急能力及与机舱沟通能力。船长必须严格遵守和执行《STCW 公约》的第Ⅷ章中关于值班和值班标准的规定和我国交通运输部 2020 年第 14 号令颁布的《中华人民共和国海船船员值班规则》中的相关规定，随时保证船舶有效、正规的值班标准，才能确保船舶的安全生产。船长在考虑船舶当时环境和条件下，应确保其值班安排足以保持安全值班。必须制定和实施值班人员的工作和休息时间，使得当值人员的工作效率不致因疲劳而削弱。当船长发现当值人员因为疲劳而不能胜任驾驶台值班工作时，果断安排替代人员来值班，安排疲劳当值人员去休息。事后安排替代人员进行补休。

5 加强船舶各种情况下的监控

公司安装“CCTV 天鹰系统”是船舶防碰撞的重要手段，目的是促使驾驶台值班人员养成遵守驾驶台纪律的良好习惯，严格地按照驾驶台规则、避碰规则、STCW 规则等值班规则履行值班职责，加强值班期间的责任心，尤其是提高瞭望效果，及早发现来船并采取适当有效的避让措施，减少紧迫局面、避免紧迫危险、杜绝碰撞事故。船长作为“CCTV 天鹰系统”的监控责任人，应不定期地实施抽查监控，发现当值人员在值班期间玩忽职守，应严肃处理并上报公司。驾驶台班组人员之间有效配合表现在几个层面，即船长、引航员、驾驶员、舵工之间各尽其责；船长、驾驶员对引航员有效监督；船长、引航员、驾驶员对舵工有效监督；船长、引航员、驾驶员、舵工对船舶有效监控。一个有效的驾驶台班组应包括：（1）意识到减少一个人所造成的错误而导致

灾难局面的风险和应对措施；（2）确保保持正规了望、使用安全航速和运用良好船艺；（3）使用多种定位手段和适合当时环境的最有效、最可靠的定位手段；（4）清楚各助航仪器的缺陷和故障并正确使用；（5）利用航行计划并在沿岸航行时利用助航系统连续的船位监控和检测；（6）将引水员作为驾驶台班组强有力的成员。船舶在进出航道和港口前，应充分收集港口资料，认真研究每一航段的航行注意事项，将重点关注点在航行计划和海图上标出。同时，进出港前船长应组织驾驶员一起研究进出港操作的注意事项，并将自己的操作意图和方案告知驾驶员，明确驾驶员需要监控的事项。驾驶台班组应团结协作，相互提醒，有任何疑问应及时通报。船长在进出港时应调整好心态，在复杂航区或是长江、珠江河道或锚地等水域，应特别关注海图水深，充分意识到风流压对船舶操纵的影响，操纵上应留有余地，严禁近距离横越他船船首。特殊航段要切实执行公司有关“车让为主，舵让为辅”的规定。

通过以上做法，公司将发挥机海务的核心枢纽作用，以此来保证船舶航行安全。严格要求全体船员遵守规章操作规程，强化他们“在岗一分钟，负责 60 秒”的工作精神，从而切断可能形成的失误链，将一切事故、隐患消灭在萌芽，从而达到船安、人安、货安。

作者简介：

汤常明，深圳远洋运输股份有限公司海务主管，（E-mail）Tang.changming@coscoshipping.com，13610853868

散货船货运风险及常见货损货差案例探讨

杨英超

（中远海运散货运输有限公司，广东广州　511455）

摘 要：通过对多起散货船装载货物中出现的事故、险情案例进行分析，找到装载这些货物的安全措施；通过对多起货损货差案例的分析，找到产生货损货差的主要原因及所采取应对措施。探讨散货船在装载及运输货物过程中对于如何确保货运质量、保证船舶安全、保护船东利益等方面应采取的一些措施。

关键词：货运风险；货损货差；货物液化；湿损；岸磅计重

1　项目背景

近些年，在散货船装载货物期间出现过很多事故、险情。比如货物液化导致船舶在风浪中沉没事故、装卸货物期间货舱着火、卸货后发现货舱严重腐蚀等。还有频繁出现的货损货差也让船东损失很大，比如货舱中出现大量压载水导致货物湿损；装载粮食、食糖、化肥等出现各种原因的货物湿损或霉变等；装载粮食、食糖等出现卸货港口短货现象；装载甲板货出现货物锈蚀、掉海、舱盖变形等；舱内装载拼装货导致货物互相挤压变形、舱底板变形、舱内设备碰撞损坏等等。这些都引起了我们深入地思考并探索一些解决措施。

2　对船舶有较大风险的散装货

2.1　A 类货物液化

国际干散货船东协会（INTERCARGO）近期发布了 2013—2022 年散货船伤亡报告，10 年间，共有 26 艘 10 000DWT 以上的散货船被定为全损，相当于平均每年 2.6 艘；从事故原因上分析，货物液化是散货船人员伤亡的主要原因。

案例：2023 年某巴拿马型散货船装载来自巴西 PDM 的铁矿石粉，开往巴西 Praia Mole。这艘船用了 2 天时间来装载货物，在操作过程中因多次遇到降雨而中断。大雨期间货舱关闭，但该轮在小雨期间继续装载。该轮抵达卸港 Praia　Mole 时，7 个货舱中有 4 个货舱内货物已经液化。

注意：铁矿粉类货物是 A 类货，水分含量超过 TML，就容易形成流态化。铁矿粉货物含水率是影响铁矿粉流态化发生的关键因素，建议控制铁矿粉的含水率在 8% 以下。装卸货期间要及时关闭不装不卸的货舱。

2.2　硫磺腐蚀货舱

硫磺在潮湿状态下会对钢板有很强的腐蚀特性，在运输硫磺过程中，涉及安全的事故时有发生。

案例：2018 年某散货船在俄罗斯港口装载“湿”硫磺，虽然在装货前对货舱进行了保护，但在 2 个月后，卸空的货舱还是发现被严重腐蚀。最后在坞修时，船舶割换舱底板达 600 多吨。调查发现：造成货舱钢板严重腐蚀的主要原因是船舶装载硫磺前货舱保护不当。

干燥的硫磺本身对金属表面是没有腐蚀性的，但是硫磺货物在存储、作业等过程中会吸收空气中的水汽，

同时为了防止粉尘，在装载硫磺时也会人为洒水，当硫磺和水混合就变成“湿”硫磺，这时对钢板就会产生腐蚀性，因此在装运散装硫磺前必须要做“货舱保护”。货舱保护一般运用在装运如硫磺、盐货物之前，货舱保护的方法一般会根据情况从 LIMEWASH、SLIP-COAT、HOLDBLOCK 三者中任选其一。

2.3 废钢着火

废钢（SCRAP METAL）属于 C 类货。分为结构性废钢（HMS---HEAVY METAL STEEL）和粉碎性废钢（SHREDDED）。结构性废钢分为不同种类，通常情况下船方仅接受不包含废马达、废汽车和其他含有油类的废钢，因该类废钢容易引起自燃。故废钢在装货过程中注意观察货物情况，部分废钢会有废旧电池或油类等掺杂其中，容易引起自燃。对于散装类废钢，装卸过程中容易对大舱围、大舱梯子、管路等设备造成损坏，及时收集证据并提交工损报告给装卸公司。

案例：2021 年某散货船在荷兰鹿特丹港装载废钢，在装货过程中发生货舱货物着火。调查发现：本次所装的货物“废钢”，实际上已不是定义上的“钢产品”，而是夹杂着各种类型的电池、手机残余物、电容器、电器部件、印刷电路板、塑料和油脂等的粉碎垃圾。不仅易燃，而且燃点很点，不用火点，装卸过程遇摩擦即着火。

3 货损货差原因汇总

对于散货船装载的货物中易产生货损货差的货物主要有：拼装货（主要包括卷钢、钢坯、钢筋等以及机械设备等拼装在货舱内）、甲板货、盐、食糖、粮食等。这些货物产生货损货差的原因也是各种各样，主要有积载不当导致货损、岸磅计重与水尺计重不同、货舱汗水导致湿损、下雨导致湿损、污水 / 压载水进入货舱导致湿损、装卸工人导致货损等。

3.1 积载不当导致货损

案例：2022 年某灵便船在国内装载吨袋化肥、车辆和钢卷，钢卷周围和上方搭建木框架积载吨袋化肥，车辆最终积载在吨袋化肥上边。到达卸港后，发现大量钢卷外包装被化肥所污染生锈，最终货方提出了巨额索赔。

钢卷货物在货舱内积载时，一般不建议在其上部再装载其他的货物。但实际操作中，为了节省舱容，钢卷货物上会装载其他的杂货、袋装货、钢材、木箱、更有甚者汽车。虽然冷卷货物都会有外包装，但其绝非是完全密封，尤其是在经过多次装卸后，外包装已出现部分破损，在卸货港卸船时，尤其是有多个卸货港或卸货工班暴力操作的情况下，堆放在下部的钢卷货物更容易被上部货物在卸货时造成损坏或污染。

3.2 岸磅计重出现短货

案例：2020 年某散货船从阿根廷 San Lorenzo 装玉米到阿尔及利亚 Bejaia 卸，卸货后水尺计算数值仅比提单数少 3.5 t，但代理通知船长，港方卸货量（磅秤）比提单货量少了 131.6 MT。最后收货人以短货金额的 75% 收现金 2 万美元结案，船舶才能正常开航离港。

注意：在北非、中东等国家的货量经常引起争议，即使船舶载货量三方计量与提单一致，但港方都以过磅称为借口，提出短货索赔，船方只能争取尽量减少。对于短货，一般在 SOF 中声明：CARGO QTY AS PER B/LS, ALL CARGO DISCHARGED ON SHORE, NO ANY CARGO ON BOARD. SHIP/OWNER N/R FOR THE SHORTAGE.

3.3 污水 / 压载水导致货物湿损

案例 1：2019 年某散货船装载原蔗糖 4 万 t 抵罗马尼亚 CONSTANTA 卸货过程中，发生 No.5 舱湿损 125.2 t。调查发现：在进行双层底自压操作时，机舱内货舱污水阀没有关闭，货舱污水井出口阀的阀盘被异物垫住落不到位，因而导致在自压过程中，No.5 货舱双层底压载水自该舱右后污水井倒灌入货舱。

事故 2：2023 年某散货船从京唐港装载煤炭到惠州，抵靠惠州后初次水尺检验发现异常，计算货量比装港

多 1　000　t，开舱发现 No.2 舱货物表面有水。调查发现 :No.2 左污水井吸口止回阀失效，　货舱污水管系总阀卡阻和 N0.2 左液压遥控阀关闭不到位。在船舶使用舱底总用泵供消防水冲洗甲板时导致了货舱进水事故。

船舶发生的因货舱舱底污水系统进水而引起的货物索赔案件，原因主要是由于杂物积在舱底污水的泵送系统止回阀中，使其无法正常工作，不能阻拦海水通过舱底污水管路回流进入舱底污水井，进而进入货舱。所以在装货前一定要检查舱底污水井系统测深管，这些位置可能被舱底污水井中的货物残渣填满，进而干燥和凝固导致堵塞。我们可以通过从甲板上用水冲洗测深管或使用空气压力清理管来防止堵塞。测深管的清洗和清理应在清洗完货舱和舱底污水井后进行。

3.4　下雨导致谷物湿损

案例：2019 年某散货船靠泊防城港卸玉米，遇到突发下大雨导致货物湿损共 288.8　t。调查发现：船舶在下雨前关舱不及时是发生货损的直接原因。预计下雨时船舶已经采取措施进行关舱，但是由于突然下雨，雨势过急，最终还是造成湿货事故的发生。

南方夏季雨水多，而且下雨突然，雨量大，非常容易造成关舱被动。货方为了抢卸，要求船方开启全部 5 个货舱同时卸货，船舶为了配合生产开启全部货舱进行卸货，在突降大雨时，来不及关好全部舱盖，造成部分货物表面被雨淋湿。

3.5　装卸工人导致货损

案例：2023　年某散货船在马尼拉卸货期间，有 3 卷卷钢受损。调查发现：该轮当时在马尼拉码头由工人使用船舶克令吊卸货，因工人指挥有误，卷钢之间的绑扎钢带未完全剪断就指挥克令吊操作人员起吊，导致超负荷起吊，港方用于卸货的吊货小钢丝突然断掉，3 卷卷钢掉落受损。

对于钢材的装卸，船方应加强装卸货监控，制止工人野蛮操作以防损坏货物，及时拍摄照片和视频为证，如货物存在问题，及时发声明通告各方。

3.6　谷物湿损

案例 1：2023 年某散货船从巴西 SANTAREM 装载大豆 4 万余吨到阿尔及利亚 ORAN 港，卸货过程中发现 No.1 舱前后角表面货物有部分汗损、霉变。船员共清理出结块黄豆 160 kg。

案例 2：2019 年某散货船从阿根廷 SAN LORENZO 装载 4 万多吨玉米到阿尔及利亚 ORAN 港，卸货过程中发现No.1舱后部有湿损货物，总共确认湿损货65 t。调查发现：航行中木匠在进行No.1货舱通风窗维护保养后，未及时关闭，这是导致本次货损事故的直接原因。

谷物产生湿损的主要原因有海水湿损和淡水湿损。造成海水湿损的原因有多种：由于货舱舱盖不密封（盘根胶条变形、脱落）、甲板污水井测量孔盖未关严、货舱通风口（孔）锈穿、货舱人孔道门未关严；舱口围槽口内的货物未彻底清理，舱口围四角处流水孔内散落的货物未用通条清理干净，压载水舱焊缝处有裂缝。在船舶遭遇恶劣天气、海况后，因甲板上浪，造成海水沿上述部位进入货舱而引发货物湿损。

汗湿是较为常见的淡水湿损。若装货港炎热、潮湿，空气湿度大，而卸货港寒冷。潮湿的空气遇冷后，空气中的水分会凝结在舱盖板上，随着船舶摇摆，水珠凝聚后，滴落在货物表面，造成谷物湿损。

4　如何避免或减小货损货差

详细探讨了上述这些货物风险及货损货差案例，发现产生货物风险及货损货差的原因，就找到了在装载及运输货物过程中对于如何确保货运质量、保证船舶安全、保护船东利益等方面应采取的一些如下措施：

1）在装货前要向货方索取货物特性资料。装卸货前后，不论租家、货主或船东是否安排水尺检验，大副都要进行水尺检量。

2）如果岸上数字和水尺检量数字存在差别，船长认为可能发生索赔事件时，应立即向总调度室报告并抄

送海务主管。

3）船舶应对装船货物表面状况进行连续监控，如发现货物装船前已变质、损坏或有其他表面缺陷，应拒绝装船并拍照取证，必要时申请检验。易出现的货物缺陷：谷物受潮、发芽、霉变、有虫、混有杂粮杂质；化肥结块；货物含水量及温度超限；冷轧类钢材生锈，钢板严重变形，底盘松脱散，包装货标志与装货单据所列不一致等。

4）装货 / 卸货过程中如需要调整压载水，则应注意经过货舱部分的压载水舱透气管和测量管是否正常无泄漏。要特别注意由于船龄的增加有些透气管或测量管存在隐藏的锈蚀穿孔的现象。建议如果需要调整压载水，压载水舱内的水位尽可能不要高于货舱舱底。

5）认真检测各舱的舱盖的盘根，确保大舱水密，对舱盖进行水密检查和试验，特别注意舱口围四周的轨道和舱盖之间的水密。检查汗水排出系统，保证流水通畅。货物全部上船后，要对所有大舱进行密封。

6）如遭遇恶劣天气或发生海事，担心货物产生损害，船长应提前备妥海事声明，于抵港后 24 小时内取得港口当局签证并报告海务主管。

7）谷物：装货前要确认货物质量，拒绝接受水湿、发热、霉粮和虫粮。货舱下面有油舱时，尽可能缩短燃油加温时间和次数，加温至燃油能驳动时即停止加温（一般控制不超过 40℃）。应经常检查货舱水密和舱口周围的汗水孔，特别是遭遇恶劣天气前后。

8）水泥：水泥遇潮湿容易结板块，应密切注视天气变化，及时关舱，防止货物雨湿，严禁雨中作业。航行途中及时测量污水井，经常检查封舱情况，防止因甲板上浪导致海水从舱盖缝和道门口进入货舱。采取措施防止舱内出现汗湿，抵港前在海况天气允许的情况下开舱检查，发现表面结块提前处理。

5 小 结

保证船舶和船员的安全是船东及船长的责任和义务，船长在装货前就应识别出货物的运输风险，并针对风险提前做好各项准备。提高货运质量、避免或减少货损货差，不仅保障了货主的权益，提高了运输效率、降低营运成本，也有利于保护船东的利益并提高航运企业在市场中的竞争力。

作者简介：

杨英超，中远海运散货运输有限公司海务监督高级主管，通信地址：广州市南沙区凯翔路 1 号，邮编：511455，（E-mail）yang.yingchao@coscoshipping.com，020-84104837，13920027196

内河避碰规则在珠江口水域的适用性分析

郑晓东

（桂林海事局，广西桂林　541002）

摘 要：随着我国经济的发展，众多内河船舶在珠江口水域航行、停泊和作业，积极参与粤港澳大湾区建设。由于珠江口是海河交汇区，但当前尚无明确的海河分界线，内河船舶在珠江口水域航行优先适用《1972 年国际海上避碰规则》还是《中华人民共和国内河避碰规则》，尚无明文规定。本文通过分析珠江口水域现状及有关管理规定，提出《中华人民共和国内河避碰规则》在珠江口水域适用的合理性。

关键词：珠江口水域；内河；避碰；规则；适用

珠江口水域，位于广东珠江三角洲，有多条内陆河流汇入，码头、水道、锚地、岛屿众多，多条水（航）道进出深港澳等各沿海港口和中山、东莞、佛山等内河港口，通航密度大，通航环境复杂。在珠江口水域航行的船舶种类繁多，既有商船又有渔船，既有运输船又有施工船，既有万吨钢质船又有自用小木船，既有海船又有内河船。据统计，自 2021 年以来，通过虎门大桥的船舶超过 20 万艘次，日均超过 500 艘次，而这又有将近三分之二为内河船。

那在珠江口水域范围内，内河船舶航行（含停泊、作业、下同）优先适用《1972 年国际海上避碰规则》（以下简称《海上避碰规则》）还是《中华人民共和国内河避碰规则》（以下简称《内河避碰规则》）？由于珠江口是入海口，所以这个问题在航运公司、船员队伍、海事执法人员中存在争议，因此需要明确界定，以便为船舶和船员提供合理的航行规则、为海事执法人员提供符合法律与技术的管理依据，共同创造一个良好的通航环境，减少水上交通事故的发生。

1　珠江口水域与《海上避碰规则》的关系

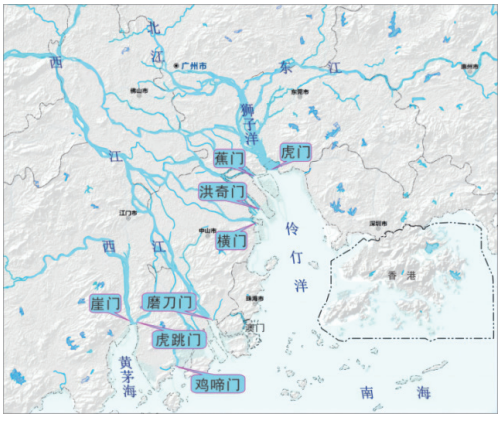


图 1　珠江口水域八大口门示意图

珠江口水域有一个较显著的特点，拥有多个出海口，即广为人知的珠江“八大口门”（见图 1）。口门外水域存在河海交汇区，河海交汇区与外海连接，有大虎水道、川鼻水道、伶仃航道等多条水（航）道供海船进

出珠江口。《海上避碰规则》第一条第 1 款明确：本规则条款适用于公海和连接于公海而可供海船航行的一切水域中的一切船舶 [1]。因此，《海上避碰规则》在珠江口水域适用。

2　珠江口水域与《内河避碰规则》的关系

笔者认为，要明确《内河避碰规则》在珠江口水域是否适用，需要从珠江口水域范围、航区、航线、船员避碰技能等方面来进行分析。

2.1　珠江口水域

2.1.1　水域范围

《广东海事局辖区船舶安全航行规定》(2023 年修订)第三十六条规定：珠江口水域为 21°48.0′N 纬度线以北，113°05.0′E 经度线以东，114°30.1′E 经度线以西和广州港黄埔大桥以南的广东海事局管辖的海区水域范围（由于管辖权限不同，深圳、香港、澳门海事部门管辖的部分水域在图中未包含在内）[2]，如图 2 所示。

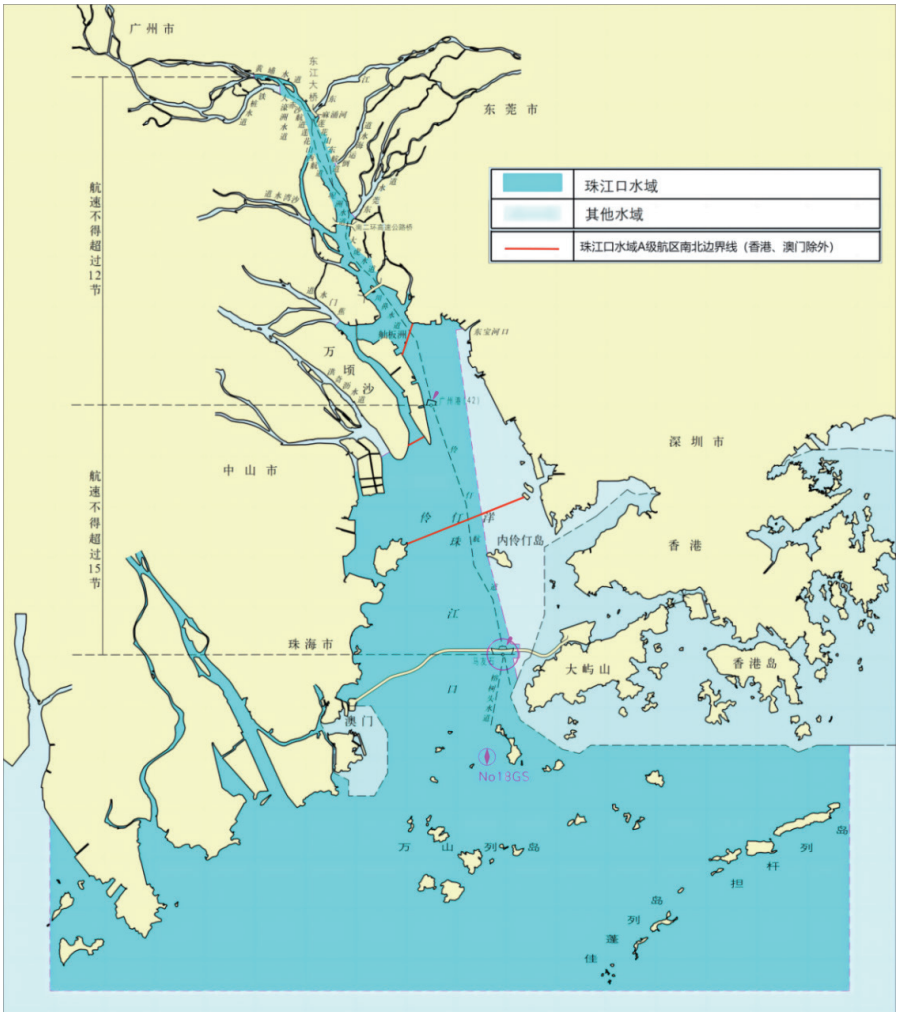


图 2　珠江口水域范围图

2.1.2　海、河分界线

从“1 珠江口水域与《海上避碰规则》的关系”可以知道，八大河流从各口门汇入珠江口，然后流入大海，那这必然存在海、河分界线。当前，如何划分、依据什么来划分海与河的界线，地方政府部门之间、中央管理部门之间、水利专家与海洋专家之间意见不一。于 1992 年 7 月颁发实施的《广东、广西两省区内河避碰若干规定》

明确的珠江口（包括虎门、蕉门、横门）海、河分界线为：

交椅角（川鼻角）22°44′51″N 113°39′49″E

舢舨洲　　22°43′02″N 113°39′29′E

龙穴岛东端　　22°41′30″N 113°38′59″E

横门岛东端　　22°33′54″N 113°35′42″E

横门岛南端　　22°33′25″N 113°34′42″E

上述诸岛延至对岸 22°33′14″N 113°34′30″E 的连线 [3]。

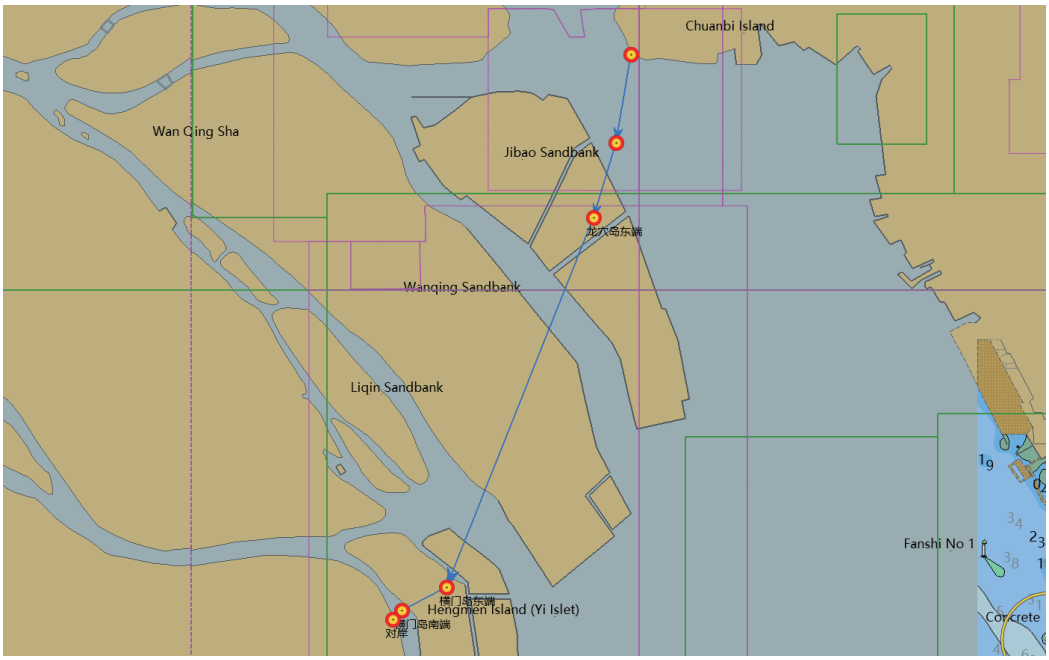


图 3　《广东、广西两省区内河避碰若干规定》划定的海、河分界线

《广东海事局辖区船舶安全航行规定》(2023 年修订)第二条第二款规定: 关于海、河分界线，广州港适用《广州港口章程》的相关规定，其他水域适用《广东、广西两省区内河避碰若干规定》的相关规定。

《广州港口章程》第一条、第三条、第四条的相关规定，广州港口（以下简称本港）位于华南沿海的珠江入海口（23º06′N,113º26′E），由海港和内河港组成；内河港水域是广州市行政区内海港水域范围以外的内河通航水域；海港水域由相关水域边界范围内的珠江干流及相关支流形成的水域组成，其中北边界为：流溪河以白坭河大桥为界；石井河以槎龙排洪站为界；增埗河以狮头围公路桥为界 [4]。

这也就意味着，《广东、广西两省区内河避碰若干规定》划定的海、河分界线已在《广州港口章程》划定的海港水域范围内，不再适用于指导内河船舶在珠江口水域的航行与避碰。

然而，《广州港口章程》对于海港与河港水域的划分，更多地是从地理位置、自然环境、行政区划、管理主体等方面来考虑，而较少考虑到水域对船舶的适航性及环珠江三角洲经济发展对内河船舶的需求量。因此，笔者认为不宜以《广州港口章程》的海、河分界线来作为内河船舶在珠江口水域航行的边界。

2.2　内河船舶在珠江口水域航行的法律依据

2.2.1　航区

由中国海事局公布的《航区划分规则 2021》明确的部分内容：（1）内河水域的航区等级按 A 级（含相当 A 级）、B 级、C 级高低顺序排列；（2）河海交界区系指在河流的入海口处，自河流口门线向海域延伸的水域；（3）位于河流入海口的河海交界水域，在有义波高和水面形状符合相关条件的情况下，可划分为相当A级航区；（4 珠江口——

自虎门（沙角信号台与舢舨洲灯塔连线延至龙穴岛陆岸，以及龙穴岛南端角与万顷沙南端角连线）至淇澳岛大王角灯标与孖洲岛灯标连线以内的水域，以及至香港鲤鱼门、澳门距陆岸不超过 5 km 的水域为 A 级航区 [5]，见图 2。

从以上条款我们可以推断出，在航区划分中，沙角信号台与舢舨洲灯塔连线延至龙穴岛陆岸，以及龙穴岛南端角与万顷沙南端角连线以北水域视为内河水域，以南至淇澳岛大王角灯标与孖洲岛灯标连线以内视为河海交界区，并划为（相当）A 级航区，允许满足 A 级航区技术要求的内河船舶航行。

2.2.2 航线

在《〈中华人民共和国内河船舶船员适任考试和发证规则〉实施办法》（2021 年修订）附件 8“珠江水系内河船舶船员适任证书航线名称和范围”中，涉及珠江口水域的航线包括珠江水系基本航线——西江思贤滘以下、北江思贤滘以下、潭江至八大口门 (崖门、虎跳门、鸡啼门、磨刀门、横门、洪奇门、蕉门、虎门) 之间的所有航线，以及口门外航线——虎门至蛇口、香港、桂山、盐田；虎门至珠海、澳门、磨刀门、高栏、崖门航线 [6]。也就是说，内河船舶驾驶员的适任证书签注有以上航线，就可以在珠江口水域对应的航线上驾驶内河船舶航行。

综合分析得知，具备 A 级航区技术条件的内河船舶在珠江口水域相应航线上航行是合法的。

2.2.3 船员避碰技能

《内河船舶船员适任培训和考试大纲（2019 版）》将“内河避碰规则与应用”作为各类别驾驶岗位的培训内容之一，而并不涉及《海上避碰规则》的相关内容 [7]。因此，内河船舶驾驶岗位人员只对《内河避碰规则》熟悉。当前，也没有相关强制性条文规定在珠江口水域或者相当 A 级航区航行的内河船舶驾驶岗位人员必须熟悉《海上避碰规则》。

综上所述，内河船舶在珠江口水域航行适用《内河避碰规则》是合理的。

3 《内河避碰规则》与《海上避碰规则》的关系

3.1 符合性

《海上避碰规则》第一条第 2 款明确：本规则条款不妨碍有关主管机关为连接于公海而可供海船航行的任何港外锚地、港口、江河、湖泊或内陆水道所制订的特殊规定的实施。这种特殊规定，应尽可能符合本规则条款。

交通运输部作为主管机关，根据《海上避碰规则》的立法精神，制订《内河避碰规则》，规范在内河水域航行的包括海船在内的一切船舶，因此可视《内河避碰规则》为《海上避碰规则》特殊规定。

表 1 两个避碰规则各章的标题

	《海上避碰规则》	《内河避碰规则》[8]
第一章	总则	总则
第二章	驾驶和航行规则	航行和避让
第三章	号灯和号型	号灯和号型
第四章	声响和灯光信号	声响信号
第五章	豁免	附则

从表中我们可以看出，《内河避碰规则》与《海上避碰规则》均为五章，除了第五章外，其余四章的主要内容基本是一致的，符合“这种特殊规定，应尽可能符合本规则条款”的原则。

3.2 优先性

一般而言，在立法实践中，对于一般规定（如《海上避碰规则》），特殊规定具有优先适用权。因此，在同一水域当特殊规定与一般规定同时适用时，特殊规定优先；当两者不一致时，应执行特殊规定；特殊规定未明确的事项应依据一般规定执行。因此，《内河避碰规则》作为《海上避碰规则》的特殊规定，对于内河船舶来说，可以在珠江口水域优先适用。

3.3 可操作性

《海上避碰规则》全文共 38 条，由于适用于全球，因此对船舶的避让行动只能做出原则性的规定。而《内

河避碰规则》全文 49 条，但只适用于我国境内江河、湖泊等通航水域，因此大多条文比《海上避碰规则》的规定要更具体，更具有可操作性。

如对于交叉相遇局面的避让行动，《海上避碰规则》第十五条是这样规定的，相对比较简单：当两艘机动船交叉相遇致有构成碰撞危险时，有他船在本船右舷的船舶应给他船让路，如当时环境许可，还应避免横越他船的前方。而《内河避碰规则》第十二条则是这样规定的，相对要更加详细、具体：机动船在横越前，应当注意航道情况和周围环境，在无碍他船行驶时，按章鸣放声号后，方可横越。除本节另有规定外，机动船横越和交叉相遇时，应当按下列规定避让：

（1）横越船应当避让顺航道行驶的船，并不得在顺航道行驶船的前方突然和强行横越。

（2）同流向的两机动船交叉相遇，有他船在本船右舷者，应当给他船让路。

（3）不同流向的两横越船相遇，上行船应当避让下行船，但在潮流河段逆流船应当避让顺流船。

（4）在平流区域两横越船相遇，上行船应当避让下行船；同为上行或下行横越时，有他船在本船右舷者，应当给他船让路。

（5）在湖泊、水库两船交叉相遇，有他船在本船右舷者，应当给他船让路。

又如珠江口水域与外海连接，受不正规半日混合型潮汐影响明显。进出珠江口水域的船舶大多会参考实时潮位及流向，以便合理选择进出港时机、航道航行或锚泊区锚泊。在《内河避碰规则》第十条、第十二条、第十五条及第十六条明确了潮流河段机动船处于对驶相遇、横越、交叉相遇、交汇水域相遇、叉河口相遇等局面时所应采取的避让行动，而《海上避碰规则》则无相关条款进行明确。

4　结论和建议

综上分析，内河船舶在珠江口水域按规定航线航行，适用且优先适用《内河避碰规则》是合理的，这样会更有利内河船舶安全航行和避让，也有利于海事执法。随着我国经济的快速发展、内河船舶质量和船员素质的稳步提高、助导航和避碰设备的日趋智能化，建议相关主管机关通过立法和整治航道的方式适当拓展内河船舶在珠江口的可航水域，以缩短船舶航线，降低通航密度，减少碰撞风险，提高运输效率，助力水运经济更快更好发展。

参考文献

[1] 国际海事组织 .1972 年国际海上避碰规则（2007 年修订）[Z].2007-12-01.

[2] 中华人民共和国广东海事局 . 广东海事局辖区船舶安全航行规定（2021 年修订）[Z].2021-09-01.

[3] 广东省人民政府 . 广东、广西两省区内河避碰若干规定 [Z].1992-07-02.

[4] 广州市港务局 . 广州港口章程 [Z].2022-12-23.

[5] 中华人民共和国海事局 . 航区划分规则 2021[Z].2021-10-1.

[6] 中华人民共和国海事局 .《中华人民共和国内河船舶船员适任考试和发证规则》实施办法 [Z].2021-02-23.

[7] 交通运输部办公厅 . 内河船舶船员适任培训和考试大纲（2019 版）[S].2019-04-12.

[8] 交通运输部 . 中华人民共和国内河避碰规则（2003 年修订）[Z].2003-09-02.

作者简介

郑晓东，硕士研究生，桂林海事局平乐海事处处长，2023 年 8—11 月在广东海事局广州海事调查研究工作站学习，（E-mail）546855413@qq.com,18877388222

浅谈平陆运河项目建设与发展意义

邵泊洋　杨宇清　莫大怀

（广西航海学会，广西南宁　530012）

摘 要：平陆运河建设项目是一个世纪工程，建成后将进一步促进广西及周边地区快速发展。本文旨在通过平陆运河建设背景、建设概况、建设价值等的分析，阐述该项目建设在宏观、交通、经济等三个层面的重要意义。

关键词：平陆运河；价值；建设意义

2017 年 4 月，习近平总书记到广西考察调研时指出，“要打造好向海经济，写好新世纪海上丝路新篇章”。交通运输部李小鹏部长指出，平陆运河是优化提升全国水运网络、加快建设国家综合立体交通网的联网工程，是建设西部陆海新通道、加快建设交通强国的标志性工程，对广西和西南地区经济社会发展具有重大战略意义。

广西水运资源十分丰富，西江上接云贵，下联广东。西江的水运服务范围可覆盖广西国土面积的 92%，涉及全区 11 个地级市，103 个县，人口约 4 200 万。由于广西的江、海不联通，导致货物等须沿着海岸线一直向东行走 700 多公里，从广州出海，时间、经济等成本居高不下。如果在广西向南打通一条水道，直接与海快捷联通，就可以大幅缩短出海里程，大大降低运营成本，形成强劲的向海经济。

这就是平陆运河。作为新中国成立以来继京杭大运河后我国建设的第一条通江达海的大运河，平陆运河是西部陆海新通道的骨干工程，也是加快建设交通强国的标志性工程，于 2022 年 8 月开工建设，预计 2026 年底主体工程建成。建成后南宁出海仅 100 多公里，将为广西乃至西南、中南地区开辟运距最短、更经济、更便捷的出海通道。平陆运河的建设对于优化区域发展战略布局，推动南宁通江达海、向海图强具有重要意义。

1　建设背景

1.1　历　程

中国民主革命的伟大先驱、中华民国的缔造者孙中山先生曾多次乘船驻节广西，在其著作中也多次为广西经济、交通等事业发展提出宏大设想。其中，在《建国方略》中，他提到：“钦州位于东京湾之顶，中国海岸之最南端。此城在广州即南方大港之西四百英里。凡在钦州以西之地，将择此港以出于海，则比经广州可减四百英里。所以直接输出入贸易，仍以钦州为最省俭之积载地也。”我们知道，当时的环境下，出远门都是乘船出行。在这段话的字里行间中，我们可以感受到他对乘船南下的渴望。

1919 年，孙中山先生在《建国方略》中提出建设平陆运河这一伟大构想。

1912 年，法国水利专家在广西进行了勘查后，提出了平陆运河的设想。

1915 年，民国珠江水利总局曾组织过勘察工作。

1949 年，新中国成立后，广东广西两省区先后在 1951 年、1958 年和 1960 年三次组织人员进行了运河的勘测。

1965 年，钦州北海防城港划给广西之后，广西壮族自治区又在 1975 年和 1979 年两次进行了勘测，提出了平陆运河规划报告。

1994 年，自治区交通厅编制上报了平陆运河工程建设前期工作立项报告，这之后广西人大代表政协委员

民主党派也多次提出建议，建议修建南宁至钦州的平陆运河。

2014 年，自治区黄金水道办自治区交通运输厅组织开展了平陆运河战略规划研究报告，并陆续开展了平陆运河相关的多项专题研究。

因此，我们说平陆运河是广西人民的百年梦想一点也不为过。

1.2 内河快速发展

近年来，随着广西经济的快速发展，沿江基础设施的不断完善，西江内河货运量也快速增长。

2013 年，广西内河港口总吞吐量超过 1 亿 t。成为名副其实的亿吨黄金水道；

2020—2021 年，贵港港的港口吞吐量连续两年突破 1 亿 t，成为珠江水系首个内河“亿吨大港”；

2021 年，广西港口货物吞吐量突破 5 亿 t 大关。

1.3 内河发展瓶颈

从 2008 年开始，广西持续掀起建设西江亿吨黄金水道的新高潮。2008—2013 年，内河吞吐量快速增长。到了 2014、2015 年达到了瓶颈期，2016 年梧州长洲水利枢纽 3、4 线船闸建成投用，解决了西江堵闸问题之后，又打开了西江快速发展的上升空间。2022 年受疫情的滞后效应，略有萎缩，达到 1.96 亿 t。2023 年已经达到约 2.1 亿 t，同比增长 13.5%，内河货运量基本上又到了下一个瓶颈期。世界上最大的船闸，梧州长洲的四线船闸又饱和了。

长洲船闸是西江下游最后一个梯级船闸，在这个断面上总共有 4 座船闸，分别是一线二线三线四线船闸，于 2015 年建成通航，这四座船闸加起来年设计单向通过能力达到 1.36 亿 t。虽然其在世界内河通航领域拥有四个世界第一：一是同一个断面上，船闸的线数最多；二是通过能力最大；三是世界上最大的互泄互灌的省水船闸；四是平面尺度并列世界第一，但也因为经济的快速增长，而频繁出现堵闸。如果没有优先的情况下，一般过闸大约需要 15 天时间。这不得不让我们寻找西南中南地区货物出海的新通道。广西要发展，西南地区要发展。平陆运河的建设是广西乃至我国西南中南地区经济发展的必然需要。现有水运出海通道不足的瓶颈是其重要因素之一，当然也有许多其他因素的考量。

2 平陆运河的基本情况

2.1 概 况

平陆运河是西部陆海新通道骨干工程，始于南宁横州市西津水库，经钦州灵山县陆屋镇沿钦江进入北部湾，全长约 140 km，其中分水岭越岭段开挖约 6.5 km。建设航道等级为内河 I 级，船闸永久设施按 5 000 吨级建设。

平陆运河建设项目以航运为第一功能，兼顾供水、灌溉、防洪、改善水生态环境等，项目静态投资 687 亿元，建设工期 5 年。建成后的平陆运河将缩短西江中上游地区入海航程 560 km，缩短到东盟航程 750 km。

平陆运河由于该工程涉及的影响面太广，例如：流量是否足够，是否需要调水，是否淹没面积过大，耕地红线问题怎么解决，移民搬迁，珠江下游广东省的补淡压咸等等。为此原自治区港航管理局曾经提出了 3 个布局方案，分别是建设 4 级枢纽、5 级枢纽、6 级枢纽。山区河流要想渠化航道，只能建设大坝并配套建设船闸。梯级越少，出海的效率就越高，但是对社会面的影响就越大。梯级越多，淹没面积就越小，但是通航效率下降，船舶每过一次船闸至少要花几个小时，有悖于建设运河的初衷。

平陆运河 1993 年第一次正式列入远期建设规划。经过多年、大量的研究和论证，于 2019 年平陆运河建设逐步进入发展的快车道，相继列入国家规划，并且得到了国家发改委、交通运输部、财政部、自然资源部、生态环境部、水利部、农业农村部、文化和旅游部、国家林业和草原局、国家海洋局等有关部委高度重视和大力支持。

2022 年 8 月 28 日，平陆运河建设动员大会召开，项目实质性开工建设。

2.2 平陆运河的价值

国家对平陆运河的建设方案确定为三级枢纽，打破了广西提出的 4、5、6 级的方案，可以说在地理环境上

做到了极限。可见，国家对平陆运河的重视程度，给予了平陆运河枢纽布置方案非常高的优先级。

2.2.1 从地理位置上看

马道枢纽、企石枢纽，均位于陆屋镇以上，相对靠近南宁一侧。青年枢纽位于钦州市。也就是说，运河沿线上的大多数乡镇，如陆屋镇、青塘镇、平吉镇、久隆镇等运河沿线绝大部分区域，只要通过一座船闸即可出海。这将带动运河沿线大片地区的经济发展，形成新的增长点。

2.2.2 从建设规模上看

平陆运河上的三座船闸均规划建设为一级船闸，同时建设两线船闸，预留三线，可通航 5 000 吨级的内河船或3 000 吨级的海轮。年单向通过能力可达 8 900 万 t。要知道，桂平航运枢纽两线船闸的单向通过能力为 4 200 万 t，梧州长洲水利枢纽 4 线船闸 1.36 亿 t。平陆运河相当于两倍于桂平航运枢纽当前的通过容量，是梧州的 65%，如果把预留的三线船闸算上，将超过梧州的设计通过能力。所以平陆运河，可以说是再造一条向南的西江。

2.2.3 从出海时间上看

大幅缩短出海时间。平陆运河全长约 135 km，比从广州出海，里程上节省了 560 km，同时避开西津、贵港、桂平、梧州长洲枢纽 4 个梯级，按照平均船速 10 km/h，每个梯级 4 h 的过闸时间计算，从西津水库至北部湾大约需要 26 h，也就是说从南宁出海仅需 1 天多的时间。目前，南宁至广州，即使是在丰水期，也需要 1 ~ 2 周的时间。时间上节省了 90%。

此外，在途时间稳定。平陆运河上的三座梯级，均是以航运为第一功能，梯级上没有建设电站，进一步保证了通航的纯粹和通航效率。内河驳船良好的准班率，也可以有力支撑钦州北部湾的集装箱国际枢纽港的打造。

2.2.4 从运输成本上看

综合运输成本大幅下降。除了里程缩短，降低燃油成本之外，还有就是过闸费。从西津水库向东出海需要经过 4 座收费船闸：西津、贵港、桂平、长洲。平陆运河是人工运河，也将实施收费。但无疑南宁以及桂西北地区的货物出海可以大幅降低成本。据我测算，运输成本大约可降低 70% 以上。

3 平陆运河建设与发展意义

3.1 宏观层面

（1）平陆运河是有机衔接“一带一路”、服务构建新发展格局的战略工程。推动广西及西南地区更好地实现面朝大海、向海图强，实现“一带一路”有机衔接，以更大力度、更广范围融入中国—东盟命运共同体建设。

（2）平陆运河是完善国家高等级航道布局、构建国家综合立体交通网的基础工程。2021 年国务院公布的《国家综合立体交通网规划纲要》提出了内河航道四横四纵，原来的规划是两横一纵。现在的规划是四横四纵，其中就有一纵是平陆运河。

（3）平陆运河是新时代推进西部大开发、促进区域协调发展的关键工程。

（4）平陆运河是实现水资源综合利用、推动可持续发展的绿色工程。平陆运河在发挥交通运输功能的同时，兼顾供水、防洪、灌溉、水生态治理等综合功能，最大限度实现水资源综合利用，改善环北部湾地区生产生活用水条件，缓解西江干流防洪压力，优化钦江流域水生态环境。

3.2 交通层面

（1）改变西南地区交通格局。运河以最短距离打通西江干流入海通道，将从根本上缓解西江中下游通航压力。

（2）平陆运河纵向贯通西江干流与北部湾国际枢纽海港，构建西南地区江海联运体系。目前自治区交通运输厅正在研究适合于平陆运河的江海直达船，不仅仅是要江船入海，更重要的是要推动海船进江，让东盟各国的船舶，泛北部湾的海船直达南宁，让南宁变南京。

（3）大幅提升西部陆海新通道运输能力。平陆运河可替代大量的北部湾港公路铁路等集疏运基础设施，

很大程度解决钦州港集装箱集疏运通道不足的问题。支撑北部湾国际集装箱枢纽港的建设。目前钦州港的公路集疏运通道基础薄弱。平陆运河将钦州港降低公路运输比例。

3.3 经济层面

（1）平陆运河将海洋战略延伸到西江水系沿岸城市。打通开放发展的“任督二脉”。推动释放“海”的潜力，激发“江”的活力，深刻改变广西产业布局、经济社会发展格局，从根本上破解广西“沿海不达海、向海海不强”的历史困局。

（2）平陆运河沿江经济带将逐步形成。六景和陆屋的集装箱运输成本优势将逐步凸显，吸引高附加值临港工业入驻，大幅提高横县和陆屋镇的土地价值和经济地位，形成新的物流枢纽和工业基地，西部陆海新通道运来的货物，可以在六景或者陆屋，实现再加工和集中转运。

（3）降低钦北防的工业发展和城市建设等基础原材料的成本，钦北防工业发展再遇新契机。

3.4 平陆运河的综合效益

（1）直接效益。根据自治区交通运输厅的预测，由于大幅缩短了出海航程，降低物流成本。预计 2035 年、2050 年每年可节约运输费用 23.9 亿元 / 年、33.6 亿元 / 年；可替代大量铁路、公路建设投资，节约铁路、公路养护费用。2035 年、2050 年平陆运河比现状运输方式能够节约能源消耗分别约 7.5 万 t 标准煤 / 年和 14.4 万 t 标准煤 / 年，节能减排效果明显。

（2）间接效益。远期通过结合调水工程沿岸可发展约 65 万亩灌区，可新增粮食产量约 32 万 t；运河建设可提高钦江防洪标准，沿线乡镇由不设防提高至 20 年一遇。郁江发生 50 年一遇洪水时，可有效分洪，提升郁江下游横州市、贵港市应对超标准洪水能力。

（3）外溢效益。预计运河经济带可拉动沿线地区新增 GDP 在 2035 年、2050 年分别达 520 亿元、3 000 亿元。2050年，预计每年可提供超过1万个水路运输服务业就业岗位，运河工程及经济带建设预计可解决超过100万人就业。

总的来说，平陆运河建成是百年梦想、照进现实。我们既是历史的见证者，也是未来的践行者，平陆运河开通，一定会助力广西经济腾飞，促进中国 -- 东盟经济的快速发展，为“一带一路”建设谱写出新世纪海上丝路新篇章。

参考文献

[1] 龙巍，张植凡 . 一条运河承载百年愿景 [N]. 中国水运网 ,2022.03.25.

[2] 刘宁 . 实地调研平陆运河项目推进情况 [N]. 广西交通新闻中心，2022.02.09.

[3] 通江达海链全球 广西水运经济提质增量 [N]. 广西云—广西日报，2024.08.16.

[4] 刘宁 . 深入平陆运河项目建设现场调研并看望慰问一线建设者 [N]. 广西日报，2024.09.18.

[5] 广西南宁打造面向东盟产业合作区 [N]. 中国日报网 ,2024.09.23.

[6] 平陆运河成功入选交通运输部交通强国建设试点 [N]. 广西云—广西日报 ,2024.09.19.

作者简介：

邵泊洋，高级工程师，广西交通职业技术学院经管学院副院长 , 广西航海学会资深专家，（E-mail）114305173@qq.com,15678899401（微信同）

杨宇清，女，正高级讲师，广西交通运输学校教务科长 , 广西航海学会资深专家，（E-mail）358448657@qq.com,13607715603（微信同）

莫大怀，广西航海学会常务副秘书长，（E-mail）598181915@qq.com,13978857111（微信同）

西江航运干线整治工程通航安全影响与对策研究

杜小燕

(广西交通设计集团有限公司，广西南宁　530029)

摘 要：西江航运干线是全国家高等级航道网的“两横”之一，承担着重要的水运通道任务，具有其独有的通航特征，“十四五”时期广西内河航道提升工程建设需求大，项目建设多，航道整治工程往往位于航道航行繁忙的区域或通航环境条件不佳的位置，航道整治施工期间存在较高的船舶通航安全隐患。针对广西西江航运干线的通航特征与内河整治工程施工期间的通航安全风险点，开展整治工程通航安全影响与对策分析研究，并选取典型案例的具体做法提炼有益经验，对未来该地区内河到整治施工期间的通航安全保障具有重要的指导示范意义。

关键词：内河航道；整治工程；通航安全

0　引　言

广西河流众多，水量充沛，水运发展条件优越，现有通航河流 53 条，主要有西江航运干线、右江、柳黔江等高等级航道，其中西江航运干线是广西内河水运的“黄金水道”。未来，交通强区建设和内河水运高质量发展要求下，西江航运干线的通航条件将持续提升，内河航道整治工程建设需持续大规模开展。内河航道整治疏浚离不开水上施工，工程区域与航道的交叉将不可避免的对船舶航行产生一定影响，需针对性的分析西江航运干线整治工程施工特点和航道通航特征，充分研究施工对通航安全的具体影响内容，采取有效的应对措施，保障航道建设的过程中通航安全风险严格可控。

1　西江航运干线通航特征

1.1　西江航运干线水文特性

西江是珠江流域的干流，自云南流经贵州、广西至广东佛山三水并入珠江三角洲网河区，干流在珠海磨刀门水道入南海。西江干流全长 2 214 km，多年平均水资源总量 2 302 亿 m^3，流域面积约 35.31 万 km^2。广西属珠江流域西江水系的面积总计 20 2082 km^2，占全区总面积的 85.39%。该水系的主要河流有红水河、黔江、郁江、柳江、浔江、桂江、西江。西江航运干线由郁江、浔江、西江、珠江组成，西起南宁、东至广州，全长 854 km。西江航运干线（广西段）径流特点具有年内分配不均，季节差异大，年际变化小的特点，径流年内分配主要集中在 5—10 月的汛期，汛期水量占年总量的 80%，洪水期具有山区河流洪水暴涨暴落的特点。南宁、贵港、大湟江口、梧州等 4 站的年平均流量基本围绕着多年平均值变动，年际变化较小 [1]。

1.2　西江航运干线通航特征

西江航运干线（广西段）是国家高等级航道“四纵四横两网”中的“横二”通道主轴，由南宁至梧州界首，途径横州、贵港、桂平、平南、藤县、梧州等地，航道里程 570 km，是广西内河航道网的主轴，是广西及

云贵地区与粤港澳大湾区沟通的水上运输大动脉。“十四五”时期，西江航运干线主轴作用将进一步巩固，重点实施南宁至贵港、长洲坝下至省界段航道工程，西津二线船闸建设工程，实现南宁以下 3 000 吨级船舶直达粤港澳大湾区。西江航运干线通过黄金水道提级扩能建设，航道通航条件已得到较大改善，船舶大型化发展带来的尺度问题和操控性难度提升、内河水位季节性变化特别是枯水期水深问题、船舶载重量不平衡等特点，航线区段多属山区河流，洪水期水流急、流态差，漂浮物多，为确保船舶航行安全，海事部门将根据水流实际，发布通航应急预警或应急封航。航道通航环境受自然条件、航道条件和交通环境条件的影响明显。

1.3 西江航运干线通航环境风险因素

1.3.1 自然环境因素。自然环境因素具体分为水文环境（流速、水位等）和气象环境（温度、风、雨、雾、雷电等）两部分。这其中风、雨、雾、雷电等因素对内河航道通航环境影响较大。珠江流域内河航行干线为东西向，在其所处自然环境中，春夏季常见偏南风，秋冬季常见偏北风，所以船舶在此航行时受风的影响程度较大，船舶的行驶的方向变化将对通航安全产生影响。

1.3.2 通航条件因素。通航条件具体包括航道基本尺度参数（最大转向角、长度、宽度等）、转向点、碍航物、交叉点等。西江航运干线航道建设尺度为 3.5 m × 80 m × 550 m，渠化航道里程达 547 km，航道长度越长，则船舶通航时间就会越长，因此出现意外事故的概率也会越高。

1.3.3 交通环境因素。交通环境具体分为船舶流量、导助航设施等。西江航运干线船舶流量大，且过闸压力大，以长洲枢纽为例，2023 年累计船舶过闸货运量超过 1.8 亿 t，过闸船舶 12.4 万艘次。航道中的船舶流量越大，则船舶会出现意外事故的概率就越高。

2 航道整治工程施工期通航风险分析

西江航运干线航道整治施工中普遍存在施工难度较大、施工水域航道船舶交通环境复杂、施工时间较长等特点，施工期通航风险具有不确定性、动态性及模糊性的，这些风险主要表现在：施工工程涉及范围较广、施工工艺复杂、施工挤占通航水域、施工船舶风险较高、自然条件对施工影响明显等。

2.1 航道内整治施工占用通航水域时间过长

航道内整治工程施工过程中不可避免的需要进行水下爆破、航道疏浚、弃方外运以及水深扫测等施工作业方式，各类船舶需频繁的移动、锚定，施工作业船舶通常需占用较大范围水域，对通航环境影响严重。

2.2 施工水域通航环境复杂

航道整治工程区内多为航道宽度、水深受限区域，船舶通航水域通航环境复杂。内河航道整治工程主要分布于航道内或者航道两侧，施工期间受施工船舶和设备平面布设的影响，在施工期间施工船舶不可避免的进出或者横穿航道。各类施工作业船舶与航道内往来的非施工船舶存在大量的交通流交汇，船舶航行风险高。

2.3 施工区域内施工船舶的自身通航风险

2.3.1 施工船舶种类、数量大，施工协调难度极高 [2]

内河航道整治施工中可能应用到涉及疏浚的各类抓斗式、绞吸式、耙吸式不同挖泥船舶，还有与之配套的铺排、抛石、运输和泥驳等辅助船舶，以及施工相关的交通艇、测量船、拖船、抛锚艇等多种船舶，种类各异，航行性能差异大，协调组织难度高，存在较高的施工船舶自身碰撞风险。

2.3.2 砂石料船、泥驳性能不佳，自身操控难度高

内河施工中的砂石料船和泥驳船普遍存在服役年限较长的特点，加之该类船舶航速一般不高，河流局部流速较快时，船舶操纵非常困难，同时砂石料船和泥驳通常方形系数较大、船舶干舷低，如遇施工中吃水控制不佳甚至超载，严重时将导致船舶稳性降低或者丧失。

2.3.3 施工水域范围大

大规模内河航道整治工程施工期较长长，施工水域跨越多个区段，施工范围大，往往涉及多个施工监理单位和不同的海事、航道、水利、渔业管理单位，施工区域沿线也通常存在多个码头、锚地、取排水口、渔区，施工区域通常又多为碍航区段或航行不利位置，通航条件往往不足，需要协调和指挥的单位多，船舶通航管理、现场维护难度大。

2.4 水上施工受自然环境影响大

内河航道施工必须采用水上施工，专业性强、施工难度大，受水文、气象条件影响明显。较长的施工周期意味着不同季节的影响均有可能遇到。施工及运输船舶受枯洪水、突风、台风及热带气旋、暴雨、雷电、冰雹、大雾等极端自然因素影响下，船舶风险较大。各种恶劣自然条件是施工期通航安全必须防范的一项重大考验[3]。

3 航道整治施工时的通航安全保障措施

3.1 施工船舶的严格管理

所有进场施工船舶必须按规定持有相关主管部门核发的的船检合格证书及相关安全许可证书，工程施工船舶必须确保在整个施工过程中良好的船舶安全技术状况，并配套齐备合规的船用通航、应急与环保设备，船舶通讯、导航、控制、应急消防、救生、防污等船舶重要安全设备始终处于良好的工作状态。

3.2 合理精细编制施工方案

施工方案应在充分收集和分析作业水域的气象、水文及通航环境等有关资料的基础上，不断完善并认真落实。在满足施工需要的前提下，精细化控制施工方案，尽量减少各类施工船舶的数量[4]。施工时，认真完成现场船舶的施工技术安全交底，确保施工人员严格遵守施工安全操作规程，不得违章指挥、违章作业。

3.3 施工单位与管理单位间建立协调有效的沟通与管理方案

为保证施工期间施工船舶与过往船舶的安全，施工单位应与建设单位、航运、水利、海事等各部门建立有效畅通的联动沟通机制。根据施工实际需要，制定必要的管理规定和监督方案，必要时要进行交通管制，维护好水上交通秩序，船舶应服从管理部门的指挥调度，积极避让。

3.4 建立完备的安全管理体系和各项应急预案

依照国家和有关部门的相关法律法规和行业标准，落实关于通航安全的各项防范措施和对策[5]，做好施工船舶作业安全与水上交通安全等多方面统筹协调工作，建立安全生产与施工作业协调机制，健全安全生产责任制，根据船舶航行区域和天气情况，分别制订符合天气条件和航行水域的应急预案，加强预案演习演练，提高应对突发事件的能力，提升应急反应能力和水平。

4 通航保障示范工程实例

4.1 工程概况

西江航运干线桂平至梧州航道始于桂平航运枢纽船闸下引航道出口，终于梧州市界首，全长 181 km。西江航运建设一期工程实施时，为了节约投资采取了分期建设，先整治水深不足 1.8 m 的 11 处滩险，这些滩险包括：羊栏、鲫鱼、力江沙、将军、盐蛇、走马黄石、铁炉角、浪中、滕头、牛腿沙、龙圩水道。

梧州龙圩水道整治工程位于长洲船闸下引航道出口—梧州洗马滩头河段，长约 8 km，航道现状最浅水深为 1.7 m，设计船型为 2 排 1 列式 2 000 t 级顶推船队和 2 000 t 级货船，本滩设计的枯水最小航道挖槽尺度为：3.8 × 80 × 1 000 m，水下炸礁计算超深值取 0.4 m，开挖边坡取 1:1，超宽值取底宽每边各 1.0 m，疏浚超深值取 0.3 m，超宽值每边 2 m，边坡 1:3。龙圩水道—界首滩设计整治建筑物的目的是束水攻沙，避免航道发生淤积。整治工程采用疏浚和水下炸礁工程措施浚深，并进行筑坝施工。桂平至梧州航道地质钻孔揭示的需疏炸的岩土

有四种，分别为粉质粘土（4 级）、中细砂（8 ~ 9 级）、卵石（12 ~ 13 级）和岩石（Ⅶ ~ Ⅹ级）。岩石主要为中风化灰岩、砂岩、花岗细晶岩，其工程可钻性、可爆性、可挖性尚属一般，采用常规的内河钻机船和挖泥船就可组织施工，无需特殊的施工机具。根据河势和浅段的特点，筑坝工程主要采用丁坝、顺坝形式。坝体材料为块石，横断面为梯形。

4.2 河流概况

桂平 ~ 梧州河段属西江干流，上游起于郁江和黔江交汇之处上游 2.5 km 处的桂平枢纽，下游止于梧州市下游 12 km 处的界首，全长 186 km，落差 16.5 m，平均比降 0.089‰。航道起点上游为 1989 年建成的桂平航运枢纽，该枢纽建有千吨级船闸一座，下游最高通航水位为 38.52 m，最低通航水位 19.81 m，保证率 95% 的通航流量为 220 m^3/s。航道下段距梧州市区上游 12 km 有在建的长洲水利枢纽，该枢纽坝址控制流域面积 30 8 600 km^2，占西江流域的 87.4%，多年平均流量 6 100m^3/s，95% 保证率流量为 1 090 m^3/s，正常挡水位 20.60 m，水库总库容 56 亿 m^3，汛期（5~9 月）限制水位与死水位均为 18.60 m，枯水期（10~4 月）发电最低消落水位为 19.8 m。西江为含沙量较少的河流，据梧州水文站统计，多年平均含沙量仅 0.385 kg /m^3，但由于西江水量丰沛，多年平均水量达 2 212 × 108 m^3，多年悬移质输沙量达 7 950 × 104 t，是广西境内输沙量最大的河流。

桂梧航道所在浔江、西江河道较为宽阔，地势平坦，河岸为土质或石灰岩、砂岩组成，河势稳定。河床多为基岩、礁石或砂卵石组成，有些地区由沙层覆盖，沙层厚薄不一。浔江、西江具有水量大，沙量少，河道水深大的特点，河床宽段浅滩都具有洪淤枯冲的规律，西江一期工程桂梧航道水深由 1.3 m 提高到 2.3 m 的事实证明，开挖后浅滩是稳定的。

4.3 施工方案

本航道地处西江干流下游，属亚热带气候，冬无严寒，枯水期 (10 月至次年 4 月) 施工不受严寒、封冻的影响，根据水文气象观测资料，枯水期为少雨季节，主要以小雨为主，对施工作业影响不大。航道水深较浅，河床为石质，枯水期对船舶通航影响较大，同时，该段航道船舶通过量非常大，又与长洲船闸下引航道出口连接，又有西江三桥、西江大桥跨越，对施工有一定的影响，施工期内客观影响时间约为 20%。因此，施工方案既要解决施工布置，施工质量达到设计要求的目的，同时，更要满足施工与通航安全要求。

施工单位通过分析历年水位资料以后，利用冬季枯水期极低水位下礁石部分露出水面的特点，打破传统施工顺序，根据礁石的高程和水位情况，将整个炸礁范围划分为多个炸礁区，首先对炸礁范围南边满足钻爆船最低吃水要求的炸礁区进行施工、同时对露出水面凸出的高点进行捡平，挖泥船利用水位上涨，再对炸礁区进行清碴、机挖砂疏浚同时进行施工。根据航道现状及河床质的具体情况，选用斗容为 1.5 m^3 的抓斗挖泥船、0.75 m^3 的铲斗挖泥船及 120 t 钻孔炸礁船及相应的泥驳为主要施工船型。在进行了合理的工序安排后，整个炸礁作业连贯进行，保证了工程进度，大大减少了施工船舶的使用数量和交通流量。

4.4 施工与通航安全

龙圩水道航行船舶密度较大，本工程炸礁区、弃渣区又临近主航道，为了处理好施工与通航安全问题，需要制定严密的应对措施：

4.4.1 施工前将施工水域及作业计划呈报当地海事部门和航道部门批准，制定施工期间的通航管理措施和航标布设方案，实现了现场施工和通航同时进行。

4.4.2 根据地形、水位、航道实际情况，制定分区施工方案，最大限度的减少施工占用航道水域，满足了施工的平行作业。

4.4.3 施工前发布航行通告，将施工时间、地点、范围等告知各有船单位及个人，以便他们及时调整航行时间及路线。

4.4.4 进入施工现场的船舶全部按船检、海事部门要求进行检验和安检，保持良好的状态，避免海损事故发生。

4.4.5 在施工过程中，严格按《内河避碰规则》悬挂标志和灯号。加强瞭望，随时与过往船舶联系，主动避让[6]。

4.4.6 施工船舶设立兼职的安全值班员。各施工和辅助船舶上的通讯设备，采用规定频道保持联系，随时了解船舶动态，作好避让措施，及时向海事、航道部门通报施工情况。

4.4.7 加强航行安全管理，安排专人值班，加强与过往船舶联系。施工船舶主缆以及通航一侧采用锚链固定船，以减小对过往船舶的影响。

4.4.8 合理安排施工时间和施工部位，做好施工船舶安全工作，将施工对通航的影响降低到最低。

4.4.9 在施工与通航发生矛盾时，把过往船舶安全放在第一位，暂停施工作业，宁误施工，不误通航。

4.4.10 强化爆破施工的安全管理，在爆破时采取临时禁航措施，爆破前爆破船舶先做好准备，下航船一旦出现短暂间隔期，马上对上航船舶进行临时控制，在达到安全距离后立即起爆，然后马上恢复通航。

施工单位通过制定科学合理的施工方案，组织足够的人力、物力和各种施工船舶，在近三年的时间完成了水下炸礁约 26.22 万 m^3、液压分裂破碎礁石约 0.18 万 m^3、疏浚（机挖砂）约 50.1 万 m^3、抛坝约 6.74 万 m^3、干砌坝面约 0.58 万 m^3 等任务，按时完成了合同各项工作，同时施工期间保证了船舶通航安全，做到了施工与通航安全两不误的目标。

5 结 论

内河航道整治工程是一个复杂而又庞大的系统工程，水上施工专业性要求高，通航水域环境复杂，各类制约要素繁多，为保障通航安全，必须充分分析施工期通航水域的各类风险，合理组织施工，制定完备的保障方案，确保施工与通航互不影响。

参考文献

[1] 普晓刚等 . 西江航运干线（广西段）设计通航水位标准探讨 [J]. 水道港口，2015,36（6）：551-554.

[2] 彭浩 . 内河航道通航环境风险研究 [J]. 中国水运，2016,16（6）：43-44.

[3] 新井康夫等 . 航行安全评价中的自然环境条件的影响 [J]. 日本海上交通工学特集，1997.

[4] 尹云峰 . 疏浚施工中港口与航道通航安全保障措施研究 [J]. 中国水运，2018,38（1）：28-29.

[5] 中华人民共和国水上水下活动通航安全管理规定 [S].2011.

[6] 刘敬贤，于徽 . 中华人民共和国水上水下活动通航安全影响与论证评估 [M]，人民交通出版社，2011.

作者简介：

杜小燕，本科，主要从事水运航道工程工作，（E-mail）645690547@qq.com，13878828268

西江干线航道商品车滚装运输思考与研究

曹　斌　李　钊　庄惠子

(广西交通职业技术学院，广西南宁　530022)

摘 要：通过对西江干线航道商品车滚装运输的背景研究，从发展态势、货源保障、可达性、码头能力等方面进行可行性分析，从货源、时效、航线、船型、码头、成本等方面提出西江干线航道商品车滚装运输方案实施建议。

关键词：西江水运；商品汽车；滚装运输

0　引　言

据中国汽车工业协会统计，2015 年我国汽车产销量超过 2 450 万辆，已连续七年位居世界第一。目前，商品车运输采用公路、铁路、水路三种运输方式，其中公路运输占绝对主导地位。商品车公路运输距离已远超汽车的经济运距，普遍存在高能耗、高成本、安全系数低等问题，存在着超限运输及非法改装行为，给交通安全带来极大隐患。珠江—西江经济带商品车以公路运输为主导的物流模式正面临着前所未有的挑战，因此本项目以商品车物流为出发点进行调研。

从国内外实践来看，欧美发达国家的公路商品车运输逐渐转向区域短驳运输和“门到门”服务，是对铁路、水路等干线运输的有效补充；我国长江内河商品车滚装物流主要是以干线内河滚装运输为主，以公、铁为辅的水公、水铁多式联运模式。

从政策导向来看，近年来，国家陆续出台了关于现代物流业的相关政策，多式联运被提到了物流业发展的战略高度。2014 年 7 月，《珠江—西江经济带发展规划》指出，要推进跨区域重大基础设施一体化建设，以珠江—西江干线航道为主通道，构建互通两广、连接东盟、通达港澳、辐射云贵、江海联运的综合交通运输大通道。

从珠江—西江经济带的发展动态来看，广州《建设广州国际航运中心三年行动计划（2015 － 2017 年）》提出，举全市之力建设广州国际航运中心，实现国际航运中心、物流中心、贸易中心以及金融服务体系相互融合的格局，依托汽车这一支柱产业，广州港将建设广州南沙国际汽车物流产业园，推动江海联运物流运输方式，使广州港成为泛珠三角地区商品汽车滚装运输和进出口基地，此举必将辐射影响珠江—西江经济带。

以上背景，为西江干线航道开展商品车滚装运输提供了有利条件。本文将就西江干线航道开展商品车滚装运输的可行性及方案实施进行思考和研究，为西江汽车整车运输提供参考。

1　西江干线航道开展商品车滚装运输可行性分析

1.1　商品车滚装运输的发展态势分析

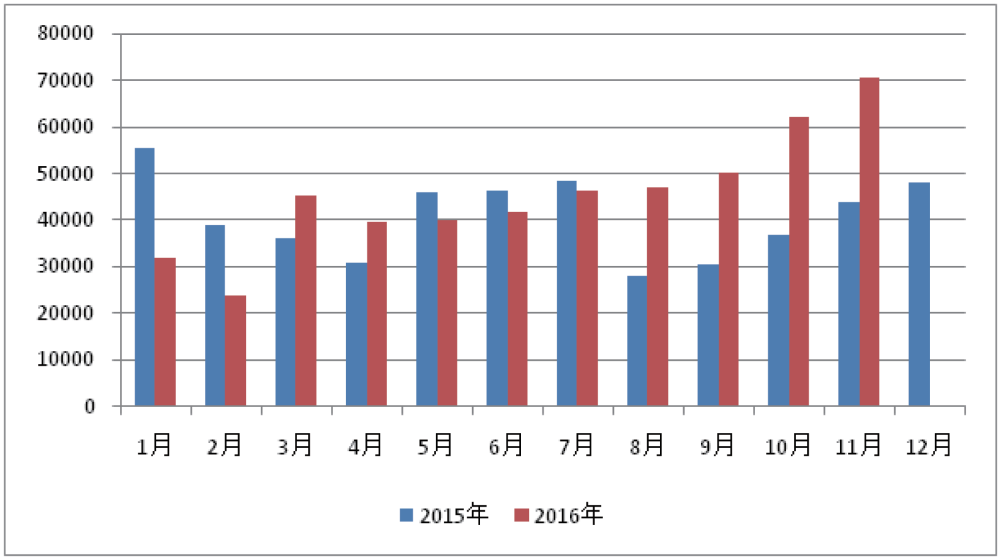
商品车水运优势在主机厂中已深入人心，当前除北汽、华晨没有与海港进行资本合作外，全国主要汽车主机厂都已与各海港进行资本合作。表 1 为目前广州 6 大主机厂 2016 年产量及水运比例。

表 1　目前广州 6 大主机厂水运比例

序号	主机厂	2016 产量（万辆）	水运量（万辆）	水运比例
1	广汽本田	42.9	12	28%
2	广汽丰田	69	12	17%
3	佛山大众	30	6	20%
4	广汽传祺	50	4	8%
5	广汽菲克	13	1	7%
6	花都日产	14	2	7%

随着《车辆运输车治理工作方案》的发布与实施，如今汽车整车运输采用水路、铁路运输的比重显著增加。表 2 为广州港南沙汽车码头有限公司 15、16 年业务量对比，从表中可以看到，2016 年 9 月份之后南沙汽车码头的业务量呈现出拐点式上升。

表 2　广州港南沙汽车码头有限公司 15、16 年业务量对比



1.2　西江干线航道滚装运输的货源保障分析

（1）出运货源

出运货源主要是柳州汽车工业基地销往北方海运优势地区（东北、华北、江苏、浙江）运量及出口运量。2015 年，柳州汽车工业基地乘用汽车销售量 150.7 万辆，预计 2020 年汽车销售量为 263.7 万辆，运量统计与预测见表 3。

表 3　西江滚装运输出运运输量

南车北运（销往北方海运优势地区运量）		出口	
2015 年	2020 年	2015 年	2020 年
34.6 万辆	55 万辆	1.34 万辆	2 万辆
		1860HQ（CKD 工程机械拆装）	8500HQ（CKD 及工程机械拆装）

备注：据自治区工信委数据

（2）回运货源

回运货源分 3 部分，一是承接南沙“北车南运”中销往西江航道（广州—柳州）腹地运量，二是广东 6 大主机厂销往西江航道（广州—柳州）腹地运量，三是承接南沙进口车中销往西江航道（广州—柳州）腹地运量；2016 年合计约 12.78 万辆。南沙形成了华南地区内外贸汽车聚集地，为西江滚装运输提供了“回头货”保证，具体分析见表 4。

表 4　西江滚装运输回运运输量

项目	数量	销往西江航道（广州 - 柳州）腹地运量比例	销往西江航道（广州 - 柳州）腹地运量
2016 南沙“北车南运”运量（供广东、广西、海南）	19.94 万辆	约 20%	3.98 万辆
2016 广东 6 大主机厂产量	218.9 万辆	约 4%	8.76 万辆
2016 南沙进口车运量	0.4 万辆	约 10%	0.04 万辆
合计	12.78 万辆		

备注：1.2016 年南沙内贸进出口运量

2. 缺乏足够数据支持，暂不预测 2020 西江滚装运输回运运输量

1.3　西江干线航道滚装运输的可达性、运输成本与时效分析

1.3.1　可达性

（1）柳州至广州南沙的可达性

“十三五”末柳州至广州航道全线可达二级航道标准，全年通航 2 000 吨级船舶，各航段条件见表 5。

表 5　“十三五”末柳州至广州通航条件

柳州 - 来宾	“十三五”末柳州以下可达二级航道标准，实现全年通航 2 000 吨级船舶。
来宾 - 桂平	按照二级航道标准建设，“十三五”末实现全年通航 2 000 吨级船舶。
桂平 - 梧州	按照一级航道标准建设，“十三五”末可实现全年通航 3 000 吨级船舶。
梧州 - 佛山	全年通航 2 000 吨级船舶
佛山 - 广州航道	全年通航 3 000 吨级船舶
柳州红花船闸	柳州红花水利枢纽二线船闸工程，工程建设规模为 1 座 2 000 吨级船闸（兼顾 3 000 吨级船舶通航）。
梧州长洲船闸	“长洲 1”号 2 000 吨级船闸，2 号 1 000 吨级船闸，新建的三线四线船闸按 3 000 吨级船闸建设。

备注：据广西润桂船运有限责任公司数据

（2）广州南沙至沿海各港的可达性

南沙开辟了上海、天津、大连、海口、青岛、烟台班轮航线，全覆盖柳州汽车销往的海运优势地区（东北、华北、江苏、浙江）。现有丰田有开设定期班轮，每周一、三、五从天津港到南沙港，每周二、四、六从南沙港到天津港。

1.3.2　运输成本与时效

（1）柳州—广州西江干线航道运输成本

以东风柳州汽车有限公司为例，目前公路运输费用为 0.82 ~ 0.85 元 / 车·公里，双排改单排后费用将提高到约 1.16 ~ 1.19 元 / 车·公里，全面合规后费用约为 1.64 元 / 车·公里。相关企业预计将按公路 80% 成本计滚装运费，柳州—广州约 600 元 / 辆。

（2）柳州—广州西江干线航道运输时效，见表 6

表 6　柳州 – 广州西江干线航道运输时效

序号	航段	单程距离（公里）	下航时间（小时）	上航时间（小时）
1	柳州装卸时间		16	8
2	柳州 - 桂平（不能夜航）	284	24	30
3	桂平 - 广州	466	47	55
4	红花船闸过闸时间		5	5
5	长洲船闸过闸时间		12	12
6	广州装卸时间		预计 8	预计 16
小计		750	112	126

备注：据广西润桂船运有限责任公司数据

（3）江—海联运运输成本与时效

《车辆运输车治理工作方案》的发布，使得汽车整车物流企业积极探索多式联运等先进的运输组织模式。在西江干线航道开展江—海联运运输的成本与时效分析见表 7。

表 7　江－海联运运输成本与时效

运输线路	成本（内河 + 海运）	时效（内河 + 海运）	辐射范围	
柳州 - 广州 - 大连	600+2000 元 / 辆	112+120 小时	东北地区	黑龙江
				吉林
				辽宁
柳州 - 广州 - 天津	600+2000 元 / 辆	112+96 小时	华北地区	北京
				天津
柳州 - 广州 - 烟台	600+1800 元 / 辆	112+96 小时		山东
				河北
				河南
柳州 - 广州 - 上海	600+1600 元 / 辆	112+64 小时	华东地区	江苏
				浙江
				安徽

以上数据均表明，滚装船运输与公路运输相比具有运量大、运价低、 安全的优势 ， 运价仅为公路运输的 5 0%左右 ， 既符合国家大力发展低碳经济和绿色物流的产业政策，也将大幅降低企业的物流成本。

1.4　南沙码头通过能力、堆存能力与挂靠船舶分析

广州港南沙汽车滚装码头岸线总长 623 m，建设有 3 个 5 万吨级深水泊位，年通过能力 100 万辆；堆场面积 37 万 m^2 及 8 万 m^2 的立体库位，可堆存商品车 2 万台。此外，正在建设 35 万平米的海嘉码头，海嘉码头年过能力 80 万辆，预计于 2018 年正式投入运营。目前南沙码头岸线与水面高差 4.5 ~ 5 m，无法接卸江轮。目前南沙码头接卸中甫航运、长航等船公司的 2 000 ~ 5 000 车位滚装船，以 2 000 车位船型为主，有相当一部分 5 000 车位以上海轮。广州港南沙汽车滚装码头为西江干线航道开展商品车滚装运输提供了强有力的运输保障。

2　西江干线航道商品车滚装运输方案实施建议

2.1　顶层设计

西江干线航道（柳州—广州）商品车滚装运输与广州南沙汽车码头对接开展“南车北运”、“北车南运”及进出口运输，需要西江集团与广州港务集团在联运品牌打造上加强顶层设计，成立联合工作组从货源组织、码头建设、航线规划、船型设计、成本控制、水 - 水衔接上进行系统规划。

2.2　政策机遇把握

《车辆运输车治理工作方案》于 2016 年 8 月 18 日正式发布实施。2016 年 9 月 21 日起所有双排车辆禁止上路，政策落实后，车辆运输运力变化见表 8。

表 8　车辆运力变化

序号	政策内容	运能变化（辆）	运力下降
1	“双排车”改为“单排车”	21 降至 14	33%
2	“单排车”改为“标准车辆运输车”	14 降至 9	36%

车辆运输车运力下降将导致全面合规的运输成本增加约 1 倍，柳州主机厂（目前全部陆运）是受到政策压

力最大。

为解决运力、确保成本优势，对柳州主机厂目前存在两个可能方案：一是柳州陆运至钦州滚装码头开展“南车北运”与“北车南运”，二是柳州官塘港江运至南沙滚装码头开展“南车北运”与“北车南运”。虽然当前西江航道虽然只能全线通航 1 000 吨级江轮（300 车位），但可结合“十三五”末（2020）西江航道通航能力，在 2018 年以前提出可行方案，进行有效尝试，造成广泛社会影响，否则将错失政策机遇。

2.3 货源组织

2015 年柳州销往北方海运优势地区整车约 35.94 万辆，但全部采用陆运运输。要充分利用当前政策机遇，吸引柳州主机厂下江下海、吸引主机厂入股共建西江滚装码头，使官塘港发挥应有的作用。就柳州汽车工业基地的四大主机厂而言，上汽 2015 年销量 204 万辆，其中柳州生产 114.5 万辆，是目前柳州基地主机厂中受到政策压力最大的；2016 年上汽北车南运 10 万辆，在南沙码头北车南运总量中约占二分之一，因此该主机厂是方案的重点合作对象企业。

2016 年销往西江干线（广州 - 柳州）腹地的整车约 12.78 万辆， 在未来方案实施过程中，还会存在货源对流不平衡的问题。需要与广州港联合推介项目，吸引广东主机厂、北方主机厂提高下江下海比例。

2.4 时效问题

目前柳州至广州下航时间为 112 h，上航时间为 126 h，750 km 的航程耗时比广州 - 天津的耗时（96 h）还长。问题在两方面：一是柳州至桂平不能夜航，要解决不能夜航的问题；二是过闸时间太长，红花船闸 5 h，特别是长洲船闸需要 12 h，要赋予滚装船优先通航权，以缩短过闸时间。

2.5 航线规划

目前南沙码头为丰田开设有定期班轮，每周一、三、五从天津港到南沙港，每周二、四、六从南沙港到天津港，对接该航线对西江干线航道开发滚装班轮极为有利。但是柳州出运车辆海运优势地区是东北、华北、江苏、浙江，需要挂靠烟台、大连、上海，因此要规划航线，增加挂靠港。

2.6 船型设计

目前，南沙码头滚装船都在 2 000 车位以上，有相当一部分 5 000 车位的海轮。300 车位以下江轮在南沙对接，存在运能不匹配的问题，极有可能过夜待船，船期上损失较大，成本也相应提高。“十三五”末，设计 700 ~ 800 车位（可参考长江航运中的东风船舶“民强”轮，设计吃水 2.8 m）江轮可以有效降低单车成本，提高效益，并掌握船期话语权。

2.7 码头改造

南沙码头不能接卸吃水较浅的江轮，需要改造升降码头（可参考上海海通码头），需要与广州港务集团系统规划码头升级改造方案。

2.8 成本控制

通过南沙码头进行水 - 水中转成本较高，10 万货值单车水 - 水中转费 140 元 / 辆且随单车货值体升，中转成本过高，需要与广州港务集团从联运方案角度出发协调降低水 - 水中转费用。

3 结 语

汽车滚装船运输作为一种高效率的商品汽车专业化运输方式，以其在经济性、节能环保、运输安全性等方面的突出优势，赢得了汽车厂商及物流公司的普遍认可。无论是对于企业（汽车生产商、物流企业），还是汽车整车运输行业的发展，西江干线航道商品车滚装运输均有较好的发展前景。长江内贸滚装运输也为西江滚装运输提供有益的借鉴。相信在多方努力下，西江干线航道商品车滚装运输终将会成为现实，积极推动沿线地区经济的增长

参考文献

[1] 詹利 . 我国汽车滚装物流发展的重点 [J]. 综合运输 ,2008(04):54-57.

[2] 冯益增 . 中国整车物流的对策研究 [D]. 大连海事大学 ,2006.

[3] 张俊 . 商品车内贸滚装运输行业的现状及未来发展 [J]. 科技展望 ,2016,26(28):243-244+247.

[4] 王明文 , 聂婷婷 , 石琼 . 推进我国商品车多式联运发展对策研究 [J]. 综合运输 ,2016,38(06):32-34.

[5] 丁伟 . 现代物流联合运输区域协调管理及网络构建研究 [D]. 中南大学 ,2012.

作者简介：

曹斌，广西交通职业技术学院管理工程系副主任，经济师，研究方向 : 国际航运与综合物流、交通运输系统优化与决策

李钊，广西交通职业技术学院管理工程系副主任，讲师、经济师，研究方向：统计学、网络营销

庄惠子，广西交通职业技术学院物流管理专业教师，经济师，研究方向：运输管理、物流运筹、供应链管理等

广西内河船舶附属艇水上交通安全监管措施研究

彭　瑾　毕昌明

（贵港海事局，广西贵港　537100）

摘 要：内河船舶附属艇（以下简称“附属艇”）是内河船舶生产、生活的配套设施，是船员离船上岸的主要交通工具，通常用于船员上岸办理业务、采购备品配件、补给生活物资、协助带解缆作业等。随着航运行业快速发展，船舶数量日益增长，内河船舶逐渐大型化，而附属艇体积小、速度快，活跃穿梭于内河航道上，易发生艇体翻沉、人员落水失踪溺亡等水上事故，是水上交通安全重大风险源。但目前还未制定相应的附属艇安全管理规定或指南来规范或细化附属艇的登记、检验、航行、停泊、作业以及附属艇的监管要求，附属艇安全监管还存在一定盲区。本文主要针对附属艇带来的水上交通安全风险，结合安全监管和通航安全保障面临的新形势和新要求，深入调查研究，坚持从实际出发，研提有关附属艇水上交通安全监管方面的建议。

关键词：内河船舶；附属艇；水上交通；安全管理

0　引　言

附属艇具有结构简单建造成本低、操纵原理简单“上手快”、艇体收放简单速度快等特点，内河运输船舶大多配备有附属艇。虽然附属艇为船员开展船舶生产活动和住船生活带来了便利，但是伴随而来的水上交通安全问题愈发突出，内河附属艇倾覆、翻沉事故频发。此类事故的发生将会带来严重后果。一是艇体打捞、维修会产生经济损失；二是可能会导致人员落水、失踪、溺亡；三是引发推进装置燃油泄漏，将会严重污染水域环境；四是若不及时打捞事故附属艇，会对在航船舶造成水上交通安全隐患。

2015 年 7 月 16 日，“桂南 XX”船附属艇在南江渡口由北向南横越航道时，与装载 810 t 河沙由平南开往横县的“桂平南货 XX”船发生碰撞。事故造成附属艇左舷凹陷、主机损坏，驾驶员落水。2020 年 6 月 2 日，“卫 X 号”船附属艇在浔江桂平江口水域往返“卫 X 号”途中，发生侧翻沉没事故。事故造成附属艇上两人落水，1 人死亡，附属艇沉没。

1　内河船舶附属艇现状分析

1.1　常见附属艇结构

内河船舶附属艇的结构多为横骨架式，推进系统由柴油机、平板舵、固定螺旋桨、操纵装置等部件构成；常见附属艇主尺度：船长 6 ~ 10 m，船宽 1. ~ 62 m，型深 0.8 ~ 1 m；常见附属艇的收放方式：一般固定在船舶尾部，通过吊机升降可以收放至水面使用。图 1 为船长为 8.5 m、船宽为 1.6 m、型深为 0.9 m 的内河船舶附属艇的俯视图和右视图。其结构特点如下：一是船体建造无设计、验收的安全保障。经调查发现，附属艇未在船舶检验证书中记载，不作为船舶检验项目。附属艇的建造无设计图纸，由船东提出主尺度要求后，船厂焊

接师傅根据工作经验进行放样与焊接，并且未经船体结构强度计算、焊缝质量监督、试航等专业验收程序，直接交付船东。二是附属艇稳性差。附属艇一般将燃油箱挂于船舷内侧，单边悬挂与自由液面的特点对横倾的回复力矩产生影响。驾驶者在船艉甲板操纵附属艇时或者随艇人员在附属艇内站立时，重心升高导致稳性高度减少，当艇内站立人数过多导致重心高于稳心时，小横倾角也极易产生翻沉事故。三是操纵性能差。因附属艇的操纵装置十分简易，在速度与方向操控上做不到精细调整，在应对风浪、避碰、靠离泊等操作时容易产生失误。四是缺少安全与防污染设施。附属艇缺少人员保障设施，甲板无防滑点，船体无护栏，人员落水风险高；柴油机、燃油箱露天放置，遇到下雨天或者设备故障，柴油容易泄漏到江里污染水域。

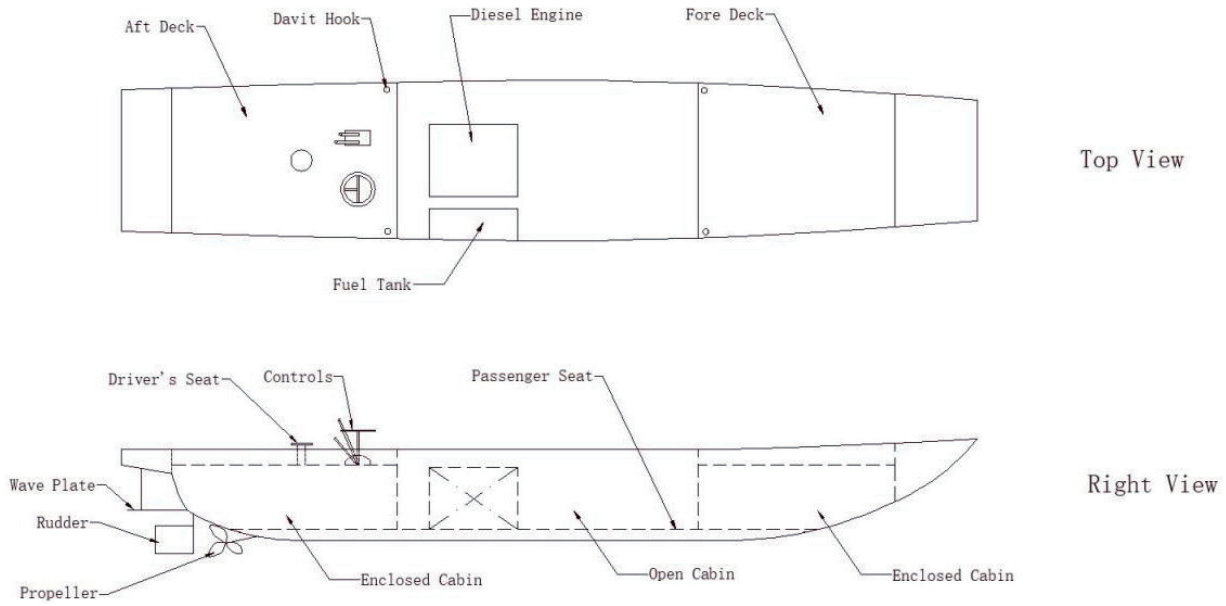


图 1　附属艇的俯视图与右视图

1.2　附属艇水上交通安全风险因素分析

（1）人员

部分船员守法意识与安全意识薄弱。有时附属艇驾驶者违反避碰规则，强行横越它船船头，在桥区、通航密集区和待闸水域随意穿插，对正常航行船舶造成干扰，与它船发生碰撞，擦碰水上水下障碍物风险增加，对过往船舶带来了巨大的安全航行威胁；附属艇主尺度偏小，抗风浪能力弱，加上航速快，乘员容易因未坐稳扶好跌落水中；乘员在登离附属艇时，可能因为舷梯湿滑、对环境的分析判断不准确、登离方式不安全等原因，失足落水；部分附属艇驾驶员不顾气象、水文、环境、设备的影响冒险航行。

附属艇驾驶员未经过专项培训，操作技能不熟练，不了解附属艇的限制使用条件。人员起吊、释放附属艇时不规范操作，附属艇快速行驶时小回转半径转弯，靠离泊方式不当，都有可能造成附属艇倾斜、翻覆和碰撞的危险。

（2）设备

附属艇构造简单，操纵性和稳定性较差，未经过船舶检验机构检验，不满足小型船舶检验技术规范要求。附属艇未配备通讯系统、航行设备、号灯号型，减少了与其他船舶沟通联系的渠道，也增加了被其他船舶辨识、避让的难度；未配备救生、消防、防污染设备，发生水上事故时的自救难度大。

（3）环境

附属艇不具备夜间航行、在恶劣天气下航行的能力，船员为了维持船上正常生活与值班，抱着侥幸心理冒险使用附属艇。夜间驾驶员分辨力下降，加上天气状况和水流的影响，对附属艇驾驶员操舵技能、保持安全航

速和遵守水上交通规则的要求更高。附属艇稳性、抗沉性低，操作性能和抵抗风浪的能力弱，安全技术状况差，不适宜在汛期水流急、大风暴雨、浓雾等恶劣天气水文条件航行。

（4）管理

广西尚未出台附属艇安全管理规定或指南。广西拥有西江干线、黔江、红水河和桂江等多条高等级内河航道，航运经济发达，运输船舶众多，附属艇事故多发，但目前还未制定相应的附属艇安全管理规定或指南来规范或细化附属艇的登记、检验、航行、停泊、作业以及附属艇的监管要求，附属艇安全监管还存在一定盲区。

航运公司安全管理制度不健全。多数航运公司和船舶未将附属艇纳入安全管理范围之内，对附属艇的管、用、养、修制度及操作规程未作出明确要求，导致附属艇的驾乘、收放操作及维护保养不规范，存在较大安全隐患。

1.3 现行法规、规章文件要求

（1）《中华人民共和国船员条例》第十六条第（三）项：船员在船工作期间，应当遵守船舶的管理制度和值班规定，按照水上交通安全和防治船舶污染的操作规则操纵、控制和管理船舶。《中华人民共和国船员条例》第十八条第（七）项：船长管理和指挥船舶时，应当保障船舶上人员和临时上船人员的安全。《中华人民共和国船员条例》第二十二条第一款、第二款：船舶上船员生活和工作的场所，应当符合国家船舶检验规范中有关船员作业安全和防护的要求，用人单位应当为船员提供必要防护用品。这里对船员正规操作船舶进行了规范和要求，明确了船长（包括履行船长职责的驾驶员）负责船上乘员的安全，同时对保障船员作业安全和防护设备的配备提出了具体的要求。

（2）《中华人民共和国内河交通安全管理条例》第六条第（一）项：船舶经海事管理机构认可的船舶检验机构依法检验并持有合格的船舶检验证书，方可航行。《中华人民共和国内河交通安全管理条例》第九十一条第（二）项：船舶，是指各类排水或者非排水的船、艇、筏、水上飞行器、潜水器、移动式平台以及其他水上移动装置。由此可见，附属艇属于《中华人民共和国内河交通安全管理条例》明确的船舶范围，应当经海事管理机构认可的船舶检验机构依法检验并持有合格的船舶检验证书。

（3）《船舶检验管理规定》第三十二条第三款：12 人及以下载客船舶的法定检验技术规范可由可由省、自治区、直辖市交通运输主管部门制定，并报交通运输部海事局备案；省、自治区、直辖市交通运输主管部门未制定的，参照交通运输部海事局制定的小型船舶法定检验技术规则检验发证。附属艇的法定检验技术规范可由可由省、自治区、直辖市交通运输主管部门制定或者参照交通运输部海事局制定的小型船舶法定检验技术规则检验发证。现行法规对附属艇的检验和发证有比较明确的规定，也就是说附属艇的检验发证有畅通的渠道。

（4）《内河船舶值班规则》第十四条第三款，船舶航行和作业期间，舱面人员进行临水作业时应当规范穿着救生衣。《广西海事局关于整治内河船员不按规定穿着救生衣行为的通知》（桂海安全函〔2018〕171 号）也指出救生衣能够有效减少船员意外落水造成溺亡的概率，强调了救生衣的重要作用。这些规章和规范性文件都明确提出船上乘员应当规范穿着救生衣，阐述了穿着救生衣的重要意义，是约束乘员规范穿着救生衣，保障乘员人身安全，提高自救和获救成功率的重要依据。

2 安全管理存在的难点、卡点

2.1 广西尚未出台附属艇安全管理规定或指南

广西拥有西江干线、黔江、红水河和桂江等多条高等级内河航道，航运经济发达，运输船舶众多，附属艇事故多发，广西海事局也出台了《关于集中整治船员临水作业不按规定穿着救生衣行为的通知》（桂海安全函〔2020〕251 号）等多个规范性文件，但目前还未制定相应的附属艇安全管理规定或指南来规范或细化附属艇的登记、检验、航行、停泊、作业以及附属艇的监管要求，附属艇安全监管还存在一定盲区。

2.2 附属艇发生事故后调查取证难

因附属艇存在目标小、速度快、抗风浪等级低等特点，在恶劣天气、水文条件下航行风险较大，对驾驶员的操纵水平要求较高，一旦发生事故，均会造成附属艇翻沉或严重损毁，沉船打捞和现场勘查困难，给后续调查取证带来困难，不能及时还原事故真相。

2.3 航运公司安全管理制度不健全

多数航运公司和船舶未将附属艇纳入安全管理范围之内，没有认识到登乘及使用附属艇过程中存在的安全风险。航运公司对附属艇及其回收装置的管、用、养、修制度及操作规程未作出明确要求，导致附属艇的驾乘、收放操作及维护保养不规范，技术状况差，存在较大安全隐患。

2.4 附属艇安全技术状况差

通常附属艇未经正规造船企业生产，所使用的主机为废旧机器，没有配备安全航行所必须的号灯、号型、通信等设备，未经船舶检验机构的建造检验，其安全技术参数不满足船舶检验技术规范要求，在航行过程中受恶劣天气和水文环境影响较大，安全风险突出，达不到进行船舶登记的条件，无法购买商业意外保险。附属艇航行中，容易造成人员伤亡和巨大的财产损失。

2.5 人员缺乏安全操作培训

部分船员上船前没有进行充分的安全培训，甚至不熟悉附属艇、收放设备的操作原理，没有按照安全的方法使用和操纵内河船舶附属艇。

3 安全管理对策及建议

3.1 研究制定船舶附属艇安全管理规定等规范性文件，统筹开展广西内河附属艇安全监管

根据广西内河船舶附属艇现状，研究制定关于船舶附属艇的强制性检验、驾艇人员的培训与发证等规范性文件，明确附属艇性质、安全技术要求和设备配备需求，厘清各监管部门管理边界，进一步细化执法依据，逐步更新淘汰现有附属艇，推动附属艇的正规化、标准化、规范化管理。将附属艇安全管理制度检查纳入航运公司安全与防污染监督检查内容中，对驾驶附属艇人员统一开展理论知识与实践操作安全培训，并颁发《附属艇驾驶安全培训合格证》，禁止无证驾驶附属艇。

3.2 提高船员安全意识，筑牢安全管理思想防线

要求船员严格落实附属艇安全航行“五要四不要”，即：要安排专人定期维护保养附属艇，要安排持有驾驶资质证书的船员驾艇，要选取经相关部门检验认可的产品配备附属艇，要充分认识登乘附属艇时潜在的安全风险，要在驾乘附属艇时穿着救生衣；不要在船舶航行途中收放附属艇，不要在附属艇施放或吊起过程中随艇，不要超过 3 个人一同乘坐附属艇，不要在台风、雷雨大风、浓雾等恶劣天气期间驾驶附属艇航行。

3.3 督促航运公司建立健全附属艇安全管理制度，夯实安全生产主体责任

一是制定附属艇安全操作制度。实施专人管理，规范附属艇使用程序，定期开展隐患排查。明确附属艇保养、释放、回收、使用等方面的责任人及具体要求，专人负责使用前安全检查、维护保养和登记管理，保障附属艇满足安全航行与防污染的规范要求。要求附属艇实行“签单发航”制度，在开航前不仅要开展附属艇开航前自查，还要对乘艇人员进行安全提醒、检查救生设备及其属具、检查登乘装置和防护设备、查看救生衣穿着是否符合标准并判断外部天气状况能否开航，在“安全员”签单后方可发航。二是完善人员培训教育制度。要求航运公司日常安全教育培训、新聘船员到岗前培训需包含附属艇安全管理的内容，并定期开展典型事故案例警示教育。三是健全应急演练制度，优化应急预案。指导船员开展附属艇应急释放、艇体翻扣自救、落水人员救援、燃油泄漏防污染等应急演练，并及时评估演练效果优化应急预案，提高船舶船员事故预防预控能力和应急处置能力。

3.4 水上交通安全监管部门构建动静态结合、智能现代化安全监管模式，营造安全、清洁的通航环境

水上交通安全监管依托全要素水上大交管平台，搭建“线上＋线下”双重巡查、“静态＋动态”双重监管的综合执法模式，构建精准化、现代化、智能化附属艇交通安全动态管控系统。一是严把“船舶适航、船员适任”关口，从严打非治违。发挥好“千里眼”CCTV 覆盖面广、即时可视、高清取证的优势，多方位全覆盖电子巡航与快响应高效率现场执法相结合，重点盯防船舶聚集区、船员活动频繁码头水域，靶向打击超员、无证驾驶、不穿戴救生衣等违规行为，实现“处罚一个、震慑一批、教育一片”的目的。二是研究制定附属艇检查指南，统一规范执法检查工作要求。执法人员对标对表开展检查，切实做到“对船舶同一个标准、对船员同一个要求”，杜绝差异化执法。三是开展附属艇专项检查，扫除安全监管盲点。结合现场安全监督检查，严格排查附属艇安全状况是否存在缺陷，并对船员开展履职能力检查，重点检查船员操作附属艇释放、回收、驾驶、应急等技能，对于附属艇存在安全隐患的船舶，要求开航前纠正。四是持续推进高素质船员队伍建设，将附属艇操作技能纳入船员培训和实操评估考核抽查项目，进一步提高船员附属艇操作水平。五是开展典型事故案例进企业进船头活动。收集整理涉及船舶附属艇险情事故和典型违法行为案例，制作宣传折页、警示教育片、宣传横幅，深入航运企业、船舶停泊聚集区，广泛开展警示宣传。

3.5 研究附属艇建造、检验、监管、通报跨单位衔接工作，构建共管共治共享联动管理体系

结合交通运输部水上交通安全信息共享共治专项行动，畅通数据共享、信息通报、问题沟通渠道，推动附属艇纳入正规船舶管理。在相关研究成果的基础上，加强与船检机构的沟通协调，形成附属艇检验共识，争取将船舶附属艇列入运输船舶检验项目，明确附属艇的设计、建造、主机功率、主尺度、相关属具配备和检验要求，作为运输船舶救生艇或其他重要附属设施实施常态化检验和监督。开展附属艇违法行为通报，实施多部门联合惩戒。持续巩固拓展运输船舶违法违规信息跨区域跨部门通报专项治理成果，安全监管部门将涉及附属艇违法行为向金融监管部门、交通运输主管部门、船籍港海事管理机构、行业主管部门通报，纳入海事政务办理红黑黄榜信用管理，实施更加严厉的联合惩戒措施，提高其违法成本从而倒逼各方筑牢附属艇使用安全防线。从而统一各方思想认识，认清附属艇乱象根源，彻底根治附属艇监管顽疾，扭转附属艇违法行为、险情事故多发形势。

参考文献

[1] 梁栋栋 . 广东内河船舶附属艇安全管理探究 [C].// 中国航海学会内河海事专业委员会 . 中国航海学会内河海事专业委员会 2023 年海事管理学术年会优秀论文集，2023：23-24.

[2] 扬州海事局 . 扬州海事局创新实施交通艇“签单发航”制度强化交通艇安全监管 [EB/OL].(2024-05-06)[2024-06-08].https://www.js.msa.gov.cn/art/2024/5/6/art_263_1499021.html.

作者简介：

彭瑾，一级行政执法员

毕昌明，政务中心主任，（E-mail）819797578@qq.com,18378580423

广西航运文化中伏波文化与龙母文化的传承与发展

钟童建超　钟　叶

（百色海事局，广西百色　533800）

摘 要：在漫漫广西土地上蜿蜒着西江江水，而西江流域奔腾而来的航运文化也是广西流域的一大内容。任何一种文化都有其发展及演变，本论文从中国传统文化的角度，以伏波文化与龙母文化为例，分析广西航运文化的传承与发展规律以及现实意义。

关键词：广西航运文化；伏波文化；龙母文化；传承与发展；传统文化价值观

1　前　言

1.1　伏波文化简介

伏波将军为西汉时期开始使用的一种敕封军队统帅的封号，象征能征善战的军事才能。从西汉到魏晋南北朝，虽然有数十人被封为伏波将军，但是仅有西汉时期的路博德和东汉时期的马援成为后世广泛祭祀的对象，形成富有地域特色的伏波信仰现象。两位伏波将军都曾在岭南地区立下赫赫战功，岭南的伏波信仰包含了马援信仰和路博德信仰，一些地方还有将两位伏波将军合祀的现象。[1]

本文仅研究伏波将军马援。对于马援的研究，已经有相当多的成果，中国的民俗文化里，对于神的信仰演化有很多种模式，历史人物神化就是其中一种。伏波将军马援戎马倥偬一生，为国捐躯，却为奸臣所害，是中国历史中颇为典型的例子。

1.2　龙母文化简介

一说龙母文化，龙之母，首先龙母文化就是龙文化的一个源头，其次龙母与伏波将军不同，龙母到底是谁，是否真实存在过，都未经史实考察，但是龙母在广西人们的心中就是水神。在广西民俗文化里，龙母与妈祖的水神不同的是，妈祖是海神，龙母是河神。传说在梧州龙母在西江边上拾到一枚龙蛋，孵出 5 只小龙，龙母谆谆教诲使得这五只小龙健康成长。

正值西江水害频发，于是有了龙母和龙子们带着乡亲们治理水害的美谈。

1.3 广西西江航运文化

西江流域的地貌体现了广西峰峦回环，溪洞深密的特征，沿江的地形地势多变，有丘陵、中山峡谷，石灰岩峰林等，在西江主要支流右江流域，处于云贵高原向广西丘陵过渡地带，呈现高原河流的特征。西江横贯广西全境，在社会历史进程中，一直发挥着交通枢纽，文化枢纽等重要作用。西江流域，涵盖多民族、多自然生态环境的区域，有丰富的历史纵深的积淀，蕴藏了多样的资源。在西江流域有一个非常突出的文化现象，沿江两岸几乎每一个村庄都有神庙。

2 伏波文化

2.1 伏波文化的起源

据《后汉书·马援列传》，马援追随汉光武帝刘秀，是东汉开国之臣，马援一生都在马背上，正如他自己当初的誓言“丈夫为志，穷当益坚，老当益壮。”[2] 马援二平岭南之后就蒙冤身死。马援病死在壶头山汉光武帝听信梁松谗言追回他新息侯印绶。

伏波文化，是西江人民对伏波将军的数年兢兢业业为民办事的回忆，也是对伏波将军为国捐躯却最终蒙冤的反抗。神像落成，伏波庙在岭南如星星之火，时间在凌厉的历史上蒙上一层纱，神话流传到我们现代，伏波将军已经不再只是一个将军了，根据《伏波庙碑记》，[3] 他疏浚南北流江，使得楼船由逆水变成顺江千里，可以说是中国水军史上的一大壮举。而且，航运人行走西江流域都会去伏波庙祈求平安顺利，这都是广西航运文化中伏波文化的体现。如今的伏波文化不光是民众对神单一的信仰，还反映着中国传统文化中爱国报国的思想，这构成了当今航运时代广西航运文化的一大特色，广西地处岭南，自古就是少数民族聚集之地，但是热爱祖国为祖国经济繁荣做出贡献的精神体现在伏波文化当中。

2.2 伏波文化的发展

建武二十五年（49年），马援病死马援死后，明帝建云台，将建武时期名臣良将画像挂于云台“独不及援”。[4] 建初三年（78年），章帝 “谥援曰忠成侯”，马援被正名。唐开元十九年 (731年)，马援被敕封为配享太公庙的七十二弟子之一。“春秋取仲月上戊日祭，诸州宾贡武举人，准明经进士，行乡饮酒礼，每出师命将，辞讫，发日，便就庙引辞。”[5] 宋代，元丰五年 (1082年）七月，获“封忠显王”；大观元年（1107年），赐庙额“威武”；绍兴五年 (1135年）“加忠显佑顺王，又加封忠显佑顺灵济王”；隆兴二年 (1164年)，“赐额‘升德’”[6] 宋代对伏波神的多次敕封，源于地方官员奏报他显示了神迹。人们在相信伏波神显示神迹，体现他在民间已经有了深厚的信仰基础，成了能够保护地方的地方神。元明清，伏波由水神变成广义的神。伏波庙香火鼎盛。这里一方面，是中央政权对伏波将军的神化，一方面是民众配合甚至主动地去供奉。

从伏波文化的发展与传承来看，历朝历代的政治统治阶级都将伏波将军作为正面教材在宣扬，结合广西特殊的地理位置和居住民特点，伏波信仰一方面统治阶级为了安定少数民族，希望利用马援等英雄人物的文化记忆达到加强社会控制的目的；一方面反映了西江人民的善良美好的品质。

2.3 伏波文化与广西航运文化

“昔者圣人之作《易》也，将以顺性命之理。是以立天之道曰阴与阳，立地之道曰柔与刚，立人之道曰仁与义”。[7] 在中国传统思想中，一个人的肉体的死亡是必然的，自先秦就有着向死而活的观念的提出，但是精神是可以不消亡的。从辩证法的角度来看，对于伏波将军他自身而言，他已经死亡，他无法再与这个世界进行任何沟通；对于我们来说，伏波将军的事迹，他的文章流传至今，他的行为仍然影响着我们，这种影响力的存在，是经过历史与社会的检验的，因此他仍然没有失去作为一个人的相关特性，他并没有完全消亡。伏波文化的兴起从侧面反映了儒家文化在社会的影响。

马援病逝时，五溪征蛮战争还没有结束，壶头山伏波祠应是马援死后所建。人死后建立的祠庙“百姓在神祠中的祈祷往往从个人的利益出发，希望祠主显现灵验，以向祠主缴福，祠主已被视作具有能够控制自然与人生进程的超人力量。”[8]

伏波庙的分布地点多在江边，其超人力量体现在免除水旱灾害和保障舟楫平安方面，水神特质比较明显。不管是官方组织的，还是民间的“舟人过者必割牲洒酒以祭”[9]，“牢系船头齐上崖，咚咚打鼓祀伏波”[10]，“伏波有高祠，门前两黄纛。舟子匍拜诚，割鸡进香烛”[11]都与祈水有关，希望伏波发挥超自然力，达到风调雨顺，出入平安的目的。伏波庙还成为人们求子、许愿的场所，伏波神也成为有求必应的万能神。

广西航运文化与其他地域的航运文化最大的不同点就在于其宗教信仰，如前言所述，西江流域庙宇林立，是其他流域所没有的。伏波信仰作为西江流域的一大宗教信仰，不仅构成了广西航运文化的主要内容，而且伏波信仰在历史的进程中侧面反映中国传统文化的核心价值观，尤其值得注意的是，伏波信仰其实也是在中央政权和地方民众的相互作用下发展传承，神职功能强化泛化，这反映了中央对地方的控制以及地方对自己的文化认同。

3 龙母文化

3.1 龙母文化的起源

龙母文化源于传说，传说有各种不同的说法，但大体情节类似，龙母故事发生在先秦时代，一说龙母是弃婴被渔翁收养，一说龙母是西江流域某氏族的首领，龙母在因养五龙子才被称为龙母。传说中龙母有很多功绩：首先就是她带领五龙子抗击洪涝灾害，这与西江流域水患频发有关；其次龙母是航运人心中的保护神，由于西江水流湍急而且古代航运设备远远不及现代，古人一直认为西江流域是险要的水域，“德庆州之悦城水口， 环山枕涛， 锁钥江滨 , 故为一州门户， 而溯流而上 ，由苍梧直达滇黔；顺流而下， 则与珠海凌江各浸相连毗 。崇崖怪石， 飞湍危滩 , 澎湃汹涌 , 若非有神以司之， 则舟楫之行 ，祸且不测。”[12] 最后，龙母不光能主宰水域上面的福祸，她还能护佑孕妇顺利生子，幼儿身体康健。

3.2 龙母文化的发展

龙母文化本质上是龙文化的起源，笔者查阅文献，历朝历代对于龙母的文献记载如下：东晋干宝的《搜神记》中描述了女子生蛇；弃蛇野中；母亡，蛇归祭母；哭母[13] 这样的一个情节。虽与后代龙母传说出入尚大，但龙母传说至少在汉代就已经成形。

南朝时期，沈怀远的《南越志·端溪温媪》[14] 里面提到的龙母传说基本上就是西江龙母文化的源头，大概是温媪水边捡到一大卵；孵出龙子；温媪治鱼误断龙尾；龙子离去，数年后归来；秦始皇召媪入宫，龙子阻挠而不得；媪殒，龙子葬母这样一个情节。唐宋时期，唐代刘洵的《岭表录异》[15] 里面将老妇人说成是丧偶的寡妇，说明传说所在的时代更进步了，因为一般的感生神话都发生在只知有其母而不知有其父的母系社会，情节也大多是老妇人或未婚女子感孕育子，并未提及有配偶的，而将龙母的身份转变为寡妇，说明当时社会已由群婚进化到对偶婚的文明时期；二是将龙母的职业由捕鱼以资日给改为绩布为业，说明龙母传说所在的时代已由渔猎社会过渡到农耕社会；三是龙子由一守宫变为一斑四青的五小蛇。可以看出，这已经是后世大多认知的龙母传说的来源，因此，唐宋时代的龙母传说已经成熟。

明代，洪武九年（1356 年），龙母得到了特殊的封典与诰敕。其实自唐代龙母就已经进入国家神系，处于封建社会的正祀地位，受到历朝历代的敕封。朱元璋在洪武九年的敕封在笔者看来一方面是封建国家利用民间信仰资源来加强对岭南地区的统治；另一方面是龙母信仰所宣扬的孝道观念， 正符合封建国家的社会伦理要求 。而且之前龙母庙在宋代大观戊子年被宋徽宗赐额“孝通庙”。这里也使得龙母信仰区别于其他宗教信仰，成为孝文化的内容之一。明清时期的龙母文化已经是中央政权弘扬“孝道”的一大载体，而“孝文化”一直是中国传统文化的伦常观的体现。

3.3 龙母文化与广西航运文化

在五伦之中，君臣关系和父子关系在儒家伦理中的重要性又更高一些，忠德和孝德是五德中最重要的两个德目。[16] 孝是比忠更重要的德目，经历代儒家学者和官方所提倡，孝在儒家伦理体系中的地位是至高无上的，龙母文化中区别于伏波文化就在于这里。

在西江流域，敬奉龙母的庙宇有 300 多所。[17] 龙母文化可以说是西江文化的内核，龙母的传说事迹中多提到的龙母抗洪救民的故事反映了古代人民勇于挑战艰难的自然环境的大无畏精神；龙母捡龙蛋细心教养而不是

残害致死又反映了人与其他物种和谐共处的友善思想，正因为如此现在在西江一带遇青蛇必放生这一习俗也是龙母文化慈悲所在；龙母传说里为历代帝王所重视的还有五龙子对于龙母的反哺之情，传递着“孝文化”。在西江跑航运的航运人的心里，龙母与伏波一样都是为船执仗护航的神明，而且龙母形象更为女性化，给人以母亲的亲切与慈爱感更甚。

4 伏波文化与龙母文化的文化共识

伏波文化与龙母文化作为主要是少数民族信仰的文化，地域特色明显，由于广西西江古代航运险要且西江流域经常发生洪涝灾害，地方人民修建庙宇供奉神灵祈求风调雨顺，行船平安。从伏波文化和龙母文化的发展与传承来看，这两种宗教信仰之所以传承至今，一方面是西江人民本身的信仰，另一方面是中央政权的提倡，历朝历代的帝王都会为这二位神明敕封。这是一个相互递进的关系，西江流域的人民对伏波与龙母愈加深信不疑，统治阶级愈加看到伏波与龙母文化的重要程度，为了加强对地方的思想统治，赋予伏波与龙母正式的祭祀职权，并挑出对统治阶级有益的部分宣传，这又使得民众更加相信伏波与龙母的神力无边。

5 伏波文化与龙母文化的现状

随着社会的发展和科技的进步，新时代的水上交通安全守护神 -- 海事人，替代伏波和龙母守护着航运安全，他们将台风、雷暴等恶劣天气预警信息及时发送给航运人，通知他们及时进港锚泊确保安全，只要航运人在海上和水上遇险，海事人都能在第一时间应急处置救援。同时，随着西江航道的疏浚和水利枢纽的建立，西江的急滩、险滩得到改善，以横县云表镇郁江的伏波大滩为例，在航道没有得到疏浚，船闸枢纽没有建成之前，过往船舶航经此处要减速慢行，由经验丰富的船员驾驶船舶通行，伏波大滩正对伏波庙，航运人经过此地必然要做三件事：鸣笛、放炮、敲锣鼓，以求航行安全。

如今，人们对伏波神和龙母的信仰，也从原先的寄希望于通过对伏波神和龙母的祭祀和祭拜以换来水上航运作业的安全扩大到譬如求学、求子、消灾减难等。每年农历四月 13 至 15 日当地群众特别是渔家船民都会赶赴伏波庙祭祀祭拜，并于农历三月初三等广西民族节日赶赴龙母庙祭祀祭拜，用进香、点炮、歌咏、舞乐等方式表达对马援将军和龙母的崇敬之意，并祈求国泰民安、五谷丰登、金榜题名、逢凶化吉等。

6 结　论

广西航运文化的突出特点是宗教信仰的盛行，尤其是龙母信仰与伏波信仰。从龙母文化与伏波文化的发展与传承中可以看出历代中央政权对地方的思想管理，以及广西地方对中央的文化认同。马援南征的历史，不仅在各种主流文献当中得到高度的颂扬，在民间的历史叙事与记忆中，也被民众以立庙、举行纪念活动等方式不断延续着这段历史。如今，随着广西水上航运和海上贸易的发展，伏波马援和龙母又增添了赐福和庇护江海航运安全的职能，分布在广西乡村的伏波将军庙与龙母庙，构成了中国传统社会最基层的信仰体系，是百姓的心灵栖息场所，庙宇的分布格局和兴衰都透露着不同时期人们的精神信仰追求，并折射出更深的文化内涵，西江两岸之所以分布着这么多的庙宇，正是渔家船民对伏波神与龙母的敬仰的体现，也是广西航运文化传承与发展的体现。庙宇慢慢陈旧，渔家船民更新换代，只有巍峨的“伏波精神”和仁爱的“龙母美德”仍在传承与发展。

当前，广西正深入学习贯彻习近平总书记关于广西工作论述的重要要求，解放思想、创新求变，向海图强、开放发展，自治区党委政府先后就加快交通强国建设、西部陆海新通道建设等国家重大战略作出工作部署，高质量推进平陆运河建设，同步推进运河经济带规划实施，推动北部湾港扩能优服，加快北部湾经济区和珠江—西江经济带开发开放，加快形成面向国内国际的开放合作新格局。广西航运的快速发展得益于对伏波、龙母文化的传承与发展，对伏波马援和龙母的敬仰成了广西航运人血液中的一部分，广西航运文化的传承与发展也将

为广西的发展提供源源不断的能量。

参考文献

[1] 杨洪林 . 从国神到家神 : 武陵地区伏波信仰变迁研究 [J]. 广西民族研究 ,2012,03:71-78.
[2] [4]（宋）范晔 .（唐) 李贤注 . 后汉书 [M]. 北京 : 中华书局，1965 年，卷二四 .
[3] 黎九皇 . 伏波庙碑记 [A]. 沅州府志 [M]，同治刻本，卷之三十八 .
[5] （宋) 王溥 . 唐会要 [M]. 北京 : 中华书局，1955 年，卷二十三
[6] （清) 徐松 . 宋会要辑稿 [M]. 北京 : 中华书局，1957 年，礼二 0.
[7] 朱熹 . 周易本义 . 清光绪 19 年，湖南文运书局刊 .
[8] 陆敏珍 . 从宋人胡则的神化看民间地方神祇的确立 [J]. 浙江社会科学，2003(6).
[9] （清) 段汝霖 . 楚南苗志 [M]. 长沙 : 岳麓书社，2008 年，卷二 .
[10] （清）向兆麟 . 酉江竹枝词 [A]. 历代诗人写沅陵 [Z]，沅陵县政协编，2003.
[11] （清）唐效尧 . 清浪滩 [A]. 历代诗人写沅陵 [Z]，沅陵县政协编，2003.
[12] （清）张学举 . 重建龙母庙碑序 [A] 德庆悦城镇程西书院资料室编 . 孝通庙旧志 .
[13] 汪绍楹 . 搜神记 [A]. 中华书局，1979.
[14] 沈怀远撰著 . 南越志・五卷，公元 557~589 年，书已佚 .
[15] 刘恂：岭表录异 . 第 5 页，成书于唐昭宗年间，丛书集成初编本，商务印书馆 1936 年版 .
[16] 张锡勤 . 中国传统道德举 [M]. 黑龙江 : 黑龙江教育出版社，1996:109.
[17] 龙母文化 : 西江流域的精神领袖 [J]. 珠江水运 ,2011,21:84-86.

作者简介：
钟童建超，百色海事局办公室主任，18977609856
钟叶，百色海事局党群工作部一级主办

新质生产力发展背景下航海类院校产教融合建设实践与探索

——以广西交通职业技术学院航海工程学院为例

李先会　唐　锋

（广西交通职业技术学院航海工程学院，广西南宁　530022）

摘 要：发展新质生产力是推动高质量发展的内在要求和重要着力点。航海类院校肩负“海洋强国”、向海图强发展中的高技能型人才培养使命。产教融合是办好职业教育关键所在。党的二十大三中全会指出，要深化教育综合改革，加快构建职普融通、产教融合的职业教育体系。加快构建产教融合，科教融汇，不断推动职业教育的服务力、支撑力、贡献力。本文结合广西交通职业技术学院航海工程学院办学优势和区域特点，以服务“交通强国”“海洋强国”战略，服务广西向海经济发展，提出以”江、海、港、产”行业发展新需求，以“金专、金课、金师、金地、金教材”作为职业教育的新基建任务，构建以精准对接产业学院、中国特色学徒制等多种形式的产教融合实践和探索。

关键词：产教融合；向海经济；新质生产力

0　引　言

习近平总书记指出：“要牢牢把握高质量发展这个首要任务，因地制宜发展新质生产力”“各地要坚持从实际出发，先立后破、因地制宜、分类指导”。党的二十大三中全会指出，要深化教育综合改革，加快构建职普融通、产教融合的职业教育体系。新质生产力是由技术革命性突破、生产要素创新性配置、产业深度转型升级而催生的当代先进生产力，它以劳动者、劳动资料、劳动对象及其优化组合的质变为基本内涵，以全要素生产率提升为核心标志。新质生产力发展需要以产业链、人才链、教育链、创新链融合生产函数，以关键性颠覆性技术为突破口，实现生产方式和经济增长的质态跃升。产教融合是办好职业教育关键所在主要包括了校企合作、劳动者素质跃升、创新性高素质技能型人才培养，有机衔接人才供应、技术创新、产业升级等重要环节，基于航海类院校肩负“海洋强国”和向海图强高技能人才培养的重要使命，必须积极思考好审视新质生产力的发展下，航海类院校及时总结产教融合经验，探索抓住产教融合发展新机遇，适应产教融合高质量发展新要求，具有十分重要的意义。

1　以发展新质生产力推动产教融合高质量发展

1.1　产教融合的精准定位

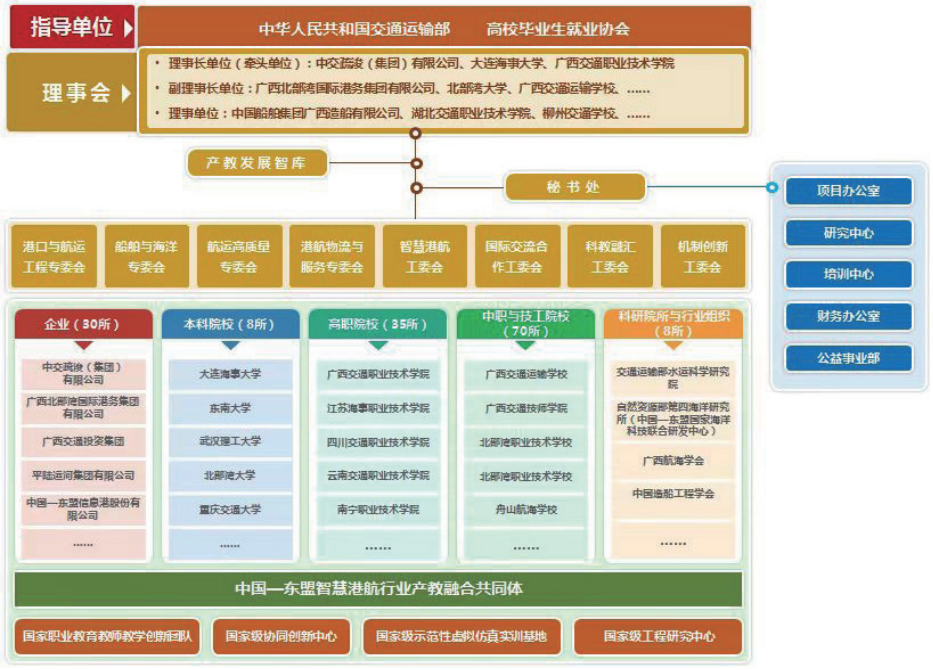
2023 年 12 月 14 日至 15 日，习近平总书记亲临广西考察，肯定广西工作，勉励广西要解放思想、创新求变，

向海图强、开放发展，奋力谱写中国式现代化广西篇章。广西正在加快建设“一区两地一园一通道”战略任务，突出抓好铸牢中华民族共同体意识示范区建设、着力打造国内国际双循环市场经营便利地和粤港澳大湾区重要战略腹地、深入推进以沿边临港产业园区为统领的各类园区建设、高水平共建以西部陆海新通道为牵引的面向东盟的国际大通道。广西交通职业技术学院航海工程学院，作为广西区内唯一一所具有航海教育与培训、船舶与海洋工程技术职业教育的高职院校，始终坚持为党育才、为国育才初心使命，把立德树人作为根本任务，围绕“海洋强国”“交通强国”战略发展要求，构建了以航海、轮机、船舶、水运、机电为学科为一体的专业群发展思路。

在产教融合的实践中，坚持“江、海、港、产”产业联动，面向西江经济带的内河航运企业群，面向远洋、北部湾的远海航运企业群，面向北部湾港集团下南宁港、钦州港、防城港、北海铁山港等港口企业群，面向沿边临港产业园众多新兴制造业和服务业集群，以清晰的行业定位和办学定位，精准开展产教融合，积极探索广泛开展深度校企合作，取得了一定的成效。

1.2 创新协同育人模式，打造行业产教融合共同体

2024 年，教育部将推动行业产教融合共同体建设尽快取得突破作为工作重点任务。高校、职业院校作为培养高素质创新型人才的组织载体，具有赋能新质生产力形成的人力资本生产优势、技术技能积累创新优势，教育赋能新质生产力需要通过教育、科技、人才良性循环发展的方式 进行，行业产教融合共同体是促进教育、科技、人才良性循环发展的组织载体，是赋能新质生产力加速发展的新型组织形态，新质生产力与行业产教融合共同体具有天然的双向契合性。2024 年 3 月 22 日，广西壮族自治区教育厅发布《自治区教育厅关于公布广西壮族自治区市域产教联合体等立项建设名单的通知》，由广西交通职业技术学院为牵头单位，联合大连海事大学、中交疏浚（集团）有限公司共同申报的广西智慧港航产教联合共同体正式获批，为产教融合赋能广西智慧港航发展赋予了新的机遇，共同体组成包括了行业学会、一流企业、一流大学、优质高职、中职等单位的积极支持。聚焦广西“向海经济”，着眼西部陆海新通道（平陆运河）重大工程建设，主动参与“西部陆海新通道（平陆运河）智慧绿色港航建设创新联合体”及“船海工程先进设计制造协同创新联盟”，开展政行校企多层面、深层次的合作，构建良好互促机制。



1.3 共建特色产业学院，打造校企合作协同育人共同体

党的二十大报告强调要“办好人民满意的教育”。人民满意的职业教育必须深化产教融合、校企合作。近年来，

国家出台了一系列深化产教融合 的文件，如《关于深化产教融合的若干意见》《国家 产教融合建设试点实施方案》《现代产业学院建设 指南（试行）》。航海工程学院坚持“产教融合、校企合作、工学结合、知行合一”的现代职业教育办学理念，与中船广西、中控技术、中船舰客、西江重工、北京鑫裕盛等多家行业领军企业开展深度合作，联合中控技术股份有限公司共建智能制造产业学院和双师双能教师企业实践基地与北京鑫裕盛船舶管理有限公司共建鑫裕盛产业学院、与中船舰客共建中船产业学院。积极融入大湾区产业集群，推动广东省“产教评”技能生态链 - 智能制造与工业视觉“链主”企业广东奥普特科技股份有限公司的合作，促进工业机器人相关专业产教融合。

在以中控技术智能制造产业学院建设过程中，开展中控 PLC 教材开发、中控 InPlant Scada 校园版软件联合开发、举办中控 Scada 工业组态全国技能创新大赛，高质量推进产业学院建设。

1.4 着力练好内功，加强职业教育“五金”新基建

在物联网、大数据、云计算、人工智能、卫星通信等新一代技术不断涌现的当下，港航业信息化发展的呈现出新的趋势和新要求。为了适应这样的新要求，学院通过“五金”新基建，以建设好专业、课程、教材、教师、实践基地为切入点，着力推进我国现代职业教育体系建设，全面提升职业教育人才培养质量。2024 年全国高等职业学校第二批专创融合“金课”与专创融合“金师”项目中《PLC 技术与工程应用》《绿色智联船舶检验》两门课程及教师团队获得立项。智慧港航专业群建有 2 门区级精品课程，专业课程的混合式教学比例达到 80%。航海技术专业《船舶操纵与避碰》《航海英语》等两门核心专业课获批中国—东盟交通职业教育联盟国际学生课程建设，课程团队共 7 人获录入中国—东盟职业教育联盟专家库。并以“走出去”为目标，开展海技术专业建设的《船舶操纵》双语课程，获广西面向东盟国际化职业教育培训资源包、东南亚教育部长组织技术教育发展区域中心认定公开课程，并投入国际船员网上培训使用。

面向船舶智造、航海技术、智慧港口产业链条，建设与工作场景对接的实训平台。与行业领军企业共建国家级平陆运河绿色智慧航运虚拟仿真实训基地；与中控技术共建中控技术智能制造产业学院，中控技术股份有限公司向我校捐赠价值 100 万元的智能制造虚拟仿真设备。校企共建船舶操纵模拟器实训室、雷达模拟器实训室、电子海图实训室、水手操舵仪实训室和轮机模拟器实训室等虚拟仿真教学资源，形成一套集教学、实训、研发、生产、参赛于一体的“产学研用整体解决方案”。

1.5 依托地方企业，积极开展现代学徒制

2022 年，学院与广西西江重工有限责任公司共同申报了服务西部陆海新通道“智慧航运”专业群广西第三批现代学徒制试点获批，在全区职业院校航运类专业中形成了良好的引领、示范和辐射效应。在现代学徒制下结合企业岗位需求，开展课程标准修订、船舶专业核心课程建设，充分融合新工艺、新技术，在课程设计中融入思政课程，教学实践运用数字技术手段，建设数字化教学资源库，实现企业导师和职业老师的交流互动，企业选派高级职称以上技术人员到校讲学，学院遴选优秀骨干教师赴企业顶岗实践，特别注重跟生产岗位部门和设计部门的交流，掌握船舶设计软件，融合创新、创业思维，提升双创思维能力，有效提高教师的专业能力，从而为教学开展，培养符合企业需求的员工奠定了更加坚实的基础。

1.6 依托船员培训中心，提升地方航运产业高质量发展“服务力”

作为广西海事局认定的广西航运高技能人才培训基地，承担着多类别多项目船员培训和企业员工培训。依托船员培训中心，面向航运企事业单位开展各级各类船员培训业务，近三年年均培训量超过 3 000 人次，为广西航运业提供了坚实的人才支撑保障。船培业务，有力促进了产教融合在航海技术的高效融合。

1.7 数字化和国际化

践行随企出海，与企业共建《船舶操纵与避碰》《航海英语》两门核心专业课，获批中国 - 东盟交通职业教育联盟国际学生课程，共建《船舶操纵》双语课程获批广西面向东盟国际化职业教育培训资源包，投入国际

船员培训使用。目前正在积极推动东南亚相关高校选派留学生到我远进行短期学习，积极推动国际化办学合作。

2 以产教融合赋能发展新质生产力

产教融合是教育主动融入、服务产业升级的鲜明印记，教育发展的新思路、新模式、新机制。伴随着科技进步和产业升级，产教科融合作为国家理念、国家制度、国家行动，进一步深化了内涵和外延，积极推进职普融通、产教融合、科教融汇，持续推动职业教育的服务力、支撑力、贡献力。

2.1 深刻理解职业教育服务地方产业发展的“服务力”的实践

职业教育还是一种类型教育，具有特殊性，即职业教育是与经济社会发展联系最紧密的教育类型，职业院校的办学定位、发展路径、人才培养、专业设置、课程改革各方面，都必须为经济社会发展服务，必须走产教融合、校企合作之路。因此，通过构建智慧港航共同体，充分联系产业链的上、中、下等产业链的各个环节，充分发挥教育的服务性功能和职业教育的类型特征，以共建产业学院、共同开发教材、共同为社会服务等具体内容，把职业教育须坚持人才培养目标与产业转型发展同步升级、专业结构调整与产业体系布局同步优化、教育教学方式与现代信息技术同步转型。脚踏实地推动产教融合走深走实，推进教育供给和产业需求精准对接，才能培养与新质生产力相匹配的高素质技术技能人才。

2.2 准确把握职业教育对地方经济人力资源“支撑力”的实践

随着我国进入新发展阶段，产业升级和经济结构调整不断加快，各行各业对技术技能人才的需求越来越紧迫。党的十八大以来，职业教育提质培优、增值赋能，职业院校毕业生成为我国产业大军的主要来源，成为支撑中小企业聚集发展、区域产业转型升级和城镇化发展的主力军。产业大军的主要来源，在现代制造业、现代服务业等领域，一线新增从业人员 70% 以上来自职业院校。因此，高质量促进产教融合，是职业发展的必然要求，职业教育对地方经济发展的人力资源“支撑力”的作用越来越大。通过构建中国特色现代学徒制，以产业学院为载体，建成了 3 个技术协同创新服务平台：内河绿色智慧船舶技术创新中心、船舶与海工装备技术创新中心、智慧港航技术创新中心，服务西部陆海新通道“智慧航运”专业群和服务西部陆海新通道建设和广西智慧港航产业集群，持续为区域经济发展找到了支撑点和落脚点，凸显了广西交通职业技术学院申报国家高水平专业群的强大“支撑力”。

2.3 有力扩大职业教育对智慧港航专业领域发展的“贡献力”的实践

职业教育只有聚焦重点、疏通堵点、破解难点，才能有效推动我国职业教育内涵发展、高质量发展。广西交通职业技术学院在职业教育实践中，始终坚持聚焦“海洋强国”、“交通强国战略”，精准聚焦智慧港航专业建设的教育链、人才链、产业链、创新链的深度融合，突出以“贡献力”目标的结果导向的职业教育的闭环设计，从为什么开设专业、如何办好专业、怎样高质量提升专业对地方经济的贡献，一头连着产业一头连着就业，始终把高质量产教融合是提高职业教育对地方经济“贡献力”考察点重要评价体系作为发力点和突破点，广西交通职业技术学院牵头组建了广西基础设施三维数字孪生工程研究中心、广西石化产业高端沥青基材料工程研究中心等 3 个省部级科研平台，聚焦水下爆破技术与防护、交通大数据等 7 类关键技术进行攻关，破解了广西交通基础设施建设与汽车产业中工程防护、新能源储电等 6 项技术瓶颈，其中液压柱破岩、水下爆破气泡帷幕防护等项技术填补国内外技术空白。10 余项新技术和 40 余项技术服务转化应用在贵南高铁、平陆运河等项目建设，节约造价成本 5 000 余万元，直接带来 2 亿多元的经济效益。广西交通职业技术学院重视产教融合对职业教育高质量发展的重要作用，准确定位我校“争国家双高，创职业本科”的发展目标、突出专业特色，实以“知重负重、苦干实干、攻坚克难”的精神状态，因校制宜，毫不动摇深化产教融合，坚定不移走产教融合之路，全面提高人才培养质量，持续为广西向海图强，向海经济发展，为中国式职业教育现代化发展贡献广西交通职业技术学院的力量。

3 结 论

在教学质量高水平、产教融合高质量的“新双高”要求指引下，学院产教融合发展取得了一定的成就，主要经验就是：一是学院上下坚持解放思想、创新求变，向海图强、开放发展。树立职业教育不是在坐在象牙塔里面的教育，而是要到车间进行实践的教育，要把教师的理论能力和动手能力，融入企业发展需求的具体环节之中；二是引进行业优秀人才。行业优秀人才具有优秀的行业经验和企业资源，以及在企业培养的良好职业习惯和先进的企业管理制度，通过引进优秀人才，对教师团队带来了新的活力和发展动力；三是主动对接区域优秀企业。以专业教研室牵头，构建专业团队，把职业教师的理论和实践融入区域行业企业生产过程中的研发、生产、设计、技改等环节，有效提高教师队伍联系应用的能力，在项目中锻炼教师，提高技能，扩大视野，有效促进产教融合的高质量发展。

诚然，在产教融合建设过程中，依然存在比较普遍的比如企业主动性不够，需要政府在财税政策、人才政策上进一步加强政策指导，调动企业参与产教融合的积极性和内生动力，以及院校制度上推动教师走出去等方面加强政策配套，真正实现产教融合高质量赋能地方新质生产力发展。

参考文献

[1] 安培，新质生产力发展背景下行业产教融合共同体建设思考 [J]. 中国职业技术教育 ,2024,24：38-45.

[2] 职业教育赋能新质生产力：理论逻辑、实践堵点与创新路径 [J]. 职教论坛 ,2024,3：5-14.

[3] 王飞，高职院校现代产业学院“四位一体”育人模式研究 [J]. 科教文汇，2024,18（总第 618）：144-147.

作者简介：

李先会，硕士，高级工程师，广西交通职业技术学院航海工程学院院长助理，主要从事智能制造与海工智能装备教学、研究，(E-mail)xianhui.li@gxjtc.edu.cn,13503078958

唐锋，硕士，副教授，广西交通职业技术学院航海工程学院院长

浅谈大数据平台开发应用助力航运经济转型升级

徐文勇

（柳州市交通学校，广西柳州 545007）

摘 要：在全球经济一体化深入发展的今天，作为国际贸易重要组成部分的航运业，其经济转型升级显得格外紧迫。本文旨在通过分析航运经济面临的挑战、大数据技术的特点以及在航运领域的应用前景，以大数据为基础，探讨大数据平台如何推动航运经济转型升级，构建航运经济转型框架。采用案例分析与比较研究方法，对大数据技术在航运资源优化配置、运营效率提升、风险管理能力提升、商业模式创新推进等方面的作用进行了详细的论述。同时，对具体运用大数据平台进行实证分析，并在航运经济中给出策略上的相应建议。该研究成果表明，在促进航运经济转型升级方面，大数据平台的开发应用效果显著，不仅可以增强行业竞争力，而且可以带来相关行业新的增长点。最后，深入分析未来航运经济走向，并就相关研究提出方向与建议。

关键词：大数据；航运经济；转型升级；资源优化；风险管理

1 前 言

1.1 研究背景

作为连接世界经济的重要纽带，在全球化背景下，航运业承担着90%以上的国际贸易和交通运输使命。但是，传统的航运模式在近年来全球航运市场波动加大的情况下，面临着多重挑战，成本上升，效益不高，环保压力增大。大数据技术的兴起，在这样的形势下，提供了一个新的航运经济机会。运用大数据应用，可以实现决策流程的精细化管理，决策流程的优化，服务的个性化增强，整体竞争力的提升。因此，具有理论价值和实践意义的是，探讨大数据平台在航运经济中的应用，以及其助力经济转型升级的作用。

1.2 研究意义

本研究的意义在于系统地分析大数据技术在航运经济中的应用现状和潜力，明确大数据技术对航运经济转型升级的促进作用。通过构建大数据驱动下的航运经济转型升级框架，为航运企业提供科学的决策支持，推动行业创新发展。同时，这些研究成果还可以为政策制定者提供宝贵的参考，帮助他们制定更加有效的行业指导政策，从而推动航运业健康可持续发展。

1.3 研究内容和方法

本文的探讨焦点包括：(1) 当前航运经济面临的主要问题及其成因；(2) 大数据技术的最新进展以及其在航运领域的应用潜力；(3) 构建基于大数据的航运经济转型框架；(4) 分析大数据平台在航运经济中的实际应用示例；(5) 提出利用大数据平台促进航运经济转型的策略建议。在研究方法上，本文融合了文献综述、案例分析、对比研究以及逻辑推理等手段，结合定量与定性数据，全面深入地分析了大数据平台在推进航运经济转型中的关键作用和影响。

2 航运经济现状与挑战

2.1 航运经济发展历程

航运经济的起源可以追溯到古代的河运和海运，随着贸易的发展逐渐形成了以海上运输为主的国际航运体系。步入 20 世纪以来，伴随着全球化的深入与集装箱运输的大规模应用，航运业进入了蓬勃发展的黄金时期。特别是在过去的几十年中，全球贸易量的持续增长带动了航运需求的膨胀，航运经济成为世界经济增长的重要推动力量。然而，进入 21 世纪后，受全球经济波动、燃油成本上涨、环保法规趋严等因素影响，航运经济开始面临新的挑战。

2.2 当前航运经济面临的主要问题

当前航运经济面临几大核心挑战：一是直接影响航运公司稳定性和预测性的市场供求失衡导致航运价格大幅波动；二是营运成本持续上升，特别是燃油及港口开支的上升，令航运公司盈利空间进一步受到挤压；不仅如此，国际海事组织 (IMO) 等机构在环境方面的压力不断增加的情况下，要求航运业采取温室气体排放限制的减排措施；最后，传统航运管理模式在数字化转型步伐落后的情况下，在应对急剧变化的市场和复杂的供应链管理方面显得力不从心。

2.3 航运经济转型升级的必要性

对航运业所面临的诸多挑战，随着现代技术的发展而必然出现的现代化转变已经成为不可回避的趋势。首先，借助物联网技术增强人工智能和大数据分析，能够有效地促进航运经营效率的提高和成本的降低。其次，数字化是航运企业应对市场波动的有效途径，使企业的资源能够得到更有效的整合与分配。最后，基于大数据分析所进行的准确的市场预判与风险管理，对于保证航运经济的平稳发展具有十分重要的意义。而且，数字化还能为航运业带来绿色转型的好处，使企业能够为节能减排而进行相应的调整。综上所述，随着航运企业数字化程度的不断提高，绿色转型的不断推进，航运经济将随着科技的进步而发展得更加健康。因此，数字化不仅是一种必然趋势。总之，航运企业的转型升级既是内在要求，也是适应全球经济新常态和实现可持续发展的必然选择，是当前航运界面临的重要课题。

3 大数据技术概述

3.1 大数据技术的定义与特点

大数据技术涵盖了用于处理海量、异构且以极高速率增长的数据集的一系列技术与方法。这一领域的核心特征可总结为“五大维度”：容量 (Volume)、速率 (Velocity)、多样 (Variety)、真实 (Veracity) 和价值 (Value)。容量描述的是数据的庞大数量，远超常规数据库的承载极限；速率突出的是数据处理的即时响应能力；多样指的是数据形态的丰富多样，包括结构化、半结构化乃至非结构化数据类型；真实则聚焦于确保数据的准确性和可靠性；而价值，则在于挖掘并提炼出隐藏在海量数据中的潜在信息与知识，为决策提供支持。这些特点使得大数据技术在处理复杂问题和发现潜在模式方面具有独特优势。

3.2 大数据技术的关键技术

大数据技术的进步有赖于若干关键领域的支撑，其中的分布式计算架构如 Hadoop 和 Spark 发挥了核心作用，使系统在处理庞大数据量的同时保证高效的分析过程，而云计算技术则提供弹性计算资源，使数据处理的灵活性和经济效益得到显著增强，另外机器学习和人工智能算法的引入，使系统在从数据中自主学习规律并实现预测和辅助决策的能力得到提升，数据挖掘自然语言处理和可视化技术同样功不可没，共同构成了大数据技术体系的基石，为海量数据的解读和应用提供全面的支持，因此具有十分重要的意义。从各个技术领域来看，大数据技术的发展离不开这些领域的支撑。同时，这些技术领域的相互衔接与融合也将推动大数据技术的进步。

3.3 大数据在航运领域的应用前景

航运领域对大数据技术的应用前景广阔，能够提高船队管理效率物流优化等方面的精确性和高效性。具体而言，对船舶操作数据的收集分析运用大数据手段，对意外故障的发生几率以及停航时间有有效的降低作用。另外，大数据技术还能为航运公司预测市场走势研究客户消费行为提供重要依据，从而对公司商业策略的精准性起到推波助澜的作用。随着物联网技术的发展，船舶上的传感器所产生的数据量急剧上升为大数据技术在航运领域的运用提供了有力的数据支撑。按照目前的形势发展下去，大数据的应用将是航运企业获得竞争优势实现智能化升级的关键性要素。

4 大数据平台在航运经济中的应用

4.1 大数据平台的架构设计

实现其应用于航运经济的基础是大数据平台的架构设计。包括数据采集层、存储层、处理层、应用层在内的一个典型的大数据平台架构。数据收集层负责获取包括船舶自动识别系统 (AIS)、传感器、日志记录和第三方数据服务在内的各种来源的数据。存储层则需要对海量数据进行高效存储，通常采用分布式数据库 (DistributedData) 和文件系统处理层是核心，涉及数据清洗、转换、整合和分析，常用的技术有 MapReduce，Spark 和流处理技术等。应用层则将处理后的数据，如运营优化、风险评估、决策支持等，转化为实际的商业智能。

4.2 大数据平台助力资源优化与调度

将原来的文段稍作修改后 : 利用大数据平台对历史数据和实时数据进行综合分析，能够更加精准地预测货运需求与船舶供给之间的相互关系，从而在资源调度上做到心中有数，使船舶调配与货物分配更加科学有效；再者能对不同航线上的货运量及季节性变化进行分析，使航运公司能够对船队进行有目的的优化配置降低空驶率提高运输效率；另外，大数据平台也能帮助航运企业提高复杂供应链上的协作能力，保证货物能够及时准确地到达目的地；综上所述，大数据平台在资源优化与调度上扮演了十分重要的角色，为航运企业带来实实在在的效益与便利。

4.3 大数据平台增强航运运营效率

主要有三个关键领域可以应用大数据平台来增强航运运营效率 : 一是实时船舶状态监测与性能考核，可预见潜在的机械故障和维修需求，从而提前采取措施预防问题的发生；第二，借助机器学习算法优化航线规划，降低燃料消耗和缩短航行时间，实现资源的有效配置；第三，深入分析客户反馈和服务数据，有针对性地改善服务质量提升客户满意度，通过上述创新应用使单个航次的运营效率和整体航运网络的高效运行都得到了显著提升。

4.4 大数据平台在风险管理与决策支持中的应用

航运在经济中占有举足轻重的位置是无可置疑的；大数据在航运经济中应用具有极其重要的意义；大数据技术帮助航运企业从海量数据的分析中得出对市场风险具有重要影响的结论是市场风险信用风险和操作风险。再者结合气象预报海盗活动监测等一些外部数据源帮助航运企业能够及时调整航线和策略来避免或降低一些损失。另外能够有这些高级的数据分析工具帮助航运企业的管理层进行一些战略规划和资源的合理调配是这些大数据平台给航运企业带来的实实在在的好处。所以航运企业能够在不确定的市场环境中做出比较明智的决策来应对一些挑战与危机而不受市场波动的冲击是这些大数据平台给航运企业带来的重大的帮助。

5 案例分析

数据对航运经济转型升级的作用与实例研究可以参照下述内容对航运经济进行转型升级的案例分析与研究。

5.1 国内外典型案例介绍

在国际航运领域，马士基航运公司是利用大数据平台进行转型升级的典型代表之一，通过部署先进的传感技术和实施物联网技术等方式收集了大量的船舶运行数据，然后对这些数据进行实时监控和分析处理，进而优化船队运行状况，减少意外故障发生的几率，降低运营成本。另外，马士基还能根据天气模式以及港口运行效率和货物流动数据，对航线规划和货物调度等进行优化，在提高运输效率方面取得了明显成效。

作为国内最大的航运公司之一的中远海运集团也是国内大数据技术应用的积极推动者之一。中远海运集团建立了一个整合多系统数据的数据平台来集中监控管理全球船队——有效地提高了资源调配的高效性——并且基于这个平台的数据分析功能也帮助公司在市场分析与风险评估上做出了更为精确的决策来适应不断变化的市场需求。同时中远海运集团在大数据技术的运用上也是积极探索与尝试的。

5.2 案例分析：大数据平台的具体应用与效果

举马士基为例子，公司利用大数据平台对船舶的燃油消耗量进行实时监控，并与气象数据和航线规划算法相结合，使船舶的航行速度和路线选择得到提高，由此每年将节省数十亿美元的燃油费用。另外，马士基对大量的市场数据进行分析，从而能够对货运市场的供需变化进行更准确的预测，并适时地调整运力部署，以避免出现过剩或短缺的情况。因此，马士基能够利用大数据技术来有效地应对燃油成本上升所带来的诸多挑战。

大数据平台的应用，使得中远航运集团在全球范围内都可以动态地调配资源，这在中远航运集团的案例中是这样的。如集团通过对各港口装卸效率、轮候时间等方面的分析，使船舶靠泊顺序得到合理安排，驻港时间有所减少，整体运输效率有所提高。同时，集团通过客户服务系统的数据分析，进一步提升客户满意度和忠诚度，从而更好地洞察客户需求，为客户提供个性化的服务方案。

这两个案例表明，大数据平台的应用不仅可以帮助船公司降低成本，提高效益，而且可以提升公司的市场应变能力，增强公司的竞争力。航运公司可以借助实时数据的分析和预测模型的应用，在市场变化的情况下做出快速反应，在经营策略上做出更明智的选择。

6 策略建议与展望

6.1 基于大数据平台的航运经济转型升级策略

建议采用以下战略：一是我国航运企业投资建设完善的大数据平台，将来自多个方面的数据资源进行有效整合。其次，企业为培养高素质的数据分析人才加强对数据的分析能力和业务洞察力。三是以数据驱动的决策文化向日常经营管理和战略性决策全面导入大数据结果。另外，企业要加大同科研设计单位和技术开发公司的合作力度以共同开发适合航运业的大数据综合解决办法。最后为支持航运业的数字化改造与转型在数据安全用隐私保护和跨境资料交换方面要有所建树的法制建设也能起到推波助澜的作用。通过上述战略的贯彻落实促进航运经济的转型升级才是上策。

6.2 大数据平台发展的未来趋势

未来大数据平台的发展将呈现以下趋势：一是为了提高数据处理的速度和效率，云计算与边缘计算的结合将更加紧密；其次，在实现更深层次数据洞察的数据分析中，人工智能和机器学习技术的作用越来越大；三是有可能在数据安全存储和共享中应用区块链技术，增强了数据的可信度；最终，实时数据传输在广泛应用 5G 通信技术后，效率更高，支持远程监控与管理。

6.3 研究的局限性与未来研究方向

在探讨航运经济转型升级中大数据平台的应用问题上，这一研究的局限性是存在的。例如，某些分析可能缺乏足够的实证支持，因为数据的获取受到了限制。今后的学习可以从以下几个方面加深：一是多收集一些实战操作资料，多做一些经验方面的细致分析；二是针对不同类型航运企业在大数据技术运用上的差异进行探索；

三是对区块链、物联网等大数据技术与其他新兴技术融合的可能性与效应进行研究；第四，对航运业持续发展的大数据应用影响进行评估。通过这些研究，更全面、更深入地提供理论支撑和实践指导，为航运经济的数字化转型保驾护航。

7 结 论

对航运业在经济转型升级过程中如何应用大数据平台进行深入探讨，并对其带来的冲击及作用进行了详细的阐述，对航运业目前所面临的一些主要挑战也作了分析。在此基础上，对大数据技术的定义及其特征作了全面介绍，重点介绍了其中的关键技术。最后对大数据在航运领域的应用前景作了展望。通过此项研究为航运业实现经济转型升级提供了有益的借鉴与启发。

研究还发现，在大数据平台的架构设计中，对资源的优化和调度有显著的帮助；同时能够提高经营效率，以及为风险管理提供决策支撑。在案例分析中，对大数据平台在实际航运业务中的应用效果有了进一步的证实；从实时监控到航线优化，从市场分析到企业竞争力的提升，都显示出了大数据平台在实际业务中的重要作用。能够提高资源利用率和运营效率，提高企业的竞争力。因此，能够提高企业的经营效益，实现资源的最优化配置。

对航运经济转型升级提出策略性建议和对未来大数据平台发展的趋势进行预测，同时指出研究的局限性并为今后的研究方向提供指导，总结起来就是强调大数据平台在促进航运经济转型升级过程中所起的重要作用，为航运业的决策者和从业者提供宝贵的参考和指导，而随着技术的不断进步和数据量的日益增长，大数据平台将在航运经济中扮演着越来越关键的角色，这是本研究的最终结论。

参考文献

[1] 于志刚 , 李源粒 . 大数据时代数据犯罪的制裁思路 [J]. 中国社会科学 ,2014(10):100-120+206.

[2] 张东霞 , 苗新 , 刘丽平等 . 智能电网大数据技术发展研究 [J]. 中国电机工程学报 ,2015,35(01):2-12.

[3] 王德文 , 孙志伟 . 电力用户侧大数据分析与并行负荷预测 [J]. 中国电机工程学报 ,2015,35(03):527-537.

[4] 真虹 , 赵富学 . 数字经济赋能航运产业链发展路径 [J]. 交通企业管理 ,2023(08):46-48.

[5] 谢美进 , 陈伊慧 , 林佳等 . 数字孪生驱动智慧航运转型升级的路径探析 [J]. 舶 ,2023,36(10):111-116.

[6] 徐金玲 , 翁克瑞 , 胡雯晴等 . 长三角区域江海联运港航高质量发展评价及对策研究 [J]. 船海工程 ,2023,42(06):1-10.

作者简介：

徐文勇，本科，柳州市交通学校教师，助理讲师，双师型教师，船舶驾驶专业，（E-mail）1257426358@qq.com,18278723973

近海消防拖船无人化适应性改造研究

梁海咏　郑国祥　李世锋　刘　磊

（交通运输部东海救助局，上海　200090）

摘 要：随着交通强国、海洋强国战略的深入实施，我国近海海上运输作业日益频繁，海上船舶火灾事故风险与日俱增，对近海应急救援及海上消防能力提出更高要求。本文主要介绍了对海上专业救助拖船进行无人化适应性改造的方案，供参考。

关键词：海上消防；救助船；无人化；适应性改造

0　引　言

海上应急救援具有较高风险，海上消防救援危险性尤甚。随着科技发展，国家海上专业救援力量逐步探索智能化和无人化在应急救援行动中的应用。无人船技术的应用为海上危化品救援以及海上消防等高危救援作业提供了新思路。近海消防拖船作为海上救援的重要工具，其无人化改造不仅能够提高救援效率，还能有效降低作业风险。因此，针对近海消防拖船的无人化改造需求，开展相关研究，具有重要的现实意义。

目前，国际上关于无人船舶的研究和应用已逐步展开，但主要集中在商用货轮和探测船领域，对于近海消防拖船的无人化改造研究相对较少。国内虽然在船舶自动化和智能化方面取得了一定进展，但在实际应用中，特别是在复杂海域的消防救援中，仍面临许多技术挑战。因此，针对近海消防拖船的无人化远程消防需求，开展系统性的研究和示范应用尤为迫切。

本研究主要针对近海消防拖船的无人化改造需求，选择具有代表性的大型综合救助船舶作为应用示范船舶，对船舶消防系统、通导系统、控制系统等开展适应性加改装，实现船舶自主航行、远程遥控、自主消防等，满足无人消防船的功能需求。

1　研究对象

根据自主航行系统及自主消防系统的改造需求，本研究改造平台的选取需满足：

（1）具备基础的通导设备：导航雷达、电罗经、风速风向仪、AIS、GPS、计程仪等，上述设备应尽量具有一路单独的信号分配接口分给自主航行系统。

（2）具备可正常工作的主机遥控 / 推进控制系统、动力定位系统，具有主机转速控制及反馈接口、舵角控制及反馈接口；

（3）船舶应具备可用的卫星通信系统或 4G/5G 通讯，带宽不小于 1 Mbps；

（4）船舶应具备至少一路 AC220 V、4 kW 左右的供电接口。

根据上述条件，最终选取“东海救 151”轮（图 1）作为本研究的改装平台。“东海救 151”轮是救捞系统建造的第一艘 4 000 kW 新型中型海洋救助船，该轮总长 69.5 m，型宽 14.6 m，型深 6.8 m，设计吃水 4.4 m，

满载吃水 5.2 m，设计航速 15 kn。其操作性能十分优异，采用全电力驱动双全回转舵桨推进方式，主发电机组功率 2 600 kWX2。全回转舵桨功率 2 000 kWX2，还配备配置 VSAT、FBB、北斗等通信系统。配备左右消防炮，排量 1 200m^3/h，泡沫排量 300 m^3/h，最小射程 120 m，对外消防能力达到 FIFI1 等级，见图 1。



图 1　改装平台“东海救 151”轮

2　研究思路与方法

本研究主要从“试验平台分析”“改造前准备”“平台改造”“试验前准备”“试验验证”“试验收尾”等阶段进行研究。“东海救 151”轮无人化适应性改造研究思路如图 2 所示。

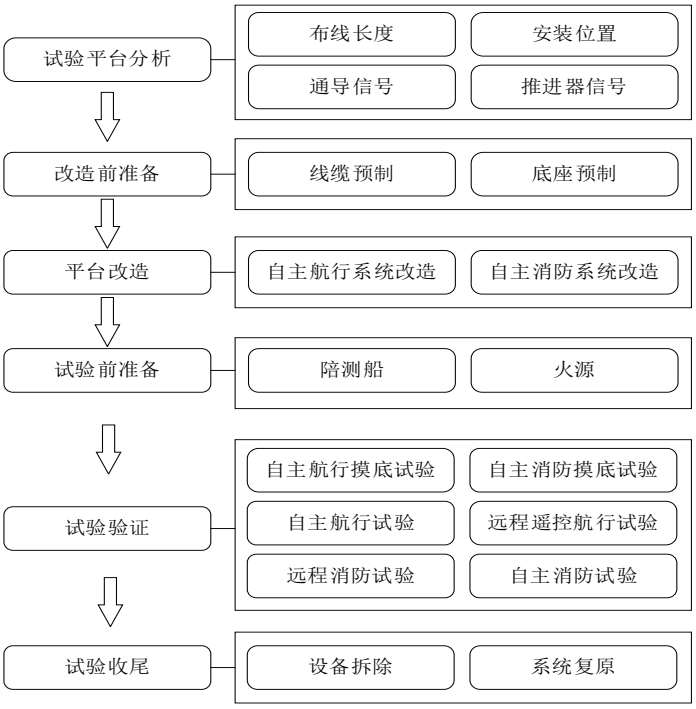


图 2　“东海救 151”轮无人化适应性改造研究思路

“试验平台分析”阶段主要研究“东海救 151”轮的通导信号采集方法、推进器信号采集方法、布线方式与长度、设备尺寸与安装位置等。研究“东海救 151”轮在已具备导航雷达、电罗经、风速风向仪、GPS、计程仪等通导信号的基础上，有效接出信号的方式，即接出信号后，不影响本船其他系统的正常工作。推进器信号的要求与通导信号类似，即不影响本船原有推进器的手动控制，当发生应急情况时，仍能保证船长可以手动

接管，控制船舶正常航行。在此基础上，由自主航行系统设备研制方与自主消防系统设备研制方实船调研，确定设备安装位置与布线长度，由各方共同评估改装方案的可行性。

“改造前准备”阶段主要研究自主航行系统与自主 / 辅助消防系统所需安装设备的固定方式与定制线缆，由系统供应商提前上船勘测，根据设备的实际尺寸与安装位置，预估线缆长度与底座要求，并由系统供应商提前预制后与设备一同运输至码头仓库。

“平台改造”阶段主要由系统供应商实施具体的设备安装改造工作，东海救助局负责相关工作的组织与协调，制定合理的改造与试验计划，在 3 ~ 4 天内完成所有设备的安装改造工作，在最后 1 ~ 2 天内进行实船试验与验证。

“试验前准备”阶段由东海救助局协调试验所需的资源，如自主航行系统避碰试验所需的陪测船“东海救 201”轮，以及自主消防系统灭火试验所需的火源，该火源（火桶）固定于陪测船“东海救 201”轮的尾甲板处，由船员在试验前点燃。

“试验验证”阶段主要根据系统供应商的需求，开展“自主航行摸底试验”“自主消防摸底试验”“自主航行试验”“远程遥控航行试验”“远程消防试验”“自主消防试验”，其中“自主航行摸底试验”与“自主消防摸底试验”为正式试验前的摸底试验，用以修正自主航行控制系统所需的船舶模型与性能参数，并测试消防炮远程遥控功能的通道正确。

“试验收尾”阶段主要开展试验后的设备拆除与系统复原，包括自主航行系统改装的通导信号接线与控制信号接线，以及自主消防系统改装的消防炮控制信号线，系统复原后需由船员逐项确认船舶原有系统是否正常工作。

3 无人化作业需求分析

3.1 无人消防船作业流程

无人消防船的航行与作业范围覆盖近海、码头、港口等，其作业流程如下：

（1）在接收到消防任务后，船长根据救援点位置，在岸端远程控制中心的航线规划站设定去程的起点、途经点（若有）、终点，航线规划站会自动进行航线规划与优化，同时避开浅水区域、岛礁等障碍物，给出一条优化后的安全航线；

（2）消防船根据规划出的航线进行自主航行，航行过程中自动避开障碍物，直至航行至目的地；

（3）船长通过远程控制站的手柄遥控船舶接近目标船，并调整消防船的位置与艏向；

（4）船长远程遥控消防炮灭火，或开启自主消防自动灭火，直至火灾扑灭；

（5）船长在远程控制中心的航线规划站设定返程的起点、途经点（若有）、终点，航线规划站会自动进行航线规划与优化，同时避开浅水区域、岛礁等障碍物，给出一条优化后的安全航线；

（6）消防船根据规划出的航线进行自主航行，航行过程中自动避开障碍物，直至航行至码头；

（7）消防任务完成。

3.2 无人消防船功能性能要求

根据无人消防船的作业流程，无人消防船应具备如下功能要求：

（1）航线规划与优化：在接收到任务后，能够在航线规划站自动设定起点、途经点和终点，并优化航线，避开浅水区域和障碍物；

（2）自主航行：配备雷达、摄像头、GPS 等传感器，能够自动感知周围环境并自动控制消防船避开航行中的障碍物；

（3）远程监测与控制：船长可以通过手柄或其他控制设备远程操控船舶的位置和艏向，并能实时传输高清视频，提供船长全面的视角，确保精准操作；

（4）远程遥控消防炮：船长能够远程操控消防炮进行灭火；

（5）自主消防：具备自主灭火功能，自动识别火源位置与消防水炮水柱落点位置，根据火势自动调整喷射角度和水量，自动控制消防炮进行灭火；

（6）灭火方式切换：配备高压水炮和泡沫喷射系统，应对不同类型的火灾；

（7）船岸通讯：具备可靠的无线电和卫星通信系统，确保远程控制和数据传输的稳定性；

（8）故障自检：具备故障自检和报警功能，确保及时发现并处理故障；

（9）应急切换：紧急状况下，船端船员可通过转换开关一键切换至船端人工驾驶模式，实现越控功能。

同时，为实现上述功能，无人消防船需满足如下基本性能：

（1）长续航能力：具备长时间作业的能力，确保在救援过程中无需频繁返航补充能源；

（2）高速航行：能够快速到达救援现场，缩短响应时间；

（3）高稳定性：在恶劣天气和复杂水域条件下，能够保持稳定航行和作业；具备良好的抗风浪性能，确保在风浪中也能正常作业；

（4）高精度控制：能够精准控制船舶位置和消防设备，确保灭火效果。四级海况下，船舶位置控制误差不超过 1 倍船宽，消防炮控制精度小于 1°；

（5）高耐用性：船体和设备材料耐腐蚀、耐高温、耐磨损，确保长时间高强度使用。

总体来说，无人消防船应具备高度自动化的航线规划与优化能力、自主导航与避障能力、远程控制与数据传输能力、强大的灭火系统以及高效的返航与靠泊功能。此外，还需要具备长续航时间、高航行速度、高稳定性和精度、耐用性及安全性等性能，以确保在各种复杂环境下高效、安全地执行消防任务。

3.3 无人消防船作业需求分析

根据上述无人消防船的作业流程，以及功能性能要求，分析无人化消防作业的需求，包括船体需求、航行与控制需求、消防系统需求、岸基控制与船端响应需求、岸基辅助决策需求。

（1）船体需求：无人船体需要具有良好的稳定性，在高海况下也能正常作业。同时，船体材料应具有耐火、耐腐蚀和耐高温性能；船体设计要便于在狭窄水域和复杂环境中灵活穿行；需要足够的载重量来容纳消防设备、燃料、电池等，并保证在满载情况下仍具有良好的操控性；尺寸和结构应符合相关法规和标准，同时考虑到便于运输和快速部署。

（2）航行与控制需求：具备 GPS 定位、雷达、罗经和摄像头等多传感器融合的自主导航和避障系统，能够在复杂环境中安全行驶；支持岸基远程控制，实时监控船舶位置、状态和周围环境信息；具备高精度的操控系统，以确保在消防作业中的精确定位和动作；能够根据任务需求和环境变化，自主规划和调整航行路径。

（3）消防系统需求：配备高压水炮、泡沫灭火器等高效灭火设备，能够快速灭火；具备喷射水雾、泡沫等多种灭火介质的能力，以应对不同类型的火灾；具有足够的消防介质储备，能够支持长时间灭火作业；灭火系统能够通过远程控制精确操作，包括灭火介质的喷射方向、力度和覆盖范围。

（4）岸基控制与船端响应需求：岸基控制中心与无人消防船之间需要有可靠的实时通信链路，确保指令和数据的即时传输；高效的数据传输和处理能力，能够实时处理来自船端的传感器数据，并做出响应；建立完善的应急响应机制，确保在通信中断或其他突发情况时，船体能够自主采取安全措施。

（5）岸基辅助决策需求：具备环境感知和火情预测能力，通过数据分析和人工智能技术，提供准确的火灾扩散预测和灭火建议；能够根据火情和资源情况，自动生成最优的消防作业方案；实时监控和管理消防资源，包括无人消防船的状态、位置和消防设备的剩余情况；提供直观的可视化界面，方便操作人员了解火情动态、船体状态和任务进展；通过历史数据的学习和分析，不断优化消防策略和船体性能。

4 适应性改造方案

“东海救 151”轮的适应性改造方案主要包含：自主航行与远程控制系统改造方案、自主 / 辅助消防系统改造方案。其中，自主航行与远程控制系统的改造主要包括：通导系统信号接入、主机遥控系统控制信号接入、自主航行与远程控制系统安装布置；自主 / 辅助消防系统改造主要包括：消防炮信号接入、自主 / 辅助消防系统安装布置。

4.1 自主航行与远程控制系统改造方案

本次在“东海救 151”轮上改造自主航行与远程控制系统采用临时布置的方式。试验成功完成后，将对系统进行拆除与复原。在改造过程中，充分考虑系统的临时布置位置和安装固定方式，既不对船舶本身造成结构性改动（如穿线打孔等），又能保证船舶在航行试验过程中设备的稳固性，确保改造规划的周全与有效。

经勘验与评估，自主航行与远程控制系统从“东海救 151”轮信息室网络机柜中获取 DGPS、风速风向、电罗经、计程仪信号，以串口信号的方式发送至自主航行系统；从 151 轮信息室推进控制系统控制箱中获取主机控制信号与舵桨控制信号，以电压 / 电流信号的方式被自主航行系统控制，如图 3 所示。

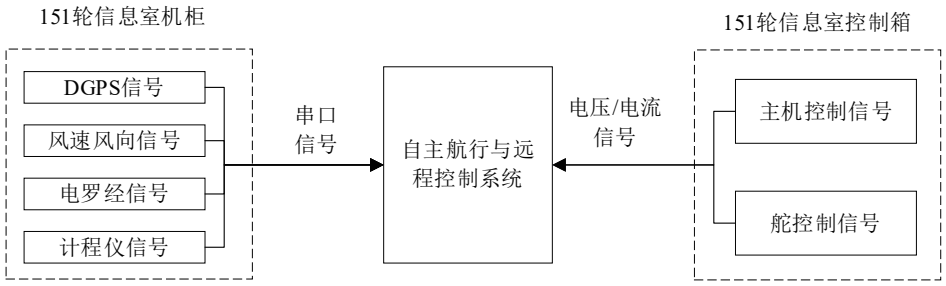


图 3 信号接入示意图

自主航行与远程控制系统主要包括：自主航行机柜、自主航行控制箱、航线规划站、综合显示单元、光纤罗经、红外可见光一体化摄像单元、RTK DGPS 天线、VHF 天线、远程控制站等，自主航行与远程控制系统所有设备的安装位置与固定方式见表 1。

表 1 自主航行与远程控制系统安装位置及固定方式表

序号	设备名称	安装位置	固定方式	备注
1	自主航行机柜	驾驶室左侧窗边	系绳绑扎固定	
2	自主航行控制箱	信息室地面	系绳绑扎固定	
3	航线规划站	驾驶室台面	系绳绑扎固定	
4	综合显示单元	驾驶室台面	系绳绑扎固定	
5	4G/5G 路由器	驾驶室台面	系绳绑扎固定	
6	光纤罗经	船中	系绳绑扎固定	
7	红外可见光一体化摄像单元	罗经甲板	焊接底座 螺丝固定	
8	RTK DGPS 天线	罗经甲板	U 型锁系柱固定	
9	VHF 天线	罗经甲板	U 型锁系柱固定	
10	远程控制站	岸上（长兴岛）	/	

4.2 自主 / 辅助消防系统改造方案

自主 / 辅助消防系统主要包括：左舷摄像头、右舷摄像头、交换机、船端主机、4G/5G 路由器、消防炮信号转换器、岸端消防炮控制站。摄像头分别安装于船舶左右舷两侧消防炮旁，并针对原有的消防炮控制系统进行软硬件改造，增加消防炮信号转换模块，经过 4G/5G 路由器与岸端进行数据通信。自主 / 辅助消防系统安装

位置及固定方式见表 2。

表 2　自主 / 辅助消防系统安装位置及固定方式表

序号	设备名称	安装位置	固定方式	备注
1	左舷摄像头	左舷消防炮旁	扎带绑扎固定	
2	右舷摄像头	右舷消防炮旁	扎带绑扎固定	
3	4G/5G 路由器	驾驶室	扎带绑扎固定	
4	消防炮信号转换器	驾驶室	扎带绑扎固定	
5	交换机	驾驶室	扎带绑扎固定	
6	船端消防炮控制主机	驾驶室	扎带绑扎固定	
7	岸端消防炮控制主机	岸上（长兴岛）	/	
8	岸端 2D/3D 态势重构站	岸上（长兴岛）	/	

5　试验及结果

2024 年 5 月，开展了“东海救 151”轮远程遥控航行与消防演示试验，试验人员在长兴岛园区“无人船远程控制中心”，对远在 160 km 外舟山海域的“东海救 151”轮进行了远程遥控。

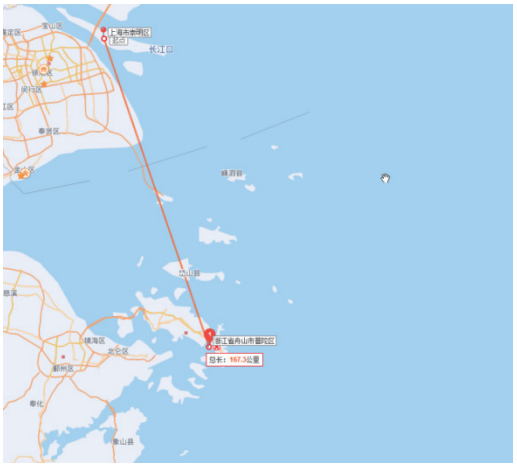


图 4　远程控制站与舟山码头距离示意图

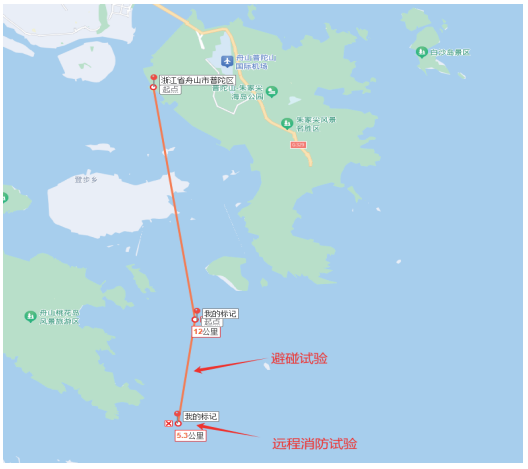


图 5　试验区域示意图

试验成功完成了“东海救 151”轮远程遥控航行、自主航行以及自主避碰，循迹控制误差为 13.5 m，小于 1 倍船宽，速度控制误差小于 0.2 m/s。同时开展了远程消防炮控制试验，对“东海救 151 ”轮 50 m 外的消防目标进行喷淋灭火。在此基础上 , 还开展了基于火源自动识别与跟踪的自主消防试验，消防船可自主识别 50 m 外的火源并自主进行喷淋灭火。

6　主要经验

本研究围绕“近海消防拖船无人化适应性改造”进行了深入的探索与分析。通过对无人化作业需求的详细研究，以及对适应性改造方案的全面设计和实施，取得了以下经验：

（1）功能性能需求的确定

针对无人化消防作业的特殊性，本研究明确了无人消防船的功能性能要求，包括自主航行、远程控制、自主消防等关键技术指标。通过综合考虑各种复杂海况及作业环境的挑战，制定了适应性强的性能需求框架，为后续技术改造方案的设计提供了科学指导。

（2）适应性改造的临时性和可逆性

在本研究中，针对“东海救 151”轮的自主航行与远程控制系统的改造采用了临时性和可逆性设计，确保了在试验可以对系统进行拆除与复原，不对试验船舶本身造成永久性的结构改动，为未来类似船舶的改造提供了宝贵的经验。

（3）非侵入式安装方法的应用

在改造过程中充分考虑了系统的临时布置位置和安装固定方式，采用非侵入式的固定方法，避免了对船体和现有系统的干扰，确保设备在试验中的稳定性，也为后续的设备拆除和船舶复原提供了便利。

（4）自主 / 辅助消防系统的全面改造

针对自主 / 辅助消防系统，进行了软硬件的全面改造，包括左舷摄像头、右舷摄像头、交换机、船端主机、4G/5G 路由器、消防炮信号转换器及岸端消防炮控制站的集成，不仅实现了数据的高效通信，还提高了系统的智能化水平，为提高船舶的消防能力提供了有力的技术支持。

7 结 语

本研究对“东海救 151”轮的自主航行与远程控制系统、自主 / 辅助消防系统进行了临时布置的适应性改造，不仅为船舶智能化升级提供了可行的技术解决方案，还在安全性和可逆性方面积累了宝贵经验。这一成果显著提升了无人化技术在海洋领域的应用潜力，推动了海上消防、救援等领域的技术进步和效率提升，为未来船舶的智能化、无人化改造奠定了坚实的基础，并为其他类似项目的实施提供了实践依据和指导。

作者简介：

梁海咏，交通运输部东海救助局高级工程师，研究方向：科技创新和信息化、标准化管理，(E-mail) lianghaiyong0417@163.com，13918852999

郑国祥，交通运输部东海救助局高级工程师，研究方向：救助装备管理，(E-mail)dhjzhgx@126.com，13817091256

李世锋，交通运输部东海救助局规划建设科技处处长、高级工程师，研究方向：应急救助管理、救助装备管理，(E-mail)guijianchu@donghai-rescue.cn，13564871936

刘磊，交通运输部东海救助局高级工程师，研究方向：救助装备管理、海上安全与环境管理，(E-mail) dhjzj1214@163.com，13564792655

船舶航行表层流服务产品生产实践

王　超[1]　王好平[2]

（1. 东海航海保障中心上海海事测绘中心，上海　200090；
2. 东海航海保障中心上海海图中心，上海　200090）

摘 要：表层流是指海洋表层处的潮流，对于船舶的航行速度和航行安全都具有显著的影响，是船舶航行的重要参考因素。充分发挥潮流资源，可有效提高我国船舶能效水平，推进绿色航运发展，对落实我国“碳达峰、碳中和”等战略部署有着重要意义，但目前我国尚缺少可用的表层流服务产品。本文从 IHO S-111《表层流产品规范》着手，对照开展了产品生产试制，最终产出符合国际标准的表层流服务产品，同时就产品的试制过程提出了一些建议，可为后续的规模化生产提供借鉴。

关键词：洋测绘；表层流；S-111 标准

0　引　言

2022 年，IHO（国际海道测量组织）S-100《通用海道测量数据模型》5.0.0 版本[1]正式发布，标志着 S-100 系列产品将逐步进入正式生产应用阶段。根据 IHO 分布走计划，第一阶段将重点推进与航线监控和关键框架相关的产品标准，其中包括 S-101《电子海图产品规范》、S-102《水深表面产品规范》、S-104《航行水位产品规范》、S-111《表层流产品规范》[2]、S-124《航行警告产品规范》、S-129《富余水深管理产品规范》等具体的数据产品标准。同时，按照 IHO 与 IMO（国际海事组织）的协商，从 2025 年开始提供 S-101 电子海图起，新装的 ECDIS 需符合 S-100 系列产品对设备型式认证的要求，ECDIS 性能新标准将于 2025 年 7 月 1 日起开始实施，亦即自 2026 年起，新装的 ECDIS 需支持以上数据产品的使用，而 IHO 组织也需提供对应的数据产品服务。面对即将到来的航运发展变化，我国也作了许多应对研究，包括产品规范翻译[3-4]、图示表达[5]和应用分析[6-7]等。但由于相关标准多还在修订阶段，离正式生产仍存有变数，国内关于产品试制的研究较少。目前 S-111 标准已基本完成 2.0.0 版本修订，计划于 2024 年底出版。为此，有必要尽快开展基于 S-111 标准的表层流产品试制研究，为迎接即将到来的技术大变革做好应对准备，同时也可为航运用户提供更全面更优质的潮流产品服务，促进绿色航运发展。

1　S-111 表层流产品规范介绍

S-111《表层流产品规范》是用于指导表层流数据产品生产的规范，主要内容包括数据标识、数据结构、要素目录、图示表达、元数据、数据编码等，可作为额外的图层叠加在电子海图上使用。

1.1　数据结构

同其他产品规范一致，S-111 的数据产品结构也是遵循 S-100 标准设计，使用 HDF5 数据格式。HDF5 是一种开源的数据存储技术，采用层次化的数据结构，具有高效的数据压缩和并行读写等优势，可以在不同操作系统下跨平台使用。S-111 的数据结构如图 1 所示，从上到下分为 4 个层级。

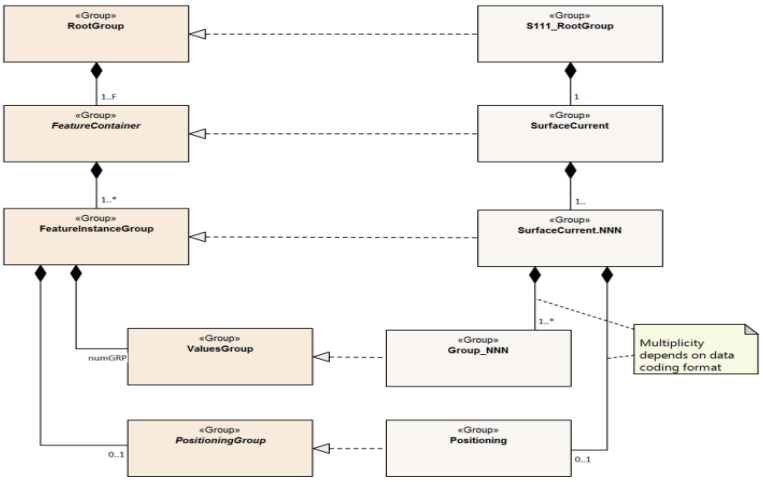


图 1　S-111 数据结构

1.2　图示表达

S-111 中详细介绍了矢量化显示表层流数据的方法，也是将来 ECDIS 设备加载显示该数据产品的关键。在规范中制定了标准化的符号来显示潮流数据，符号的颜色大小代表着不同的流速区间，箭头方向代表着流速方向，如图 2 所示。符号使用可缩放的矢量图形格式（SVG）绘制，确保可与海图比例尺保持相适应，并通过一定的图示表达规则（大小、颜色、方向等）进行展示。图示表达文件已作为规范的附件，可下载后直接使用。

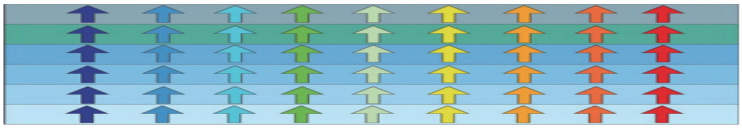


图 2　S-111 图示表达用到的符号

1.3　数据产品

S-111 产品主要通过 Web 发布，整个产品由 XML 格式的交换目录、HDF5 格式的数据产品及辅助文件组成。辅助文件包括 XML 格式的要素目录、XML 格式的图示表达目录、SVG 格式的符号文件以及其他用于报警、指示和互操作的支持性文件等，文件层次结构如图 3 所示。依赖以上文件，ECDIS 等终端用户就可以实现表层流产品的使用与交互。

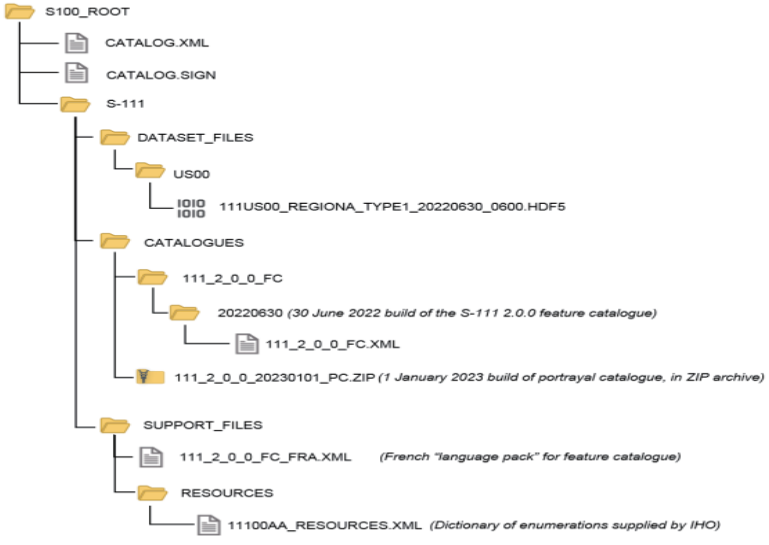


图 3　S-111 数据产品目录结构

2 S-111 产品生产实践

通过上文可以看出，S-111 产品规范从数据封装、图示表达到产品文件结构都已做了较为完整、详细的指导。在此约束下，S-111 产品的生产关键就在于数据封装，包括元数据、流速流向数据、不确定度等，必须严格按照规范要求一一封装成 HDF5 文件，以便 ECDIS 终端读取使用。下文以海图《南槽航道（三）》为例，开展 S-111 产品生产实践探索。

2.1 潮流数据来源

S-111 表层流的数据类型共有 5 类，见表 1，其中在格网类型下可查看的潮流数据点会更多更密，更符合航行用户的需要，在本文中也是重点选择该方式进行试制探索。

表 1 表层流数据类型

数据编码格式	数据类型
1	一个或多个固定站的时间序列数据（以时间排列）。
2	一个或多个时间的规则格网数据。
3	一个或多个时间的不规则格网或位置点集数据。
4	一个移动平台的时间序列数据。
8	一个或多个固定站的逐站时间序列数据（以站点排列）。

由于采用格网类型涉及潮流点位多，一般采用数值化的潮流预报模型作为数据来源，比如美国国家海洋和大气管理局（NOAA）就采用了全球实时海洋预报系统 (RTOFS）、西海岸运行预报系统（WCOFS）等模型来作为 S-111 产品的数据来源。本文使用的是单位自建的长江口潮汐精细化模型，该模型基于东中国海模型及长江口区域多个长期观测站实测数据构建，其数据精度可满足 S-111 产品生产需要，如图 4 所示。

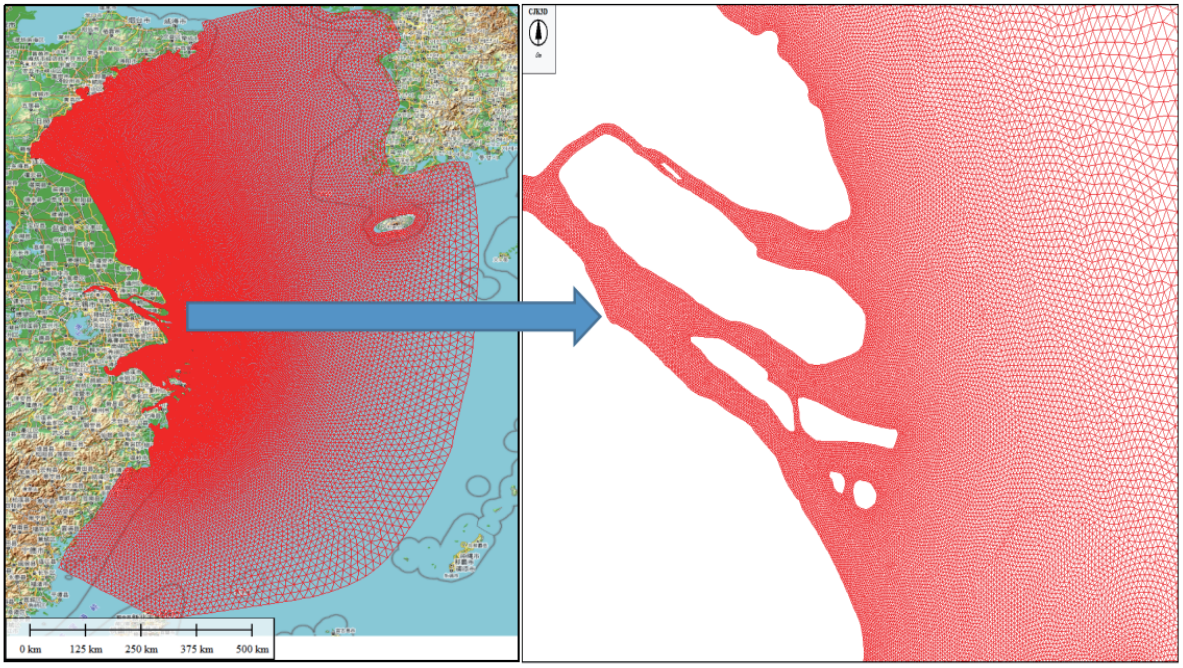


图 4 长江口潮汐精细化预报模型示意图

2.2 格网点位设计

使用格网类型生产 S-111 产品，需指定格网点位置，使用经度、纬度表示。在规则格网类型下，因每个格网大小一致，只需指定产品服务范围的最大最小经度、纬度值，以及潮流点位的行数列数即可。而不规则格网类型下，则需要按一定顺序依次录入潮流点位的经度、纬度，放在 Positioning 组下。从上述可知，S-111 对产

品服务范围及格网点位数的多寡都没有约束，只是建议最终产品文件大小不要超过 10MB，以便于数据传输。考虑到在实际应用时，潮流数据是作为一个单独的图层叠加在海图上使用，为了避免潮流数据点位过密而影响到海图使用，本文提出一种 S-111 产品与海图保持同一性的设计方式，即 S-111 产品的服务范围与配套海图保持一致，格网点位与配套海图经纬度分隔线保持一致，这样既保有一定的潮流数据密度，又可兼顾产品文件大小以及产品的可视性、美观性，方便配合海图使用。以《南槽航道（三）》图幅为例，按照 1′ *1′ 的格网大小，可以将整幅海图均匀地划分为 135 个小格，每个小格的顶点即为潮流数据点，陆地上的点另作标记，如图 5 所示。

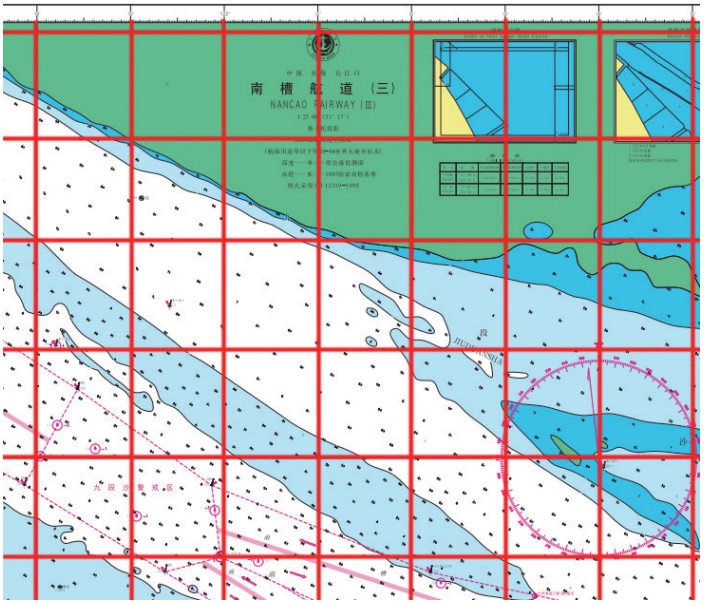


图 5　S-111 产品格网点位设计

2.3　潮流数据录入

完成潮流数据点位选择设计后，就可以使用潮汐精细化预报模型按照设计点位逐点生成指定时间下的流速、流向数据，录入到数据库中，如图 6 所示。

id	pointname	chartno	date	s00	s01	s02	s03	s04	s05	s(
1	D1	44129	2024-08-01 00:00:00	0.76	0.98	1.05	0.96	0.70	0.39	
2	D2	44129	2024-08-01 00:00:00	0.89	1.08	1.11	0.96	0.62	0.29	
3	D3	44129	2024-08-01 00:00:00	0.76	0.92	0.94	0.83	0.56	0.27	
4	D4	44129	2024-08-01 00:00:00	0.90	1.11	1.16	1.01	0.65	0.31	
5	D5	44129	2024-08-01 00:00:00	0.91	1.15	1.20	1.06	0.71	0.36	
6	D6	44129	2024-08-01 00:00:00	0.85	1.06	1.11	0.97	0.65	0.33	
7	D7	44129	2024-08-01 00:00:00	0.63	0.71	0.61	0.47	0.22	0.00	
8	D8	44129	2024-08-01 00:00:00	0.89	1.10	1.11	0.94	0.59	0.27	
9	D9	44129	2024-08-01 00:00:00	0.89	1.09	1.10	0.93	0.57	0.25	
10	D10	44129	2024-08-01 00:00:00	0.88	1.08	1.10	0.93	0.59	0.27	
11	D11	44129	2024-08-01 00:00:00	0.32	0.30	0.21	0.07	0.22	0.29	
12	D12	44129	2024-08-01 00:00:00	0.76	0.85	0.80	0.64	0.35	0.11	
13	D13	44129	2024-08-01 00:00:00	0.80	0.92	0.88	0.71	0.40	0.13	
14	D14	44129	2024-08-01 00:00:00	0.87	1.04	1.03	0.85	0.52	0.22	
15	D15	44129	2024-08-01 00:00:00	0.90	1.11	1.12	0.94	0.58	0.26	
16	D16	44129	2024-08-01 00:00:00	0.91	1.03	1.00	0.80	0.44	0.14	
17	D17	44129	2024-08-01 00:00:00	0.34	0.23	0.19	0.11	0.27	0.30	
18	D18	44129	2024-08-01 00:00:00	0.36	0.27	0.21	0.10	0.26	0.30	
19	D19	44129	2024-08-01 00:00:00	0.43	0.40	0.30	0.17	0.16	0.25	

图 6　潮流数据录入示意图

2.4 元数据设置

除了流速、流向数据以外，S-111 产品还需录入元数据，用来表示该产品的一些重要信息，比如水平基准、垂直基准、表层流所在深度，数据不确定度等，根据产品实际情况设置，如图 7 所示。

```
metadata = {
        'horizontalCRS': 4326,
        'metadata': '111_1_2_0_FC.xml',
        'geographicIdentifier': 'NANCAO FAIRWAY(III)',
        'speedUncertainty': -1.0,
        'directionUncertainty': -1.0,
        'verticalUncertainty': -1.0,
        'horizontalPositionUncertainty': -1.0,
        'surfaceCurrentDepth': -2,
        'depthTypeIndex': 1,
        'commonPointRule': 3,
        'interpolationType': 10,
        'dataDynamicity': 5,
        'methodCurrentsProduct': 'CJK_Hydrodynamic_Model_Forecasts',
        'datetimeOfFirstRecord': '20240801T000000Z',
        'verticalCS': 6498,
        'verticalDatumReference': 1,
        'verticalDatum': 48,
        'datasetDeliveryInterval': 'PT6H',
        'issueDateTime': datetime_forecast_issuance,
    }
```

图 7　元数据设置

2.5 成果展示

完成以上数据录入后，就可以按产品数据结构将数据封装成 HDF5 文件。由于 HDF5 技术成熟，可以通过多种编程语言实现数据的封装，此处不作展开。最终产品成果展示效果如图 8 所示，点击箭头符号可查看详细信息。

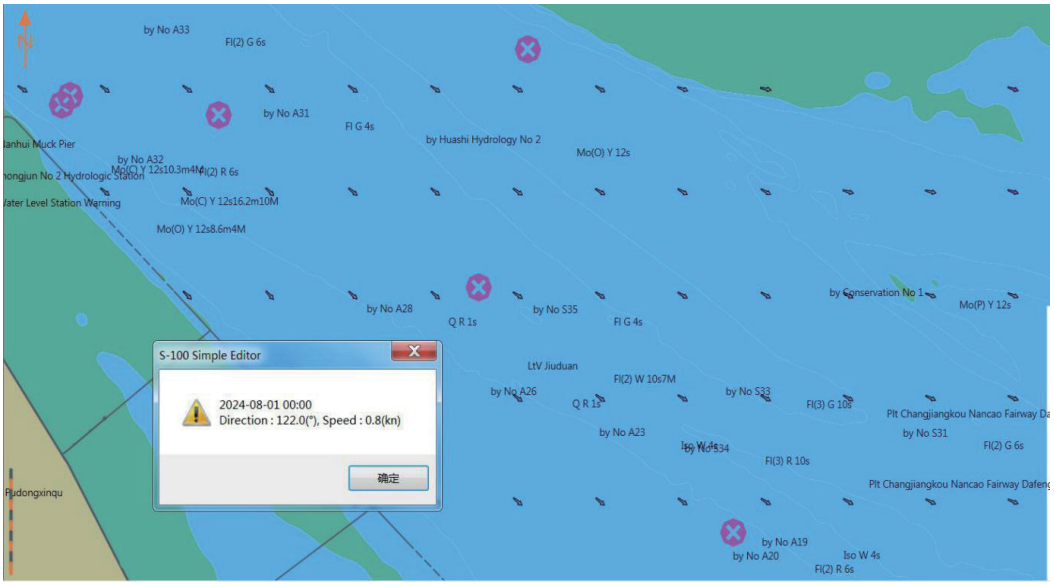


图 8 产品成果展示效果图

2.6 应用拓展

由于 S-100 系列标准目前还在修订阶段，支持该系列标准的 ECDIS 设备也未上市，导致 HDF5 格式的表层流产品对现阶段的航运用户来说并不适用，对行业发展也无法产生预期的促进作用。随着互联网、通信技术的发展，在我国基于网站、APP 的服务形式也更容易被用户所接受，如海事通、海 e 行、启航者等 APP 都已是除 ECDIS 外的另一种广为使用的海上智能导航选择。

因此，在该标准使用过渡阶段，笔者也对表层流数据产品的其他服务方式进行了探索，如 KMZ 文件服务，该文件格式通用性广，可以被多种软件平台解析，使用效果如图 9 所示。其他服务形式还有 API 接口服务、

GML 文件服务等等，通过多样化的服务手段，可以使得航运用户在现有平台上就能查看表层流数据，从而加快表层流服务产品的普及。

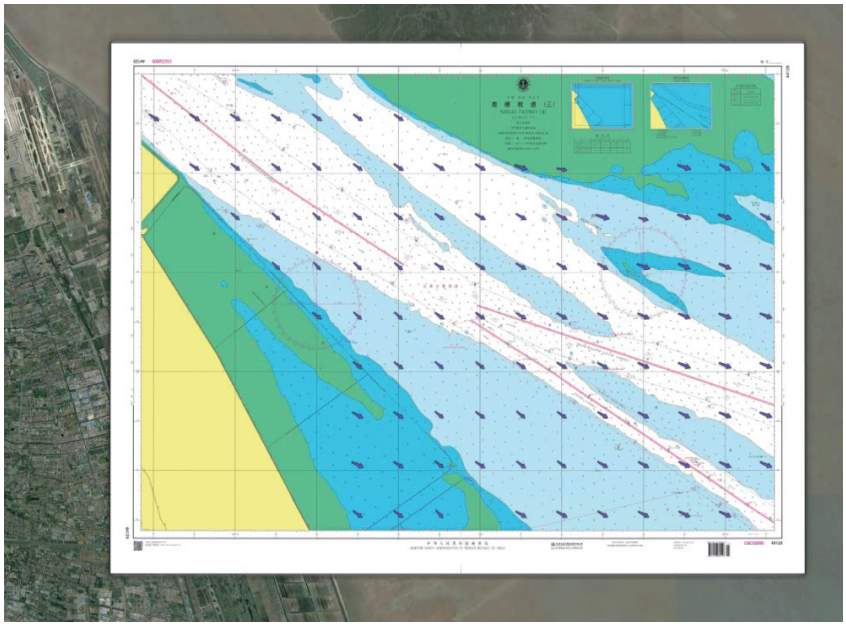


图 9　KMZ 文件格式成果展示效果图

3　结　语

S-111 表层流产品规范，是 S-100 系列标准中专用于表层流数据服务的规范，其产品可为航运用户提供更为详细的表层流数据，有助于提高船舶航行效能，保障航行安全。本文通过自研软件对照该规范实现了 S-111 产品试制，验证了规范的可行性和使用效果，为下一步规模化生产提供了样本示范。同时，笔者也将继续对 S-111 产品其他服务形式进行探索，在应用实践中助力国际标准的进一步完善。

参考文献

[1] IHO. S-100 Universal Hydrographic Data Model，Edition 5.0.0[S].Monaco: International Hydrographic Organization，2022.

[2] IHO. S-111 Surface Currents Product Specification，Edition 1.2.0[S].Monaco: International Hydrographic Organization，2023.

[3] 中华人民共和国海事局. S － 111 表层流产品规范 [M]. 北京 : 人民交通出版社，2022.

[4] 中华人民共和国海事局. S － 100 通用海道测量数据模型 [M]. 北京 : 人民交通出版社，2023.

[5] 彭文，桑百川，沈继青等. IHO S-100 通用海道测量数据模型图示表达 vJ]. 海洋测绘，2017，37(1):55-59.

[6] 陈长林. IHO S － 100 系列标准研究现状、问题与建议 [J]. 海洋测绘，2022，42(1):69 － 73.

[7] 吕玉晓，杨毅. IHO S － 127 海上交通管理要素数据模型分析及应用 [J]. 海洋测绘，2022，42(4):78 － 82.

作者简介：

王超，高级工程师，本科，主要从事海洋测绘研究，地址：上海市杨浦区共青路 82 弄 7 号，邮编：200090，（E-mail）30991092@qq.com

关于加快国有航运企业绿色低碳发展的思考

陈　超　范胤宏　耿佳东

（中远海运能源运输股份有限公司科技与数字化部，上海　200080）

摘 要: 2023 年，中国成为世界最大的船东国。然而，日趋严格的降碳要求对国内航运企业的发展产生了重大影响。为了适应航运绿色低碳发展的新需求，我国航运企业特别是国有航运企业需要加快自身能力建设，推进绿色低碳发展。本文围绕航运绿色低碳发展主要驱动力、面临的困难展开论述，系统分析影响航运绿色低碳发展存在的问题，并结合国有航运企业的实际，提出可行的措施。

关键词： 航运；绿色低碳；标准规则；科技创新；绿色金融

中图分类号： U699

文献标识码： A

0　引　言

航运业承载着全球贸易运输的重要使命，承担了超过 80% 的全球贸易运输任务。2023 年，中国成为世界最大的船东国，然而，随着全球航运业的环保要求日趋严格，不断促进着航运碳中和提档加速，中国的航运企业也面临着巨大的节能减排压力。以中远海运为代表的国有航运企业在此过程中不断探索，寻求一条适合的绿色发展路径。

国内外研究人员围绕航运碳排放管理和节能减排技术进行了大量的研究 [1-4]，并提出了一系列可能的转型发展举措。绿色低碳替代燃料路径不清晰、节能减排技术减碳效果有限等问题依然存在，没有有效结合现有政策规范发展绿色航运，导致了国内航运业绿色低碳发展路径较为模糊，缺乏对航运绿色低碳发展的系统认识。本文针对航运绿色低碳发展的主要驱动因素、面临的困难进行分析，提出可能的发展路径，为国有航运公司绿色低碳发展提供参考。

1　航运绿色低碳发展主要驱动力

1.1　国际及地区性规范法规约束

国际海事组织海洋环境保护委员会（MEPC 80）提出了 2050 年左右实现航运业净零排放的目标 [5]，规定了 2030 年和 2040 年节点下碳排放目标和新能源船舶占比目标。2023 年修订战略与 2018 年初步战略温室气体排放量对比如图 1 所示，不难发现，新修订的战略对航运温室气体减排提出了极其严格的要求。

2023 年，欧盟理事会通过“Fit for 55”修正案，将航运排放纳入欧盟排放交易体系（EU ETS）修正案，生效后，航运公司将逐步执行限额义务。同步，欧盟理事会通过了更为严苛的 Fuel EU Maritime 法规，从技术层面直接对船舶温室气体排放进行限制，未达标船舶将面临罚款，目标 2050 年欧洲区域内航运碳排放强度相较于 2020

年降低 80%。

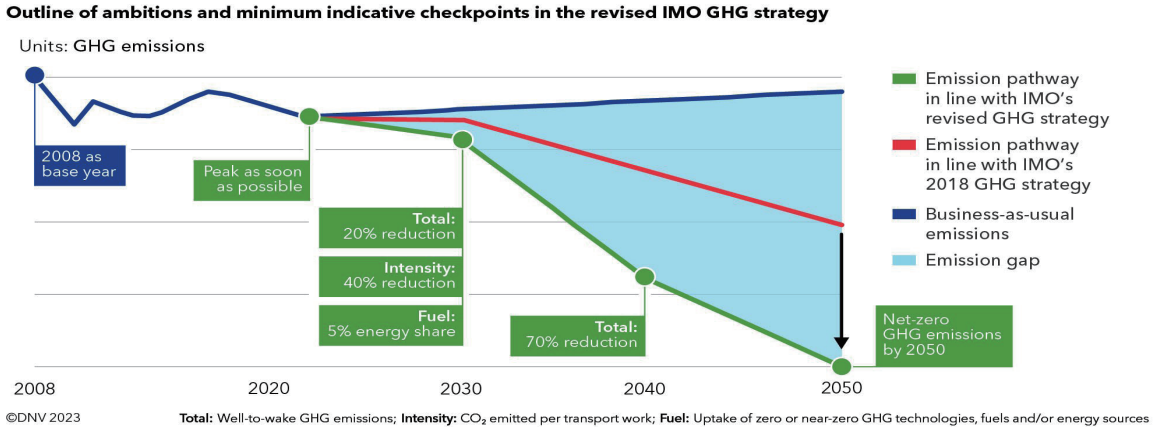


图 1　2023 年修订战略与 2018 年初步战略温室气体排放量变化 [6]

与此同时，中国积极开展“双碳”背景下的航运减碳工作，提出了一系列减排法规和措施，包括《2030 年前碳达峰行动方案》《绿色交通“十四五”发展规划》等指导规划文件，明确“十四五”期间船舶节能减排的政策目标。中国也在不断从体制机制、技术研究以及运营管理等方面推动航运业减排治理。

1.2　航运客户的绿色低碳需求

随着航运减排要求的进一步收紧，航运业脱碳转型蕴藏着来自客户需求的巨大潜力。根据波士顿咨询关于欧洲航运业的一项研究发现，客户对低碳航运解决方案的需求日益迫切 [7]。越来越多的航运客户认为可以利用碳中和航运建立竞争优势，脱碳被越来越多地视为一种竞争性资产。未来随着各国政府对碳排放监管力度的加大，航运客户对于溢价支付的意愿预计将进一步提高。

马士基于 2019 年推出的 ECO Delivery Ocean 产品吸引了包括零售、汽车和快消品等各行业的全球客户，为客户提供零碳低碳的绿色物流运输服务。中远海运集运则于今年开始为客户提供基于区块链的航运产品 Hi-ECO，包含可追溯、可验证的绿色证书。

1.3　国际航运优等生的潜在压力

全球各大航运公司纷纷宣布了自己的减排目标，这些目标大多与 MEPC 80 会议的目标相一致或者更加严格。克拉克森截至 2023 年底的数据显示，全球船队中使用替代燃料作为动力的船舶比例已从 2017 年的 2.3% 增长至 6%。同样可以发现，现有船队仍在大量使用传统燃料，船东没有对超过 10 年船龄的船进行主机动力改造的意愿。因此，全球船队绿色转型将会以新造替代燃料船为主，现有船舶降速航行、绿色改装为辅的方式进行。

以马士基集团为例，自 2019 年启动减碳计划以来，强调通过购买绿色甲醇等清洁燃料来实现航运脱碳。然而，受限于绿色甲醇供应的问题，马士基不得不重新考虑 LNG 燃料。近日，英国劳氏船级社联合马士基启动了一项关于船用核能的研究，探索核动力在船舶领域的可能性。此外，达飞、赫伯罗特等航运企业公布了自身的绿色低碳转型方案及相关举措，致力于投资替代燃料船舶或能效提升措施。国际上，航运公司不断在对高效脱碳路径积极尝试，不仅给国内航运公司带来了诸多启发，其先发优势也带来了巨大的转型压力。

2　航运业绿色低碳发展面临的困难

2.1　脱碳节奏不一致，欧盟航运脱碳更具优势

IMO 航运温室气体排放定价机制仍在“协商”，欧盟区域性航运脱碳法规提前落地实施，这导致运营欧洲航线的航运公司与其他航运公司面临不同的脱碳节奏。营运成本、管理成本、政策风险的增加使得航运公司不

得不重新规划脱碳策略，进行新燃料、新技术的尝试。欧盟内的航运企业，享受新燃料基础设施法规和可再生能源指令等燃料供给、基础设施建设的便利条件和资金扶持，欧盟的航运脱碳技术配套产业将迅速发展，这使得欧盟区域脱碳选择更具优势。

2.2 新燃料选择面临困境，选择路径不明晰

在航运脱碳的道路上燃料的选择非常关键，不同的燃料选择将直接引向不同的脱碳路径。绿色甲醇和绿氨等均有潜力作为中长期的航运替代燃料，受限于燃料供应链、发动机技术、环境影响和法规规范等因素，航运公司对新燃料的选择路径不明晰，行业内并未形成新燃料选型的明确路线。目前全球尚无成熟的以甲醇或氨作为船用燃料的专用基础设施，所需的加注港口、能源供应和投资等整个产业链的配套体系还未形成。

2.3 节能技改降碳有限，无法实现净零目标

在节能技改方面，通过开展船体线型优化、加装水动力节能附体、借助风帆辅助推进系统、利用空气润滑等节能技术可以在一定程度上减少船舶燃料消耗，降低船舶碳排放强度 [8]。在实际节能方案设计时，会组合不同类型的节能减阻技术，但不同节能技术在实际中无法叠加其节能效果，最多仅能实现约 20% 左右的碳减排，短期内可在技术性和操作性层面提供有效的降碳支持，但对航运业在 2050 年左右实现净零目标的作用相对有限。

2.4 新造船需求集中，船舶产能有限

环保法规加速老旧船更新，老旧船舶在短期 CII 与中期“碳税”等措施下，经济性与竞争力逐渐降低。不仅如此，若满足 IMO 最低碳减排要求，只有建造大量的替代燃料船舶才能满足绿色转型的紧迫目标。船东面对环保法规的挑战，受制于节能技改的局限性，更倾向于新建零碳燃料船舶。现阶段可供航运公司下单的窗口期越来越短，由于现有造船产能紧张，现有船台交船排期已经排至 2028 年之后，仅能满足约 80% 的替代燃料新造船需求。

3 国内航运业绿色低碳发展主要措施

3.1 加强“双碳”战略引领，完善航绿色航运规则

（1）加强船舶能效管理，积极应对航运碳减排要求

现有 CII、EEXI 等规范指标对航运公司提出了明确的要求。通过制定船舶能效管理的近、中、远期措施，积极应对国际航运碳减排要求，开展设备能耗数据的实时采集及在线分析、设备能效水平的分析评估，制定设备能效管控和优化方案。其次是针对船队分析现有能效水平，提前储备高能效的新能源船舶，整体提高船队能效水平。

（2）发挥行业优势，积极参与航运碳减排规则制定

要秉持“大国船队”的担当，立足行业领航者定位，发挥国有航运公司船型多元化优势和丰富的管理经验优势，牵头制定行业相关标准和规则，增强行业影响力，推动、引领航运业的高质量发展。

结合实际积极参与国际航运碳减排工作。充分利用已有的经验与实践，参与排放核算方法论的选择、核算标准与模式的制定；密切关注 IMO、欧盟以及国际社会对航运业减排有关规则的制定、修改和实施等事项，适时通过国家相关部门和国际组织表达航运公司的立场和观点；与我国政府主管部门保持良好沟通，通过双、多边谈判解决可能的困境。

3.2 以科技创新赋能绿色低碳，加强绿色低碳技术研发

（1）积极开展船舶能效提升，探索船队能源结构调整

近期应重点关注水动力节能附体、空气润滑、风帆等船舶节能改装技术，相较于新造替代燃料船舶，不仅投资少、周期快，对于实现 IMO 的短期目标有能力发挥重要作用。相关节能技术改造可与绿色甲醇等替代燃

料技术的发展同步实施，以期待更成熟的替代燃料方案出现。

中远期应综合研判绿氢、绿氨等零碳燃料的技术成熟度、能源供给度、温室气体排放和经济性等多方面因素，积极开展新船型的设计研发工作，时机成熟可以启动应用示范工作。不仅如此，零碳燃料和新型减排的机制等因素都需要考虑在内，还应做好船舶碳捕捉的相关技术储备，可以帮助无法利用替代燃料的船舶获得更好的减排效果。

（2）替代燃料及配套装备技术研发

要以航运公司需求为出发点，针对新燃料技术、关键装备组建联合创新研究平台。关注未来低碳燃料选择的多元化路径，保持对绿氢、绿氨、绿色甲醇等新燃料选项持续关注和深入研究；对新燃料主机、燃料运输、加注、重点节能设备等关键技术进行集中攻关；强化数字化智能化应用，推进燃料供应数字化平台建设，全面提升数字化智能化在促进航运绿色低碳发展的能力；持续开展船端碳捕获技术研究，关注设备安装、运营、运输等成本，优化航运业碳中和的路径。

3.3 航运绿色金融服务

（1）抓住新一轮老旧营运船舶更新换代机遇

2024 年 8 月，交通运输部印发《交通运输老旧营运船舶报废更新补贴实施细则》，细则规定新建燃油动力船舶以及新能源清洁能源船舶符合条件的，船舶所有人可以申请补贴资金。补贴资金直接和船舶吨位挂钩，支持力度相当可观，是一次船舶更新换代、绿色运力结构调整的难得机遇。对于国有航运企业而言，充分利用好政策支撑，可以有效促进企业快速绿色低碳转型发展。

（2）绿色金融助力航运转型发展

自我国“双碳”目标提出以来，金融机构的绿色金融服务广度和深度不断拓宽。以交通银行为例，率先完成水上运输行业绿色低碳转型目录编制，并成功推动全国首笔水上运输业转型金融贷款落地，为中远海运发展提供了创新的绿色金融产品。围绕航运企业全链需求，从清洁燃料供应到绿色船舶建造再到绿色低碳节能技改等多个领域，充分借助绿色金融产品的力量，可以更好地支撑起航运业的绿色低碳转型。

3.4 多维度推进航运节能降碳建设

（1）夯实航运碳排放核算基础能力

夯实国内航运企业碳排放核算基础能力。将自身减排能力与数字化的排放核算、监控、认证能力相结合，打造可视、可认证、可追溯的全程绿色航运物流服务产品；协助碳排放核算，帮助上下游企业掌握碳排放、抵消碳排放。

（2）协同能源供应企业推进绿色能源供应体系建设

利用航运企业的规模优势，与绿色能源研发、生产企业开展广泛合作，引导、促进大规模、低成本的绿色甲醇和其他新燃料生产，尽可能缩小新燃料与传统燃料的价格差距。深入绿色燃料生产模式、生产技术的研发环节，从源头确保绿色燃料供给；关注能源转型催生的液化二氧化碳运输船与液氨运输船需求；积极参与国际航运业的绿色燃料供应加注建设和布局工作，保障航运绿色能源供应。

4 结 论

航运绿色低碳是未来重要的发展趋势，我国航运企业在绿色低碳转型发展过程中面临着来自多方的压力和各种困难，必须充分认识航运绿色低碳发展的重要意义和实际现状，充分做好绿色低碳发展转型实践工作，以求在国际航运市场中更具竞争力。本文基于对面临困难的系统分析，从标准规则制定、科技创新引领、绿色金融服务等多角度提供了加快航运绿色低碳发展的建议，相关内容可供航运企业参考研究，并结合实际制定具体的发展路径。

参考文献

[1] 范爱龙 , 严新平 , 李忠奎 , 等 . 我国航运业绿色低碳发展的需求、路径与展望 [J]. 船海工程 , 2024, 53(4):1-5, 12.

[2] 王悦 . 基于低碳绿色发展理念的我国航运企业竞争力评价研究 [D]. 辽宁 : 大连海事大学 , 2013.

[3] 王宇 , 孙晓伟 . “双碳”背景下“海峡股份”绿色低碳发展路径 [J]. 水运管理 , 2023, 45(8):5-7.

[4] 廖兵兵 . " 双碳 " 目标下我国航运实现碳中和路径研究 [J]. 太平洋学报 , 2022, 30(12):89-100.

[5] IMO. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. MEPC. 377(80)[S]. London: IMO, 2023.

[6] DNV. Maritime forecast to 2050[R]. Energy transition outlook, 2023.

[7] Peter Jameson, Ulrik Sanders, Camille Egloff, et.al. The Real Cost of Decarbonizing in the Shipping Industry[R]. Copenhagen: Boston Consulting Group, 2024.

[8] 穆亚娣 , 陈伟民 , 董国祥 . 基于船舶水动力性能的节能技术研究回顾 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报 , 2022, 45(3):14-19, 24.

作者简介：

陈超，博士，工程师，研究方向：船舶绿色低碳技术应用研究，（E—mail）siriuschao@qq.com，021-65968918

豪华邮轮走锚原因分析与探讨

陶士陆

(香港国航船舶管理公司，上海　200080)

摘 要：豪华邮轮在进厂维修或者营运中，有时会根据需要安排在锚地临时锚泊等候，这就涉及锚泊作业。豪华邮轮水面上的建筑物从船头至船艉分布较广，而且高大，排水量和吃水也比较大，因此受到风流作用产生的外力非常大，锚抓力和风流作用力相比，系数偏小，因此比起一般货轮，更容易在风流影响下出现走锚现象。船舶走锚的发生与船型、锚抓力、锚地底质、水深以及风流影响等多种因素有关，走锚现象给船舶的安全锚泊带来极大的隐患，甚至有时会导致严重的后果，如何确保锚泊安全是船舶管理的一项极为重要的任务。豪华邮轮“蓝梦之星”号（见图 1）在舟山六横岛中远船厂修船时，在中远船厂 3 号临时锚点锚泊时遇到冷空气影响，发生 2 次走锚的现象，而且每次走锚均是左锚，起锚后重新抛左锚后依然走锚，而重新在同一锚点抛右锚则没有发生走锚的现象。本篇以豪华邮轮“蓝梦之星”号为例，对豪华邮轮走锚的因素进行分析、研究和探讨，以寻求和采取切实可行的措施对豪华邮轮的锚泊作业进行风险防范和管控。

关键词：豪华邮轮；锚泊；走锚



图 1　“蓝梦之星”号邮轮

1　舟山六横岛中远船厂 3 号锚地气象和水文情况概述

舟山群岛气候特点：四季分明、季风明显 (秋冬多偏北风、春夏多偏南风)、冬暖夏凉；全年多大风天气，

春季多海雾、夏秋多台风等。舟山群岛一带水域影响船舶安全的常见灾害性天气主要有大风、台风、寒潮、暴雨、海雾等。六横岛位于浙江省舟山群岛南部海域，处于大陆东部副热带季风气候区，属北亚热带海洋性季风气候。舟山六横岛中远船厂位于六横岛的西北端，毗邻国际航运主航道，具有深水岸线，深水航道、深水锚地等得天独厚的地理优势。待修理的船舶到港后无法及时靠泊修理就在主航道外的船厂码头前沿水域 3 个锚泊点锚泊等候，锚泊点的水深 25 m 左右，泥沙底质。“蓝梦之星”号邮轮锚泊的 3 号临时锚泊点，由于受到周围群岛地形的影响，风向和水流的方向多变，冬季冷空气影响时主要盛行西北风，最大风向一般出现在 315° 左右。锚泊点离船厂码头较近，流向受到码头和岸形的影响比较明显，3 号锚点涨潮流最大时流向大约 270°，落潮流最大时流向大约 070°，涨、落潮流受到佛渡水道外窄里宽的影响，造成落潮流比涨潮流大，而在落潮流中有一股从中远船厂码头前沿回转的水流，这股水流冲击着 3 号锚点，向着佛渡水道主航道方向汇集，如图 2 所示。

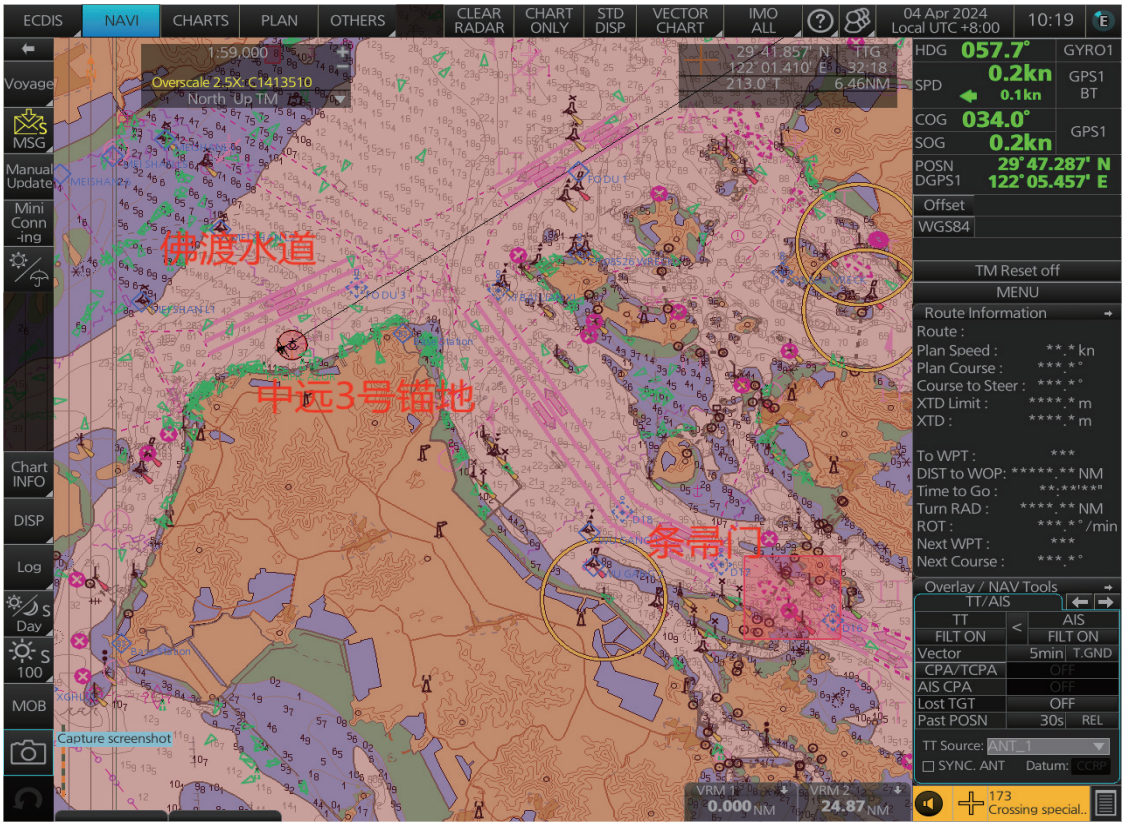


图 2　中远 3 号锚地周围水文特点

2　豪华邮轮“蓝梦之星”特点简介

豪华邮轮“蓝梦之星”号船长 180.40 m，型宽 25.50 m，型深 9.90 m，夏季满载最大吃水 7.40 m，总吨 24 782，最大排水量 15 408.6 t，配有 4 台主机，型号均为 9L46C（WARTSILA NSD）柴油机，每台主机额定功率 9 450 kW。采用可变螺距螺旋桨推进，左右均为外旋式。艏侧推功率 1 500 kW，无艉侧推。“蓝梦之星”号采用半悬挂舵，舵叶宽度 5.4 m，高度 5.6 m，桨叶上方的船体依据桨叶的形状做成弧形导流槽状，用以增加流速对于舵叶的压力提升船舶的操纵性能。静水中 4 台主机的最大营运航速可达 28.7 kn，两台主机最大营运航速可达 23.5 kn，最大载客量是 1 275 人，营运吃水首部 7.2 m，尾部 7.4 m。为了提升航行速度，球鼻首

长度达 10 m。“蓝梦之星”号船头左右各配备一个大抓力锚以及首甲板配备一个同样型号的备用锚，锚重皆为 3 t，锚链左右长度皆为 11 kn。

3 走锚的判定

当船舶受到风、流、浪等外力作用的总和大于锚和锚链所产生的抓力，就会拖动锚链和锚在海底移动，这种现象称之为走锚，如果不能得到及时有效的控制，容易与周围的其他船舶发生碰撞、触角或者搁浅等事故。判断船舶是否走锚的方法非常重要，尤其是锚泊点可供船舶旋回水域的半径较小的情况下，抛锚时的锚位测定是否精确非常重要，有些人错误地把抛锚时的船锚落点记作抓底锚位，导致初始锚位记录错误。其实船舶抛锚时，一般是有一定的船速，锚落地后要随着船舶运动一段距离才能逐渐抓牢海底，而且这段距离的大小取决于船舶抛锚时船速，以及船锚在抓底过程中从锚落点到船锚抓底后停船的时间。确定抓底锚位最精准的方法可以在船锚抓牢海底后立即根据 GPS 船位，沿着锚链长度和方向加上锚链孔到 GPS 天线的距离进行反推，从而得到精确的锚位作为初始的记录。

4 蓝梦之星邮轮在舟山中远船厂 3 号锚点走锚原因分析

4.1 横向风流作用力大

豪华邮轮无论空载还是满载都有着较大的排水量，有高大的建筑物和较大的吃水，不但水线面以上侧面积很大，而且水线面以下侧面积也很大，因此横向风、流对于船体的作用力都非常大。一旦风和流与船体达到一定的交角，根据风作用在水面上或者流作用在水面下的侧面积计算，需要锚和锚链产生足够的抓力才可以保证锚位稳定。而豪华邮轮营运的时候一般会综合考虑多方面因素以及载荷量大小而无法按照极端风、流影响下需要配备的船锚重量和锚链直径，锚重和锚链直径是决定船锚抓力大小的重要因素，因此会导致在同样风、流要素的情况下，豪华邮轮比一般货船更容易走锚。

4.2 落潮流较大

舟山中远船厂 3 号锚点，冬、春季受到寒潮影响时常有大风侵袭，由于受到周围群岛地形的影响，风向与东海海面盛行风有一定的夹角，最大风向往往出现在 315° 左右。锚点离船厂码头较近，流向受到码头和岸形的影响比较明显，锚点涨潮流主要流向大约 270°，落潮流主要流向大约 070°，涨、落潮流受到佛渡水道外窄里宽的影响，造成落潮流比涨潮流的流速大，在落潮流中有一股从中远船厂码头前沿回转的水流，这股水流冲击着 3 号锚点，向着佛渡水道主航道方向汇集，以至于每次走锚时都是船横拖着锚链和锚向着航道方向移动。舟山中远船厂 3 号锚点在风、流较小或者风、流方向接近一致时，两个锚使用情况相差无几，都没有走锚的现象发生；每次船舶走锚现象发生时基本上都是出现在 6 级以上的西到西北风且又遭遇到落潮流较大的情况下。走锚后起锚重新抛下左锚，在同样风流影响下左锚依然走锚，而起锚后重新在同一个位置抛右锚，则可以抓牢不走锚。根据此现象分析原因如下：在风、流较大且作用力的方向不一致时，比如：

（1）抛左锚时，如果风从左船艉吹来，流从船头来，风力产生转船力矩使船艉右转而船艏左转，船舶锚链容易被压到船体下方，船舶左转引起受流面增大，一旦受流面和流速大到一定程度，作用到锚链上的力超过锚和锚链的抓力时，引起走锚现象的发生。

（2）抛右锚时，风动力矩使船艉右转而使船艏左转增加受流面，而右锚锚链有个向右的分力拉动船艏右转从而减少受流面，受流面减少后锚链受力也减少，这样的因素使右锚在同样风流情况下所受流压的作用力远远小于左锚，在锚的抓力范围内，船舶是不容易走锚的。

4.3 首尾所受风动力矩相差不多

通常的尾机型货轮的首、尾侧面积相差较大，侧面受风影响时船艉受到的风动力大于船头。豪华邮轮首、

尾侧面积相差不大，因此在侧面受风影响下，首、尾受到的风动力差值不大。对于一般尾机型货轮来说，船艉受到风动力矩远远大于船头，在风向多变的情况下，侧面受风的影响下，迅速向上风方向转动，从而减小与风向的夹角。而豪华邮轮首、尾受到的风动转船力矩相差不多，在风向多变的情况下，在侧面受风影响时，船舶整体向下风方向漂移，首尾向与锚链方向容易产生较大的交角，船舶与风向产生交角则受风影响增大，作用在锚链上的力量会增大。豪华邮轮船体的水上的侧面积很大，受风影响的作用力很大，一旦风力达到一定的强度，将远远地大于锚的系固力。

4.4 首尾吃水差小

一般货轮无论是空载还是满载，为了船舶航行性能均会保持一定的前后吃水差，而豪华邮轮为了保持良好的舒适性，前后吃水差很小，侧面受流影响时也前后相差不多。在流向多变的情况下，侧面受流影响下，首、尾吃水差越大，前后受流的转船力矩差值也越大，一般货轮侧面受流时，由于后吃水大于前吃水，船艉受流的转船力矩大于船艏，因此货轮很容易在水流力矩的冲击下转向上流方向，锚链受力变小；而豪华邮轮的首、尾受到的水流的转船力矩相差不多，转向动力不足，很容易整体随流漂移，使首尾向与锚链拉力方向存在一定的交角。船舶与流向产生交角则受流影响增大，作用在锚链上的力量会增大。豪华邮轮船体的水下侧面积很大，船体一旦在流影响下产生的运动方向与锚链的夹角较大，受流影响的作用力很大，一旦流速达到一定的强度，将远远地大于锚的系固力。

5 豪华邮轮走锚的预防措施

5.1 减小风流作用力与船舶的交角

豪华邮轮由于水面以下和水面以上的侧面积都很大，因此一旦与风、流的交角比较大时，风、流作用力对船舶的影响非常大。船舶抛锚前，必须综合考虑锚地风、流对船舶作用力的方向，以尽量减小风、流作用力与船舶的交角，尤其是必须考虑可以预见的最大风向和流向，认真评估选择左锚还是右锚以便于产生理想的效果。

5.2 选择合适的锚地

选择合适的锚地对于安全锚泊非常关键。首先锚地要有足够的富余水深，如果富余水深不足，锚泊船在涨潮打横时船底过水断面会很小，船舶受到的流压短时间内会成倍的增加，从而引起船受力急剧增大。海底的底质是锚能否有足够抓力的重要因素，抓力最好的底质是粘土，其次是泥沙，而沙底较差，沙砾、贝壳等底质产生的锚抓力太差不适合船舶安全锚泊。海底底质不好时，船舶最容易走锚。另外，海底的地形也会影响锚的抓力，比如比较陡峭的地形，或者凹凸不平的地形，对锚的抓力都会产生不利的影响。

5.3 使用正确的抛锚方法

正确的抛锚方法和适当的出链长度是产生较好锚抓力的重要因素。操作不当也会增加船舶走锚的概率，如抛锚时后退速度不够、下锚时松链太快、出链过短或者锚链发生堆积等原因，都可能会使锚不能牢牢地抓底，一旦遇到强风和急流，就很容易会发生走锚现象。

5.4 不要在他船上风或正前方抛锚

尽量避免在其它抛锚船的上风或者其它船的正前方抛锚，因为刚刚下锚，无法确定是否已经抓牢，一旦在风流中走锚或者操作不当，容易形成紧迫局面。如果不得已只能在它船上风和它船的前面抛锚，一定要留有足够的余地，以策安全。

5.5 大风浪需采用更多措施

大风浪来临前，可适当增加锚链长度，也可选择抛双锚或抛止荡锚，备车待航，适当使用侧推器，减小船舶与风、流的夹角，可以减缓锚链的受力。

5.6 做好设备保养

船舶平时应做好船上设备的保养，使其处于良好使用的状态。在抛锚后，应对当时的气象水文状况进行分析，对可能引起走锚的因素进行评估，及时采取预防船舶走锚的措施，同时加强锚泊值班，熟练掌握判断走锚的常规方法，以便在船舶（包括本船和他船）发生走锚的初期及早发现，及早采取措施。

6 豪华邮轮走锚的应急措施

6.1 不可松长锚链

豪华邮轮单锚泊时一旦发生走锚，切不可松长锚链，因为松长锚链不利于锚的二次抓底。应立即抛出另一舷首锚并使之受力，如果侧推可用，可以配合使用侧推减少受流面，有助于控制走锚运动以及有助于二次抓底，防止船舶由于走锚距离过大而发生搁浅、碰撞等事故。

6.2 立即起锚

立即通知机舱备车的同时报告船长，悬挂及鸣放“Y”信号，并用“VHF”等通信手段及时报告有关当局和发出航海警告，通知附近的船舶及早避让。主机备妥后立即起锚，选择合适锚地重新抛锚。

7 结束语

为了使豪华邮轮成为旅客快乐的港湾，必须在涉及邮轮营运的每个环节都加强管理，尤其是在其营运中所涉及的安全锚泊问题要加强管理，采取切实有效的措施保障船舶锚泊作业及锚泊期间的安全。

参考文献

[1] 薛满福 . 船舶操纵与避碰 [J]. 大连海事大学学报 ,2003.

[2] 焦玉会 . 船舶安全管理基本现状分析与研究 [J]. 天津航海 ,2008.

[3] 洪碧光 , 于洋 . 控制论与船舶安全管理 [J]. 大连海事大学学报 ,1999.

作者简介：

陶士陆，高级远洋船长，香港国航远洋船舶管理有限公司副总经理兼体系主任，（E-mail）capttao@163.com，15851865058

极地卫星通信使用大规模 MIMO-OTFS 的导频设计

翁从严[1]　吴华锋[1]　韩　冰[2]　梅骁峻[1]　黄　亮[1]

（1. 上海海事大学，上海　201306；　2. 上海船舶运输科学研究所，上海　200135）

摘 要：针对极地高多普勒信道环境下信道状态信息（Channel Situation Information，CSI）准确获取问题，提出一种运用于极地卫星信道估计的多输入多输出正交时频空间调制（Multiple Input Multiple Output - Orthogonal Time Frequency Space，MIMO-OTFS）方法。首先设计一种适用于极地环境下的大规模 MIMO-OTFS 系统，实现高效可靠的信道传输；进而提出一种极地卫星通信的预编码导频设计，将信道估计问题转化为稀疏信号重构问题，充分利用稀疏延迟多普勒信道脉冲响应，以减少导频开销并实现信号可靠传输。仿真实验表明，使用所提方法进行信道估计可有效提高结果可靠性并降低系统能效。研究成果面向 2035 极地装备重点发展方向，对推进极地资源开发及航道建设等具有积极作用。

关键词：极地通信；卫星通信；MIMO-OTFS；导频设计

DOI：10.3969/j.issn.1000-4653.2022.03.001

随着全球气候逐年变暖所带来冰期缩短，极地部分航线已经实现了季节通航[1]。在带来巨大经济效益和日益显现发展潜能的同时，极地航线特殊环境也为船舶航行安全带来较大风险，保障极地航行船舶多频多模、高可靠通信在极地资源开发及安全航行保障等方面意义重大，是实现国家极地航道建设及安全的基本前提[2]。卫星通信是目前极地无线电通信的重要手段之一，具有低路径损耗及传播时延、高时空动态等特点[3]。然而极地处于偏远、高纬、高寒的地理环境，气候环境恶劣，地磁环境复杂，卫星覆盖面积小，再加之大规模通信设施研发相对落后，导致极地卫星通信存在质量差、设施少、能效低等问题[4]，数据传输信号受卫星轨道运动带来的多普勒效应更为显著，以致卫星通信系统缺乏较好的可靠性。

多输入多输出正交时频空间调制（Multiple Input Multiple Output - Orthogonal Time Frequency Space，MIMO-OTFS）作为多天线和多载波技术的结合，在当前和未来的无线通信系统中显示出了巨大的高速传输潜力[5-7]。针对极地卫星通信中时频信道双选性以及高时延和高多普勒现象，OTFS 技术可将传统时变时频（Time-Frequency，TF）域的双色散信道传输转换为时不变时延多普勒（Delay-Doppler，DD）域的二维信道，充分利用全信道的时频分集，具有良好的抗衰落性能[8-9]。大规模 MIMO 技术作为 5G 关键技术之一，与 OTFS 的融合可以在极地高多普勒扩频场景下实现更高的频谱 / 能量效率和可靠性[10]。

在极地环境下实现 MIMO-OTFS 系统信号调制解调的过程中，如何高可靠且低开销地完成导频信息识别是目前信道估计亟需解决的问题[11]。为了能够高效准确地估计分数多普勒信道的状态信息（Channel State Information，CSI），早期多数研究聚焦于基于保护带的信道估计方法。该方法实现简单且复杂度低，但其开

销比较大。为此，目前研究的主流趋势是通过取消保护带，在 DD 域插入导频并叠加在数据符号上 [12-13]。在接收端结合适当的干扰消除方法 [14] 或经典数学方法 [15] 来获取导频延展信息，完成信道参数的估计。然而，多数研究主要聚焦在星地链路的高移动性或高频段场景下 [16-17]，针对极地海上卫星通信的研究较少。因此，考虑到星载处理能力和极地特殊信道的限制，极地卫星通信中的导频设计需要兼顾消除符号间干扰和降低系统开销两方面。

本文针对极地高多普勒环境下信道状态信息的准确获取问题，以实现无线电信号多收多发、提高信号传输可靠性和降低计算复杂度为目标，提出一种运用于极地卫星信道估计的 MIMO-OTFS 方法。首先设计一种适用于极地环境下的大规模 MIMO-OTFS 系统，实现高效可靠的信道传输；进而提出一种极地卫星通信的导频预编码设计，以避免导频与数据符号间的干扰并节省系统内存消耗。

1 极地 MIMO-OTFS 系统

在本节中，我们考虑采用集中式的极地大规模 MIMO 系统。其中基站和船载用户终端都配备天线并随机分布在一个较大的区域中。基站通过前传网络与中央处理器相连。此时，由于极地卫星通信中存在的多普勒扩频现象，基站和用户之间的信道经历时频双选择性衰落。我们首先采用 OFDM 调制解调器作为时频调制解调器，考虑极地海上卫星通信中的分数多普勒现象，得到 SISO-OTFS 系统的输入输出矢量化关系。然后我们将其扩展到大规模 MIMO 系统的情况。

1.1 单输入单输出的 OTFS 系统

在 OTFS 调制中涉及三个信号传播域，即时延多普勒域、时频域和时域 [18]。为了便于后续的推导，首先对输入信号进行预处理。我们将二维时频域网格定义为 $\Lambda=\{nT,m\Delta f\}$，其中 T 和 Δf 分别是时间维度 (s) 和频率维度 (Hz) 的采样间隔，参数 $n\in[0,N-1]$，$m\in[0,M-1](N,M\in\mathbf{Z}^{+})$。同理，将二维时延多普勒域网格定义为 $\Gamma=\{k/NT,l/M\Delta f\}$，其中 $1/M\Delta f$ 和 $1/NT$ 分别为时延维度和多普勒维度的采样间隔，参数 $k\in[\lceil -N/2\rceil,\lceil N/2\rceil-1]$，$l\in[0,M-1]$。$M$ 和 N 分别是子载波和符号的个数。通常，OTFS 的带宽 $B=M\Delta f$，帧长 $T_f=NT$。

在船用发射端，我们在 DD 域利用 OFDM 调制器进行星座调制并插入导频。在 Γ 上的 DD 域中排列一组 M 行和 N 列的正交调幅（QAM）符号，每个符号取自 QAM 调制字母表 $A=\{a_1,...,a_Q\}$ 中，得到 DD 域信号 $X^{DD}[k,l]$。在发射机中利用反辛有限傅里叶变换（ISFFT），将 DD 域符号转换为 TF 域符号 $X^{TF}[n,m]$：

$$X^{TF}[n,m]=\iint X^{DD}[k,l]e^{j2\pi(\frac{nk}{N}-\frac{ml}{M})}dkdl \tag{1}$$

接着，使用 OFDM 调制器作为时频调制器，在时域内进行海森堡变换，即利用发射波将 $X^{TF}[n,m]$ 转换为连续传输信号：

$$s(t)=\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1}X^{TF}[n,m]\cdot g_{Tx}(t-nT)\times e^{j2\pi\cdot m\Delta f(t-nT-\frac{M_{CP}}{M}T_{CP})} \tag{2}$$

其中，$g_{Tx}(\cdot)$ 为整形脉冲滤波器，通常定义为 $g_{Tx}(t)=1/\sqrt{T_{CP}},0\le t\le T$（当 t 为其他值时，$g_{Tx}(t)$ 取 0。在发射端我们通过增加循环前缀 CP 使相邻子载波间信号在 TF 域上具有强相似性，Tcp 为存在循环前缀 CP 的 OFDM 码元持续时间，考虑到 CP 长度 M_{CP}，则 $T_{CP}=MT/M+M_{CP}$。

由于极地卫星通信环境的特殊性，极地卫星链路具有高多普勒特性。我们考虑到信道时频双选性，将信号传输分为直接传输的视距无线传输（Non Line of Sight，LoS）路径和冰面多径效应导致的非视距无线传输（Line of Sight，NLoS）路径。因此，极地卫星通信信道应考虑时变、多径传播和多普勒效应。则 TF 域的信道响应可以表示为：

$$h^{TF}(t,f)=\sqrt{\frac{R}{R+1}}e^{j2\pi(t\upsilon_0-f\tau_0)}+\sqrt{\frac{1}{R+1}}\sum_{i=1}^{P}\sum_{s_i=1}^{S}h_{s_i}e^{j2\pi(t\upsilon_{s_i}-f\tau_{s_i})} \tag{3}$$

其中 R 是莱斯因子，表示直达链路与多条等效反射链路的强度比；υ_0 和 τ_0 分别为 LoS 路径的多普勒频移和传播延迟；此处我们假设船用收发器之间的 NLoS 主路径数为 P，每条主路径由 S 个子路径组成，其中 h_{si} 和 v_{si} 分别为 NLoS 第 $i+1$ 个主路径的第 s_i+1 个子路径中的复路径增益和多普勒频率。而第 $i+1$ 个主路径的所有子路径均具有相同的时延 τ_{si}。值得注意的是，公式（3）中的信道模型适用于 LEO 卫星与船载设备相对位置变化不明显的情况，这与极地船舶的运动特点相符，因此可以使用该模型。

为了将时变信道转换为时不变信道，分别对信道响应 $h^{TF}(t,f)$ 沿时间维度和频率维度进行傅里叶变换和傅里叶反变换，可以得到 DD 域的信道响应：

$$h^{DD}(\tau,\upsilon)=\sum_{i=0}^{P-1}\sum_{s_i=0}^{S-1}h_{s_i}\delta(\tau-\tau_{s_i})\delta(\upsilon-\upsilon_{s_i}) \tag{4}$$

通过分别对时延和多普勒频率的分辨率进行归一化，我们将第 s_i 个子路径中的时延和多普勒用抽头指数来表示

$$\tau_{s_i}=\frac{l_{s_i}+Mb_{s_i}}{M\Delta f},\quad \upsilon_{s_i}=\frac{k_{s_i}+\tilde{k}_{s_i}+Na_{s_i}}{NT} \tag{5}$$

l_{si} 和 k_{si} 分别是第 s_i 条子路径的时延抽头和多普勒抽头，$\tilde{k}_{si}$ 为分数多普勒抽头且取值范围为 $-0.5<\tilde{k}_{si}\le 0.5$。$a_{si}$ 和 b_{si} 分别表示外部多普勒频移和外部时延，代表每个子路径中超出一个载波间隔和一个符号持续时间的部分。由于典型的宽带系统中，时延轴的分辨率可以将每个路径时延映射到一个整数时延抽头，因此不需要考虑分数时延。此外，我们还定义了所有路径的时延和多普勒频移的抽头集合为 $L=[l_0,\ldots,l_{si}]$，$K=[k_0+\tilde{k}_0,\ldots,k_{si}+\tilde{k}_{si}]$。

在船载接收端，发射信号 $s(t)$ 通过多径时变信道传输，接收到的信号 $r(t)$ 可以表示为：

$$r(t)=\iint h^{DD}(\tau,\upsilon)\cdot s(t-\tau)\times e^{2\pi j\cdot v(t-\tau)}d\upsilon d\tau+\omega_{TF}(t) \tag{6}$$

式中，$\omega(t)$ 表示极地卫星通信 TF 域上常见的加性高斯白噪声，其平均值为 0，方差为 σ^2。值得注意的是，我们在接收端删除了 CP，通过交叉模糊函数进行采样，旨在减少信号冗杂并对抗多径效应的影响。接收到的时频域信号可表示为：

$$Y^{TF}[n,m]=A_{g_{Rx},r}(\tau,\upsilon)|_{\tau=nT,\upsilon=m\Delta f} \tag{7}$$

接着，我们利用辛有限傅里叶变换（SFFT）将 TF 域的 $Y^{TF}[n,m]$ 映射到 DD 域中的符号 $Y^{DD}[k,l]$ 为：

$$Y^{DD}[k,l]=\frac{1}{\sqrt{NM}}\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1}Y^{TF}[n,m]\times e^{-j2\pi(\frac{nk}{N}-\frac{ml}{M})} \tag{8}$$

通过以上讨论，我们可以得到一个 TF 域上发射端到接收端的 SISIO-OTFS 输入输出关系，如公式（8）所示。为了进一步提高频谱效率，我们利用信道路径信息修改传感矩阵的相位补偿矩阵以提高信道估计性能。我们采用相对较短的 CP，并选择适当的符号时长和载波间距完成简化。因此在下文中我们将重点讨论 $\tau_i\ll T$ 且 $v_i\ll\triangle f$ 的情况。

1.2 大规模 MIMO-OTFS 下行链路传输

在 SISO-OTFS 的基础上，我们考虑采用集中式大规模 MIMO[19]。其中卫星在空间域部署具有均匀平面阵列（UPA）[20] 的 $S_y\times S_z$ 个天线，船用终端部署也部署 UPA 的 $S_x\times S_y$，分别表示多卫星对单个船用终端和多用

户终端对单个卫星的天线阵列。各天线间距设置为半波长。在保障信号正常传输的前提下，我们对多船用终端 xOy 平面进行推导，yOz 平面与前者相似。我们假设在给定时间间隔的内存在 U 个单天线设计的船用卫星通信用户终端。各终端的活动状态用活度指标 β_U 表示，当设备处于活动状态时等于 1，否则等于 0。则处于活动状态可以向卫星传输数据的终端数 $U_a=\{u\,|\,\beta_u=1,0\le u\le U-1\}$。

我们将 DD 域信道扩展到时频多普勒空间（Delay-Doppler-Space，DDS）域中，信息符号由 DD 域脉冲携带，该脉冲为二维 Sinc 函数。在大规模 MIMO 系统中，当 $M\to\infty$，$N\to\infty$ 时，DD 域基函数沿时延维的宽度与系统带宽 $M\Delta f$ 成反比，其沿多普勒维的宽度与 OTFS 帧占用的时间 NT 成反比 [21]，并趋向于二维狄拉克脉冲，所产生 DD 域的二维局域脉冲响应。同时，受海森堡测不准原理影响，与之相对应的 TF 域基函数阻止了相应的脉冲定位，导致极地时变双选信道的脉冲响应较为复杂。由此可见采用 DD 域可以充分利用信道稀疏性，用更少的参数对信道进行描述。

为了充分利用角度域的稀疏性，提高信道估计可靠性并降低系统开销。我们采用二维离散傅立叶变换（2D-DFT），将 DDS 域信道沿空间维度 A 得到时延 - 多普勒 - 角度域（Delay-Doppler-Angle，DDA）域信道如下：

$$H^{DDA}[k,l,a_x,a_y]=\frac{1}{\sqrt{S_xS_y}}\sum_{s_x=0}^{S_x-1}\sum_{s_y=0}^{S_y-1}H^{DDS}[k,l,s_x,s_y]\times e^{-j2\pi\left(\frac{s_xa_x}{S_x}+\frac{s_ya_y}{S_{zy}}\right)} \tag{9}$$

式中 $a_x=0,\ldots,S_x-1$，$a_y=0,\ldots,S_y-1$ 为角度域参数。从公式（9）中，我们可以发现信道 $H^{DDA}[k,l,a_x,a_y]$ 分布在 DDA 域上的各个位置，在时延域 $k\approx NT\upsilon_{u,si}$，在多普勒频率域 $l\approx M\Delta f\tau_{u,si}$，在角度域上 $a_x\approx S_x\sin\phi_u\sin\varphi_u/2$ 和 $a_y\approx S_y\cos\phi_u/2$。这意味着该信道在 DDA 域具有三维稀疏性。又根据叠加原理，可得到 DDA 域所有船用终端的接收符号如下：

$$\begin{aligned}Y^{DDA}[k,l,a_x,a_y]&=\sum_{u=0}^{U-1}\beta_uY_u^{DDA}[k,l,a_x,a_y]\\&=\sum_{u=0}^{U-1}\sum_{l'=0}^{M-1}\sum_{k'=\lceil -N/2\rceil}^{\lceil N/2\rceil-1}\beta_u\phi(l,l')H_u^{DDA}[k',l',a_x,a_y]\\&\quad\times X^{DD}[(k-k')_N,(l-l')_M]+\omega_{DDA}[k,l,a_x,a_y]\end{aligned} \tag{10}$$

式中 $\omega_{DDA}[k,l,a_x,a_y]\sim\mathrm{CN}(0,\sigma^2)$ 为精度为 σ 的 DDA 域高斯噪声。

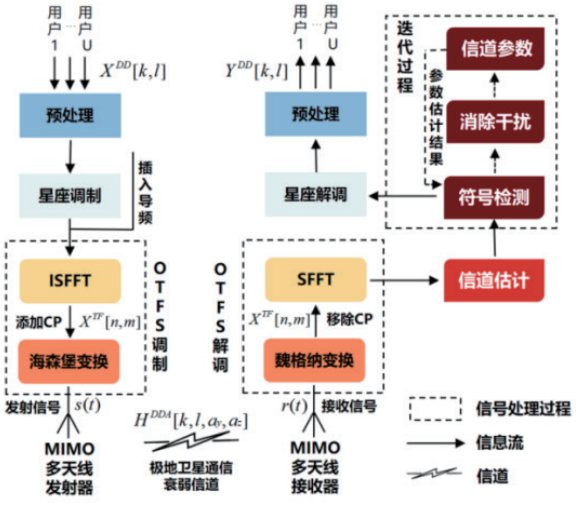


图 1　极地卫星通信大规模 MIMO-OTFS 系统

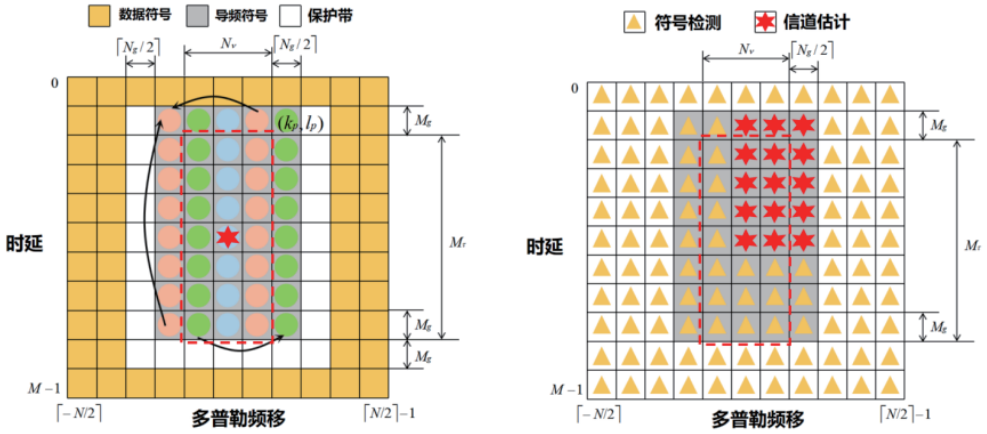
综合上述系统模型分析，我们可以得到极地大规模 MIMO-OTFS 系统的流程图，如图 1 所示。根据极地大

规模 MIMO-OTFS 系统下行链路传输模型和 DDA 域信道的稀疏性，下行链路的信道估计问题实质上是一个稀疏信号重构问题 [5]。在下一章中，我们将设计一种确定性的导频设计及极地卫星通信下行链路的 CSI 获取模型。

2　极地 CSI 获取和导频设计

在 DDA 域中，由于极地卫星通信系统中主导传播路径的数量有限，因此 3D 信道沿时延维度稀疏；由于路径的多普勒频率通常远小于系统带宽，因此 3D 信道沿多普勒维是块稀疏的；由于岸基到卫星处路径的离去角扩散通常较小，因此 3D 通道沿角度维度是突发稀疏的 [21]。当我们设计导频时，需考虑 DDA 域的信道矩阵 $\boldsymbol{H}$ 具有二维突发块稀疏性，即它在沿列方向的角度域和沿行方向 DD 域均具有突发块稀疏性。根据这一特性，我们提出一种 DD 域内导频符号插入方法，如图 2 所示。

具体来说，在船载发射端，图 2（a）所示。我们认为每个船载天线的导频在 DD 域中的位置相同，即 $k=k_p,\ldots,k_p+N_v-1$，$l=l_p,\ldots,l_p+M_\tau-1$。其中，$k_p$ 和 l_p 分别为导频在多普勒域和时延域的初始位置。N_v 和 M_τ 分别为导频沿多普勒维度和时延维度的长度。我们将保护间隔插入到一个 OTFS 帧中，用于消除数据与导频之间的干扰，并在保护带中插入循环前缀，这与公式（2）中在发射端加入循环前缀 CP 的模型相匹配。然而，如果直接使用传统的基于保护带的导频系统（红色虚线方框），在极地卫星通信系统的导频矩阵中将出现零符号，影响导频矩阵相干性，严重降低通信可靠性。为了克服这个问题，我们沿多普勒维度将首个 $\lceil N_g/2\rceil$ 个导频（绿色圆形）添加到末尾，将最后一 $\lceil N_g/2\rceil$ 个导频（粉色圆形）添加到开始，将长度为 $\lceil N_g/2\rceil$ 的保护带放置在导频的开始和最后。在时延维度，我们将最后一行 M_g 添加到开始，将保护间隔放置在导频最后。我们还在将导频符号中央设置中央导频，以便在接收端进行信道估计。在接收端，如图 2（b）所示。我们分别对数据符号和导频符号进行信号检测和信道估计。为了在保证通信可靠性的基础上降低复杂度，我们选用部分导频（红色五角星）进行信道估计，其他符号均进行信号检测。同时，我们删除循环前缀，这与公式（6）相对应。



（a）发射端符号排列　　（b）接收端符号排列

图 2　极地卫星通信中 DD 域内导频设计

值得注意的是，DD 域信道沿时延维度和多普勒维度分别存在有限支持 $[0,M_{\max}-1]$ 和 $[-N_{\max},N_{\max}]$。对于时延维度，保护间隔应设置在导频的起始和末端，长度 $M_g\geq M_{\max}-1$ 并假设 $M_g\geq M_\tau$。然而，由于由于实际系统中通常存在非分数多普勒现象。为了充分挖掘多普勒域的稀疏性，我们利用多普勒域的所有可用资源发送导频，即对于 H^{DDA} 只考虑 $k\in[-N_{\max},N_{\max}-1]$，范围外的值取零。保护间隔应放置在长度 $N_g/2\geq N_{\max}/2$ 的导频开始和结束处。因此，DDA 域信道 $H^{DDA}(k',l',a_x,a_y)$ 中 $l'\in[0,M_g]$ 且 $k'\in[\lceil -N_g/2\rceil,\lceil N_g/2\rceil-1]$。此外，数据符号应放置在除导频和保护间隔外的位置。最后，在给定的时间间隔内，活跃终端同时发送导频信号。信道估计接收符号的位置为 k 和 l，则公式（10）可以改写为：

$$\boldsymbol{Y}=(\boldsymbol{\Phi}\cdot\boldsymbol{X})\boldsymbol{H}+\boldsymbol{W} \tag{11}$$

其中 $\boldsymbol{W}\in\mathbb{C}^{M\tau N\upsilon}\times 1$ 为 MSC 中的独立高斯噪声。接收信号矩阵 $\boldsymbol{Y}\in\mathbb{C}^{M\tau N\upsilon\times 1}$ 的列向量矩阵可以表示为 $vec(\boldsymbol{Y}_p^{DDA}[:,:,a_x,a_y])$。$\boldsymbol{\Phi}=[\boldsymbol{\Phi}_0,\ldots,\boldsymbol{\Phi}_U—1]$ 中包含相位补偿矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_u\in\mathbb{C}^{M\tau N\upsilon\times UM\tau N\upsilon}$。发射信号矩阵 $\boldsymbol{X}=[\boldsymbol{X}_0,\ldots,\boldsymbol{X}_U—1]\in\mathbb{C}^{M\tau N\upsilon\times UM\tau N\upsilon}$。其中 $\boldsymbol{X}_u\in C^{M\tau N\upsilon\times M\tau N\upsilon}$ 为第 u 个船载卫星通信用户发射端 $\boldsymbol{X}_u^{DDA}[(k—k')_N,(l—l')_M,ax,ay]$ 的导频矩阵。$\boldsymbol{H}=\in\mathbb{C}^{UMgNg\times 1}$ 是 DDA 域信道 $H^{DDA}[k',l',a_x,a_y]$ 的矢量矩阵形式。

我们进一步定义 $\boldsymbol{\Theta}=\boldsymbol{\Phi}\odot\boldsymbol{X}$。此时可以将极地卫星通信大规模 MIMO-OTFS 系统的 CSI 获取问题转变为一个稀疏信号重构问题。其中 $\boldsymbol{H}$ 为待恢复的稀疏向量，$\boldsymbol{\grave{E}}$ 为传感矩阵。但由于相位补偿矩阵 $\boldsymbol{\ddot{O}}$ 与通道有关，无法用未知的传感矩阵直接恢复 $\boldsymbol{H}$。幸运的是，当选择足够大的载波间距 Δf 和一个 OTFS 帧中的 OFDM 符号数 $N\to\infty$ 时，$\boldsymbol{\Theta}$ 转化为 $\tilde{\boldsymbol{\Theta}}\triangleq\tilde{\boldsymbol{\Phi}}\odot\boldsymbol{X}$。传感矩阵 $\boldsymbol{\Theta}$ 和$\tilde{\boldsymbol{\Theta}}$仅有相位补偿矩不同。我们结合两者优势并运用于压缩感知矩阵中。首先使用与信道无关的相位补偿矩阵$\tilde{\boldsymbol{\Phi}}$，可以直接获得粗感知矩阵$\tilde{\boldsymbol{\Theta}}$，但性能略有下降。通过提取路径时延和多普勒频移获取参数估计结果，并进行多次迭代，对$\tilde{\boldsymbol{\Theta}}$进行修正得到更精确的 $\boldsymbol{\Phi}$，并获得最终信道 $\tilde{\boldsymbol{H}}$ 。

接着，由于在极地卫星通信常用的码分多址 CDMA 系统中，每个用户的码分序列与其他用户的序列是相互正交的。因此我们采用一种自相关性好、互相关性低的二进制正交 Walsh-Hadamard 序列（以下简称为 WH 序列）进行预编码。该序列由沃尔什函数和哈达玛矩阵组成，并具有简单的递推关系，即高阶矩阵可用两个低阶矩阵的克罗内克积求得（ $\boldsymbol{H}_{2^n}=\boldsymbol{H}_2\otimes\boldsymbol{H}_{2^{n-1}}$ ）。在迭代次数较多的情况下，该序列可以使导频序列与其循环位移版本正交，以保证角度域导频矩阵各列之间的正交性。又由于 WH 变换具有能量集中的性质，即当传输的数据符号越是均匀分布，则经过变换后的数据越是集中于矩阵的边角上。因此 WH 序列非常适合本文所提出的导频设计。我们定义根为 r 长度为 H_a 且循环位移为 ha 的 WH 序列为$Wal_{ha}^{Ha,r}$，该序列可用于 $\theta_L\theta_K$ 的角度中，其中 $\theta_L=\lfloor M_\tau/M_g\rfloor$ 且 $\theta_K=\lfloor N_\upsilon/N_g\rfloor$。其第 $n+1$ 个元素可表示为：

$$Wal_{ha}^{Ha,r}(n,t)=\frac{1}{\sqrt{H}}\prod_{k=0}^{g-1}[R(n+1,t)] \tag{12}$$

其中 $R(n,t)=sign[\sin(2^n\pi t)]$ 为拉德梅克函数，且符号函数 $sign[f(x)]$ 在 $f(x)>0$ 时取 1，在 $\boldsymbol{Z}^+=(I_{\mathrm{NO}}^{\min}$时取 -1。为了分析导频矩阵列间相关性，我们按列向量分成 g 个集合，每个集合中有$M_\tau N_\upsilon\times\theta_L\theta_K$列。

因此，基于 WH 序列，我们总结了所提出的导频预编码设计的信道估计方法。在极地卫星通信系统中使用所提出的预编码导频可以根据不同的系统配置快速生成，而不需要预先花费大量内存进行存储。与随机导频相比，确定性的导频设计较容易实现并能够有效节约内存。虽然由于传感矩阵是导频矩阵 X^{DDA} 与相位补偿矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 或 $\tilde{\boldsymbol{\Phi}}$的哈达玛乘积，会导致传感矩阵各列之间的相关性受到相位补偿矩阵的影响。但根据仿真结果表明，所提出的预编码频设计仍然优于随机导频，具体分析见下节。

3 仿真方案与结果

根据上述所述的方法，在本节中，我们结合极地特殊衰落信道模型，利用数值模拟从可靠性和系统开销两方面来说明所提出导频设计方案的性能。我们采用 3D-SOMP 做为压缩感知算法进行信道估计，采用广义近似消息传递算法 GAMP 进行符号检测，利用准确定性无线电信道发生器（QuaDRiGa）为蒙特卡罗模拟生成仿真信道。相关仿真参数见表 1。

为验证导频识别的可靠性，我们采用误码率 BER 指标和比特信噪比 Eb/N0 做为衡量指标。在接收端为理想信道参数的情况下，图 3 给出了进行预编码导频设计前后不同调制技术及不同 MIMO 配置的 BER 性能比较。在延迟多普勒域的传输信号采用 4QAM 调制。最小均方误差（MMSE）检测器利用基于感知矩阵的信道估计算法得到的 CSI 恢复传输数据。可以观察到，极地卫星通信所采用所提出的预编码导频设计较未进行预编码的

OTFS 及传统 OFDM 均有较大提升，在大约 20 dB 的信噪比下，未编码系统的误码率达到 10^{-4}，而在预编码系统中，达到相同的误码率所需的信噪比降低了约 2 dB。同时我们考虑单用户情况下 SISO 和 2 × 2 多用户 MIMO 的情况。由此可见，所提出的预编码导频设计在极地多用户卫星通信中具有较为良好的可靠性。

表 1　极地 MIMO–OTFS 仿真系统参数

参数	数值
载波频率（GHz）	4
子载波间隔（kHz）	15
OTFS 子载波（M 行 N 列）	（32,32）
循环前缀长度（Mcp）	8
Turbo 解码叠带次数	8
主路径数量	6
每个主路径中的子路径数量	5
最大迭代次数	30
MIMO 配置	1 × 1, 2 × 2

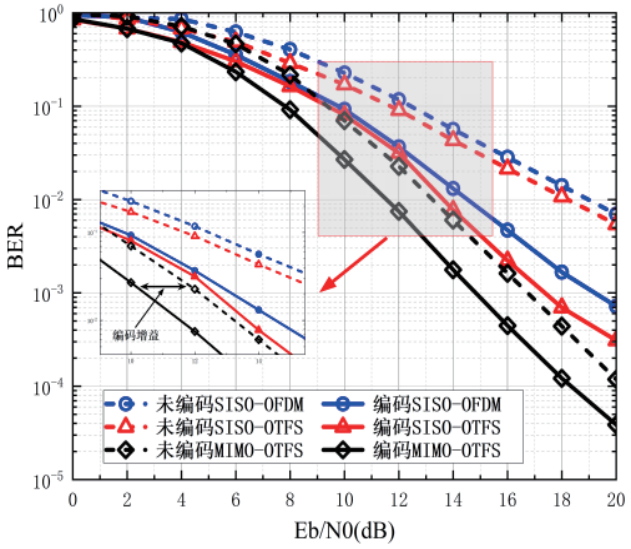


图 3　预编码导频设计前后 OTFS 和 OFDM 比较

对于系统开销，我们采用文中所提的确定性导频设计，将导频开销比定义为导频数与总延迟 - 多普勒域资源网格之比，即 $M_\tau N_\upsilon / MN$。通过使用归一化均方误差（NMSE），对仅使用 $\tilde{\boldsymbol{\Theta}}$ 的粗信道估计和文中所提出的 CSI 获取模型 WHPD 进行对比，NMSE 采用信道向量的欧几里得范数平方计算，公式如下：

$$\mathrm{NMSE}=\frac{\left\|\tilde{\boldsymbol{H}}-\boldsymbol{H}\right\|_2^2}{\left\|\boldsymbol{H}\right\|_2^2} \tag{13}$$

图 4 我们根据导频开销比比较了不同导频类型下不同算法的 NMSE 性能。随机导频由复高斯随机序列组成。我们观察到，当使用相同类型的导频时，所提出的 CSI 获取模型在不同导频开销比下优于使用 $\tilde{\boldsymbol{\Theta}}$ 粗信道估计算法。我们充分考虑极地卫星通信中存在的分数多普勒现象，并使用从粗信道中提取路径时延和多普勒频移，进行迭代以重建更精确的传感矩阵。此外，在相同算法下，文中所提出的确定性导频设计较传统随机导频具有更好的能效性能。例如：所提出的确定性导频设计只需 30% 的导频开销比即可达到 0.018 的 NMSE，而随机导频至少需要 35% 的导频开销比，影响整体系统能耗。由于所设计的导频矩阵各列之间的相干性较低，与随机导频相比具有更好的传感性能。

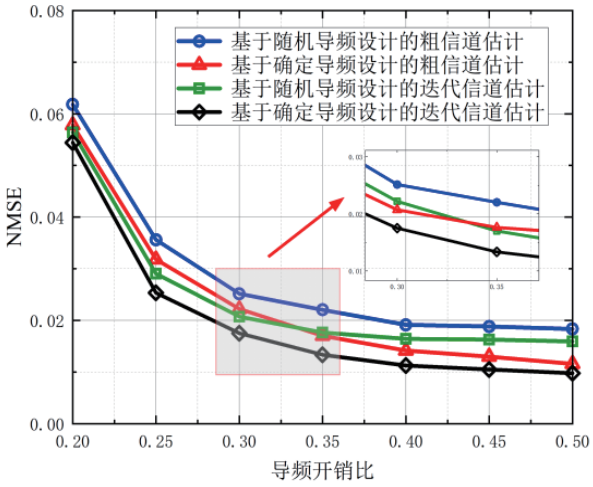


图 4　NMSE 性能与导频开销比

4　结　论

本文提出一种适用于极地卫星通信高多普勒场景下存在分数多普勒现象的 MIMO-OTFS 导频设计方案。首先我们考虑极地卫星通信特殊性，利用基于多天线技术的调制解调算法 MIMO-OTFS，在实现极地无线电信号的多收多发的同时，增强卫星通信在多普勒衰落信道中的可靠性。随后，我们提出一种基于 WH 序列的预编码导频设计，将极地高多普勒环境下的信道估计问题转化为压缩感知求解问题，通过感知矩阵的粗估计和迭代更新，得到最终的信道估计结果。最后，我们利用 OTFS 算法的符号耦合和稀疏延迟多普勒信道脉冲响应特性，在有效提高极地通信系统能效的基础上，保证高多普勒环境下极地无线电通信的可靠性。仿真结果表明，该方案能够准确获取信道状态信息和设备活动信息，并有效降低系统开销，可为极地卫星通信的导频预编码设计提供参考，最终支持极地船载综合无线电通信系统的研发。

参考文献

[1] 于立伟 , 王俊荣 , 王树青 , 等 . 我国极地装备技术发展战略研究 [J]. 中国工程科学 , 2020, 22(06): 84-93.

[2] Mei X J, Han D Z, Chen Y Z, et al. Target localization using information fusion in WSNs-based Marine search and rescue [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 68: 227-238.

[3] 董浩 , 宋亮 , 化存卿 , 等 . 海上通信技术发展与研究综述 [J]. 电信科学 , 2022, 38(05): 1-17.

[4] Cheffena M. High Capacity Radio Communication for the Polar Region: Challenges and Potential Solutions[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(2): 238-244.

[5] Shen W Q, Dai L L, An J P, et al. Channel Estimation for Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) Massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(16): 4204-4217.

[6] Kollengode Ramachandran M, Chockalingam A. MIMO-OTFS in high-Doppler fading channels: signal detection and channel estimation[C]. Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 206-212.

[7] Li M Y, Zhang S, Gao F F, et al. A New Path Division Multiple Access for the Massive MIMO-OTFS Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(4): 903-918.

[8] Raviteja P, Hong Y, Viterbo E, et al. Effective diversity of OTFS modulation[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(2): 249-253.

[9] Surabh G D, Augustine R M, Chockalingam A. On the diversity of uncoded OTFS modulation in doubly-dispersive channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(6): 3049-3063.

[10] 邢旺 , 唐晓刚 , 周一青 , 等 . 面向 OTFS 的时延 - 多普勒域信道估计方法综述 [J]. 通信学报 , 2022, 43(12): 188-201.

[11] Raviteja P, Phan K T, Hong Y. Embedded pilot-aided channel estimation for OTFS in delay-Doppler channels[J]. IEEE Transactionson Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4906-4917.

[12] Yuan W J, Li S Y, Wei Z Q, et al. Data-aided channel estimation for OTFS systems with a superimposed pilot and data transmission scheme[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(9): 1954-1958.

[13] Zhao L, Gao W J, Guo W B. Sparse Bayesian learning of delay-Doppler channel for OTFS system[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(12): 2766-2769.

[14] Mishra H B, SinghI P, Prasad A K, et al. OTFS channel estimation and data detection designs with superimposed pilots[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(4): 2258-2274.

[15] 蒋占军 , 刘庆达 . 高速移动通信系统中 OTFS 信道估计算法研究 [J]. 电子与信息学报 , 2021, 43(10): 2878-2885.

[16] Liu Y S, Zhang S, Gao F F, et al. Uplink-Aided High Mobility Downlink Channel Estimation Over Massive MIMO-OTFS System[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(9): 1994-2009.

[17] Shen B X, Wu Y P, An J P, et al. Random Access With Massive MIMO-OTFS in LEO Satellite Communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(10): 2865-2881.

[18] Molisch A F. Delay-Doppler Communications: Principles and Applications[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(3): 10.

[19] Zhang M J, Gao J B, Zhong C J. A Deep Learning-Based Framework for Low Complexity Multiuser MIMO Precoding Design[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(12): 11193-11206.

[20] Zhang X, Sun S, Tao M X, et al. Joint Hybrid Beamforming and User Scheduling for Multi-Satellite Cooperative Networks[C]. 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Glasgow, United Kingdom, 2023: 1-6.

[21] Mohammed S K. Derivation of OTFS Modulation From First Principles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(8): 7619-7636.

基金项目：

国家重点研发计划（2021YFC2801002），国家自然科学基金（52331012、52201401、52201403、52102397、52071200），上海市科学技术委员会基金（23010502000），中国博士后科学基金（2022M712027），上海市博士后优秀人才计划（2022767）

作者简介：

翁从严，研究生，（E-mail）wengcy0216@163.com

吴华锋，教授，（E-mail）hfwu@shmtu.edu.cn

韩冰，研究员，（E-mail）han.bing@coscoshipping.com

梅骁峻，副教授，（E-mail）xjmei@shmtu.edu.cn

黄亮，研究生，（E-mail）202130110076@stu.shmtu.edu.cn

大型集装箱船在洋山四期顺流离泊操纵浅析

高　涛　蔡　斌　赵建成　谢云华

（上海港引航站，上海　200082）

摘　要：为了提高码头利用率，满足集装箱船的船期要求，顺流离泊作业已经成为一种常态化的操作模式[1]。上海洋山港在全港区实行了顺流离泊作业模式，但相较于其余 2 个港区，洋山四期码头（尚东码头）地形影响引起的潮流变化，码头前沿水域和与之连接航道设置的特殊性，以及船舶的大型化和深吃水，决定了这里的顺流离泊难度更高，操作要求更为精细和严格。本文通过介绍洋山四期码头和航道的设置以及码头前沿水域的潮流情况，分析开展顺流作业的风险点和操纵难点，通过实例，结合自身的操纵经验，提出相关操纵要领和建议，为大型集装箱船在洋山四期安全顺流离泊提供技术参考。

关键词：大型集装箱船；洋山四期码头特殊性；顺流离泊；安全

0　引　言

洋山深水港集装箱吞吐量几乎占上海港半壁江山，尤其是洋山四期即尚东分公司的投入运营极大地提升了洋山港的接纳能力。2022 年，洋山四期集装箱吞吐量超 635 万 TEU，同比增长 11.4%，创历史新高。除了尚东公司扩大生产规模和持续科技赋能之外，上海港引航站洋山分站采用顺流离泊、双向通航、套泊作业等特殊作业方式增加靠离泊方式和手段，拓展靠离泊窗口时间，也起到了很大的助推作用。这些与传统方式不同的操纵模式，增加了船舶靠离泊操纵的难度，对引航安全提出了新的挑战，在洋山四期泊位进行顺流离泊更是如此。本文对在洋山四期顺流离泊存在的风险点和操纵难点，以及具体的操纵方法提出建议，供大家参考。

1　洋山四期码头基本情况

1.1　地理位置及地形特点

洋山四期码头位于颗珠山汊道西侧，岸线长度 2 800 m，自东向西依次为 1—7 泊位，设计靠泊 15 万吨级集装箱船。码头走向 106°/286°，码头前沿水域是由洋山四期码头东端、西端，以及 H59、H58、H52、H57、H56 灯浮（其中 H58、H57 是虚拟灯浮）组成的水域。码头前沿水域与港外水道相连是通过位于一期码头前沿宽度为 250 m、浚深 15.5 m 的深水航道，H52 和 H57 的连线是连接码头前沿水域深水航道（以下简称深水航道）的西段入口。码头下角与 H56 灯浮连线走向 355°/175°，距 H57 虚拟灯浮 1.1 n mile，离东侧的蒋公柱岛距离约 800 m，如图 1 所示。

1.2　码头附近潮流特点[2]

如图 2 所示，洋山四期码头前沿水域总体呈现往复流特征，属不正规半日潮，一日内分别出现两次高潮和低潮。码头前沿涨潮平均流向分别为 289°、302°，落潮平均流向分别为 107°、120°，实测垂线最大流速涨落潮均为 1.57 m/s。洋山四期 1、2 泊前沿受港内航道和颗珠山汊道两股流的影响，流向复杂多变。深水航道水流流

向近乎与洋一期码头走向平行，涨落流分别为 310° 和 130°。

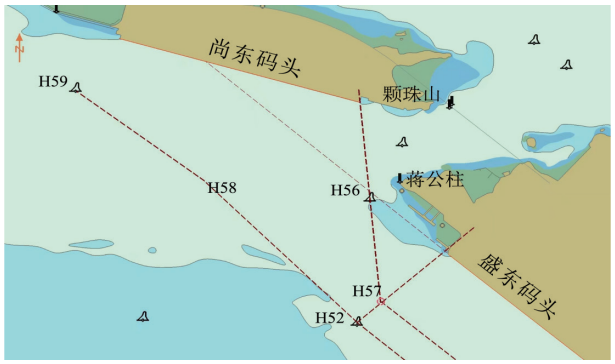


图 1　洋山四期地理位置

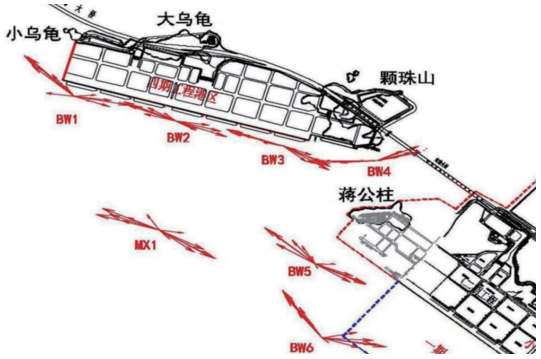


图 2　洋山四期码头附近流向示意图

1.3　码头的特殊性

洋山四期码头地理位置特殊，相对于一期、三期码头泊位有其特别之处。如图 1 所示，由于洋山四期码头与洋一期（盛东）码头走向不一致，相对于洋一期码头相差 26° ，东端的泊位（1、2、3 泊位）并不处于洋一期码头的延长线上，且与深水航道横距较大（从 H56 灯浮至洋山四期 1 泊东端垂距有 960 m），纵距却很小（从 H56 灯浮至洋山四期 1 泊东端纵距只有 380 m）。码头前沿水域与连接的深水航道流向不一致，而且前沿与港外航道连接的深水航道宽度仅 250m，因此从码头前沿驶入深水航道需要克服着较大的流压，在东端泊位船舶离泊时容易形成大角度离泊方式。洋山四期码头为开敞式码头，四周无明显遮挡，靠离泊时受风影响较大，特别是甲板上集装箱装载层数较高时。春夏盛行南风时，港区内会产生波浪，会大大降低拖船的使用效率。

2　顺流离泊操纵难点分析

2.1 顺流离泊俗称“反潮水”离泊，是在顺流条件下进行离泊作业的操纵模式，相对于正常顶流状态下的离泊[3]，它的难点在于：

（1）大型集装箱船船艏是流线型，船艉是方型或近似方型，相对水流有前进速度时，船艉迎流阻力显著大于船头；

（2）通常情况下，由于螺旋桨结构的原因，相同转速下倒车功率小于正车功率，特别是在目前主机主要采用低速机的情况下，该情况更加明显；

（3）顶流离泊时需用正车抑制后缩，螺旋桨排出流可以产生舵力，采用车舵联动有助于操纵。顺流离泊时需用倒车抑制前冲，排出流几乎不产生舵力。

（4）倒车产生的横向力并不能人为控制，有时会不利于船舶操纵；

（5）在船舶后退时，会产生“尾找风”的现象，随着风向的不同，有时也会产生不利于操纵的转头效应。

2.2 洋山四期码头顺流离泊的特别之处。东端码头（1、2 泊）落流离泊时，由于码头前沿水域与连接深水航道的水流流向相差 20 以上，而且横距较大，可供调整船位的纵距较小，船位如果没有放到足够偏南的位置，船舶向下游方向的岛礁和浅滩漂移时，会需要很大角度避让，会形成大角度驶进深水航道，而深水航道的宽度并不足以让超大型船舶横向通过，容易造成危险局面 [4]；西段泊位（5、6 泊）涨流离泊在掉头时受流影响船舶会压向西边的浅滩，掉头时需要精确控制船位，不能有过大的流致漂移，且在涨流时有着向南的流压，过度掉头有压向南边浅滩的风险。因此为了能够便于在离泊后能够精准地驶入深水航道，为后续正常航行创造有利条件，对离泊后船舶的船位和船艏向控制相较于其他码头要求更为精确。

3 顺流离泊实例

顺流离泊可分为涨水头落流时离泊和落水头涨流时掉头离泊两种情形，各有着其特殊的操纵方式和不同的操作难点。下面分别以这两种情形从操纵实例来阐述顺流离泊过程及关键性操作步骤。

3.1 涨水头落流离泊

洋山四期 1、2 泊位落流离泊的难度更大和要求更高，这里选取 2 泊位离泊实例进行说明。

船舶参数及离泊计划：大型集装箱船“HYUNDAI JIPITER”轮，船长 334.98 m，船宽 45.8 m，吃水 12.7 m。计划在唐脑山低潮前 1 h，乘洋山四期 2 泊涨水头急落流离泊。

船速参数：D.Slow-6.2 kn；Slow-9.5 kn；Half-12.0 kn；Full-15.4 kn。船艏侧推 3 000 kW。

外界环境及外部因素：当天唐脑山低潮为 2005 时，潮高 0.7 m，估算为落流 2 ~ 2.5 kn；离泊时偏南阵风达 27.7 kn，为正横方向吹拢风。3 艘拖船协助离泊（海港 61：马力 6 000 Hp；海港 33：马力 4 000 Hp；新北方 9 号：马力 6 000 Hp）。

3.1.1 关键性操作步骤

（1）泊位距港内连接深水航道横距较大，落流时码头前沿流向与港内连接航道走向有 20° 以上的交角，叠加较强正横吹拢风，离泊后要将船位尽量置于足够偏南，且船艏向要大于港内连接水道走向，以便于正常航行时克服较大的压拢流和吹拢风对船舶的影响。

（2）在船舶离泊的初始过程，若要始终保持里档受流，船艉横移速度就必须大于船艏的横移速度。考虑到此次离泊时有着较强的吹拢风，需把 3 艘拖船带上，且将 2 艘拖船置于船艉，保证船艉有足够的拖力。

（3）在离泊的前半段的运动状态是船艏、船艉均向外横移，且船艉横移速度要大于船艏 h 横移速度，相当于船舶是在逐步左转的过程中。由于离泊后至深水连接航道横距较大，为了缩短离泊时间，船艉就必须展开足够的角度，实践中首向要达到 70° ~ 75°，在拖船的作用下，辅以倒车才能够尽快把船舶后缩至预定的位置（本次操作船艏转至 72° ）。

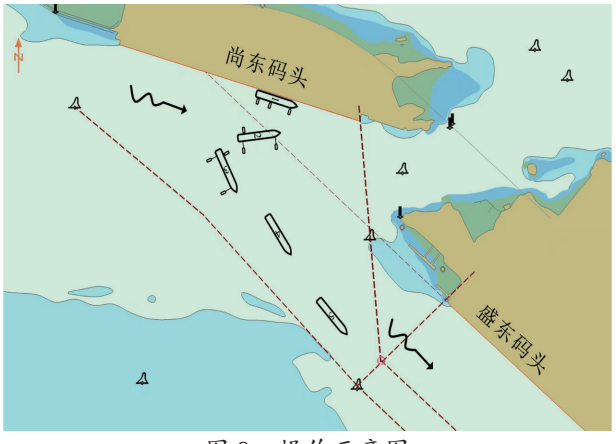


图 3 操作示意图

（4）在船舶后缩至在洋一期码头延长线上时，根据船舶的后退速度适时调整拖力和侧推，使得船艏逐渐产生右转，一方面逐步降低船舶横向速度，另一方面要使得在到达深水航道延长线时船艏向要达到140°以上（本次操作船艏右转最大达到146°），才能够保证在离泊后的正常航行初始阶段船速较慢时抵消较大的流压和风压。

具体操作示意图如图 3 所示。其中，位置 1 为离泊初始状态，位置 2 为船舶左转极限状态，位置 3 为船舶右转极限状态，位置 4、5 为船舶驶向深水航道。

3.1.2 注意事项

（1）做好开航前准备和信息交流，向船方交代离泊的注意事项。一般大型船舶第一车有 26 s 的延迟，因此待尾倒缆解清时，可短暂倒车一次[5]。

（2）在解离船艉缆绳时，船方应快速收妥，避免受流影响绞缠车舵。实践中是船方和码头方协调好，解好一条，尽快收上一条，确保车舵安全。

（3）较大马力拖船应配置在迎流端即船艉，在离泊初始阶段，要特别注意调整首尾拖船的拖力，务必使得船艉横移速度大于船头的横移速度，保持船舶里档受流。由于此时船舶对水存在后退速度，流的作用点偏于船舶后端，船艉的转动力矩大大小于船艏；而且倒车时偏向力使得船艉向左，也不利于船舶左转。因此船艏的拖船只需使用极小拖力即可。必要时船艏拖船停拖，甚至在左转趋势停滞时，可操作侧推向左，确保船舶保持左转趋势。

（4）后退过程中，要时刻关注船舶横移位置，根据横移位置调整船舶转动趋势，实际操作中可以参照盛东码头的西延长线和深水航道的西延长线。

（5）离泊过程中注意三艘拖船的配合使用，必要可调整第三艘拖船至左舷，顶推船艉或船艏来调整船舶左转或右转速度。

（6）防止左转过度，船舶整体压向蒋公柱岛。如果左转不能抑制，可以考虑两次掉头。

（7）要做好应急准备，备妥双锚。

3.2 落水头涨流离泊

船舶参数及离泊计划：大型集装箱船“MSC TERESA”轮，船长 365.5 m，船宽 51.2 m，吃水 12.9 m。计划在唐脑山高潮前 1 h，乘洋山四期 4 泊落水头急涨流离泊。

船速参数：D.Slow-3.9 kn；Slow-9.1 kn；Half-11.3 kn；Full-15.9 kn。船艏侧推 3 600 kW。

外界环境及外部因素：当天唐脑山低潮为 2300 时，潮高 4.98 m，估算为涨流 3 kn 左右；离泊时偏南阵风达 17 kn，为正横方向吹拢风。3 艘拖船协助离泊（海港 101，马力 6 000 Hp；海港 102，马力 6 000 Hp；海港 103，马力 4 000 Hp）。

3.2.1 关键性操作步骤

（1）落水头涨流离泊，船舶操纵总体上是一个船艏对着码头掉头的过程，相对于船艏背着码头掉头，存在着视觉上的冲击。由于是船艉迎着流，船舶转心位于船艉端，必须待船艏离开码头足够距离后才能令船艏拖船顶推和首侧推向右。

（2）必须确保船舶始终处于里档受流状态。尤其是初始离泊时，一旦外档受流，船艉可能压向码头。在拖船起拖时，首先是船艉拖船得力，让船舶产生右转趋势，船艏拖船再行起拖，使得船舶边横移边缓慢右转。

（3）离泊操纵时应注意控制船舶的前冲后缩。在离泊初始阶段，船舶应该是后缩趋势，保证整个船身是离开码头。在后半段，要注意及时用车抑制后缩，以防后缩过快冲向南边和西边的浅滩。

（4）由于涨流是流压是朝南的，掉头完成时的船位不能离南边线太近，而且航向也无需掉正，以保证正常航行时能顺利地进入连接深水航道。

3.2.2 注意事项

（1）同 3.1.2.1）项

（2）同 3.1.2.2）项

（3）较大马力拖船放在迎流端即船艉。在离泊初始阶段，要特别注意调整首尾拖船的拖力，务必使得船艉横移速度大于船头的横移速度，保持船舶右转的趋势，确保里档受流。可令第三艘拖船顶推右船艉，必要时船艏拖船停拖，甚至在右转趋势停滞时，可操作侧推向右，确保船舶保持右转趋势。掉头后的船艏向在 120° 左右，应适时令拖船、侧推减速，防止右转过度。

（4）做好应急准备，备妥双锚。

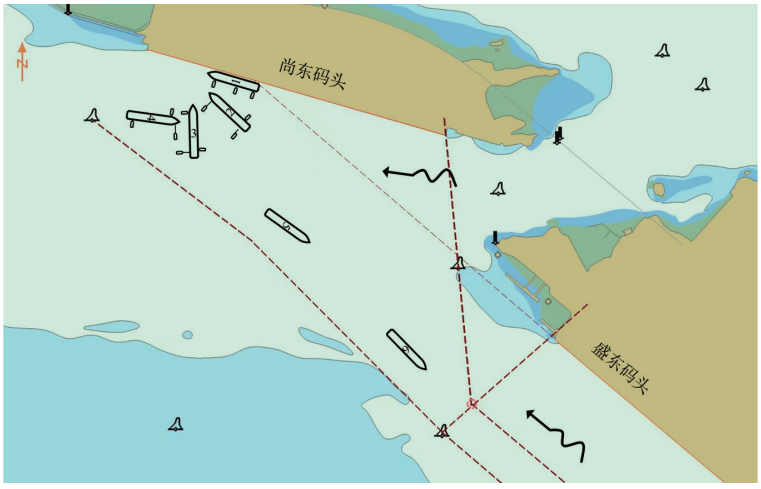


图 4　操作示意图

具体操作示意图如图 4 所示。位置 1 为离泊初始阶段，位置 2 为船艉拖船顶推，开始向右旋回，位置 3 为加速旋回阶段，位置 4 为船舶掉头完毕时状态，位置 5、6 为船舶驶向深水航道。

4　结束语

创新引领发展，时代呼唤创新。随着港口的发展，以及各种新码头的建成，港航企业有着提升码头泊位利用率的需要，对于拓宽船舶靠离泊窗口产生了实际的需求。而且由于科技的进步，船舶设备的更新迭代也让我们创新船舶靠离泊手段产生了可能性。在充分的理论分析基础之上，了解泊位地形和水文特点，以及特殊的船舶操纵可能产生的风险点，通过实践不断探索，总结出安全可靠的靠离泊方法，以达到为港航企业提供优质服务的目的，助力港口和社会经济的发展。

参考文献

[1]　陈健 . 大型集装箱船顺水离泊南沙集装箱码头 [J]. 珠江水运 .2016(3) 92-95.

[2]　上海港引航站 , 上海海事大学 .A639 洋山四期自动化码头引航效能提升研究（正式稿）34-39.2019 年 6 月 .

[3]　李能荣 . 超大型集装箱船反潮水离泊操纵 [J]. 航海技术 .2016 (2) 4-7.

[4]　李景喜 , 薛松辉 . 洋山四期码头 1、2 泊急落潮流靠离泊操纵探讨 [J]. 航海技术 .2022(11) 12-15.

[5]　李景喜 , 张扬 . 超大型集装箱船洋山深水港顺流离泊操纵 [J]. 航海技术 .2023 年 (3) 4-7.

作者简介：

高涛，高级引航员，在上海洋山港从事引航工作

船用甲醇燃料的全生命周期分析及应用

薛树业

（上海海事大学，上海　201306）

摘 要：在当前国际海事组织和欧盟对船用燃料全生命周期温室气体减排设定目标的背景下，甲醇燃料表现出巨大应用潜力。为明晰船用甲醇燃料全生命周期背景下的应用情况，本文分析甲醇燃料的突出特点、分类及定义，解析马士基应用甲醇案例，基于国际标准化组织关于生命周期评价的标准，分析船用甲醇燃料全生命周期的温室气体排放，最后结合国际海事组织和欧盟关于全生命周期燃料的规定，探讨甲醇燃料在船应用情况。预计随着国际航运温室气体减排政策的进一步实施、甲醇相关技术的不断成熟和发展，甲醇将有望成为一种重要的船用替代燃料。

关键词：船舶；替代燃料；甲醇；生命周期；碳源

0　引　言

2023 年 7 月，国际海事组织（International Maritime Organization，IMO）海上环境保护委员会（Marine Environment Protection Committee，MEPC）第 80 次会议审议通过《2023 年 IMO 船舶温室气体减排战略》（MEPC.377（80）号决议），提出具体目标：“到 2030 年，应用零或近零温室气体排放技术、燃料和 / 或能源的比例，至少占国际航运所使用能源的 5%，力争达到 10%”。同时，该战略指出目标水平应考虑到 IMO 制定的《船用燃料全生命周期温室气体强度导则（LCA 导则）》（MEPC.376（80）号决议）中所述的船用燃料全生命周期温室气体排放。2024 年 3 月，MEPC 81 次会议审议通过经修订的 LCA 导则，即《2024 年 LCA 导则》（MEPC.391（81）号决议）。此外，欧盟 2023/959 指令将航运业纳入其碳排放交易体系，船公司须缴纳相应的碳配额；欧盟关于在海运中使用可再生和低碳燃料的 2023/1805 条例（即 FuelEU Maritime）将于 2025 年开始实施；欧盟经第三次重大修订的《可再生能源指令》（欧盟 2018/2001 指令）已于 2023 年 11 月 20 日生效。

IMO 和欧盟针对船舶温室气体（Greenhouse Gases，GHG）减排设定了分阶段的定量减排目标，并对零或近零 GHG 排放燃料提出了具体要求，以鼓励船舶转向使用替代燃料。当前航运零或近零 GHG 排放技术、燃料和 / 或能源在政策导向下发展迅速，这对实现 GHG 减排目标至关重要。在这方面，甲醇燃料表现出巨大潜力 [1]。

甲醇常温下为液态、易于操作管理，燃烧排放性能优良，对海洋生态系统友好，目前船用甲醇动力技术较为成熟 [2]，已有多个成功应用案例 [3]，且现有船队改装成本合理 [4]，加上甲醇全生命周期可实现零或近零 GHG 排放、供应链基础设施完善 [5]、生产原料来源广泛，因此甲醇被认为是解决航运脱碳问题的重要燃料。然而，甲醇全生命周期脱碳属性（即零或近零 GHG 排放的绿色性能）如何界定、生产甲醇的原料（如生物质原料、可再生氢）是否充足和可持续、市场机制能否弥补甲醇生产成本等问题影响船用甲醇燃料的推广使用。

本文梳理分析甲醇相较传统船用燃料的突出特点、分类及定义，解析马士基应用甲醇案例，基于国际标准

化组织（International Organization for Standardization，ISO）关于生命周期评价（Life Cycle Assessment，LCA）的标准，分析船用甲醇燃料全生命周期的GHG排放，最后结合IMO LCA导则、欧盟《可再生能源指令》（European Union Renewable Energy Directive，EU RED）、FuelEU Maritime关于全生命周期燃料的规定，探讨甲醇燃料在船应用情况。

1 甲醇燃料的突出特点及分类

1.1 理化特性

在理化特性方面，甲醇（CH_3OH）与传统的船用燃料（船用重/轻质燃料油、船用重/轻柴油）有巨大差异，其突出特点是：

（1）燃烧排放性能优良。甲醇分子中的C、H、O原子以单键结合，不含碳碳双键、三键[6]，氧含量高达50%，不含硫元素，因此甲醇在内燃机中燃烧更完全，不易产生碳烟，硫氧化物排放几乎为零。此外，甲醇的汽化潜热是传统船用燃料的4倍左右，这在燃烧过程中可有效减少氮氧化物的生成[6]。

（2）需要更多存储空间。甲醇的低热值不到传统船用燃料的一半，而密度差别不大，若甲醇的能量密度笼统地按传统船用燃料的50%计，在船舶需要携带相同能量燃料的情况下，甲醇占用的存储空间需要多出一倍。

（3）降碳性能优良。即便不考虑全生命周期，从船端碳排放来看，综合甲醇的低热值、含碳量、燃烧做功效率等参数，甲醇相较船用重质燃料油具有10.8%的降碳潜力[7]，可有效改善船舶能效设计指数、营运碳强度，且用化石原料生产的甲醇成本与船用低硫油相差不大[5]。

此外，在安全性方面，甲醇和汽油同属一个级别，需要特别注意的是其燃烧火焰日光下不可见以及不可饮用[8-9]。

1.2 分 类

目前，IMO对于零或近零GHG排放燃料没有定义，因而也无法定量去衡量燃料的GHG排放是零或近零。零或近零GHG排放燃料与绿色燃料之间也不能简单地画等号。

根据甲醇生产的碳原料（生物质、非生物质）、能量来源（可再生、非可再生）进行排列组合（生产甲醇的碳原料、能量来源见表1），按照是否可持续的原则[10-11]，目前市场上甲醇可笼统地分为生物源可再生电制甲醇（绿色甲醇）、大气源可再生电制甲醇（绿色甲醇）、工业源可再生电制甲醇（蓝色甲醇）、化石源不可再生甲醇（灰色甲醇）等几类，见表1。随着国际航运碳减排目标的提高，船舶对绿色甲醇、蓝色甲醇有较大需求。

表1 生产甲醇的碳原料、能量来源[9-14]

碳原料来源	能量来源
非可再生的含碳化石原料（如煤炭、焦炭、天然气、焦炉气、石油、重油、沥青等）	由化石原料产生的合成气（主要由CO、H_2以及CO_2等组成）
从工业（如火电、水泥、炼钢等）排放捕集的非可再生CO_2	非可再生电力（如化石能源产生的电力）制取的H_2
来自生物质非废料（如玉米、大豆、饲料、木材等）的CO_2	
从大气直接捕集的CO_2（可再生）	可再生电力（光、风、水、地热等产生的电力）或核电制取的H_2
来自生物质废料（如秸秆、废木屑）、速生植物（如芦竹、藻类）等的CO_2（可再生）	

1.3 绿色甲醇的定义

目前，国际上对绿色甲醇亦无统一定义[5]和定量标准。国际可再生能源署和甲醇研究所的报告《创新前景可再生甲醇（2021）》指出，可再生甲醇的生产过程需要符合一系列环境和社会可持续性标准，只有两种方式制取的甲醇才能称为可再生甲醇，即由生物质生产的生物甲醇，以及通过使用可再生能源捕获的CO_2（具有碳捕获和储存功能的生物能源[Bioenergy with Carbon Capture and Storage，BECS]和直接空气捕获[Direct Air

Capture，DAC]）和绿色氢气（即可再生电力生产的氢气）获得的绿色电制甲醇。

笔者认为绿色甲醇燃料是指通过可持续的可再生能源或者碳中和技术生产的、全生命周期零或近零 GHG 排放的甲醇燃料。关于近零 GHG 排放的定量问题，可根据船用燃料 LCA 标准和具体减排政策来灵活确定。传统的甲醇生产通常使用化石能源，例如天然气或煤炭，而生产和使用传统甲醇在全生命周期内会释放大量的 CO_2，对环境造成负面影响。绿色甲醇生产则利用可再生能源如太阳能、风能等，将可再生的生物质或碳捕的 CO_2 转化为甲醇，从而减少对环境的影响，并且有望实现碳中和。绿色甲醇作为船用替代燃料和氢能载体，在未来船舶能源转型和减缓气候变化方面具有重要作用。

2 马士基关于甲醇的使用

马士基制定了 2040 年实现碳中和的目标，在其 2023 年可持续发展报告中对绿色燃料的定义如下：与化石参考燃料相比，在其生命周期内 GHG 排放量低至极低的燃料。根据生产途径，不同的绿色燃料在生命周期内实现的 GHG 减排量也不同。所谓“低”，是指与化石燃料相比，在生命周期内 GHG 减排量达到 65%~80% 的燃料。“极低”是指与化石燃料相比，在生命周期内可减少 80%~95% 的 GHG 排放。

马士基关于绿色燃料的定义定量规定了绿色燃料相对化石参考燃料的减排比例，没有直接明确“生命周期内 GHG 排放量”所依据的标准或法规。然而，马士基根据 LCA 为绿色甲醇等非商品燃料制定了指南，强调对环境和社会潜在影响的评估，针对生物质原料和绿色燃料确立了三大管理要素：

（1）认证：所有生物燃料必须由第三方认证；所有燃料必须具有可持续性证明（Proof of Sustainability，PoS）或同等证明；马士基接受 RSB（the Roundtable on Sustainable Biomaterials，可持续生物材料圆桌会议）和 ISCC（the International Sustainability and Carbon Certification，国际可持续发展与碳认证）认证的燃料。

（2）生命周期 GHG 减排：燃料必须符合欧盟可再生能源指令（2018/2001）第 29(10) 条规定的最低减排量，即与化石参考燃料相比，生物燃料的减排量为 65%，电制燃料的减排量为 70%。

（3）原料：马士基只接受废料和残渣作为原料；林业废料和残渣必须来自 FSC（Forest Stewardship Council，森林管理委员会）认证的森林或同等资源。马士基不接受任何第一代作物（如玉米、大豆、油菜籽、棕榈、甘蔗、甜菜、向日葵、能源作物）或通常用作饲料的原料；不接受任何第一代木质生物质；不接受任何与棕榈油有关的原料，包括棕榈油生产过程中产生的废料和残渣原料（如棕榈油厂废水、空果穗、棕榈脂肪酸馏分、废漂白土油）。

除气候变化外，马士基还考虑环境指标，包括生物多样性、生态系统、资源和材料损耗、人类健康和生态毒性、空气和水质等因素。

对于电制甲醇，马士基仅认可使用生物源 CO_2 作为原料，并将其与绿氢结合生产的甲醇。生物源 CO_2 是一种废料，产生自沼气升级为生物甲烷过程，或生物质发电厂、纸浆和造纸厂以及乙醇厂等，目前这些 CO_2 排放到大气中。氢气必须是“绿色”的，即使用可再生电力通过电解水产生。

3 LCA 标准及甲醇全生命周期 GHG 排放

3.1 ISO 的标准

ISO 14040:2006《环境管理 生命周期评价 原则与框架》是一项关于 LCA 原则和框架的标准，其主要内容概述如下：

（1）范围：ISO 14040 涵盖 LCA 的整个过程，从 LCA 目标和范围开始，到清单分析、评价结果的解释和报告等。

（2）目标和应用：明确 LCA 的目标，包括确定产品、过程或活动的环境性能，并提供基于事实的信息以

支持决策。

（3）定义：定义了 LCA 的术语，确保在实践中的一致性和清晰性。

（4）系统边界：确定 LCA 研究的边界，包括对产品、过程或活动的全生命周期的界定。

（5）功能单位：确定进行比较的功能单位，即比较不同产品或过程提供的功能的效率。

（6）生命周期清单分析：包括对物质和能量的投入和排放的定量评估，以及它们对环境的影响。

（7）生命周期影响评价：对生命周期清单的结果进行解释和评估，以确定对环境的潜在影响。

（8）解释：解释 LCA 结果的含义和不确定性，并提供信息以支持决策。

（9）报告：提供关于 LCA 结果的报告标准，确保结果的透明和可比性。

（10）评审：鉴定某个 LCA 是否满足方法学、数据、解释和报告要求的过程，同时核查它是否符合基本原则。

总的来说，ISO 14040:2006 为 LCA 提供了一致的方法和框架，以评估产品、过程或活动的环境性能，为可持续发展和环境保护提供了重要的决策支持工具。

3.2 船用甲醇燃料全生命周期 GHG 排放

甲醇全生命周期 GHG 排放涵盖甲醇从生产到废弃处理的整个过程中释放到大气中的 GHG 总量。这包括所有与甲醇相关的 GHG 排放，无论是直接排放还是间接排放，以及在整个生命周期中可能产生的 GHG 排放。理解船用甲醇燃料 GHG 排放全生命周期评估可从以下 5 个重要方面着手。

（1）范围：全生命周期 GHG 排放包括生产、运输、使用和废弃处理等各个阶段的 GHG 排放。这意味着需要考虑到所有可能与船用甲醇燃料相关的上船前、船端、下船后的 GHG 排放源。

（2）直接与间接 GHG 排放：直接排放是指直接由船用甲醇燃料本身产生的 GHG 排放，如船上燃烧甲醇释放的 CO_2。间接排放则是指间接与船用甲醇燃料相关的 GHG 排放，如上船前的原料采集、产品生产、转化、存储、运输、销售、加注，以及下船后的废弃处理等过程中产生的排放。

（3）系统边界：为准确评估船用甲醇燃料全生命周期 GHG 排放，需要明确定义系统边界，包括对哪些环节和过程进行考虑和计算，以及 GHG 排放的种类和数量。

（4）数据收集和计算：收集相关数据，并利用 LCA 方法计算甲醇燃料的全生命周期 GHG 排放。这可能涉及使用专业软件或模型来进行准确的计算。

（5）综合评估：船舶应用甲醇燃料考虑整个产品或活动的生命周期 GHG 排放，强调燃料的可持续性和对气候变化的影响，提供更全面的评估，为减排措施的制定和实施提供科学依据。

船用甲醇燃料全生命周期 GHG 排放计算步骤包括：

（1）确定全生命周期各环节 GHG 排放源。

（2）生产阶段 GHG 排放计算：需要考虑原材料的采集、加工、运输以及甲醇生产过程中排放的 GHG。生产过程中可能涉及使用化石燃料、电力等能源，这些能源的碳排放需要计入总体排放量中。

（3）运输、储存和分配阶段 GHG 排放计算：需要考虑甲醇从生产地到船端的运输过程中所产生的 GHG 排放。这包括甲醇的运输方式（如管道、卡车等），以及所用能源类型、任何泄漏损失。

（4）使用阶段 GHG 排放计算：需要考虑甲醇在船端燃烧过程中排放的 GHG，主要是 CO_2 排放。这一部分排放量通常是根据燃料的理论燃烧产生的 CO_2 量来计算的。

（5）处置阶段 GHG 排放计算：需要考虑甲醇燃料在使用后的处置过程中可能产生的排放，例如甲醇残留物和废弃物处理的 GHG 排放。

（6）吸收和抵消：如果适用，需要考虑甲醇生产或使用可能导致部分 GHG 的吸收或抵消，例如碳捕获和封存技术或者利用可再生能源生产甲醇。

（7）验证和报告：对计算结果进行验证，并根据适用的标准，编制全生命周期 GHG 排放报告。

在这些步骤中，需要考虑各种因素，例如甲醇生产过程中使用的能源和原料来源、生产技术的效率、运输距离和方式、船端燃烧转换效率等，以准确估算甲醇燃料的全生命周期 GHG 排放。

4 全生命周期燃料 GHG 排放的相关规则和政策

4.1 IMO LCA 导则

IMO LCA 导则是一项技术指南，为船用燃料和其他能源载体（如电力）的全生命周期温室气体排放强度评估提供指导。该导则涵盖船用燃料全生命周期（有特定的边界），即从原料开采 / 种植 / 回收、原料转化为燃料产品、运输和分配 / 加注、到船上的燃料使用，此外还考虑了船用燃料的可持续性，并定义燃料全生命周期标签。该标签包含有关燃料类型、原料（原料类型和原料性质 / 碳源）、转化 / 生产加工（加工类型和加工中使用的能源）、温室气体排放因子、混合燃料和可持续性主题等方面的信息。

考虑到碳源，LCA 导则给出两种关于船端温室气体排放因子（GHG emission factor，单位为 gCO_{2eq}/MJ）计算方法：（1）计算时不考虑碳源，因此不考虑 e_c 和 e_{ccu}；e_c 是指生物质生长产生的排放信用额，e_{ccu} 是指用捕获的 CO_2 作为碳储量生产合成燃料产生的排放信用额，且未在 e_{fecu}（与原料开采 / 种植 / 获取 / 回收有关的排放）和 e_p（与原料加工和 / 或原料转化有关的排放，以及与原料转化为最终燃料产品包括发电有关的排放）中核算过。（2）计算时考虑了生物源燃料的碳源或由捕获的碳制成的燃料的碳源，因此考虑 e_c 和 e_{ccu}。无论采用上述两种计算方法中的哪一种，将对船用绿色燃料的界定产生重要影响。而与生物碳源、捕获碳源相关的排放信用额，以及可持续性认证，还有待 IMO 制定进一步的指导方法。

此外，LCA 导则明确根据混合燃料中每种燃料的能量比例确定相关的温室气体默认值或实际排放因子（gCO_2/MJ），计算时应使用各种燃料成分能量的加权平均值。这对于计算甲醇与其他燃料的混合燃料的碳转换系数等参数具有指导意义。

目前 LCA 导则尚未成熟可用 [15]，LCA 导则中没有关于零或近零 GHG 排放燃料的定义，亦无定量规定船用燃料全生命周期 GHG 排放因子低于多少算“绿色”，因此也无法确认哪种燃料为绿色。

4.2 EU RED

EU RED 是欧盟制定的一项法规，旨在促进可再生能源的发展和利用，减少对化石能源的依赖，以实现欧盟的气候变化和能源安全目标。该指令制定生物能源的可持续性标准，要求生物能源生产和使用过程符合一系列环境、社会和经济标准。这些标准包括土地使用变更、碳排放、生物多样性保护等方面。为促进可再生能源电力的发展，该指令规定了欧盟各成员国应采取支持措施，以确保可再生能源的竞争力和可持续性。此外，该指令要求欧盟成员国建立和维护可再生能源的认证和监测体系，以确保可再生能源的来源和使用符合法规要求。

EU RED 最初于 2009 年颁布，后经过修订和更新，目前的版本为 RED III。RED III 大幅提高了欧盟可再生能源发展指标，要求至 2030 年欧盟总能源消费中至少应包含 42.5% 的可再生能源，目标值为 45%；设定可再生能源在交通领域的使用目标，要求至 2030 年可再生能源占该行业全部能耗的 29%，或减少 14.5% 的 GHG 排放，其中交通领域至少 1% 的能源来自非生物来源可再生燃料（Renewable Fuels of Non-Biological Origin，RFNBO），是指由非生物质可再生能源所产生的液体或气体的燃料，如绿氢。海运行业至少 1.2% 的能源来自 RFNBO。

EU RED 规定对从化石来源捕集的 CO_2 不给予扣除排放信用，来自生物质或从大气捕集的 CO_2 才被称为“可再生 CO_2”。显然，这个规定较为苛刻。考虑到脱碳进程，在 EU RED 补充条例中，欧盟对工业中捕集的 CO_2 给予过渡期（2041 年前），即由工业源 CO_2 制备的甲醇可以暂认为绿色甲醇，但全生命周期 GHG 排放不超过 28.2 gCO_{2eq}/MJ。

4.3 FuelEU Maritime

FuelEU Maritime 基于全生命周期，考虑船用燃料生产、运输、分配和船上使用的影响，以船舶报告的燃料消耗量和相关排放系数为基础，给出船用燃料的年平均 GHG 强度的计算方法和公式，划定 GHG 强度限制值（91.16 gCO_{2eq}/MJ）；允许船公司灵活地将合规盈余从一年转为另一年，或在一定限度内从下一年开始借入预付款合规盈余，此外也允许船公司汇集不同船舶，可以利用同一艘船舶的超额履约来弥补其他船舶的欠佳履约；未达到船用燃料年平均 GHG 强度限制的船舶须支付罚款，相关罚款将被用于促进船用可再生和低碳燃料的分配和使用，以实现航运业的气候和环境目标。

目前，航运业已纳入欧盟碳排放交易体系，但仍不足以支撑替代燃料尤其是 RFNBO，而 FuelEU Maritime 作为使用可再生和低碳燃料的激励和惩罚措施被引入航运碳减排政策中，但 FuelEU Maritime 尊重技术中立原则，而不规定使用任何特定的燃料或技术。

船用甲醇的成本取决于其生产过程中使用的 CO_2 源，这可能影响其在市场上的竞争力和可行性。FuelEU Maritime 为促进全生命周期低碳、零碳甲醇燃料的在船使用提供了灵活的合规机制，通过合规履约来弥补低碳、零碳甲醇燃料在成本上的不足，但使用低碳、零碳甲醇能否产生溢价，还有待市场反应。

5 展　望

根据 IMO 的统计数据，2019 年至 2021 年甲醇燃料（不区分绿色属性）在船年消耗量分别约为 3 万、7.7 万、13 万 t[16]，在总燃料消耗量中占比很小，但增长势头迅猛。预计随着 IMO 航运 GHG 减排政策的进一步实施、甲醇相关技术的不断成熟和发展，甲醇将有望成为一种重要的船用替代燃料。

当前 IMO LCA 导则还在进一步完善中，尤其还需要进一步制定与生物碳源、捕获碳源相关的排放信用额，以及可持续性认证等方面的指导方法。不同 CO_2 源制备的船用甲醇燃料的成本结构差异巨大，随着原材料价格变动、技术进步、政策支持和市场竞争的演变，这些成本也可能发生变化。我国的甲醇产量居世界第一，且工业源捕获的 CO_2 存量巨大，积极争取在 LCA 导则修订中合理纳入工业源捕集的 CO_2 作为绿色甲醇生产的碳源具有重要意义。

目前船用甲醇燃料的全生命周期 GHG 排放认证主要通过 ISCC、RSB 等国外组织来完成，我国在这方面还缺乏话语权，这与我国作为甲醇生产和消费大国的地位不相符，因此，我国应大力发展自己的全生命周期 GHG 排放认证体系，以确保满足我国船舶在 IMO、欧盟绿色甲醇燃料履约的需求。

本论文得到上海市科技计划“上海船舶智能运维与能效监控工程技术研究中心”项目资助，项目编号：20DZ2252300。

参考文献

[1] 甘少炜 , 雷伟 , 周国强 . 甲醇 : 未来船用燃料 [J]. 中国船检 , 2016, (08): 90-94.

[2] 姚安仁 , 贾宝富 , 马宝东 , 等 . 甲醇燃料在船舶内燃机动力中的应用 [J]. 柴油机 , 2022, 44 (03): 2-8+37.

[3] 王立健 , 秦寅 . 船用甲醇双燃料低速机市场格局及趋势 [J]. 中国船检 , 2022, (12): 78-82.

[4] 薛龙玉 . 甲醇是最符合标准的替代燃料之一——访全球甲醇行业协会首席运营官 Chris Chatterton 先生 [J]. 中国船检 , 2020, (09): 20-23.

[5] 薛龙玉 . 甲醇为航运减排选择提供了更多确定性——访全球甲醇行业协会中国区首席代表赵凯先生 [J]. 中国船检 , 2022, (06): 39-42.

[6] 危红媛 . 柴油 / 甲醇组合燃烧发动机的非常规排放特性研究 [D]. 天津大学 , 2018.

[7] 郭慧茹 , 薛树业 . 使用 LNG 燃料对船舶碳强度指标评级的影响 [J]. 世界海运 , 2022, 45 (05): 1-5.
[8] 中国汽车报 . 专家讲堂 : 甲醇毒性问题不应成为甲醇汽车推广障碍 [N/OL]. (2018-07-24), http://www.cnautonews.com/yaowen/2018/07/24/detail_201807247861.html.
[9] 姚春德 , 姚安仁 . 甲醇燃料的应用现状及其展望 [J]. 汽车安全与节能学报 , 2023, 14 (05): 521-535.
[10] IMO. Review of Existing Practices on Marine Fuel Sustainability Aspects/ Certification and Third-party Verification Issues[Z].2024.
[11] IMO. Report for the Study on Sustainability Criteria and Life Cycle Ghg Emission Assessment Methods and Standards for Alternative Marine Fuels. [Z].2021.
[12] 张轩 , 历一平 . 绿色甲醇生产工艺技术经济分析 [J]. 现代化工 , 2023, 43 (03): 209-212.
[13] 郭嘉懿 , 何育荣 , 马晶晶 , 等 . 二氧化碳催化加氢制甲醇研究进展 [J]. 洁净煤技术 , 2023, 29 (04): 49-64.
[14] 王明 . 2023 年国内甲醇产业发展现状及展望 [J/OL]. 现代化工 , 1-12[2024-04-16]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2172.tq.20240401.1543.020.html.
[15] 张爽 .IMO 2023 年船舶温室气体减排战略全面引领新未来 [J]. 中国船检 ,2023(08):11-15.
[16] 张英 , 薛树业 . 基于数据收集机制的国际航行船舶燃油消耗数据分析 [J]. 世界海运 , 2023, 46 (05): 14-21.

作者简介：
薛树业，上海海事大学商船学院、船舶能效数据中心工程师

基于 PLC 和 PPU 的船舶自动化电站常见故障分析与对策

侯少卿　孟铉博

（交通运输部东海航海保障中心上海海事测绘中心，上海　200090）

摘 要: 本文通过对实际电站构成的研究以及运行中的故障案例进行收集和整理，系统地归纳了船舶电站在启动、运行和停机过程中可能出现的故障类型，如通信中断、模块失效、电压波动等。针对故障案例，提出了相应的预防和解决对策，加强系统监控、定期维护与检修、优化控制程序以及提高操作人员的技术水平。结果表明，通过实施合理的对策措施，能够显著提高船舶电站的运行可靠性和稳定性，减少供电系统故障发生率，保障船舶航行安全。

关键词：PLC；PPU；船舶自动化电站；故障

0　引　言

随着现代科技的发展，船舶自动化电站系统替代传统船舶电站逐渐成为船舶动力系统的重要组成部分，也成为船舶轮机管理的重要内容。船舶自动化电站系统不仅优化了船舶电站的运行特性，还在节能减排、安全管理等方面发挥出了独特优势。然而，在实际运行中，由于系统组成复杂、工作环境恶劣等因素，船舶自动化电站系统难免会出现各种意外和故障，给船舶正常航行作业造成影响。因此，分析船舶自动化电站系统的构成及其常见故障，并提出相应的管理对策，对于保障船舶安全稳定的航行具有重要意义。

1　船舶自动化电站系统的构成

1.1　发电机组

发电机组是船舶自动化电站系统的核心组成部分，主要包括主发电机和应急发电机。主发电机通常 2 台或 3 台，各自分别由独立的柴油机驱动，是船舶电力供应的主要来源。应急发电机通常由一台可以独立运行的柴油机驱动，用于在主发电机突发故障时给舵机、应急消防泵等重要设备提供电力支持，确保重要设备供电的连续性，从而保证船舶安全。小型船舶不配置应急发电机，一般由备用电池替代应急发电机。发电机组的稳定运行对于船舶供电的可靠性至关重要。

1.2　自动化控制系统

基于 PLC(Programmable Logic Controller, 可编程逻辑控制器) 和 PPU（ Paralleling and Protection Unit，并车与保护单元）的船舶自动化电站自动化控制系统是自动化电站系统的“大脑”，核心部件包括 PLC 和 PPU。PLC 负责监控和控制发电机组的运行状态，确保发电机组的启动、运行和停机等操作的正常进行。PPU 则负责电力的分配和管理，确保电力的合理分配和使用。

某船电站控制系统采用 S7-1200 PLC 和 PPU 相结合的方案，通过与传感器、断路器及其他自动化设备的配合，S7-1200 PLC 能够实时监测电力参数，自动调节发电机的输出功率，防止电力过载或不足，确保电力系统的安全和可靠。外接的显示屏能够方便地显示发电机运行参数和实时显示故障报警。在船舶自动化电站系统中，S7-1200 PLC 支持多种通信协议，如 PROFINET、MODBUS 等，能够与各种自动化设备实现无缝连接和数据交换。这种强大的通信能力使得 S7-1200 PLC 能够集成多个子系统的数据，实现系统的集中监控与管理。通信与数据集成不仅包括实时数据的传输和处理，还包括历史数据的存储与分析。通过与上位机软件和数据库系统的结合，S7-1200 PLC 可以记录并存储系统运行数据，供后续分析和优化使用。这种数据集成能力为船舶电站系统的故障诊断、性能优化和预防性维护提供了强有力的支持。

1.3 配电系统

配电系统的主要任务是将发电机组产生的电力分配到各个用电设备，由多个配电板和分配电板组成。配电系统的设计和运行直接影响到船舶的用电安全和效率。现代配电系统通常采用智能化设计，通过自动化设备实现电力的实时监控和调节，确保电力的稳定供应。

1.4 监控系统

监控系统对整个电站系统进行实时监控，及时发现并处理故障。监控系统通常包括各种传感器、监控软件和报警装置。通过对系统运行状态的实时监控，及时发现故障隐患，并采取相应的措施进行处理，确保系统的安全运行。电源管理系统（Power Management System, PMS）在船舶自动化电站系统中扮演着至关重要的角色。它通过监控和控制发电机、配电系统及电力消耗设备，确保船舶电力系统的平衡和稳定。PMS 能够根据船舶的实时电力需求，自动启停发电机组，优化能源利用效率。

2 船舶电站自动化控制系统

2.1 系统流程

船舶电站自动化控制系统的流程主要包括发电、配电、用电三个环节。在发电环节，柴油机输出轴带动发电机转子旋转切割磁力线发出电能。在配电环节，电力通过配电系统输送到各个用电设备。在用电环节，用电设备将电能转化为机械能、热能等，以满足船舶的各种需求。整个过程中，自动化控制系统通过对各环节的监控和调节，实现电站系统的自动化控制。

2.2 系统流程分析

在系统流程中，PLC 和 PPU 起到了关键作用。PLC 主要负责发电机组的启动、运行和停机等操作，确保发电机组能够协调、稳定、安全地运行。通过 PLC 的编程和控制，实现对发电机组的自动化管理，包括故障检测、报警和应急处理等功能。PPU 则负责电力的分配和管理，通过对电力的实时监控和调节，确保电力的合理分配和使用，避免电力浪费和过载现象的发生。

2.3 船舶电站自动准确同步并车

在自动模式下，PLC 和 PPU 被授权接管船舶电站。当船舶负载较重超过设定值时，待并机自动启动并入电网即自动同步并车。船舶电站自动准确同步并车要求待并发电机输出的电力特性要与汇流排电力特性参数相匹配，即待并机电压要与汇流排电压一致且恒定；待并机供电频率与汇流排供电频率一致；待并机相序和汇流排相序一致且待并机相位略提前于汇流排相位，满足以上条件才能提高并电成功率，一旦并电成功接下来就要调整并合理分配功率，确保供电稳定可靠。当负载变少低至设定值时，发电机组自动调整负荷分配，待并机从汇流排解列停机。以上过程即由 PLC 和 PPU 协同完成。PLC 通过对发电机组的精确控制，实现发电机组的同步启动、并车、解列和停机；PPU 通过对电力的实时监控和调节，实现电力的同步分配。在同步并车和运行过程中，PLC 和 PPU 需要紧密配合，确保各台发电机的输出参数一致，从而保证电力系统的稳定性和可靠性。

3 船舶自动化电站系统故障分析

3.1 发电机故障

发电机是船舶自动化电站系统的核心设备之一，其运行的可靠性直接关系到船舶整体电力供应。发电机常见故障主要包括启动失败、运行中断和功率输出不足等。如某船舶在航行中，负载增加时，备用发电机组自动启动失败。经过初步检查，发现启动电池电压不足，导致发电机无法正常启动。进一步的检测显示，启动电池由于长期未进行维护，电解液由于蒸发严重缺失，电池容量大幅下降。

处理这类故障的对策首先是更换故障电池，并对整个电池组进行全面检查，确保没有其他电池存在类似问题。日常维护中应制定详细的维护计划，包括定期给电池充电、检查电池电压，有条件的还可以检查维护电解液等，确保电池始终处于良好状态。除此之外，发电机的其他部分，如润滑系统、燃油系统和冷却系统，也应定期检查和维护，以防止故障发生。对于发电机的专业知识，技术人员应进行专业培训，提高管用养修技能，确保能够及时发现潜在的问题和迅速处理突发故障。

3.2 主配电板故障

主配电板是船舶供电系统的重要组成部分，其功能是将发电机产生的电能分配到各个用电设备。主配电板的常见故障主要包括接线端子松动、电缆老化和断路器故障等。某轮在一次修船期间，生活区中某一层照明灯出现频闪现象，插座无电。经过认真检查发现，配电板上 220V3P 照明空气开关上的一个接线端子烧熔，导致空气开关内部触点接触不良。由于工作环境恶劣，高湿、震动、过载等长期存在，导致配电柜内部可能出现接线端子松动、触点打火氧化，造成接触不良引起电力传输中断。

为此应定期检查和紧固供电系统的接线端子，并对配电柜的整体连接状况进行全面检查，确保没有其他松动的连接点，确保有异常及早发现。其次，电力系统不像机械设备那么直观，有一些问题仅凭目测难以发现，应对配电系统进行整体测试，确保电力传输的稳定性。为了防止类似故障再次发生，船舶还应结合供电系统实际编制和实施定期对配电柜内部的连接点进行检查和紧固的计划。此外，对于电缆、开关、插座老化问题，发现后应及时进行更换，确保配电系统的安全性和可靠性。

3.3 电网系统故障

船舶电网系统的可靠性事关船舶安全。电网系统的常见故障主要包括电力波动、电力中断和短路等。例如某船发电机因冷却液温度过高出现保护性停机故障，船舶失电，备用机启动投入使用，造成船舶短时间因失电出现失控的局面。检查发现，海水冷却器堵塞严重，且由于夏季海水温度较高，电站负载增加时，冷却液温度升高，而冷却器冷却效果不佳，出现冷却液温度超过设定保护温度而突发停机，引发船舶供电中断，进而影响电网系统的稳定性。

解决方法很简单，对冷却器进行疏通清洗，并对冷却系统进行全面检查和维护，确保其他部件工作正常。另外，应注意到，要根据夏季炎热的特点适当增加冷却系统的检查和维护频率，确保其运行状态良好。在每次航行前，技术人员应对冷却系统进行例行检查，确保其能够有效应对高温环境。

4 船舶电气设备故障检测方法研究

4.1 直观检测法

直观检测法是指通过感官直接观察电气设备的外观和运行状态，判断设备是否存在故障。这种方法简单易行，通常不需要复杂的工具和设备。技术人员通过观察电气设备的外观，如是否有烧焦痕迹、是否存在异味或异常声音等，初步判断设备的运行状况。直观检测法常用于电气设备的日常检查和维护，能够及时发现明显的故障隐患。

直观检测法能够迅速发现明显的故障问题，特别是在设备出现异常情况时，如发热、异响、冒烟等，通过

直观检测迅速做出判断并采取相应措施。然而，直观检测法也存在一定的局限性，无法检测出内部电路的故障或潜在问题。因此，直观检测法通常作为初步检查手段，与其他检测方法相结合，进行更为全面的故障排查。

4.2 电路检测法

电路检测法是指通过专业仪器对电气设备的电路进行检测，以判断其运行状态和故障原因。这种方法能够提供详细的电气参数，如电压、电流、电阻等，帮助技术人员准确定位故障部位。电路检测法通常使用万用表、示波器等专业工具，能够检测出电路中的断路、短路、过载等问题。通过测量电气参数，发现电路中的异常情况，进一步分析故障原因。例如，当电气设备无法正常启动时，通过测量电路中的电压和电流，判断是否存在电源故障或电路短路问题。通过电路检测，准确找出故障部位，并采取相应的维修措施。

4.3 经验指引法

经验指引法是基于技术人员的经验和知识，通过综合分析设备的运行情况，判断故障原因并采取相应措施。这种方法依赖于技术人员对设备的深入了解和丰富的故障处理经验，能够在没有复杂仪器的情况下，快速做出判断并解决问题。经验指引法通常适用于设备运行中的常见故障和复杂问题的初步排查。根据设备的历史故障记录、运行环境和操作情况，综合分析故障原因。例如，当发电机组出现运行不稳定的情况时，技术人员结合以往的故障经验，判断可能的故障原因，如燃油系统问题、冷却系统故障等，并采取相应的检查和维修措施。

4.4 硬件替换法

硬件替换法是指通过更换故障设备的硬件部件，以排除故障并恢复设备的正常运行。这种方法适用于无法通过检测和维修解决的故障问题，特别是设备的关键部件出现损坏或老化时，通过更换新的部件，能够有效解决故障问题。硬件替换法通常包括更换电池、传感器、继电器等部件。

硬件替换法常用于处理设备的重大故障和不可修复的问题。技术人员在经过检测和分析后，确认故障部件无法修复时，通过更换新的部件，迅速恢复设备的功能。例如当发电机组的燃油泵出现严重磨损或故障时，技术人员直接更换新的燃油泵，确保发电机组的正常运行。硬件替换法不仅能够快速解决故障问题，还能够延长设备的使用寿命，提高系统的可靠性。

5 结 论

和传统的手动电站相比，基于 PLC 和 PPU 的船舶自动化电站在使用便捷性、运行可靠性、优化排放性等方面均有其独特的优势，但由于其结构复杂也提高了管用养修的难度。文中分析了基于 PLC 和 PPU 的船舶自动化电站构成、各主要模块功能，并结合实际列举了使用中遇到的一些问题和解决问题的方法，总结了常用的分析解决船舶电气系统故障的思路，对管理使用好基于 PLC 和 PPU 的船舶自动化电站具有一定的帮助。

参考文献

[1] 王清 . 船舶电气自动化系统技术现状及设备故障排除方法 [J]. 今日制造与升级 , 2022(10): 15-23.

[2] 徐雪慧 , 陈柳 . 物联网技术在船舶电子设备故障诊断中的应用 [J]. 舰船科学技术 , 2021(22): 45-53.

[3] 张爱丽 . 船舶电气自动化的发展及其设备故障的排除研究 [J]. 科技创新导报 , 2020(14): 68-74.

[4] 田荣明 , 唐京瑞 . 基于物联网技术的船舶电气设备检修方法优化分析 [J]. 舰船科学技术 , 2020(02): 32-40.

作者简介：

侯少卿，工程师，本科，主要从事船舶轮机设备管理工作，地址：上海市共青路 82 弄 7 号，邮编：200090，（E-mail）610647456@qq.com

基于 BIM 技术的船闸浮式系船柱结构设计

李超军　叶雅思

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司，湖南长沙　410200)

摘 要：针对二维设计在处理空间复杂的结构设计及计算问题时手段局限的情况，运用 BIM 技术在可视化环境下对船闸浮式系船柱进行结构设计，并基于 BIM 模型进行有限元模拟计算分析，对船闸浮式系船柱结构开展设计研究。建立固接式和铰接式两种结构形式的船闸浮式系船柱 BIM 模型，分别从结构构造和力学性能分析等方面进行研究。结果表明：铰接式船闸浮式系船柱的系缆小车可以很好地解决系缆高度适应性差等问题，多层系缆小车之间通过连杆柔性连接，降低了埋件的支承反力，并在结构安全性及后期维护等各方面均有较大提升，经多个船闸工程应用实践检验，可为类似工程设计和改进提供参考。

关键词：船闸浮式系船柱；结构设计；柔性连接；BIM 技术；数值模拟

近年来，国内外航运业发展迅速，船舶不断向大型化发展，过船建筑物的规模越来越大，从而对船闸各结构的可靠性等要求更高，其中船闸浮式系船柱作为船闸过船的关键金属结构，其结构设计、工作性能等一直都备受关注。

目前，传统的船闸浮式系船柱大多为固接式结构，随着航运规模的扩大，其结构自身重力大、船舶系缆高度适应性差等问题逐渐凸显。对此，许多学者对其进行了大量设计研究，如刘松等 [1] 从系船柱的材料选择、几何造型等方面阐述一种新型系船柱的研究设计；张星星等 [2] 针对水位的瞬变对系船柱的影响问题，提出新型码头浮式系缆装置，有效解决了装置升降过程的不平衡阻力等关键技术问题；吴俊等 [3] 提出标准条件系缆力的概念与指标，并提出一种系船柱结构受力安全监测方法；刘明维等 [4-5] 利用数值模拟方法对船闸浮式系船柱结构进行有限元计算，得到其应力集中区和受力敏感区，为船闸浮式系船柱的结构改进及现场试验方案提供了理论基础；尹斌勇等 [6]、张虎等 [7] 将传统系船架结构调整为系缆小车结构，从而解决船闸浮式系船柱系缆高度适应性差的问题，研究成果为船闸浮式系船柱结构的改造升级提供了参考。但由于船闸浮式系船柱复杂的空间结构，根据传统的平面设计，船闸浮式系船柱依然存在结构装配式设计难度大、实际系缆力无法精准考量等问题，亟待解决。另一方面，随着计算机行业的飞速发展，建筑信息模型（building information modeling，BIM）技术逐渐被应用于各行各业，其结构参数化、三维可视化、干涉检验等为复杂结构的设计提供了一条新道路 [8]。

本文拟采用 BIM 技术对船闸浮式系船柱进行可视化设计，并基于 BIM 模型进行有限元计算，为船闸浮式系船柱结构的改进和优化提供依据与支撑。

1　浮式系船柱结构设计

1.1　固接式结构

固接式船闸浮式系船柱采用双层系缆，主要由浮筒、上层系船架、导向滚轮装置 3 部分组成，分别采用钢结构焊接制作后通过螺栓连接组成。导向滚轮装置由横向、纵向各 6 个导轮组成，导轮在闸墙导槽内随水位升

降上下滚动，从而实现浮式系船柱与水面的相对平衡，确保船舶安全系缆过闸。基于 BIM 技术建立固接式船闸浮式系船柱模型，如图 1 所示。

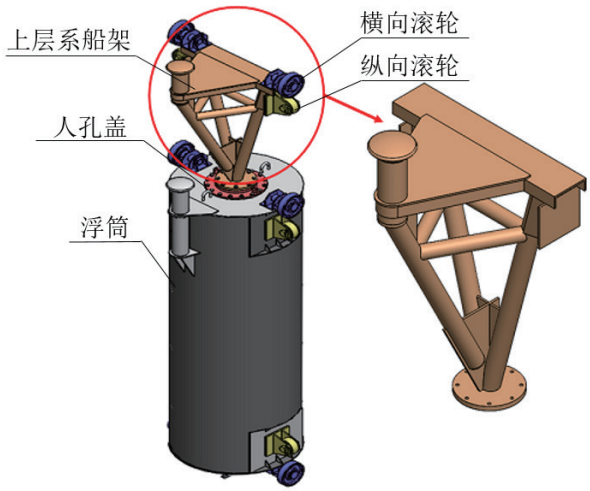


图 1　固接式浮式系船柱 BIM 模型

1.2　铰接式结构

铰接式结构针对固接式结构体系存在的系缆高度适应性差、系缆力矩过大等问题，将浮式系船柱的结构由固接式优化为铰接式。利用系缆小车代替传统固接式浮式系船柱中的上层系船架，通过连杆及法兰盘铰接柔性联结，将各层系缆小车与浮筒连为整体。

铰接式船闸浮式系船柱通常采用 3 层（或多层）系缆，主要由浮筒总成（浮筒、顶盖、横向滚轮、纵向滚轮）、系缆小车总成（系缆小车车架、横向滚轮、纵向滚轮）、连杆、法兰盘等组成，分别采用钢结构焊接制作后通过螺栓连接组成，其中，每套系缆小车由小车车架、4 个横向导轮和 2 个纵向导轮组成。基于 BIM 技术建立铰接式船闸浮式系船柱模型，如图 2 所示。

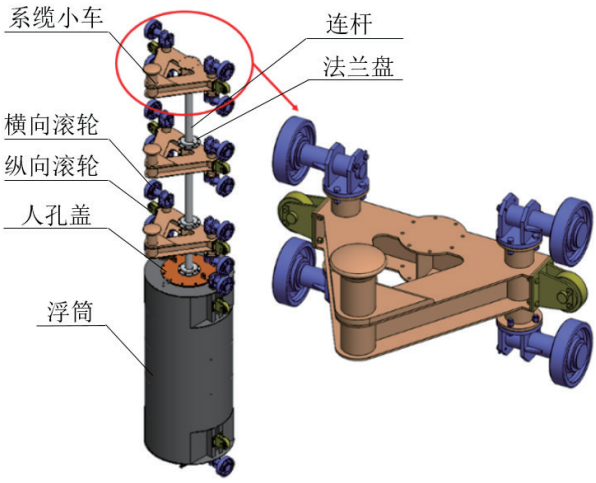


图 2　铰接式浮式系船柱 BIM 模型

2　浮式系船柱结构分析

2.1　结构构造分析

传统的固接式船闸浮式系船柱的上、下层系缆柱通过上层系船架和人孔盖固接在一起，属于刚性连接，如图 3 所示。固接结构体系中，由于制造、安装等精度误差的存在，上、中、下 3 组导轮很难共面。最不利工况

下，上、下导轮作为受力支撑点，中间导轮空悬，系缆力矩将变得很大。系缆力矩的增大使固接式浮式系船柱结构的强度、刚度设计要求变得更高，同时埋件支承反力的增大也将导致埋件结构设计要求相应变大。

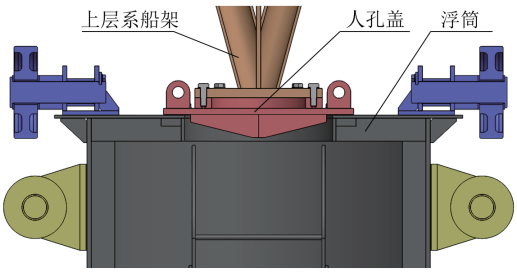
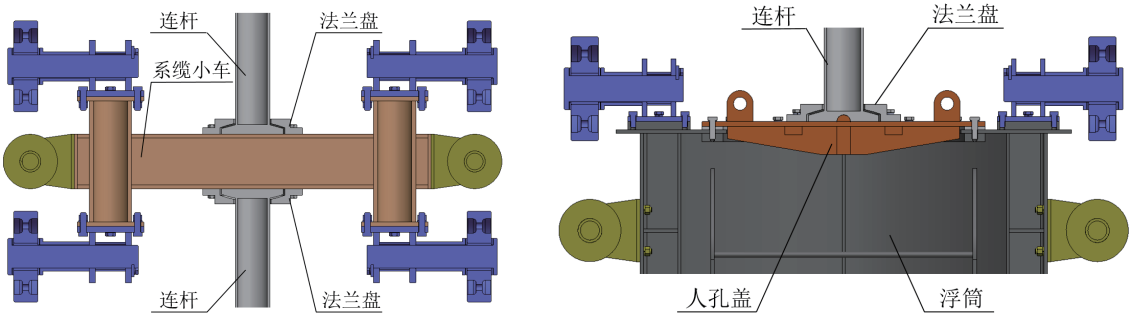


图 3　固接式上层系船架与浮筒连接

铰接式船闸浮式系船柱通过连杆将浮筒与系缆小车、系缆小车与系缆小车之间进行柔性连接，如图 4 所示。铰接结构体系中，连杆作为系缆小车与系缆小车、系缆小车与浮筒的连接结构，通过调整其长度可轻易实现各层系缆高度的调节。各层系缆小车之间、系缆小车与浮筒之间均可视为相对独立的系统。船舶系缆时，浮筒仅作为浮游装置提供浮力，其系缆力主要由系缆小车系统承担，系缆小车受力支撑点为其纵、横向导轮，系缆力可完全由小车的滚轮系统自平衡后直接传递至埋件，避免使系缆力传至浮筒或其他系缆小车，从而大幅减小了力矩及埋件反力，提高了浮式系船柱结构及其埋件结构的安全性和可靠性。同时，各层系缆小车的独立性很大程度提高了船闸浮式系船柱的系缆力和系缆高度的适应范围。此外，铰接式船闸浮式系船柱的系缆小车在使用过程中，若某个车架或导轮损坏，不需要更换整个浮式系船柱，只需更换损坏的结构，大幅节省了后期维修改造的工程量和费用。



a）系缆小车连接关系　　b）系缆小车与浮筒连接关系

图 4　铰接式浮式系船柱连接

2.2　结构力学性能分析

2.2.1　有限元计算

运用 BIM 软件 Solidworks 建立的三维数字模型能实现与 ANSYS Workbench 的无缝对接，计算时可直接在 Solidworks 主界面将处理好的模型导入 ANSYS Workbench 进行有限元计算分析，其流程如图 5 所示。

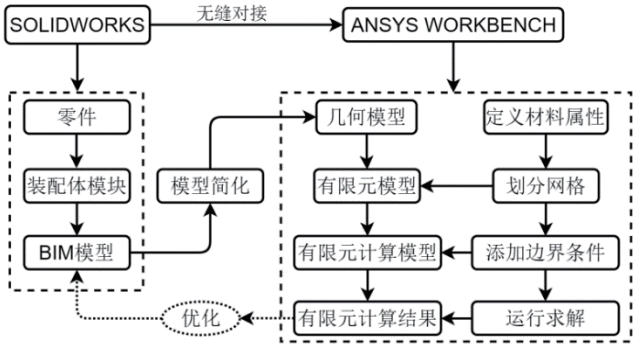


图 5　计算分析流程

在进行有限元分析之前，对几何模型进行必要的简化修改，将简化后的浮式系船柱 BIM 模型直接导入 ANSYS Workbench 中，定义材料属性，划分网格得到有限元模型（图 6），添加边界约束条件、加载得到有限元计算模型，最后运行求解，得到各个工况的计算结果。



a) 固接式浮式系船柱结构　　b) 铰接式浮式系船柱系缆小车结构

图 6　浮式系船柱结构有限元模型

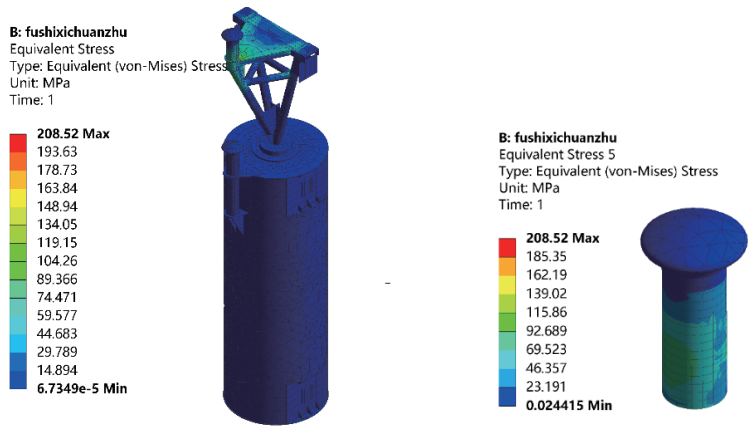
本文以系缆力 150 kN 规格的船闸浮式系船柱为例，选取具有代表性的系缆角（90° 和 140° ）进行模拟计算，工况见表 1。

表 1　计算工况

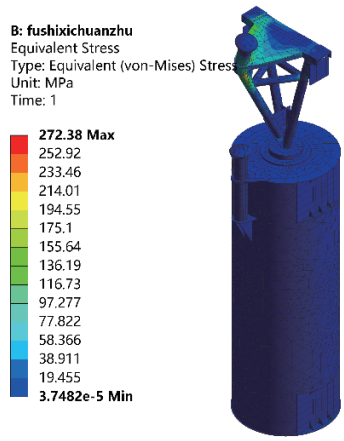
结构	工况	系缆位置	系缆力 /kN	角度 /(°)
固结	X_1	上层系缆	150	90
	X_2	上层系缆	150	140
	X_3	下层系缆	150	90
	X_4	下层系缆	150	140
铰接	Y_1	系缆小车	150	90
	Y_2	系缆小车	150	140

2.2.2　结果分析

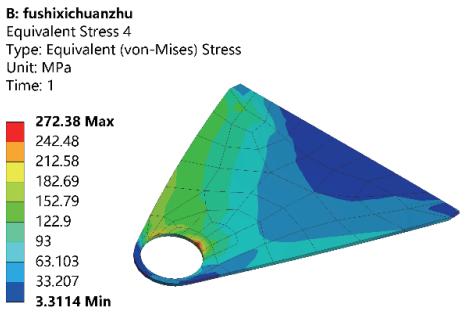
对固接式船闸浮式系船柱的不同工况下进行模拟计算，得到的应力云图如图 7 所示。可以看出，固接式船闸浮式系船柱的最大应力主要集中于上层系船柱与上层系船架顶板、下层系船柱与下层系船柱支撑板的交接处。系缆角为 140° 时，出现明显的应力集中现象，最大集中应力达到 272.38 MPa。



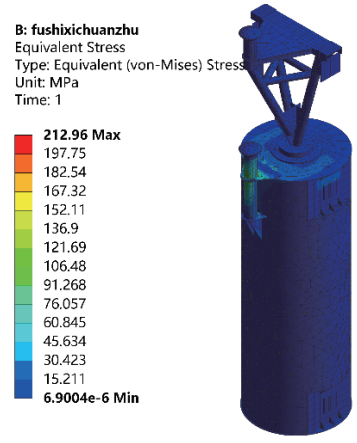
a）X_1 工况，整体　　b）X_1 工况，上层系船柱



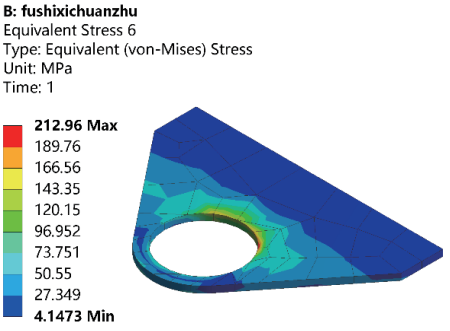
c）X_2 工况，整体



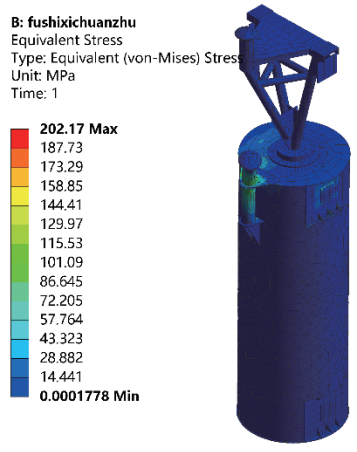
d）X_2 工况，上层系船架顶板



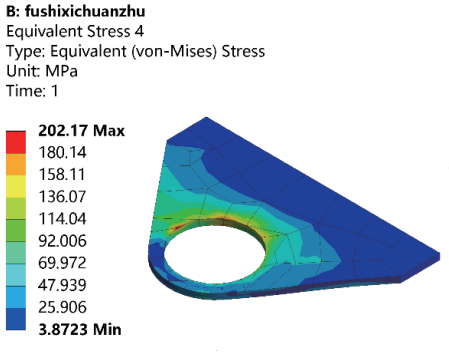
e）X_3 工况，整体



f）X_3 工况，下层系船柱支撑板



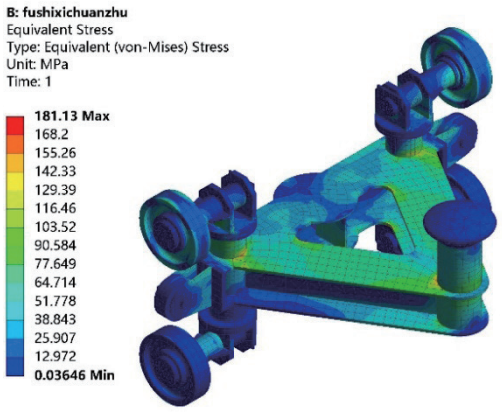
g）X_4 工况，整体



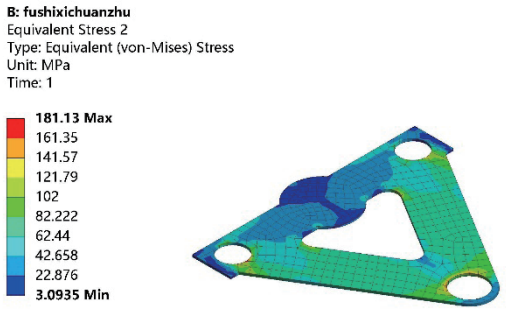
h）X_4 工况，下层系船柱支撑板

图 7　固接式浮式系船柱结构应力云图

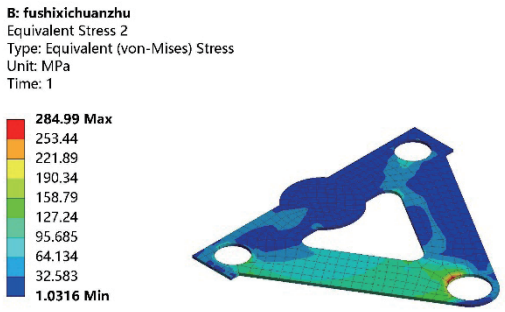
铰接式船闸浮式系船柱系缆小车与浮筒之间采用铰接连接，系缆力经由系缆小车导向轮传递至埋件和混凝土结构，各层系缆小车从系缆力的传递角度均可视作一个独立的系统。浮筒计算原则上不受系缆力影响，可只考虑自身重力、系缆小车压力、浮力、水压力。在 2 种工况下进行模拟计算，得到的应力云图如图 8 所示。可以看出，铰接式船闸浮式系船柱最大应力主要集中于系缆小车车架上翼缘与系船柱交接处。系缆角 140° 时，应力分布偏向系缆小车结构的一侧，所受系缆力主要由系缆小车车架上翼缘的一侧承担，出现较明显的应力集中现象。



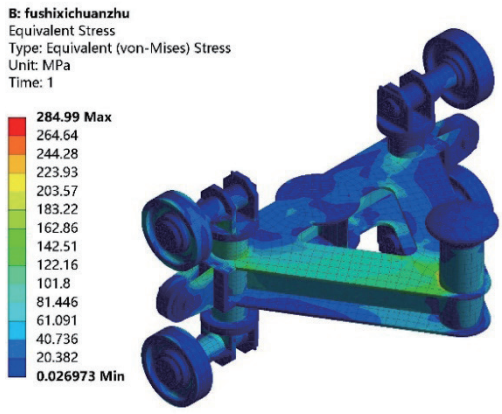
a）Y_1 工况，整体



b）Y_1 工况，系缆小车上翼缘



c）Y_2 工况，整体



d）Y_2 工况，系缆小车上翼缘

图 8　铰接式浮式系船柱系缆小车结构应力云图

铰接式结构浮筒应力云图见图 9。可以看出，铰接式结构中浮筒在只考虑自身重力、系缆小车压力、水压力、浮力的条件下，浮筒应力较小。因此，相较于固接式浮式系船柱结构，在满足浮力等条件下，可适当简化浮筒结构、减小浮筒壁厚等几何参数，从而使结构更加简洁化、轻便化。

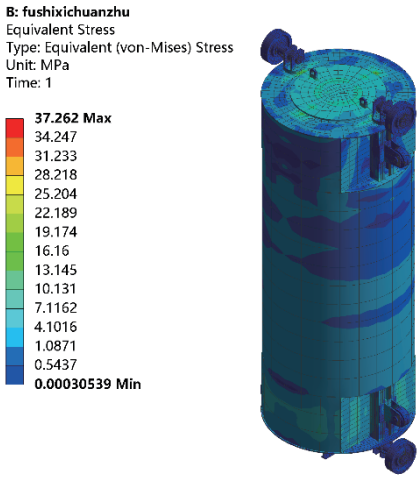


图 9　铰接式浮式系船柱浮筒结构应力云图

基于系缆力 150 kN 的工况，对 2 种不同结构形式的船闸浮式系船柱进行模拟计算，得到的最大支座反力

见表 2。可以看出，铰接式船闸浮式系船柱支座最大反力整体比固接式船闸浮式系船柱小，并且随着系缆角度的增大，最大反力降低程度更为显著。最大支座反力降低的主要原因在于铰接式浮式系船柱系缆小车从受力角度可视为独立系统，上下导轮间距小，继而力矩减小，支座反力也随之减小。

表 2　支座最大反力

结构	系缆角度（°）	最大反力 /kN	
		横向轮	纵向轮
固接	90	54.72	7.38
	140	81.59	46.97
铰接	90	41.65	22.63
	140	48.29	52.88

综上可知，相对于固接式结构，铰接式结构由于将系缆小车与浮筒分为数个独立系统，系缆力较均匀地通过系缆小车的横、纵向导轮传递至埋件，大幅减小了系缆力矩，降低了埋件结构的承力要求，使结构在相同系缆力情况下具备更高的安全性和可靠性。

2.2.3　工程应用案例

该铰接式船闸浮式系船柱结构已成功应用于湘江长沙枢纽船闸（图 10）、湘江湘祁二线船闸、湘江近尾洲二线船闸、澧水青山船闸、澧水艳洲船闸等多个大型水运工程，很好地解决了系缆高度适应性等问题，其安全性、可靠性以及可替换性更佳，经多年现场运行反馈效果良好，可为其他船闸工程浮式系船柱的设计改进和优化提供参考。



图 10　湘江长沙枢纽船闸工程船舶系缆应用

3　结　语

1）将 BIM 技术应用于船闸浮式系船柱结构设计，很好地解决了传统的二维设计在处理空间复杂的结构设计及计算时手段局限的问题。

2）铰接式浮式系船柱用系缆小车代替原有结构的上层系船架，很好地解决了系缆高度适应性差等问题。后期运行中若某个系缆车架或导轮损坏，可直接单独替换，而无需更换整个浮式系船柱，降低维护成本、提升维修的便捷性。

3）铰接式浮式系船柱结构中浮筒与系缆小车及系缆小车与系缆小车之间采用柔性连接，可大幅改善浮式系船柱结构及埋件的受力情况，提高浮式系船柱结构的安全性和可靠性。

参考文献

[1]　刘松 , 刘声树 , 邹艳春 . 一种新型系船柱的研究设计 [J]. 水运工程 ,2015(2):168-173.

[2] 张星星 , 陈明栋 , 巴添 . 新型浮式系缆装置关键技术及可靠性分析 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版),2013,32(3):489-493.
[3] 吴俊 , 舒岳阶 , 周世良 , 等 . 大型港工系船柱结构安全监测方法与实验 [J]. 光学精密工程 ,2021,29(7):1631-1639.
[4] 刘明维 , 曾丽琴 , 齐俊麟 , 等 . 船闸浮式系船柱受力状态数值模拟 [J]. 水运工程 ,2020(12):112-117.
[5] 刘明维 , 李明龙 , 吴林键 , 等 . 船闸浮式系船柱受荷响应力学模型 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版),2022,41(5):127-132.
[6] 斌勇 , 张虎 , 刘虎英 . 湘江长沙综合枢纽船闸新型浮式系船柱应用及特点 [J]. 湖南交通科技 ,2020,46(3):150-153.
[7] 张虎 , 尹斌勇 . 船闸新型浮式系船柱的设计与应用 [J]. 人民长江 ,2019,50(9):137-140.
[8] 李超军 , 叶雅思 , 唐洁 .BIM 技术在船闸金属结构全生命周期中的应用 [J]. 水运工程 ,2019(3):159-164.

作者简介：
李超军，硕士，工程师，从事水运工程设计和 BIM 技术研究，（E-mail）1134420118@qq.com，15211091162

曲线型隧洞式引航道通航断面尺度研究

王　能[1]　李　明[1]　陈叶华[1]　乾东岳[2]　章日红[2]　普晓刚[2]

（1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司，湖南长沙　410000；
2. 交通运输部天津水运工程科学研究所工程泥沙交通行业重点实验室，天津　300456）

摘 要：目前，通航隧洞已逐渐成为高山峡谷地区水利枢纽通航建筑物改扩建以及运河工程建设跨越分水岭段的重要通航方式，当船闸与通航隧洞相连并直接从隧洞取水时，隧洞内将产生十分显著的非恒定水流，对船舶的安全航行影响较大，针对此种布置情况，提出了船闸隧洞式引航道的概念，并依托贵州清水江白市水电站枢纽新建船闸工程，采用 1:36 正态整体水工模型与遥控自航船模相结合的技术手段，对多种断面尺度的隧洞式引航道在船闸灌泄水时的通航水流条件以及船舶航行参数进行了试验研究，提出了安全、经济的通航隧洞断面尺度及隧洞内船舶航行参数，可供类似通航隧洞工程参考。

关键词：隧洞式引航道；非恒定水流；断面尺度；水工模型；自航船模；弯曲

20 世纪 80 年代起，因国内经济大发展需求，国内兴起水电开发。在上游河段水电开发中，应缺乏水资源综合利用理念，不少河流水电开发过程中忽略了通航建筑物的建设。随着近年来航运发展需求，需对该类枢纽进行通航设施扩能升级，因受上游河段两侧高山地形和河道限制，此时紧挨枢纽两岸布置通航建筑物具有一定的局限性，需在相对远离枢纽位置重新开辟航道建设通航建筑物，而选择航道穿越高山峦岭，为减少开挖和环境破坏，采用开凿通航建筑物的方式进行地下通航，该通航建筑物即为通航隧洞 [1]。通航隧洞大多采用直线型，隧洞两端有引航道与主航道相连，引航道中设有导航建筑物及靠船建筑物，船舶在航行过程中，其航行状态的好坏取决于水流条件，口门区通航水流条件是船舶通航安全论证的重点内容 [2]，但其通航标准尚未统一。一般地，隧洞断面尺度与船舶航速、航行阻力、船艉下沉等船舶特性具有高度相关性 [3]。

目前国内外针对曲线形通航隧洞的研究很少，一是大多在枢纽布置时，充分利用现有河道条件，将通航建筑物贴岸布置，利用隧洞通航的很少，二是隧洞通航需满足水下断面形状要求、水上部分净空要求和隧道通航安全保障措施要求，而弯曲形河道其本身水流条件就差，两者叠加，加剧了曲线形通航隧洞通航安全风险。2006 年，王犹扬 [6] 等提出了隧洞布置方案，对枢纽布置进行了一系列的优化调整；2012 年，李焱 [7] 等采用水工物理模型及船模试验，对构皮滩第一级中间渠道内的航行水力条件、单线通航隧洞和渡槽的尺度进行研究并提出合理的通航隧洞尺度。2015 年，吴德兴 [8] 等以富春江七里泷航道通航隧道工程项目为依托，提出了适合Ⅳ级单线航道的通航隧道断面，并对其隧洞轮廓进行优化设计。2021 年，钮新强 [9] 等通过建立大型通航隧洞断面尺度目标优化数学模型，对构皮滩通航隧洞断面尺度深度分析得出大型通航隧洞断面尺度优化问题的最优解。现有研究成果多集中于直线隧洞断面形式选型，未考虑曲线布置对船舶航行安全的影响。同时国内大多数引航道考虑船舶低速域操纵性较差，多采用直线型布置。在空间受限时，可在局部调整引航道轴线，形成折线型引航道或曲线型引航道，为保障引航道通航安全，轴线转弯段需局部加宽。而通航隧洞断面尺度随有效宽度的增加，工程造价成倍增加。调整引航道布置方案同时满足穿越山体、引航道功能性设计以及保障隧洞内船舶

航行安全是曲线型隧洞式引航道的主要难点。总体而言，目前国内外对大断面通航隧洞尺度及在其中航行的船舶航行参数尚无可参照的标准规范，在曲线型隧洞式引航道适航条件研究方向上处于空白阶段。

因此，本文依托“清水江白市枢纽船闸工程”上游引航道通航系统，通过物理模型试验，分析不同通航隧洞尺度与灌水非恒定流相互响应的特征及规律，提出了安全、经济的通航隧洞断面尺度及隧洞内船舶航行参数，可为其他类似工程设计提供参考。

1　工程概况与设计方案

1.1　工程概况

白市水电站是清水江贵州省境内最后一个梯级，位于贵州省黔东南州天柱县境内，是一个以发电为主，兼有防洪、航运、水产养殖等综合利用效益的工程。其现有通航建筑物为 50 t 垂直升船机，按 50 吨级船舶过坝设计，远不满足国家规划的通航 500 吨级船舶的标准，且白市至分水溪河段 34 km 航道现状为 VI 级。根据白市目前货运量增长情况及远期预测货物运量需求，为提高通航建筑物至Ⅳ级（500 吨级）标准，避免大范围的岩石高边坡开挖，船闸上游引航道中间高山段采用隧洞通航方式连通上下游停泊段，利用右岸冲沟地形布置船闸，既结合了通航隧洞形式避免了大范围的岩石高边坡开挖，又保证了通航安全性。

1.2　设计方案

白市船闸通航设计代表船型为 500 t 货船，船长 55 m，宽 10.8 m，设计吃水 1.6 m，船闸上、下引航道设计方案平面布置采用不对称型式，船舶采用曲线进闸、直线出闸方式过闸。从上至下依次布置为上游曲线型明渠连接段（半径 R=500 m，长 L=650 m）、隧洞上游直线型明渠连接段（长 L=75 m）、曲线型通航隧洞段（半径 R=800 m，长 L=550 m）、隧洞下游直线型明渠连接段（长 L=135 m）、上游停泊段（长 L=142 m）、上游导航调顺段（长 L=130 m）、船闸主体段（长 L=250 m）、下游导航调顺段（长 L=130 m）、下游停泊段（长 L=142 m）、下游连接段，总长 2 496 m。上下游停泊段满足停靠一闸次 2 艘船舶。船闸采取省水船闸型式，在闸室右侧单侧布置三级省水池，各级省水池面积与闸室水域面积相等，具体详见图 1。通航隧洞按单线通航设计，平面为弧形布置，弧长 550 m，半径为 800 m；采用曲墙式断面型式，隧洞通航净宽 22 m，通航净高 8 m，通航水深 4.0 m。隧洞开挖最大宽度达 28 m，最大高度 25 m，隧洞内航道有效底高程 290 m。通航隧洞设计方案见图 2。

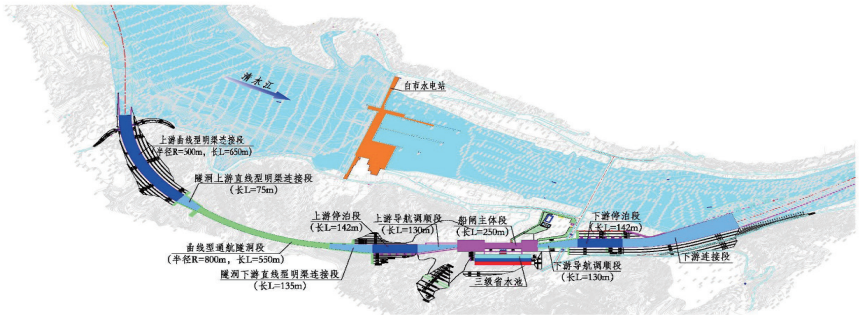


图 1 白市船闸布置图

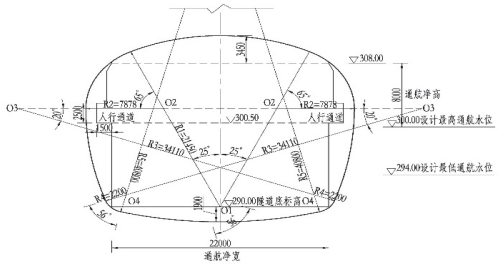


图 2 白市船闸通航隧洞设计方案图

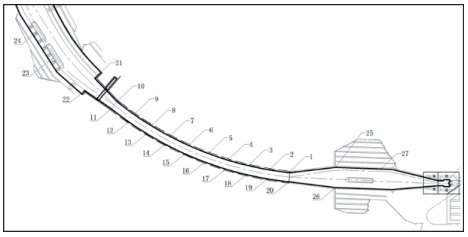
2 模型设计与验证

船闸曲线型隧洞式引航道设计参数与通航水流条件、船舶尺度、船舶航速等因素相互关联与制约，且隧洞段工程投资对隧洞断面尺度极为敏感，属于复杂的多目标优化问题。为研究船闸曲线型隧洞式引航道内船舶、水流与隧洞设计参数的互馈机理，依托贵州清水江白市水电站枢纽新建船闸工程，采用 1:36 正态整体水工模型与遥控自航船模相结合的技术手段，开展模型试验研究。主要研究内容包括：隧洞式引航道内船闸灌水诱发的非恒定波流传播特性与规律；隧洞内非恒定波流运动作用下的通航水流条件；断面尺度与隧洞内通航水流条件的响应规律，以及非恒定波流运动环境下曲线隧洞内船舶航行条；提出安全、经济的通航隧洞断面尺度及隧洞内船舶航行参数，为类似通航隧洞工程提供参考。本文所采用的物理模型及自航船模设计概况如下：

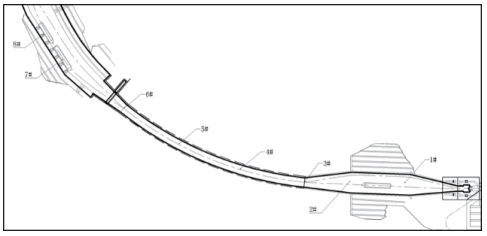
根据白市上下游河道走势、地形条件等特点，通航隧洞物理模型上游模拟至上游引航道出口外 50 m，下游模拟至船闸主体下游段。模拟河段最宽处约 320 m，平均宽度约 80 m，长度约 2 000 m。模型采用 1:36 的几何比尺，满足几何相似和重力相似条件，其运动速度及时间也应与实船相似。模型采取直导线的导线网控制，采用全站仪精密放样，平面精度控制在 1 cm 内，闸室及输水廊道用 PVC 塑料板制作，上游导航段采用水泥砂浆制作，通航隧洞以模型 0.5 m 间距布置，采用内衬垂直断面 + 底部曲线型断面及弧形刮板控制隧洞特殊的断面形态表面涂刷清漆，以满足隧洞形态精度及糙率要求。根据研究内容，模型沿程共布置波高观测点 27 个，流速观测点 8 个，物理模型及采样点布置见图 3。



a. 物理模型全景图



b. 波高观测点布置图



c. 航线流速采样点布置图

图 3　隧洞式引航道 1:36 物理模型及采样点布置

船模制作完成后，对船模静水性能和运动性能进行校准。船模与实船在静水中的排水量、吃水及平面重心位置达到相似要求。在保证船模直航稳定的前提下，调整螺旋桨的转速，率定了 0.6 m/s、0.8 m/s、1.2 m/s、1.5 m/s、1.8 m/s 和 2.0 m/s 六档静水航速，使船模的航速与实船相似。根据《水运工程模拟技术规范》要求，为减小尺度效应对通航船模操纵性的影响，一般采用减小舵面积的方法予以修正。目前常用的内河通航船模的舵面积需减小为原舵面积的 0.6 ~ 0.8 倍，本项目减小为 0.75 倍，并选取类似尺度实船操纵性数据为基准，开展船模操纵性能率定试验，微调舵面积达到修正尺度效应的效果，修正后的船模操纵性能与同类型实船操纵性能基本一致。

3 试验工况及通航判别标准

3.1 试验工况

根据设计，白市船闸上游最高通航水位 300 m，最低通航水位 294 m；下游最高通航水位 251.44 m，下游

最低通航水位 240.4 m。经静水条件下的船模航行试验，初步了解到船模通过平面形态弯曲型隧洞均需要较大的舵角。对于隧洞弯道形态，以最大舵角不超过 25° 来判断船舶操控难易度较为合理。另外，在上下游引航道均为最低通航水位时的灌水过程中，隧洞断面系数小，隧洞内水流条件及船舶航行条件最差，此为决定隧洞断面尺度及船舶安全航行的控制性工况。

根据船闸运行组织调度流程，船舶航行主要考虑灌水波影响的情况。对于有灌水波影响的船舶航行情况分为船舶出闸上行和船舶下行进闸；由于船舶出闸上行至上停泊段后，下行进闸船舶才可解缆航行进入隧洞，此时距船闸灌水结束的时间较长，下行船舶的航行水流条件比船舶出闸上行要优，因此本次非恒定流条件下隧洞内船舶航行条件研究以船舶出闸上行通过隧洞为主。

针对曲线形隧洞式引航道通航断面尺度对通航条件的影响问题，本文结合不同的船舶航行速度，针对 22 m、20 m 和 18 m 三种不同的隧洞净宽尺度，共开展了 4 组次共 9 个工况的研究，工况组合设计见表 2。

表 2　工况设计

组次	初始水位（m）	静水航速（m/s）	隧洞净宽（m）	隧洞有效底高程（m）	备注
1	294	0.8、1.2、1.5	22	289	灌水波航行试验上行
2		0.8、1.0、1.2	20	289	
3		0.6、0.8、1.0	18	289	

3.2　通航判别标准

对于船闸引航道内通航水流流速标准，《船闸输水系统设计规范》[4] 提出船闸灌泄水时，上游引航道最大纵向流速应不大于 0.5~0.8m/s；对于引航道内灌水引起的波高标准，《三峡船闸通航调度技术规程》[5] 规定船闸引航道口门区涌浪高度不大于 0.5m；对于引航道内船舶航行标准，“七五”期间三峡船闸引航道口门区的通航条件研究成果对口门区船舶航行状态进行判断，即舵角应小于 20°，漂角应小于 10°，且不能长时间用大舵角 [10-11]。

综上，本工程隧洞式引航道为平面弯曲布置，断面系数小，船舶进出闸航速较小，舵效相对较差，船舶安全通航判别标准宜定为水流流速不大于 0.5 m/s、涌浪波高不大于 0.5 m、船舶舵角最大不超过 25°。

4　研究结果

4.1　水流流速分析

图 4 是灌水结束后不同净宽隧洞内沿程最大流速，可得到如下结论：（1）船闸灌水结束后，隧洞内存在往复型非恒定流；（2）隧洞内最大流速值呈现自下游向上游逐渐增大的趋势，隧洞上游最大流速可达 0.6m/s 以上；（3）隧洞有效宽度越大，灌水结束后隧洞内沿程水流流速越小；（4）三种净宽尺度隧洞内沿程最大流速大都超过 0.5 m/s，水流条件较差，船舶不宜立即进入隧洞航行。

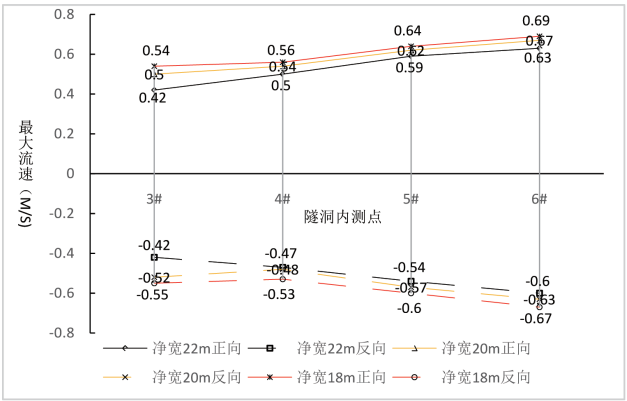


图 4　隧洞内沿程最大流速（灌水结束后）

4.2 涌浪波高分析

图 5 是灌水结束后不同净宽隧洞内沿程最大波高，可得到如下结论：（1）船闸灌水结束后，隧洞内水位波动幅度自下游至上游呈现逐渐减小的趋势，负向波动大于正向波动；（2）隧洞有效宽度越大，灌水结束后隧洞内沿程涌浪波高越小；（3）隧洞净宽减小后，灌水结束后最大水位波动有较大幅度的增加，18 净宽负向波高达到 -0.69 m，较 22 m 净宽增加 0.14 m。

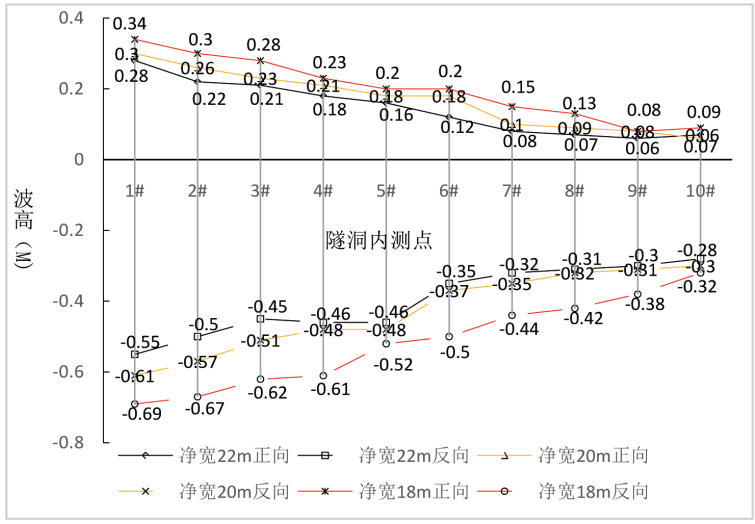


图 5 隧洞内沿程最大波高（灌水结束后）

4.3 船舶航行条件分析

图 6 是净宽 22 m 隧洞内船舶不同航速条件下沿程最大舵角，可得到如下结论：①当船舶以 1.2 m/s、1.5 m/s 静水航速航行时，舵角基本在 25° 以内，船舶航态较好；②以 0.8 m/s 静水航速航行时，航行舵角较大，船舶操控较为困难，通航效率较低且存在安全风险。

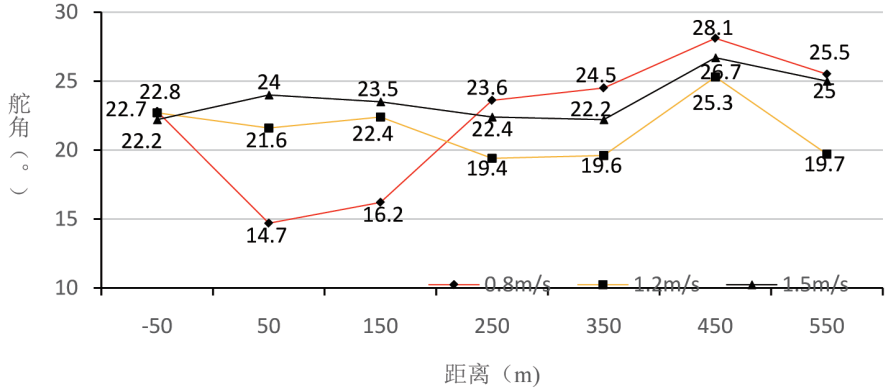


图 6 隧洞内船舶不同航速下的舵角变化（22 米净宽）

图 7 和表 3 是净宽 20 m 隧洞内船舶不同航速条件下沿程航行参数与最大舵角变化图，可得到如下结论：（1）受通航隧洞宽度变窄影响，在非恒定流情况下，隧洞内水流流速增大，船舶受非恒定流影响加大。当船舶以 0.8m/s 静水航速航行时，船舶通过隧洞时对岸航速最小时仅为 0.45 m/s，航行时调整航态所需舵角最大为 33.06°，船舷距隧洞边壁最小距离不足 0.5 m；（2）当静水航速提高至 1.0 m/s 时，船舶航行时最小航速 0.5 m/s，航行时调整航态所需舵角最大时为 35.50°，船舷离隧洞边壁最小距离约为 0.8 m。试验中当船舶航速控制在 0.8~1.0 m/s 通过隧洞时，航行最大舵角均大于 30°，且船舷距隧洞边壁距离较近，船舶航行风险较大；（3）当船舶以 1.2 m/s 静水航速通过隧洞时，船模试验时均发生船模触碰边壁情况。

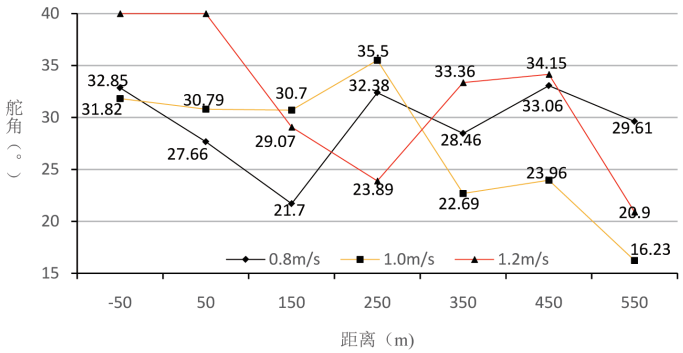


图 7　隧洞内船舶不同航速下的舵角变化（20 m 净宽）

表 3　隧洞内船舶航行参数（20 m 净宽）

航速（m/s）	参数 \ 位置	-100~0	0~100	100~200	200~300	300~400	400~500	500~600
0.8	舵 角（°）	32.85	27.66	21.70	32.38	28.46	33.06	29.61
	漂 角（°）	-8.98	5.23	-6.00	-4.48	-7.74	5.48	-7.25
	对岸航速（m/s）	0.38-0.77 0.53 0.62 0.75 0.77						
1.0	舵 角（°）	31.82	30.79	30.70	35.50	22.69	23.96	16.23
	漂 角（°）	-6.78	-7.17	-4.57	-8.56	6.47	-6.02	-8.08
	对岸航速（m/s）	0.43-1.10						
1.2	舵 角（°）	撞壁		29.07	23.89	33.36	34.15	20.90
	漂 角（°）		-5.95	8.47	5.60	-9.91	13.40	
	对岸航速（m/s）		0.94-1.2					

表 4 是净宽 18 m 隧洞内船舶不同航速条件下的航行参数，可得船舶航行结论如下：（1）受通航隧洞宽度进一步变窄影响，在非恒定流情况下，隧洞内水流流速进一步增大，船舶受非恒定流影响更大；（2）若船舶在船闸灌水完成后立即出闸进入隧洞，采用不同航速均难以安全航行，出现舵效差、长时间使用大舵角和“贴壁航行”等情况；（3）若船舶在船闸灌水完成后等待 15 min 出闸，非恒定流影响减弱，船舶以 0.8 m/s 静水航速上行时所操舵角最大为 27.71°，距边壁安全距离均大于 1 m，基本可通过隧洞；（4）若船舶在船闸灌水完成后等待 30 min 出闸，船舶以 0.8 m/s 静水航速上行，除进入隧洞时调整航态所需舵角超过 25.00 °（27.62 °），其余均小于 25 °，航行状态较好。

表 4　隧洞内船舶航行参数（18 m 净宽）

静水航速 (m/s)	灌水后等待时间（min）	对岸航速区间（m/s）	最大舵角（°）	航行评价
0.6	0	0.32-0.85	35.00	舵效差，有“倒退”现象
0.8		0.47-0.90	35.00	与边壁安全距离小
1.0		0.62-0.95	24.45	碰壁
0.6	15	0.42-0.85	35.00	舵效差
0.8		0.66-1.20	27.71	基本可通航
1.0		0.69-1.37	30.85	贴壁航行
0.6	30	0.50-0.86	35.00	舵效差
0.8		0.74-1.09	23.75	可通航
1.0		0.79-1.35	23.58	有碰壁风险

5 结 论

模型试验表明：隧洞内船舶安全通航以水流流速 0.5 m/s、水位波动 0.5 m、船舶舵角最大不超过 25° 为判别标准是比较适宜的。

白市船闸通航隧洞净宽 22 m 情况下，船闸灌水后船舶可以 1.2 ~ 1.5 m/s 静水航速安全上行通过隧洞，航行条件最优；隧洞宽度 20 m 情况下，船舶航行困难，容易发生触碰边壁情况；隧洞宽度 18 m 情况下航行空间更加受限，船舶在船闸灌水完成 15 min 后，才可以 0.8 m/s 静水航速缓慢通过隧洞，故推荐白市船闸通航隧洞净宽采用 22 m。

隧洞式引航道通航条件受船闸灌水非恒定流影响大，一般情况下隧洞净宽尺度越大，隧洞内水流流速、涌浪波高越小，船舶航行条件更优。

实际工程运用中隧洞尺度宜根据通航水流条件、施工难度，通航效率及工程造价进行综合比选。

参考文献

[1] 汤建宏 , 阚得静 . 高坝通航建筑物通航隧洞断面经济性分析 [J]. 水运工程 ,2017(07):141-144.

[2] 刘剑明 , 王新 , 黄群等 . 景洪升船机下游引航道口门区通航水流条件观测研究 [J]. 水运工程 ,2021(01):6-11+16.

[3] 中华人民共和国交通运输部 . 内河通航标准 : GB50139-2014[S]. 北京 : 中国计划出版社 ,2014.

[4] 南京水利科学研究院 , 天津水运工程科学研究所 . 船闸输水系统设计规范 : JTJ306-2001[S]. 北京 : 人民交通出版社 ,2001.

[5] 长江三峡通航管理局 . 三峡船闸通航调度技术规程 : JTS196-6-2012[S]. 北京 : 人民交通出版社 ,2012.

[6] 王犹扬 , 胡中平 , 杨一峰 . 构皮滩水电站枢纽布置及优化 [J]. 人民长江 ,2006(03):20-22.

[7] 李焱 , 郑宝友 , 周华兴 . 构皮滩升船机中间渠道通航隧洞和渡槽的尺度研究 [J]. 水道港口 ,2012,33(01):45-50.

[8] 吴德兴 , 周红升 , 郭洪雨等 . 富春江通航隧道建筑限界及内轮廓设计研究 [J]. 隧道建设 ,2015,35(11):1182-1187.

[9] 钮新强 , 吴俊东 , 王小威 . 基于目标优化的大型通航隧洞断面尺度研究 [J]. 水利水运工程学报 ,2021(03):1-8.

[10] 孙精石 . 从《内河通航标准》看某些特殊限制性航道宽度的确定 [J] . 水道港口，2006， 27（5）：300-305.

[11] 孙精石 . 从《内河通航标准》看某些特殊限制性航道水深的确定 [J] . 水道港口，2006， 27（6）：373-377.

[12] 李明 , 王能 , 张日红等 . 高坝枢纽新建通航建筑物轴线及通航条件研究 [J]. 水运工程 ,2021(03):98-106+137.

[13] 交通运输部天津水运工程科学研究所 . 清水江白市枢纽船闸上游隧洞式引航道通航系统安全通航条件物理模型试验研究报告 [R]. 天津 : 交通运输部天津水运工程科学研究所 ,2020.

[14] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司 . 清水江白市至分水溪航道建设工程可行性研究报告 [R]. 长沙 : 湖南省交通规划勘察设计院有限公司 ,2017.

作者简介：

王能，高级工程师，湖南省交通规划勘察设计院有限公司水运院副总工，从事水运设计，（E-mail）347112411@qq.com,13687321325

基于设备运行可靠性理论分析确定船闸输水阀门检修周期

尹斌勇[1]　杜　丁[1]　莫　雄[2]　贺柏武[2]

（1. 长沙市湘江综合枢纽工程办公室 湖南长沙　410200；
2. 湖南省港航水利集团有限公司 湖南长沙　410214）

摘 要：针对我国船闸检修管理仍普遍采用事后维修和定期预防检修管理模式的情况，以湘江长沙综合枢纽船闸为例，从研究船闸设备运行可靠性入手，通过人工检测方式，对船闸各设备状态进行分析判断，根据实际情况进行分析，发现湘江长沙综合枢纽船闸输水阀门可靠度较低，建议对输水阀门支承运转件部件按 3a 一周期、对主轨按 5a 一周期进行状态检测，根据实测资料统计分析得出船闸输水阀门检修周期，给出了主轮、轴套和水封更换周期的计算公式，为同类船闸检修工作提供借鉴参考。

关键词：船闸；输水阀门；可靠性；检修周期

0　引　言

截至目前，我国有船闸 1 000 余座，是船闸大国。近些年来，随着我国内河水运快速发展，船闸作为水运航道的一项重要设施和水运通道关口，其对保障大宗物资运输、促进水运发展的作用愈显重要，如何确保船闸设备运行可靠，以及合理经济选择船闸设备检修周期，引起业内广泛关注。对于船闸设备运行可靠性的研究，1996 年，宣国祥、张瑞凯、宗慕伟[1]在《船闸运行可靠性分析》中，以葛洲坝船闸为研究对象，提出通过结构函数方法结合各设备故障率的方式计算船闸运行可靠度；2021 年，杨珏、李乐新、杨冰[2]在《单级船闸运行可靠性分析及提升措施》中，通过失效概率函数方法结合各设备故障率的方式计算船闸各设备运行可靠度，并提出提升船闸运行可靠度的一些措施。以上研究对定量分析船闸设备运行可靠性提供了可循方法，具有较好操作性。

输水阀门是船闸设备中运行最为频繁和重要的设备之一，对其检修周期的确定，目前国内对这方面的研究较少，多数船闸仍处于事后维修和定期预防检修（包含临时性检修和计划性检修）管理模式，事后维修容易造成设备受损扩大、检修时间延长、修复费用增加、停航影响增大等问题，定期预防检修则容易造成设备过度检修、增加维护成本、浪费设备寿命等问题。在《船闸检修技术规程》[3]中，对输水阀门的检修内容和技术要求进行了明确，但对检修周期未提相关要求。在《通航建筑物维护技术规范》[4]中，仅对船闸大修提出：宜每 5~10a 组织实施一次。实际运行中，输水阀门受设备状况、运行频次、运行环境等因素影响，各地船闸的运行情况区别较大，如何较为精准的确定输水阀门检修周期，成为多数船闸开展船闸检修工作的一大疑问和难题。本文以湘江长沙综合枢纽船闸设备运行可靠性分析为基础，通过人工检测方式，对船闸输水阀门设备状态进行分析判断，在此基础上进行船闸状态维修，对船闸输水阀门检修周期进行确定，以此提升船闸运行可靠性和维护性价比。

1 工程概况

湘江长沙综合枢纽位于湖南省长沙市望城区湘江干流蔡家洲，是湘江九个梯级开发的最下游一级航电枢纽，上游距株洲航电枢纽 132 km，下游距城陵矶 146 km，是一座以改善湘江航道为主，兼有保障供水、发电、灌溉、改善环境、公路交通等多重功能的综合性枢纽工程。坝址控制流域面积 90 520 km^2，枢纽正常蓄水位 29.7 m（黄海高程，以下一致），相应库容 6.75 亿 m^3。枢纽由船闸、泄水闸、坝顶公路桥、水电厂等四大主要部分组成，其中船闸为 2 000T 级单级双线船闸，闸室尺寸 34 m×280 m×4.5 m（宽 × 长 × 门槛水深），设计最高运行水头 9.3 m，年通过能力 9 800 万 t，船闸上下闸首为钢结构人字闸门，输水阀门为钢结构平板闸门。

根据湘江长沙综合枢纽两阶段施工图[5]，船闸输水阀门为钢结构平板闸门，结构见图 1，主轮采用悬臂结构方式，材料采用 ZG340—640 铸钢，进行调质处理，热处理后踏面硬度 HB≥300，热处理深度 ≥15 mm。主轮轴套采用铜基镶嵌自润滑轴套，内径 260 mm，外径 300 mm，壁厚 20 mm，动压强 ≥40Mpa，静压强 ≥70 Mpa，最大静摩擦系数 ≤0.12，采用 P 型橡胶止水。

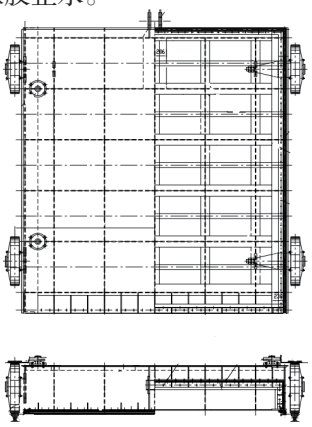


图 1 输水阀门总结构图

2 船闸设备运行可靠性分析

杨珏、李乐新、杨冰[2]在《单级船闸运行可靠性分析及提升措施》中，提出船闸各设备部件失效概率计算公式：

$$F_i=\frac{n_c+n_j}{N+n_c+n_j}\times 100\% \quad (1)$$

$$n_j=\frac{T_j}{T} \quad (2)$$

式中：F_i 为设备部件失效概率；n_c 为设备部件停机闸次数；N 为设备部件运行正常次数；n_j 为设备部件检修停机等效闸次数；T_j 为设备部件检修停航时间（h）；T 为闸次间隔时间（h）。

设备可靠度 :$R=1-F_i$。根据以上公式，以湘江长沙综合枢纽船闸 2022 年度一线上右输水阀门的情况为例，船闸运行闸次间隔时间 80 min（≈1.33 h），船闸运行总闸次 4 300 次（一线船闸），一线上右输水阀门因门体损坏停机闸次 2 次，检修停航时间 28 t（672 h），计算得出一线上右输水阀门失效概率为 0.105，该设备可靠度 R=1—0.105=0.895。

湘江长沙综合枢纽船闸设备（包含金属结构部分）有：人字闸门、输水阀门、液压启闭机（含液压系统）、浮式系船柱、浮式检修闸门、输水廊道进水口拦污珊、跨闸管线桥、盖板、栏杆、检修闸门、检修闸门卷扬机、控制系统、配电系统、工业电视监控系统、信号系统等。根据可靠性要求，与船闸运行可靠度有关的设备包括：人字闸门、输水阀门、液压启闭机（含液压系统）、控制系统、配电系统。

与上同理，对与船闸运行可靠度有关的设备缺陷进行统计，并对各设备每年度的运行可靠度进行计算，结果见表 1。通过计算分析可见：湘江长沙综合枢纽船闸人字闸门、控制系统、配电系统可靠度较高，人字闸门

启闭机系统和输水阀门启闭机系统、输水阀门可靠度较低。

表 1　湘江长沙综合枢纽船闸（一线）主要设备运行可靠度统计表

名称＼年度	可靠度					
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
运行总闸次	5 489	4 710	4 660	4 880	5 960	4 300
上右人字闸门	1	1	1	1	1	1
上左人字闸门	1	1	1	1	1	1
下右人字闸门	1	1	1	1	1	1
下左人字闸门	1	1	1	1	1	1
上右人字闸门启闭机系统	1	1	1	1	0.989	0.999
上左人字闸门启闭机系统	1	0.999	1	0.987	0.999	1
下右人字闸门启闭机系统	1	0.997	1	0.987	0.999	0.995
下左人字闸门启闭机系统	1	1	1	0.987	1	1
上右输水阀门	0.981	1	1	1	0.991	0.895
上左输水阀门	1	1	1	1	1	1
下右输水阀门	0.984	1	1	1	1	1
下左输水阀门	0.975	1	1	1	1	1
上右输水阀门启闭机系统	1	1	1	1	0.999	0.999
上左输水阀门启闭机系统	1	1	1	1	0.999	1
下右输水阀门启闭机系统	1	1	1	1	0.999	0.995
下左输水阀门启闭机系统	1	1	1	1	0.996	1
控制系统	1	1	1	1	1	1
配电系统	1	1	1	1	1	1

3　船闸输水阀门检修周期

根据湘江长沙综合枢纽船闸（一线）设备运行可靠性分析，人字闸门启闭机系统和输水阀门启闭机系统、输水阀门可靠度较低，同时，鉴于湘江长沙综合枢纽船闸金属结构自动检测和监测技术方式不多，在现有条件下，通过人工检测方式，对输水阀门进行设备状态信息收集，判断设备运行状态，研判其检修项目和周期。

3.1　人工检测

湘江长沙综合枢纽船闸 2012 年 10 月投运，船闸满负荷运行工况：每天 24 h 运行，日平均 18 闸次，年平均运行360 t。通过人工检测方式对船闸可靠度较低的输水阀门进行定期检测。根据相关规程规范、设计图纸要求，输水阀门检测部位、检测项目、技术要求参考《船闸检修技术规程》，检测周期的确定，每年检测需要维护和检修费用，必要性不大，对有些船闸需要停航检测的，影响船闸运行。反之，检测周期太长，可能出现检测不及时，问题发生在检测之前，影响输水阀门及时检修。综合以上因素，根据实际运行情况，输水阀门的检测周期取 3 a（主轨检测取 5 a），对输水阀门的检测项目和周期等内容见表 2。

表 2　湘江长沙综合枢纽输水阀门检测项目和周期

检测部位和项目		检测周期	技术要求
门体结构	蚀损情况	3 年	依据《水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程》（SL101—2014），不能超过 D 级（严重腐蚀），有必要可进行强度、刚度和稳定性复核。
	开裂情况	3 年	门体焊缝及门体面板等部位应无明显开裂情况
	变形情况	3 年	门体面板平面度、直线度；门体垂直度等无明显变形
支承运转件	主轮磨损量	3 年	根据检测结果，测算出年平均磨损量，判断后续磨损趋势。且依据设计图纸要求，主轮踏面最大磨损量（单边）应小于热处理深度，一般 ≤15m（具体以设计图纸为准）
	主轮轴套磨损量	3 年	根据检测结果，测算出年平均磨损量，判断后续磨损趋势。且依据设计图纸要求，以水封固定螺栓与门槽水封面板不能碰撞为原则，一般 ≤17m（具体以设计图纸为准）
止水装置	水封磨损情况	3 年	1）止水橡皮应完好，顶止水、侧止水橡皮与止水座面的间隙宜 0~2mm，底止水橡皮的预压缩量宜为 3~5mm；2）止水橡皮压板和螺栓应完好。
吊耳、吊杆和锁定装置		3 年	吊耳、吊杆和锁定装置应无变形、蚀损严重或开裂问题
埋件	主轨磨损量情况	5 年	根据检测结果，测算出年平均磨损量，判断后续磨损趋势。且依据设计图纸要求，以水封固定螺栓与门槽水封面板不能碰撞为原则，一般 ≤17m（具体以设计图纸为准）

注：检测工作宜选择每年常温为 25℃ ~30℃时的同一时段进行；

3.2 输水阀门检修周期

通过以上检测，对设备状态进行判断，湘江长沙综合枢纽船闸 2017 年进行了双线船闸大修，对输水阀门滚轮轴套（含轴）进行了更换，2023 年对输水阀门所有滚轮、轴套、轴、水封进行了更换。综合船闸实际工况、设计图纸要求、相关规程规范，确定输水阀门检修周期。

输水阀门易损部件和检修部件主要是支承运转部分和水封部件。输水阀门允许主轮和轴套的允许磨损量，以水封固定螺栓与门槽水封面板不能碰撞为原则，主轮、主轨、水封装配见图 2，计算过程如下：

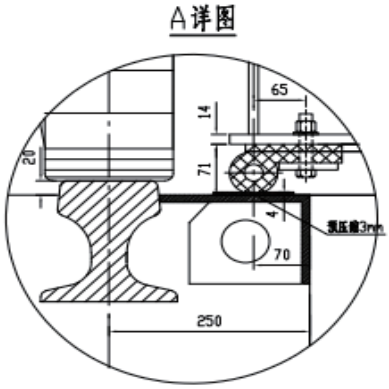


图 2　输水阀门主轮、主轨、水封装配（局部）图

71 mm（输水阀门面板至水封座面板尺寸）-10 mm（水封垫板厚度）-20 mm（水封厚度）-10 mm（水封压板厚度）-10 mm（水封螺栓头厚度）-4 mm（水封面板厚度）=17 mm，即主轮和轴套的总允许磨损量≤17 mm。

结合主轮和轴套的相关参数，对主轮踏面最大允许磨损量和轴套最大允许磨损量要求如下：主轮踏面最大允许磨损量（单边）应小于热处理深度，即≤15 mm；轴套最大允许磨损量（单边）在不超过壁厚 20 mm 的前提下，不允许超过主轮和轴套的总允许磨损量值，即 ≤17 mm。实际工作中，要综合轴套允许磨损量和主轮踏面允许磨损量，按总允许磨损量 ≤17 mm 进行控制，当主轮踏面磨损量未超过 15 mm 时，可优先更换轴套，以确保输水阀门支承运转部分正常工作。

根据以上要求，湘江长沙综合枢纽船闸输水阀门运行 6 a 左右，测量轴套磨损量 10~13 mm，测量滚轮磨损量 5~7 mm，先后对轴套和水封进行了更换，滚轮暂未更换；运行 10 a 左右，2022 年检查，测量滚轮磨损量 10~13 mm，2017 年新更换的轴套磨损量 10~12 mm，先后对轴套、主轮和水封进行了更换。按照比例逻辑关系，得出：

输水阀门主轮更换周期，以 T_L（单位：a）表示，其计算式为：

$$T_L=64\ 800/Z \quad (3)$$

输水阀门主轮轴套更换周期，以 Tz（单位：a）表示，其计算式为：

$$Tz=38\ 880/Z \quad (4)$$

水封更换周期，以 Ts（单位：a）表示，其计算式为：

$$Ts=38\ 880/Z \quad (5)$$

式（3）（4）（5）：Z 为船闸年平均实际运行闸次数

此外，输水阀门主轮、主轮轴套、水封的更换周期，与其材料性能、水质情况（泥沙含量）、运行水头等因素密切有关，材料硬度偏低、水质泥沙含量大、运行水头越高，主轮和轴套磨损加快，反之要慢，其检修周期应在式（3）、（4）、（5）基础上，根据实际情况做适当调整。同时，有些船闸输水阀门采用反弧门，平板输水阀门主轮轴承采用滚动轴承结构方式，其检修更换周期需另做考虑。

表 3　输水阀门各部位检修周期表

检修部位		满负荷下使用寿命	实际使用寿命（更换或检修周期）	备注
输水阀门	阀门主轮	10a	T_L=64 800/Z	依据设计要求和实际使用情况
	主轮轴套	6a	Tz=38 880/Z	依据设计要求和实际使用情况
	水封	6a	Ts=38 880/Z	依据设计要求和实际使用情况
	金属结构防腐		> 20a（面漆 > 10a）	依据设计要求和实际使用情况

注：（1）各设备满负荷下使用寿命，是以船闸每天 24 h 运行，每天 18 闸次，一年运行 360t 计算；（2）Z 为年平均实际运行闸次；（3）h 为年每天平均运行小时数；（4）在进行输水阀门主轮或主轮轴套更换时，应同时更换水封；（4）使用寿命单位：a。

4　结　论

本文基于设备运行可靠性分析为基础，采取失效概率计算公式，对湘江长沙综合枢纽船闸各设备的运行可靠度进行计算分析，并对可靠度较低的输水阀门等设备进行状态检测，根据状态检测情况、设计图纸要求、规程规范要求，确定输水阀门状态检修周期，得出结论如下，供同类船闸借鉴参考：

1）湘江长沙综合枢纽船闸人字闸门、控制系统、配电系统可靠度较高，输水阀门、液压启闭机系统可靠度较低。

2）在可靠度分析的基础上， 建议对输水阀门支承运转件部件（滚轮、轴套等）按 3 a 一周期、对主轨按 5 a 一周期进行状态检测。

3）根据设备运行状态检测情况、设计图纸要求、规程规范要求综合考虑，确定输水阀门按 T_L=64 800/Z 周期更换主轮，按 Tz=38880/Z 周期更换轴套和水封。

参考文献

[1] 宣国祥、张瑞凯、宗慕伟 . 船闸运行可靠性分析［J］. 水利学报 .1996，1（1）：1-7.
[2] 杨珏、李乐新、杨冰 . 单级船闸运行可靠性分析及提升措施［J］. 水运工程 .2021，579（2）：17-21.
[3] 中华人民共和国行业标准 . 船闸检修技术规程（JTS320-3-2013）［S］. 中华人民共和国交通运输部 .
[4] 中华人民共和国行业标准 . 通航建筑物维护技术规范（JTS320-2-2018）［S］. 中华人民共和国交通运输部 .
[5] 湘江长沙综合枢纽两阶段施工图［R］. 湖南省交通规划勘察设计院 .2010.

作者简介：
尹斌勇，长沙市湘江综合枢纽工程办公室技术安全部部长、高级工程师，从事航电枢纽工程建设与运行管理，（E-mail）107377751@qq.com，13874935880

基于多式联运的怀化国际陆港与水港融合发展研究

熊浩奇　虢名琦　吴米玲　官志鑫

（湖南省交通规划勘察设计院有限公司，湖南长沙　410200）

摘 要: 当前，国家高度重视多式联运发展，大力推动各种交通运输方式深度融合，促进现代物流新质生产力发展。怀化是西部陆海新通道的重要节点城市，是重要的铁路枢纽，同时拥有沅水、舞水等航道资源，具有典型的“水陆兼备”交通资源优势。本文立足多种运输方式融合、发展新质生产力的形势要求，以怀化国际陆港为例，研究分析陆港、水港运输融合发展的具体路径。针对怀化国际陆港的水、陆运输资源，提出了 3 条对外的多式联运线路方案，并对路线方案进行了比选，提出了近、远期不同运量水平下的运输推荐方案，对怀化国际陆港发展以物流为核心的新质生产力提供支撑，也为其他具有类似条件的地区多式联运发展提供参考。

关键词：新质生产力；多式联运；怀化国际陆港；物流成本；西部陆海新通道；综合交通；融合发展

0 引　言

现代物流领域的新质生产力是一种行业生产力体系，多式联运作为一种融合、高效的物流组织形式，是现代物流新质生产力的重要一环。怀化国际陆港依托得天独厚的铁路枢纽优势，是湖南对接融入国家西部陆海新通道的战略门户。同时，怀化国际陆港毗邻舞水、沅水等航道，可经岳阳城陵矶入长江，是西部陆海新通道与湖南省“一江一湖四水”航道网的交汇节点，具有发展多式联运的先天条件。在当前国家大力推进多式联运、培育和发展新质生产力的背景下，以怀化国际陆港为例开展陆港与水港运输融合发展研究，对优化运输结构、提升区域运输效率具有重要意义，同时，也可为其他具有类似条件地区提供参考。

1　怀化国际陆港基本情况

1.1　功能定位

2019 年 8 月，国家发改委印发《西部陆海新通道总体规划》，明确自重庆经怀化、柳州至北部湾出海口通道为西部陆海新通道三大主通道之一[1]。怀化成为湖南唯一被纳入西部陆海新通道的重要节点城市。为加快融入西部陆海新通道，湖南省、怀化市加快建设怀化国际陆港，并将怀化国际陆港定位为湖南省五大国际货运集结中心之一，是新形势下湖南加快构建全方位对外开放格局、促进全省区域协调发展、培育和发展物流新质生产力的战略抓手，具有多式联运、保税物流、海关监管、综合服务等核心功能。

1.2　发展目标

2022 年 5 月，湖南省人民政府办公厅印发《关于深度融入“一带一路”支持怀化国际陆港建设实施方案》，明确怀化国际陆港的发展目标为：打造内陆地区对外开放重要基地，建成中西部地区一流国际陆港，迈入全国

东盟班列第一方阵，推动临港产业跃上千亿台阶。怀化国际陆港将重点对接长株潭，有效辐射大湘西，加强湘鄂赣等协作，不断提升服务能级和辐射带动作用[2]。

2 怀化国际陆港水陆交通现状

2.1 交通设施现状

（1）铁路。焦柳、湘黔、渝怀、怀邵衡、沪昆（高铁）、张吉怀（高铁）等六条铁路在怀化市区呈“米”字形交汇，陆港已有铁路专用线接入焦柳铁路怀化西站。

（2）公路。通过包茂高速、沪昆高速、长芷高速、怀化绕城高速实现连南接北，承东启西。陆港通过临近的绕城高速怀化南互通、池回互通可便捷接入高速公路网。

（3）水路。陆港位于舞水沿岸，舞水航道规划为 500 吨级航道，已纳入省“十四五”水运规划，正在开展前期工作；怀化港是湖南省地区重要港口，在国际陆港规划有货运作业区。港口航道建成后可通过水路经沅水通江达海。



图 1 怀化国际陆港综合交通示意图

2.2 交通物流现状

怀化国际陆港周边公、铁、水货运现状如下：

（1）公路。怀化国际陆港周边 20 km 内 9 个高速公路收费站年货运量约 3 600 万 t。

（2）铁路。与国际陆港相连的怀化西编组站目前年到发货物约 200 万 t。怀化国际陆港已开拓北部湾铁海联运及中老、中越、中缅铁路等四条国际物流大通道，2023 年，发运东盟班列 455 列，同比增长 201.3%。

（3）水路。舞水航道暂未打通，怀化国际陆港及周边地区目前无水路运量产生。

3 怀化国际陆港现代物流发展优势

3.1 形势政策有导向

2023 年 10 月，习近平总书记在进一步推动长江经济带高质量发展座谈会上强调，要从整体上谋划和建设区域交通基础设施，加快建设综合立体交通走廊，加强交通网络的相互联通和“公水铁”等运输方式的相互衔接[3]。近年来，国、省两级先后印发多式联运发展优化调整运输结构工作方案，对多式联运发展提供了明确的指向。

3.2 交通区位有优势

怀化属于中西部结合部，是西部陆海新通道上的重要节点，拥有优越的铁路枢纽优势，近年来与东盟的物

流通道建设成果斐然。怀化同时也是沅水国家高等级航道沿线的重要城市。沅水是国家综合立体交通网主骨架中的水运主通道之一，也是湘黔的省际水运通道。“十四五”期，湖南加快实现沅水航道全线畅通，并积极推动重要支流舞水航道前期工作。交通运输部 2024 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》也明确提出重点加快沅水鱼潭枢纽等项目建设 [4]。随着上述航道的打通，怀化将成为西部陆海新通道与长江航道网的重要交汇点。

3.3 现实发展有需求

湖南省定位怀化国际陆港为“东盟资源 + 长株潭先进制造业 + RCEP 市场”东引西拓的桥梁，将培育形成以现代物流业为主体的“一体两翼”产业体系。怀化国际陆港正在依托自身优势发展临港产业，同时为长株潭及全省提供物流通道方面的坚强保障。随着陆港产业和物流组织逐步成熟，相关产业生产的粮油、板材、饲料等产品及东盟运入的矿石、煤炭也可经陆港上下水，未来运量需求巨大。需进一步培育和发展现代物流新质生产力，服务和支撑相关产业发展。

4 基于多式联运的怀化国际陆港与水港融合发展思路

新质生产力赋能的现代物流最终目标是为了提供高质量的物流服务。从怀化国际陆港物流发展条件和需求来看，现阶段物流新质生产力的发展在于大力推进多式联运发展，提升怀化国际陆港的物流竞争力，进而为湖南乃至中西部地区提供物流支撑。怀化国际陆港多式联运主要可按以下思路发展：

1)统筹协调。结合当前怀化国际陆港货物的流量流向和现有基础设施的发展状况，统筹考虑规划、运输费用、时间、距离、相关设施建设投入等因素，综合进行比选。

2 ）远近结合。近期，重点考虑怀化国际陆港物流功能发挥，主要承接过境货物集散功能；远期，结合怀化国际陆港产业布局，充分为产业大宗提供运输支撑。

立足全局。在关注怀化国际陆港自身产业发展的基础上，立足西部陆海新通道及“一江一湖四水”航道网全局，发挥枢纽节点作用，充分考虑多式联运的发展需求。

5 怀化国际陆港多式联运方案比选

5.1 运输线路方案

《怀化港总体规划（2035 年）》共规划鹤城、洪江、辰溪、沅陵 4 个港区 [5]。规划鹤城港区国际陆港作业区与陆港直接相连，洪江港区安江作业区、辰溪港区火马冲作业区通过多式联运方式与陆港相互衔接。以陆港和最下游的辰溪港区火马冲作业区作为方案比选起讫点，提出三条线路方案。

（1）线路一：在陆港直接下水

陆港码头直接下水，水路经舞水航道、沅水航道至辰溪火马冲作业区，全程水路运距 211 km。

（2）线路二：在安江作业区下水

陆港经 G209 国道至池回互通上高速，经怀化绕城高速、包茂高速、沪昆高速，由安江互通下高速，经 S222 省道至洪江安江作业区下水，通过沅水航道运至辰溪火马冲作业区，总运距 157 km，其中：公路运距 56 km（含高速公路 43.2 km）、水路运距 101 km。

（3）线路三：在火马冲作业区下水

陆港通往火马冲作业区线路共有铁路、公路两种路径。

公路路径：陆港经 G209 国道至怀化南互通上高速，经怀化绕城高速、长芷高速，由辰溪南互通下高速，经 S250 省道至辰溪火马冲作业区下水，全程公路运距 69 km（含高速公路 54.6 km）。

铁路路径：陆港经焦柳铁路、沪昆铁路至辰溪站，通过新建铁路专用线 2 km，接入火马冲作业区下水，

全程铁路运距 72 km。



图 2　运输线路示意图

5.2　运输费用测算

（1）取费标准

水路运价：由水路单位运价、船舶过闸费、港口装卸费组成。此外，由于舞水航道目前处于断航，在当前航道筹融资模式下，需考虑新建航道工程贷款利息分摊至运量。水路单位运价以 1 000 t 级货运船舶、大宗散货作参考，取 0.1 元 /t・km；船舶过闸费用按《湖南省内河航道新改扩建船闸收费实施办法》[6]，仅新改扩建船闸收费，即沿线共有舞水牌楼、三角滩船闸，沅水洪江船闸等 3 道船闸收费，费用取 1 元 /t・闸；港口装卸费参照周边类似码头收费标准，取 9 元 /t；舞水航道建设自筹费用考虑银行贷款，按 20 年贷款期测算，每年需偿还利息约 7 000 万元。按 2026、2035 两个水平年舞水航道预测水路货运量分别为 300 万 t、650 万 t 分摊，2026 年分摊费用为 23 元 /t，2035 年为 11 元 /t。

公路运价：由公路单位运价、高速公路通行费组成。公路单位运价取费以主要公路物流平台的价格测算和怀化相关汽运物流企业的调研为参考，取 0.65 元 /t 公里；高速公路通行费根据《湖南省高速公路各通车路段货车通行费收费具体执行标准》，以大宗货物运输的 5 类货车为计价标准，单位公路货运收费约为 0.15 元 /t・km。

铁路运价：由铁路单位运价、运杂费、铁路建设基金组成，按相关收费文件标准，分别取 0.103 元 /t・km、35.4 元 /t、0.03 元 /t・km。

（2）费用测算

线路一：全部为水路运输，除运输费用外，需另考虑 1 次港口装卸、3 道收费船闸收费及新建舞水航道工程利息分摊，经测算，2026 年运量水平下综合运价 56.1 元 /t，2035 年 44.1 元 /t。

线路二：公水联运，除运输费用外，需另考虑高速公路收费及 1 次港口装卸，综合运价为 62.0 元 /t。

线路三：公水联运方案，综合运价为 64.0 元 /t；铁水联运方案，除运输费用外，需另考虑铁路装卸、接取、港口装卸各 1 次，综合运价为 54.0 元 /t。

5.3 综合比选

线路一从陆港直接下水，线路里程最长，远期在运价上有竞争优势，但舞水航道暂未开工，需 4 年建设期，近期难以实现对陆港的有效服务。远期随着陆港货运量增长，具备转水运潜力的货物增加，线路一运价最具备竞争优势。

线路二从安江下水，线路里程仅次于线路一，运价较高；

线路三通过公路运至火马冲作业区下水，里程最短，但运价最高；通过铁路运至火马冲，线路里程较短，且近期运价最低。

各线路方案的对标情况见表 1：

表 1　不同多式联运线路物流成本比选表

线路方案	里程（公里）	综合成本（元 / 吨）
一	211	2026 年 56.1；2035 年 44.1
二	157	62.0
三（公水）	69	64.0
三（铁水）	72	54.0

5.4 推荐方案

经比选，近期在怀化国际陆港运量不大的情况下，推荐辰溪火马冲作业区下水线路。主要考虑因素：一是近期采用铁路方式运价最低；二是辰溪具备公铁水联运条件，有已建的沪昆铁路通过规划的火马冲作业区附近；三是码头建成后运量有保障，规划的火马冲作业区附近有火马冲工业园，可同时兼顾当地园区和怀化国际陆港货物运输；四是有公路、铁路两种方式相互补充，货物承载能力更强。

远期，随着怀化国际陆港运量提升，特别是湖南及周边省份进口的矿石、煤炭、粮食等大宗物品选择从怀化国际陆港中转，则可逐步选择向舞水航道转移。

6 建　议

1）加快沅水鱼潭枢纽等项目建设，建成后可实现沅水辰溪以下航道畅通，怀化市交通区位优势将进一步提升，枢纽效应将显著增强。应尽早启动辰溪火马冲作业区建设，近期根据运量规模，可建设 2 个泊位及 2 公里铁路专用线，投资约 3.5 亿元，力争与沿线航道同步投入使用。

2）随着货运量增长，航道建设分摊到货运量的利息将持续减少，远期水运方案将成为综合运价最低的线路。根据货运量预测，陆港与长株潭及长江沿线地区的钢材、粮食、饲料等大宗货物将成为的主要大宗货物，具备转水运潜力，建议同步推动舞水航道建设，推动大宗货物转水路运输，有效降低物流成本。

参考文献

[1] 西部陆海新通道总体规划 [R]. 北京 : 国家发展和改革委员会 ,2019.

[2] 湖南省人民政府办公厅印发《关于深度融入 " 一带一路 " 支持怀化国际陆港建设实施方案》的通知 (湘政办发〔2022〕24 号)[J]. 湖南省人民政府公报 , 2022(10):22-33.

[3] 中华人民共和国中央人民政府 . 习近平主持召开进一步推动长江经济带高质量发展座谈会强调：进一步推动长江经济带高质量发展 更好支撑和服务中国式现代化 [EB/OL].[2023-10-12].https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202310/content_6908721.htm.

[4] 中华人民共和国交通运输部 . 交通运输部关于新时代加强沿海和内河港口航道规划建设的意见 [EB/OL].[2024-06-06].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202406/content_6957717.htm.

[5] 怀化港总体规划（2035 年）[R]. 湖南 湖南省交通规划勘察设计院有限公司 ,2023.

[6] 湖南省发展和改革委员会 . 湖南省发展和改革委员会 湖南省交通运输厅关于印发《湖南省内河航道新（改扩）建船闸船舶过闸费收费管理办法》的通知 [EB/OL].[2023-11-29].http://fgw.hunan.gov.cn/fgw/xxgk_70899/gzdtf/gzdt/202311/t20231129_32451858.html.

作者简介：

熊浩奇，湖南省交通规划勘察设计院有限公司工程师，（E-mail）504546245@qq.com，18684924028

虢名琦，湖南省交通规划勘察设计院有限公司工程师，（E-mail）15116314117@163.com，15116314117

吴米玲，湖南省交通规划勘察设计院有限公司高工，（E-mail）93884383@qq.com，18874003783

官志鑫，湖南省交通规划勘察设计院有限公司高工，（E-mail）guanzhixin24h@163.com，13507492651

船闸人字门振动与背拉杆动力特性关系研究

刘永胜　叶雅思　匡　涛　牛继业　彭厚德

（湖南省交通规划勘察设计院有限公司，湖南长沙　410200）

摘 要：人字门是船闸的重要组成部分，其结构的稳定性和安全性至关重要，背拉杆作为人字门的重要构件，其动力特性对人字门的整体性能有着重要影响。研究发现，施加适当的预应力到背拉杆上可以提高人字门主体结构的刚度，然而，这种提高对于局部构件的刚度改善作用有限，在背拉杆预应力施加后，人字门仍可能出现振动现象，这种振动主要出现在次要构件上，如面板和隔板，表现为高频局部振动和噪音，这种振动与人字门整体结构的动力特性有着本质区别。为了深入了解人字门振动和背拉杆动力特性的关系，本研究通过实际试验获取了监测数据，这些数据分析的结果可以为人字门背拉杆预应力值的确定和预应力调试施工提供指导，对于指导船闸人字门的设计和施工具有重要的实际意义，有助于确保船闸人字门的结构安全和稳定运行。

关键词：船闸；人字门；加速度；振动；背拉杆；动力特性

中图分类号：U 641.33

文献标志码：A

船闸人字门作为水利枢纽的重要组成部分，其安全性和稳定性直接关系到整个水利系统的正常运行，对人字门振动问题的研究一直是水利工程领域的热点之一[1]。人字门在运行过程中，由于水流、风载、启闭机操作等多种因素的影响，往往会产生振动，这些振动不仅会影响人字门的正常运行，还可能对船闸结构造成损害[2]。因此，对人字门振动及其与被拉杆特性的研究显得尤为重要。近年来，随着科技的进步和研究的深入，国内外学者在船闸人字门振动与背拉杆动力特性关系方面取得了一定的研究成果。

本文研究了船闸人字门振动与背拉杆动力特性的关系。通过实际试验获取监测数据，分析了人字门振动和背拉杆动力特性的关系，并探讨了人字门背拉杆预应力值的确定和预应力调试施工。本研究对于指导船闸人字门的设计和调试具有重要意义，有助于确保船闸人字门的安全运行，减少振动噪音，提高船闸的运行效率。同时，本研究也为人字门背拉杆预应力值的确定和预应力调试施工提供了科学依据，为类似工程的设计和施工提供了参考。

1　工程概况

本研究依托湘江大源渡航电枢纽二期船闸工程，船闸有效尺寸为 280 m × 34 m × 4.5 m，大源渡二线船闸下闸首人字门，单扇门叶尺寸为 19.82 m × 18.72 m × 2.5 mm，共设 15 根主梁[3]。闸门下游面设有单层背拉杆，共有 3 根主背拉杆，2 根副背拉杆，背拉杆截面尺寸为 200 × 40 mm。研究对象为大源渡二线船闸下闸首左门。

2　研究内容

船闸人字闸门为空间薄壁钢结构，在自重作用下自由悬挂时，会产生较大的翘向上游的扭转变形[4]。在人

字门上设置背拉杆并对背拉杆施加预应力，可提高人字门单扇门页的扭转刚度和整体刚度，减小闸门的扭转变形。根据《船闸闸阀门设计规范》要求，人字门安装完成后必须施加计算得到的预应力值，确保人字门左扇和右扇门页无缝合拢、以及单扇人字门门轴柱变形满足规范要求；在背拉杆中张拉预应力可以明显提高单扇门页的整体结构刚度，通过这一措施，可以减小人字门在运行过程中的整体振动与噪音。人字门在运行过程中背拉杆中的预应力是一个不断变化的值，需保证人字门背拉杆的预应力值必须处于正值范畴，避免背拉杆因失稳而失效[5]。研究背拉杆预应力值在人字门的运行过程中与人字门结构振动规律之间的关系。可及时发现问题提交船闸管理处运行管理人员参考。

2.1 试验准备

1）试验方法

试验采用电测法。在下闸首人字门（左门）各关键部位（主梁、竖梁、A 杆和 B 杆、启闭杆）布置动应变计、加速度传感器、振动位移拾振器，采取上述被监测部位的振动大小，将动应变和加速度实时动态信号采集并送入分析仪，利用动力测试设备及配套的动力问题分析软件，对各测点动态信号进行时域和频域分析[6]。根据分析结果研究人字门在运行过程中的动力问题、振动烈度以及振动规律。在人字门底主梁布置脉动压力感测器，监测人字门在各种运行工况下人字门体承受的水流脉动压力，分析水流脉动压力与门体振动的关系。

2）测点设置

设置监测测点：人字门振动测点包括加速度测点、动应力测点、动位移测点[7]。

加速度测点：加速度测点共 9 枚，水下 3 枚、水上 6 枚，沿人字门主梁横向和竖向布置，检测人字门构件的振动规律。人字门面板和横隔板是人字门刚度较小部位，选择部分面板和横隔板布置加速度测点。

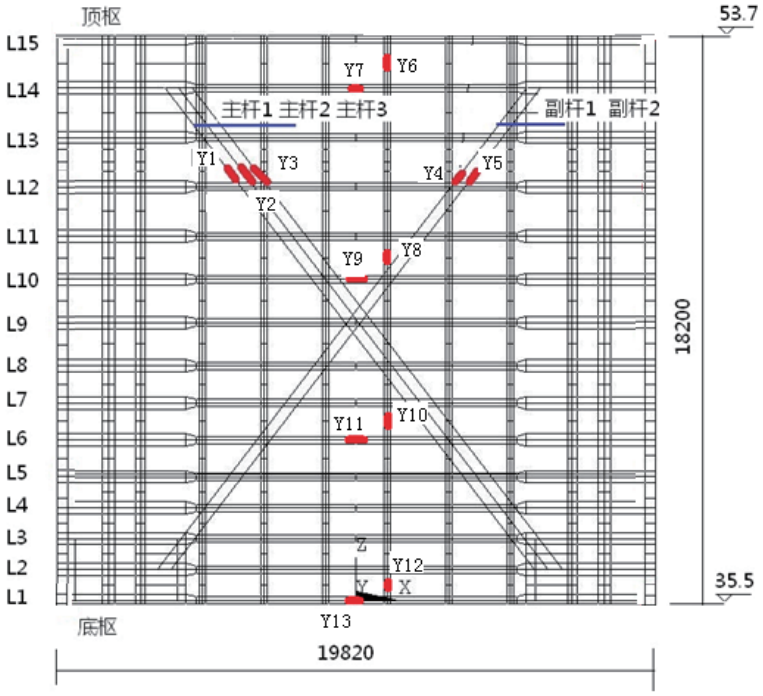


图 1　人字门振动测点布置图

动应力测点：人字门体动应力测点共布置 12 枚，布置在人字门主梁的横向和竖梁，监测人字门主要受力构件在船闸各种运行工况下承受动应力的大小及规律。如图 1 所示的人字门振动测点布置图。

动位移测点：动位移测点布置在人字门水上部分，沿人字门主梁横向和竖向布置，从振动位移上检测人字门主要结构构件的振动规律。人字门面板和横隔板也布置动位移测点。

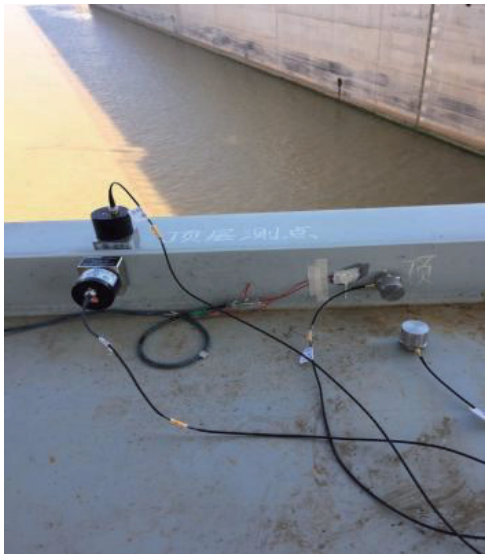


图 2　顶梁动力测点（位移、加速度、应变）

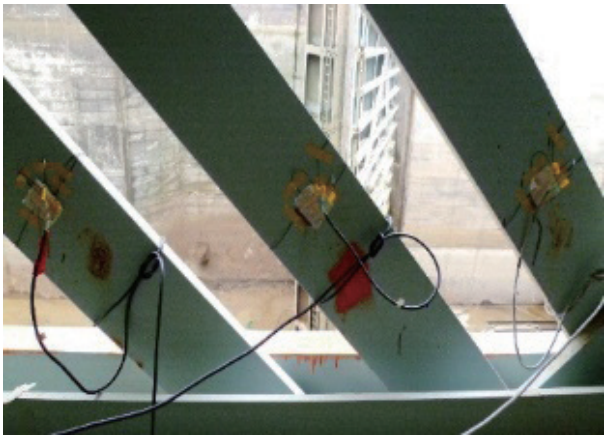


图 3　主背拉杆应变计布置图

2.2　基础介绍

人字门主体结构振动和局部构件的振动是两个完全不同概念，产生的危害也是不一样的，以往总是把人字门整体结构振动和局部构件的振动混为一谈，使得人字门振动问题的解决变得更加困难 [8]。分别研究人字门主体结构和人字门局部构件的振动特性，通过研究各自的动力特性，对比两者之间的差别和联系，有助于对人字门整体结构振动分析。

大量人字门现场振动试验结果表明，施加背拉杆预应力后人字门仍存在所谓振动现象，此时的振动大多是人字门次要构件如面板、隔板的局部高频振动，并以噪音形式出现，这类振动噪音与人字门整体结构的动力特性是有本质区别的，而且人字门内部的高频振动是无法通过施加背拉杆预应力来根除的。表 1 是主要构件受力允许值。

表 1　人字门主要构件受力允许值

主要构件名称	设计应力允许值	
面板	σ_{max}	108MPa
主梁	σ_{max}	-123MPa
	τ_{max}	19MPa
	折算应力	123.2 MPa
	最大挠度	20.2mm

3　人字门加速度结果分析

3.1　现场加速度实测结果

试验共进行两次，表 2 为在冬季 11 月测试的人字门不同工况下，各测点振动加速度测量结果，表 3 为在夏季 6 月测试的人字门不同工况下，各测点振动加速度测量结果。为了分析人字门动力试验结果，一般规定，人字门主体结构为横梁、竖梁；局部构件为横隔板、纵隔板、面板。

表 2　人字门振动加速度实测最大值（单位：g）

测点 \ 工况		关门		开门		闸室泄水	闸室充水
		开始	结束	开始	结束		
底层主梁顺水水流方向		0.013	0.038	0.028	0.005	0.011	0.003
-3 层主梁顺水水流方向		0.014	0.034	0.020	0.005	0.015	0.002
顶层主横梁	垂向方向	0.085	0.289	0.234	0.044	0.166	0.059
	顺水	0.087	0.356	0.191	0.029	0.102	0.022
7 层主横梁	垂直方向	0.078	0.265	0.212	0.046	0.121	0.048
	顺水	0.055	0.276	0.136	0.022	0.061	0.014
13 层主横梁	垂向方向	0.032	0.122	0.044	0.010	0.036	0.025
	顺水	0.073	0.269	0.112	0.020	0.108	0.016
7 层隔板	垂向方向	0.076	0.128	0.255	0.091	0.415	0.102
13 层面板	顺水			0.080	0.021	0.184	0.038

表 3　人字门振动加速度实测最大值（单位：g）

测点 \ 工况		关门		开门	闸室泄水		闸室充水
		开始	结束	开始	结束		
底主梁	顺水	0.013	0.009	0.012	0.042	0.024	0.003
-3 层梁	顺水	0.016	0.010	0.013	0.038	0.024	0.007
顶层主横梁	垂向	0.007	0.018	0.041	0.042	0.035	0.013
	顺水	0.028	0.112	0.110	0.233	0.087	0.050
顶层面板	顺水	0.127	0.026	0.337	0.181	0.223	0.106
顶层隔板	垂向	0.240	0.031	0.433	1.068	0.377	0.176
13 层主横梁	垂向	0.003	0.017	0.022	0.016	0.021	0.008
	顺水	0.009	0.025	0.037	0.078	0.035	0.012
7 层隔板	垂向	0.070	0.022	0.101	0.023	0.240	0.043
13 层面板	顺水	0.044	0.017	0.111	0.072	0.184	0.029

3.2　加速度结果分析

1）关门、开门工况

关门工况垂直方向最大振动加速度为 0.289 g，测点为顶层主横梁；水流方向最大振动加速度为 0.356 g，测点为顶层主横梁。人字门水下测点水平

方向振动明显小于水上测点同方向加速度。水下各测点水流方向振动加速度接近。水上各测点水平方向振动加速度随测点高程增加而增加，顶层最大。第二次试验结果，各测点振动加速度不同程度减小，特别是竖直方向，加速度减小明显。

开门工况垂直方向最大振动加速度为 0.234 g，测点为顶层主横梁测点；水流方向最大振动加速度为 0.191 g，测点为人字门顶层主横梁测点。人字门水下测点水平方向振动明显小于水上测点同方向加速度。人字门水下各测点水流方向振动加速度接近，水上各测点水平方向振动加速度随测点高程增加而增加，顶层梁最大。

开门和关门工况为人字门运动工况，这两个工况是人字门运行振动最不利工况。综合两次试验结果表明，人字门主体振动加速度最大值和人字门局部构件振动加速度最大值符合加速度振动安全标准，人字门振动属于中等强烈度，对人字门结构不会产生明显影响。

2）闸室充水、泄水工况

研究船闸闸室廊道内充水和泄水工况人字门振动加速度，以此评价廊道内水流脉动压力对静止状态下人字门的动力影响，结果见表 3 数据。试验结果表明，船闸廊道内充水时，闸室廊道内的水流脉动压力对人字门主

要框架结构各测点产生的振动加速度最大有效值不超过 0.009 g；垂直方向最大加速度值 0.059 g（充水工况）、0.166 g（泄水工况）；水流方向最大加速度 0.022 g（充水工况）、0.102 g（泄水工况），振动加速度最大值都出现在人字门顶层。闸室充水工况人字门水下测点加速度很小。

船闸闸室廊道内充水和泄水工况，人字门产生的振动主要来自廊道内脉动水流压力。试验结果表明，充水和泄水工况，人字门振动属于较小振动，振动对人字门主体结构的没有影响。

3.3 人字门加速度谱分析

选择人字门稳态运行工况下各测点的加速度时程曲线进行傅里叶变换得到线性谱，如图 4、图 5 所示。频率分析包括人字门整体结构和局部构件水流方向频率分析和竖直方向频率。测点包括人字门主横梁水流方向和竖直方向 (整体结构谱)、人字门局部构件面板、横隔板水流方向和竖直方向（局部构件谱）等。

试验结果表明，人字门整体结构测点优势频率在 5.5 ~ 18.5 Hz 范围内，主要是低频成分。

人字门局部构建测点优势频率范围 18.5 ~ 99.0 Hz 范围。与人字门整体结构频率比较，局部构件优势频率明显大于人字门整体结构的优势频率。人字门在振动时，局部构件主要以各自的固有频率振动，许多现场人字门结构振动试验都说明，人字门振动时人字门局部构件更容易起振而且振动能量远远大于主体结构的振动能量 [9]。

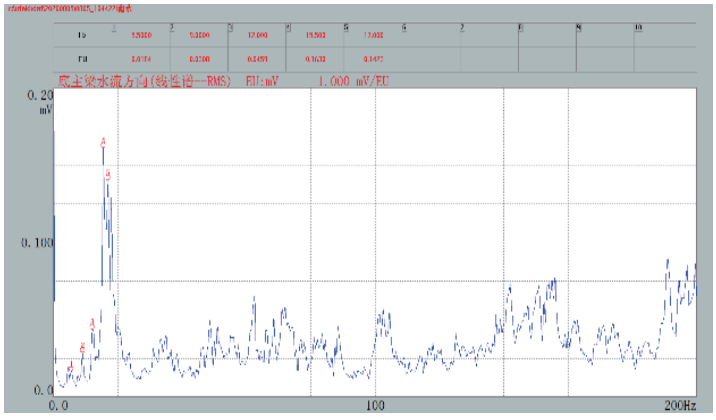


图 4　整体结构水流方向加速度线性谱图

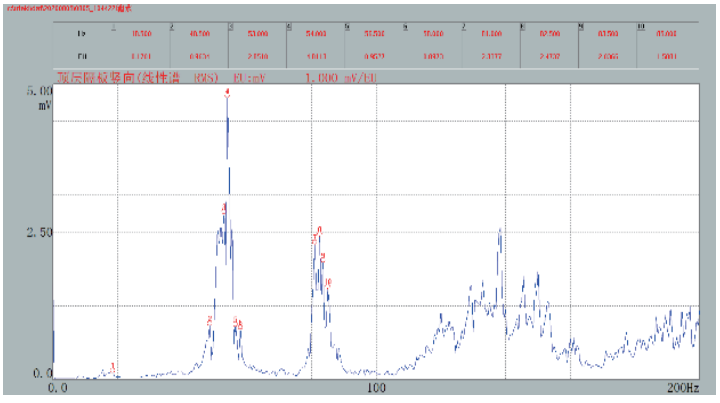


图 5　局部结构水流方向加速度线性谱图

根据各测点线性谱能量分别规律，人字门水下测点振动能量较小，一般是水上测点的 3 倍以下，水上测点谱能量随高程增加而增加，顶层最大。人字门局部构件的振动能量明显较大，一般是人字门主体结构振动能量的数倍之多。这也说明人字门在振动过程中，整体振动与局部构件振动是两个不同的概念。许多人字门振动试验表明，人字门局部构件如横隔板与面板在人字门工作时产生的振动更大甚至发出高频噪音，人字门运行管理者误认为是人字门的整体振动 [4]。本工程经试验验证了局部振动的存在，在其他工程设计中，应对局部构件进行加强，降低局部构件的振动频率。

4 门体的动应力结果分析

4.1 人字门体动应力实测结果

表 4 给出人字门门体主要部位动应变实测结果，表 5 给出不同运行工况下现场实测的人字门体动应力结果。

表 4 人字门门体主要部位动应变实测结果（单位：με）

工况 / 测点	开门过程工况		关门过程工况	
	动应变变化量	最大动应变	动应变变化量	最大动应变
顶主梁横向	2	16	8	15
顶主梁竖向	-6	11	2	10
-2 层主梁横向	9	8	2	10
-2 层主梁竖向	6	6	-5	8
底主梁横向	4	4	2	8

表 5 人字门门体主要部位动应力实测结果（单位：MPa）

工况 / 测点	开门过程工况		关门过程工况	
	动应力变化量	最大动应力	动应力变化量	最大动应力
顶梁横向	0.42	3.36	1.68	3.15
顶梁竖向	-1.26	2.31	0.42	2.10
-2 层主梁横向	1.89	1.68	0.42	2.10
-2 层主梁竖向	1.26	1.26	-1.05	1.68
底主梁横向	0.84	0.84	0.42	1.68

4.2 人字门体动应力分析

根据表 5 的试验结果，从力的分布规律看，人字门各主梁并没有出现底层水压大顶层无水压的特征，而是人字门上部应力变化大，底部应力变化小。这一现象与人字门振动加速度的分布规律相同。这说明人字门的受力变化更多与人字门的振动应力有关。由于受水下水体的阻尼作用，减小了人字门体的振动，使人字门体受力减小。

人字门在工作过程中的振动应力是人字门安全评估的一个基本参数，一般是按静力最大荷载的 1.2 ~ 1.5 倍考虑。这种处理方法误差很大。根据人字门体动力试验结果，人字门在工作时振动应力处于较低水平，动应力值在 3.15 ~ 3.36 MPa 的范围内变化，而且各种工况下最大振动应力都十分接近，可见人字门强度满足使用要求。

5 背拉杆动力特性结果分析

5.1 背拉杆试验结果

人字门背拉杆采用单层设置。其中主杆 3 根，副杆 2 根。主副背拉杆截面尺寸 A=200 mm × 40 mm。钢材特性模量 Es=2 × 105 N/mm^2。

背拉杆试验结果见表 2-6，试验是在背拉杆施加完毕后进行，因此表中数据是人字门运行过程中预应力变化值。预应力变化值 = με × Es。

表 6 人字门门体主要部位动应力实测结果（单位：MPa）

工况 / 测点	开门工况				关门工况			
	实测 με	变量 KN	实测 με	变量 KN	实测 με	变量 KN	实测 με	变量 KN
	开始		结束		开始		结束	
主杆 1	4.4	0.92	7.8	1.64	2.1	0.44	1.4	0.29
主杆 2	2.0	0.42	2.6	0.55	1.7	0.36	1.1	0.23
主杆 3	5.1	1.07	8.7	1.83	1.9	0.40	1.6	0.34
付杆 1	17.7	3.72	41.7	8.76	25.2	5.29	19.7	4.14
付杆 2	43.9	9.22	66.0	13.9	46.4	9.74	25.8	5.42

5.2 背拉杆动力特性分析

1）人字门在开门或关门工况，因为人字门与背拉杆处于门体牵连运动和相对运动状态，评价两者之间的动态关系比较困难。但是在充水和泄水工况门体和背拉杆均处于静止状态，在水流脉动压力作用下，人字门门体和背拉杆都会产生一定程度的振动，此时可以看出两者之间的关系[10]。根据试验结果，背拉杆的振动应力与人字门体加速度处于同步振动的状态，人字门振动大背拉杆振动也大，由此可见对于背拉杆施加到位的人字门，背拉杆的振动应力与人字门体的振动加速度是同步的。

2）通过背拉杆在振动过程中的动应力变化值，可以评估背拉杆预应力施加效果[11]。试验结果表明，在泄水或充水工况，主背拉杆的振动明显小于副杆。因为各根背拉杆尺寸相同，背拉杆内预应力越大背拉杆的刚度就大，在相同的激振力作用下刚度大的背拉杆振动就小。可见副杆内施加的预应力小于主杆内的预应力。根据背拉杆施加原理，首先施加主背拉杆，然后调整副杆。施加预应力的目标就是主背拉杆预应力要大于副杆预应力。

3）根据实测背拉杆预应力变化值可见，在开门或关门工况，主杆和副杆预应力变化值都比较大。显然人字门工作过程中，背拉杆预应力变化量远远小于实际施加于背拉杆内的预应力值，也就是说背拉杆在工作过程中始终都是处于正拉应力状态，背拉杆不会产生稳定性问题。

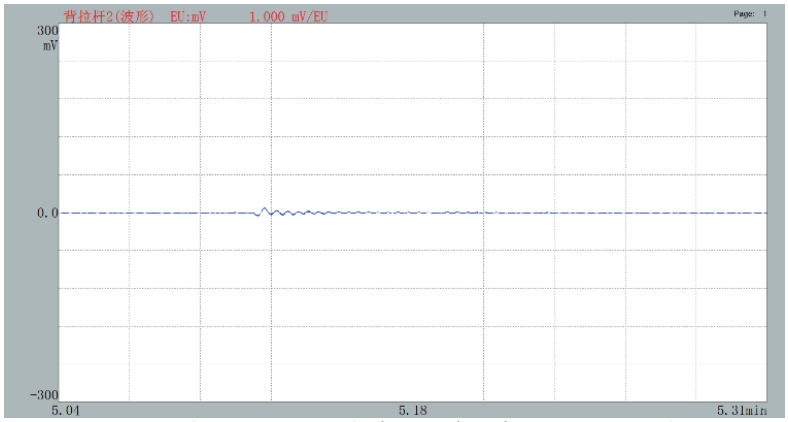


图 6 关门工况门全关瞬间主背拉杆典型时程曲线

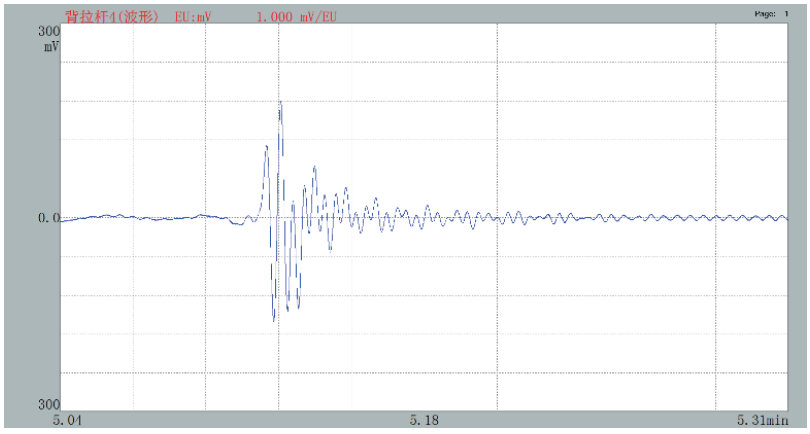


图 7 关门工况门全关瞬间付背拉杆典型时程曲线

4）根据预应力变量实测值和背拉杆时程曲线可见，人字门在运行过程中，正常运行时主付背拉杆预应力都在较小的范围内振动变化[12]。同时在人字门开门或关门工况门体启动或结束瞬间，背拉杆主杆预应力值变化也不大，但是需要注意在开门和闭门启动瞬间，背拉杆付杆内预应力变化较大甚至超过背拉杆设计施加值，图 6 和图 7 分别给出关门工况关闭瞬间主背拉杆和付背拉杆的时程曲线的对比图，从图可以清楚看见，人字门运行过程中的接触瞬间，付背拉杆的振动烈度远大于主背拉杆的振动烈度。背拉杆振动过大对保持背拉杆内预应

力值是非常不利的，因此建议，在人字门强度以及门体变形满足要求的前提下，背拉杆主、付杆内施加的预应力值应该越大越好。同时设计时应该设法提高背拉杆的刚度，如缩短背拉杆长度或增大背拉杆截面尺寸，目的也是减小背拉杆在工作过程中的振动。

6 结 论

1）人字门动力试验以振动现场测试为依据，对人字门安全、人字门设计等具有真正意义上的分析研究。特别是对人字门体、背拉杆的工作性能评价更直接、更清晰、更准确、更全面。人字门动态试验可以较好了解人字门运行过程中，人字门体振动规律与背拉杆之间的关系，为后期人字门的设计、制造、安装提供可借鉴的数值依据，为人字门后期运行管理提供参考依据。

2）人字门振动属于中等强烈度，对人字门结构不会产生明显影响。开门和关门工况在启门和门体到位瞬间两个时间点，人字门振动都是最大的，因此确保人字门长期安全运行，需要控制人字门在这两个瞬间的振动足够小。船闸闸室廊道内充水和泄水工况，人字门产生的振动主要来自廊道内脉动水流压力。充水和泄水工况，人字门振动属于较小振动，振动对人字门主体结构的没有影响。

3）人字门振动与背拉杆振动保持同步，证明背拉杆预应力基本施加到位；人字门工作时背拉杆预应力值始终保持受拉力状态，确保背拉杆的正常工作。根据试验结果，建议人字门工作时在满足门体强度和变形的前提下，应该选择更大的预应力施加值。

参考文献

[1] 张斌，郑中义，峰宝明等 . 复杂水域船舶交通组织研究综述 [J]. 科学技术与工程 ,2022,22(27):11774-11782.
[2] 何进朝, 周昔东, 母德伟等 . 三峡出闸船舶航速分布规律与预测应用 [J]. 科学技术与工程 ,2021,21(11):4682-4687.
[3] 叶雅思 , 周钦 , 曾又林等 . 大源渡二线船闸人字门静动力数值计算 [J]. 水运工程 ,2019,553(03):116-120.
[4] 尹斌勇 , 刘虎英 , 张虎 . 湘江长沙综合枢纽船闸人字门背拉杆设计与调试 [J]. 湖南交通科技 ,2015,41(04):135-138.
[5] 何文娟，宋一乐，汤长书，等 . 三峡永久船闸人字门背拉杆预应力施工工艺研究 [J]，人民长江，2004，35(1):35-37.
[6] 秦网根 , 方海东 , 江守燕等 . 船闸人字门日常运行状态监测技术研究 [J]. 水运工程 ,2014,(06):108-111
[7] 刘骞 . 船闸人字门应变数据分析方法研究 [D]. 大连海事大学 ,2019.
[8] 顾磊 , 管义兵 , 胡友安 . 超高人字门结构研究 . 水利水电技术 [J].2020,51(S1):60-64.
[9] 黄树华 , 温洁明 . 西津二线船闸人字门背拉杆预应力调试与校核 [J] 装备制造技术 .2023.352(04):177-180.
[10] 王政平 , 李晓旭 . 大藤峡水利枢纽人字闸门背拉杆预应力优化分析 [J] 水运工程 ,2020,51(04):164-167.
[11] 孙保虎，黄亚栋，徐洪强 . 基于 Ansys 的大型船闸人字门背拉杆预应力设计 [J]，水运工程，2018,549(12):143-146.
[12] 邢述炳 . 人字闸门背拉杆预应力优化方法研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版),2017,41(4):656-661.

作者简介：
刘永胜，硕士，高级工程师，研究方向：船闸及航道设计，（E-mail）13974836625@163.com

大跨度网架钢结构施工监测控制关键技术研究与应用

刘新民[1]　丁　杰[2]

（1. 湖南省城陵矶港口集团有限公司，湖南岳阳　414000；
2. 湖南省城陵矶港口集团有限公司，湖南长沙　414000）

摘 要：随着钢结构技术的不断发展，大跨度钢结构在大型公共设施中的应用日趋广泛，类似结构对施工安全及构件安装精度的要求越来越高，催生出对大跨度钢结构施工过程监测相关要求。本文应用无线远程振弦式应变计及无线远程静力水准仪，建立岳阳城陵矶智慧港口散货封闭料场结构监测系统，完成对散货封闭料场全施工过程的变形和应力监测，探讨大跨度钢结构监测系统预警级别与监测测点布置的原则，该监测系统应用结果表明该施工监测控制关键技术能满足钢结构施工过程安全预警的需求。

关键词：钢结构；施工监测；应用

0　引　言

钢结构因其灵活性、环保性、抗震性与承重能力强、工业化程度高等特点，可用于各种类型的建筑，尤其在体育馆、会展中心、料棚、桥梁、飞机场及高铁站候机楼等大型的民用或公用住所中得到广泛应用。大跨度钢结构施工面临诸多挑战：1. 缺乏科学与精细化的有限元分析和符合建筑要求的数据分析来指导施工；2. 吊装过程中的结构稳定性问题；3. 施工全过程的安全监测问题。本文以岳阳城陵矶智慧港口散货封闭料场结构监测系统为例，探讨对大跨度钢架结构施工过程的监测要点，为钢结构监测控制关键技术在建筑工程中的推广应用提供技术支撑。

1　工程概况及施工工序

1.1　工程概况

岳阳城陵矶港环保提质改造项目散货封闭料棚为钢网架结构，外形为半“胶囊”形状，长 470 m、宽 110 m，高 46.5 m，网壳杆件数量达 33 456 件、螺栓球为 8 490 件、焊接球为 40 件，总建筑面积 50 214 m^2，静态堆存能力 38 万 t，综合抗震设防烈度等级 7 度，使用年限 50 年。建成后现场如图 1 所示：

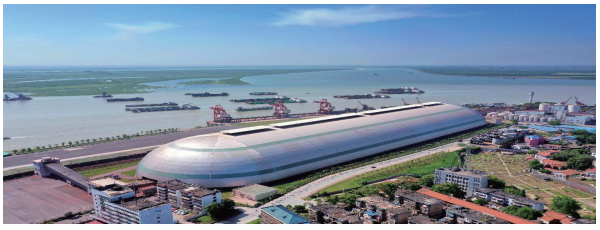


图 1　城陵矶港改造后空中俯视图

1.2 施工工序

针对本项目实际情况及其特点，采用“分块吊装法结合高空散装法”施工方法，其主要施工顺序如下：

（1）直线段 470 m 共分 46 轴，选择 9~11 轴和 32~34 轴作为起步基准跨进行网架起步架安装，起步基准跨宽度 16 m；

（2）起步网架安装就位后，采取高空散装的安装方法向起步基准跨两侧安装网架；

（3）依次类推，逐步安装，直到钢网架安装完成；

（4）钢网架累计完成约 1/3 宽度后，开始进行檩条安装；

（5）檩条安装累计完成约 1/3 面积后，开始进行屋面板安装施工。

2 施工监测系统

2.1 施工监测概况及目的

施工监测控制利用 BIM、智能感知、大数据分析等技术，搭建监测控制系统，其系统包括采集仪、分析仪、云平台、客户端四部分，采集仪负责传感器数据采样并上传采样数据；分析仪负责多采集仪组网、数据中转、预警、上传数据到云平台；云平台负责数据在服务器存储、显示、预警、数据分析等功能；客户端主要实现云平台上的数据显示和监测系统的远程配置。

系统主要监测内容包括模板沉降、整体位移、顶杆失稳、扣件失效，支撑体系倾斜，承压过大等。系统采用无线自动组网、高频连续采样，实时数据分析及现场声光报警。在施工监测过程中，秒级响应危险情况，提醒作业人员在紧急时刻撤离危险区域，并自动触发多种报警通知，及时将现场情况告知监管人员。

预警级别的确定是结合现场监测数据信息，通过核查、综合分析和专家咨询等，判定工程风险大小，确定相应预警级别，并对关键参数进行时时预警。

预警级别按工程风险由大到小分为四级：红色预警、橙色预警、黄色预警、蓝色预警。

一级预警：当日监测数据达到监测预警要求，且无有效措施，综合判断为不可接受风险，工程处在抢险状态。

二级预警：当日监测数据达到监测预警要求，且周边环境复杂，综合判断为不愿接受风险，工程处在不安全状态，现场须立即采取措施。

三级预警：当日监测数据达到监测预警要求，综合判断为可接受风险，现场须采取防范措施。

四级预警：当日监测数据达到监测预警要求，综合判断为可接受风险，现场无须采取防范措施，但需提高警惕。

监测控制系统通过与生产管理系统、视频监控系统进行数据互联互通，利用数字孪生技术，构建三维可视化虚拟实景，实时展示码头作业状态和钢网架稳定状态。

2.2 监测布点原则

监测点的布设不能影响施工，还要考虑稳定、可靠、不易被破坏，且基本上能控制整个结构物可能的变形，因此，监测点只能在钢网架基本形成、檩条安装完成约一半、屋面板完成约 1/3 面积时开始安装。

由于散货封闭料场附近无稳定结构物，基准站单独立墩布设，根据现场地形条件，选择在远离结构物的稳定区域，若地形无法满足条件，选择在相对稳定的区域，并在散货封闭料场附近布设高程控制网进行定期校准。同时根据《工程测量规范》GB50026-2007, 为保证监测数据的准确性，结合监测所使用的设备以及现场的环境，对港口现场进行布设高程监测网。通过数据的采集、传输、处理、反馈及预警等进行实时监测。监测数据实时传输并显示在城陵矶港生产调度控制中心，从而保证突然性的变形能及时得到响应与处理。

2.3 监测内容及方法

为了有效地掌握钢结构物的稳定性状况，确保施工期和运营期的稳定生、安全性。对钢网架进行结构应变

监测、对立柱和桩基础进行沉降监测，监测方式为自动化监测。根据散货封闭料场监测测点布置图，在钢网架布设 3 个断面，第 1、3 段面布设 1 个静力水准仪测点，第 2 断面布设 2 个静力水准仪测点，2 个基准点，布置在结构两侧。布置点位如图 2 所示。

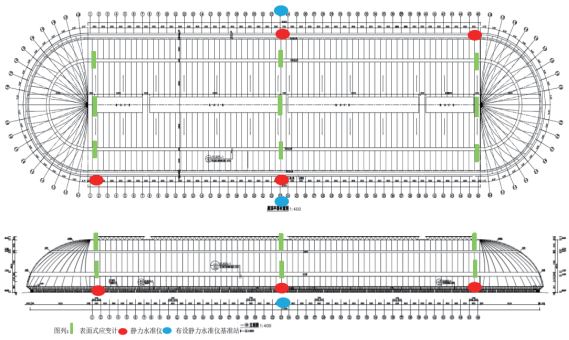


图 2　监测测点布置图

根据散货封闭料场监测测点布置图，在钢网架布设 3 个断面，每段面布设 3 个应变计，共计 9 个应变计。具体监测内容见下表 1：

表 1　监测内容及数量一览表

监测内容	监测设备	数量	位置
结构应变	表面式应变计	9	布置在钢网架两侧中上部及顶部各 3 个，共 9 个，监测点编号 YB01 ∽ YB09
基础沉降	静力水准仪	6	布置在结构物周边，4 个沉降测点、2 个基准点

3　结构监测要求和结果

3.1　结构监测要求

根据城陵矶智慧港口散货封闭料场结构项目设计和施工特点，提出对以下结构及构件监测。

管径 Φ140 mm（含）以上杆件和螺栓球是钢网架结构里发挥关键性作用的主受力构件，管径 Φ140 mm 以下杆件作为次受力杆件，三者共同构成了钢网架完整结构体系。所涉及主受力构件和非主受力杆件在施工期和运营期均应进行应力、应变和位移监测。钢网架无论是外部形状还是受力情况均十分复杂，钢网架各组成部分均通过电脑建模由工厂定制、现场拼接，杆件、螺栓球以及焊接球生产工艺较为复杂、高空作业施工难度大，因此，开展施工与运营期的结构应力、应变和位移监测是非常必要的。主受力构件和螺栓球需要承担更大的受力，获得其位移、应变等基础监测数据尤为重要。

3.2　数据分析

（1）沉降监测：共布设 4 个沉降监测点位，2 个沉降基准站，在 2020 年 3 月 02 日至 2021 年 9 月 23 日期间，各基础沉降监测点的累积沉降 - 时间曲线见如图 3—图 4：



图 3　东侧 E-SZ01、E-SZ02 监测点累计沉降 – 时间曲线图　图 4　W-SZ01、W-SZ02 监测点累计沉降 – 时间曲线图

分析图 3—图 4 各静力水准仪监测点累积沉降—时间曲线可知：

①监测期内所有沉降监测点未见明显的变形特征及趋势。

②数据局部时间段波动较大，可能由于气温变化引起的水管热胀冷缩造成数据波动。此波动情况不影响对各监测点的变形趋势的判断。

（2）应变监测：根据《钢结构设计标准》GB 50017-2017 确定钢材的强度设计值的 80%、70%、60%、50% 微应变设置四级预警，由规范可查到该大棚材料的强度设计值，通过公式转换：应变 = 应力 / 弹性模量，Φ140 以下管径杆件材质为 Q235B，对应四级预警计算微应变分别为 ±835με、±731με、±626με、±522με；Φ140 以上管径杆件材质为 Q355B，对应应变分别为 ±1184με、±1036με、±888με、±740με。本项目共布设 9 个应变监测点位，在 2020 年 03 月 02 日至 2021 年 09 月 23 日期间，选东侧、顶部、西侧 3 个代表性的应变监测点的曲线图如下图 5—图 7：

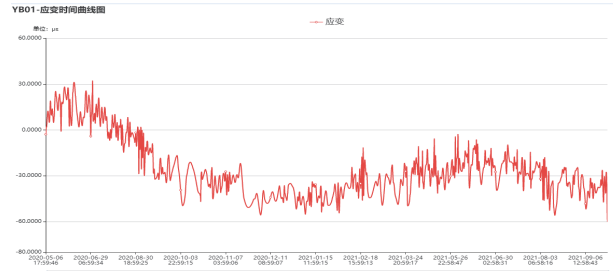


图 5　东侧中部应变 YB01 曲线图

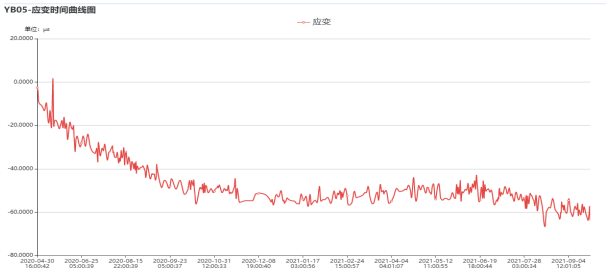


图 6　顶部应变 YB05 曲线图

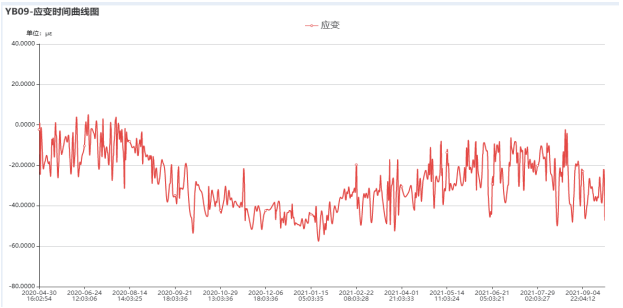


图 7　西侧中部应变 YB07–YB09 曲线



图 8　各应变监测点在 2021 年 9 月 23 日的应变值

分析图 5 ~ 图 8 各应变监测点曲线图和应变值可知：

①监测服务期内所有应变监测点均未超标、也未见明显的变形特征及趋势。

②数据局部时间段波动，判断为由于外界风吹、温度变化造成数据波动，此波动情况不影响对各监测点的变形趋势的判断。

3.3　监测结果

（1）监测周期内所有沉降监测、应变监测数据变化小，曲线平缓，未见明显的变形特征及趋势，结构物整体处于稳定状态。

（2）岳阳城陵矶智慧港口散货封闭料场结构监测系统的应用，能够精准、实时地了解建筑的内力改变与受力情况，所得数据可以为施工提供重要的指导依据。

4　钢结构施工监测控制关键技术研究结论与应用展望

4.1　研究结论

（1）岳阳城陵矶智慧港口散货封闭料场结构项目于 2020 年 3 月建成，使用至今约四年多时间，特别是在长江洞庭湖口历经 2024 年年初百年一遇冰雪灾害险情，周边树枝压断，钢网架大棚覆盖约 20 cm 冰 +40 cm 雪未出现任何影响。本文以该项目为背景，以无线传感网络为基础进行的大跨度钢网架施工监测控制关键技术，

对钢结构各构件应力、温度、位移和沉降变化情况进行了长期实测，结果最后得到的分析结论可以认为，该施工监测控制关键技术能很好满足钢结构施工过程安全预警的需求。

（2）开展相关钢结构的施工监测工作时，最主要的是控制钢结构的变形应力，基于施工环境、温度、构件安装工艺等多方面的因素来建立多系统集成的云物联平台构建技术、智能化的物联网设备状态感知技术和多参数的综合预警及分析模型的无线传感监测控制关键技术，可一定程度上克服钢结构施工的技术难题。

4.2 应用展望

钢结构施工监测控制关键技术在未来仍有较高的研究价值，可以概括为下面几点：

（1）随着技术的发展，监测工作不断地进行深入化与精细化，所以需要设置更多的测试点位，因此必须得研发更精确与符合实际应用的监测系统与网络。

（2）基于施工过程中应力的复杂多变性，施工控制是监测的主要目的，以监测数据作为施工过程的预警依据，改善无线传感器网络，从而实现高频采集、多点及多通道同步采集。再者，提高测点数据的样本存储容量，以获得准确的时程曲线，从而保证施工的安全顺利进行，是施工监测控制关键技术急需解决的问题。

（3）对于结构的健康监测，先进、精确、方便耐用的测试仪器和手段是前提，开发具有高精度、智能化的测试仪器和方法是一个需要继续深入研究的课题。

（4）无线传感技术是世界的十大新兴尖端技术，如何在国内外的研究热潮中分“一杯羹”，将其成功应用到土木工程领域是一个人们话题。当前，伴随其来的能耗、组网、成本等问题是需要进行深入的研究。预警技术通常在军事、经济、社会自然灾害等领域应用研究较多，但是作为影响国计民生的土木建筑领域研究还较少，如何根据实测数据对结构施工过程的安全度分析评估、如何能够快速实时的跟踪预测结构的安全情况、如何根据预警技术来调整结构的施工方法、如何进一步找出更加成熟的预警理论等都是钢结构施工测控技术亟待克服的难题。

（5）钢结构施工监测控制关键技术研究对施工过程中可能存在的薄弱环节及重点控制部位有充分的了解及预见，指导施工，确保施工的可靠性与安全性。

参考文献

[1] 方龚 . 大体积钢结构整体提升监测控制方法研究福建建设科技 [J]. 2020,(06)72-76.

[2] 廖晓坤 . 大跨度钢桁架屋盖节点加固的施工控制与监测 [J]. 安徽建筑大学学报 .2020,28(01)25-32+40.

[3] 张猛万策 . 大跨度结构施工阶段变形监测软件系统分析 [J]. 建材与装饰 .2019,(20)295-296.

[4] 石韵等 . 基于 BIM 技术的结构健康监测管理系统设计与应用 [J]. 建筑钢结构进展 . 2019,(02)107-114.

[5] 乔茂伟 . 钢结构应力及变形自动监测系统设计及应用 [J]. 土木建筑工程信息技术 . 2018,10(01)98-104.

作者简介：

刘新民，高级工程师，本科，湖南省港务集团党委委员、副总经理，QQ450694230，19976956702

岩质高陡边坡动态支护设计在船闸改扩建工程中的应用

凌　威　李芃芃　王　能

（湖南省交通规划勘察设计院有限公司，湖南长沙　410200）

摘　要：本文以湖南省在建的洪江枢纽船闸改扩建工程为依托，在边坡开挖过程中实时判断地质条件，结合边坡稳定性计算、边坡位移监测数据分析，对设计支护方案进行优化调整，从而实现高陡边坡动态支护设计。针对岩质高陡边坡的三类典型破坏模式所提出的动态支护策略可为今后类似工程建设提供参考。

关键词：高陡边坡；动态设计；边坡支护；船闸工程

0　引　言

随着水运建设事业持续发展，航道级别、通航建筑物等级不断提升，原有通航建筑物已无法满足现有船舶的通航需求，须对原有通航建筑物进行改、扩建。由于山区地形地貌及原枢纽布置的影响，船闸改扩建工程的施工场地受到严格制约，深基坑、高边坡的开挖及支护，已成为目前船闸改扩建工程中必须面对的难题。

工程地质勘察工作具有阶段性，应贯穿整个工程建设周期。当已建工程周边环境及地质条件复杂时，地质勘察工作以控制主要地质问题为目的，其岩土特性是在数量有限的试验成果基础上所了解的静态特性，工程施工后可能出现新的变化。边坡是自然条件与人类活动相结合的产物，施工程序、方法、工艺、质量对边坡的稳定性有重要影响。船闸改扩建工程实施过程中，应充分掌握已建工程基本情况、重点分析工程建设对已建工程和周边环境的影响。因此边坡工程设计和施工应结合历史调查、地质预测预报、地质编录和监测分析反馈资料，调整边坡稳定分析参数，实现边坡工程全过程动态设计[1]。

本文以湖南省在建的洪江枢纽船闸改扩建工程为依托，根据工程实施过程中的边坡开挖情况实时判断地质条件，结合边坡稳定性计算、边坡位移监测数据分析，对设计方案进行优化调整，从而实现高陡边坡动态支护设计。

1　工程概况

1.1　工程简介

洪江枢纽船闸改扩建工程是湖南省“十四五”水运建设重点项目之一，该工程按 1 000 吨级标准改扩建洪江枢纽现有单线二级 300 吨级船闸。

已建洪江枢纽位于顺直微弯河道，两岸山体雄厚。从左至右依次布置左岸重力坝、电站、泄水闸、单线二级船闸、右岸重力坝（如图 1 所示）。电站左岸紧接连片高山，山体内布置有坝体灌浆廊道，左岸公路隧洞与坝顶公路桥连接，左岸基本无建设二线船闸位置。右岸第一级船闸左右两侧分别与泄水闸及右岸重力坝坝相连。船闸右侧为枢纽管理区及洪黔公路，洪黔公路内侧边线至现有船闸最小距离约为 15 m，右岸为嵩云山国家森

林公园，基本为岩质山体。因此右岸基本无新建二线船闸空间，且施工场地十分狭窄。



图 1　已建洪江枢纽下游侧航拍图

经综合比选，洪江枢纽船闸改扩建工程总平面布置方案 [2] 为（如图 2 所示）：

利用原船闸上闸首、一闸室和中闸首作为上游通航明渠，拆除二闸室、下闸首等原结构后，在原闸址新建一座单级船闸。将原上闸首口门宽度由 12 m 拓宽至 16 m、一闸室口门宽度由 16 m 渐扩至 23 m、中闸首口门宽度由 12 m 拓宽至 23 m，加固并改造原上游主辅导航墙、上闸首、一闸室、中闸首及右岸重力坝。船闸上、下游引航道均采用曲进不完全直出进出闸方式，引航道停泊段布置于岸侧，停泊段与导航调顺段均呈折线型布置。

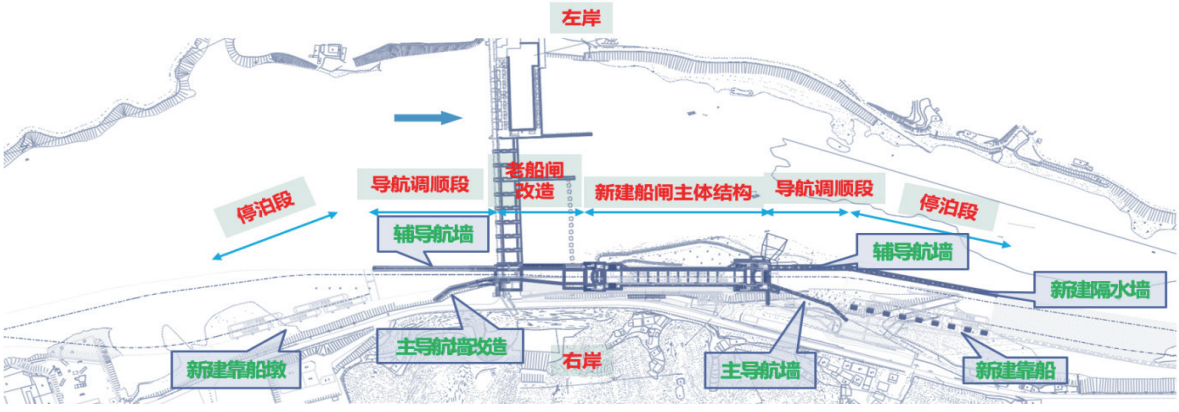


图 2　洪江枢纽船闸改扩建工程总平面布置示意图

1.2　边坡开挖方案

本工程主体基坑开挖方案根据船闸主体结构设计断面和地质勘察成果 [3] 综合确定，根据边坡平面位置及开挖断面的不同，将主体基坑划分为 7 块，如图 3 所示。

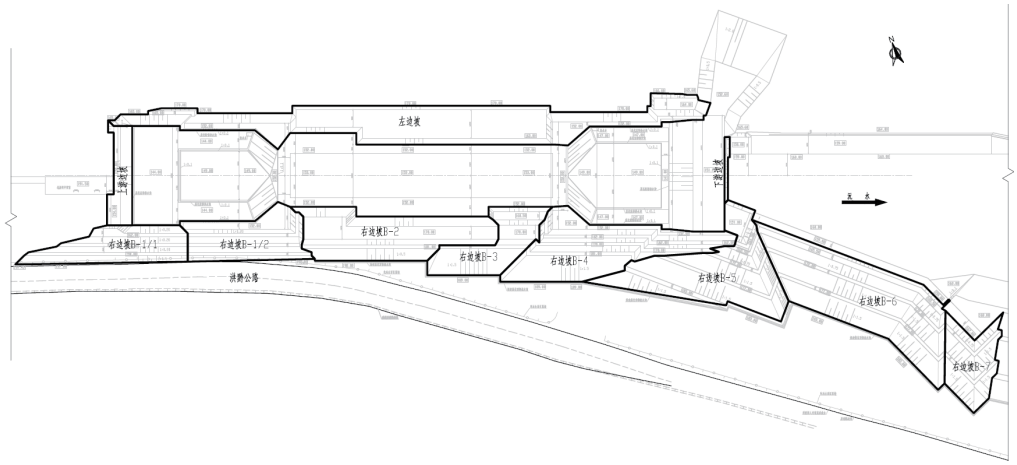


图 3　工程主体基坑边坡开挖分块示意图

其中，上游边坡为新建船闸上闸首靠上游侧边坡，坡面倾向下游，坡高 10.8 m，开挖坡比 1：0.5，上部为原船闸中闸首结构。右边坡 B-1/1 为新建上闸首岸侧边坡，右边坡 B-1/2 为新建闸室第 1、2 号结构段岸侧边坡，右边坡 B-2 为新建闸室第 3—8 号结构段岸侧边坡。右边坡 B-1/1、B-1/2 及 B-2 紧邻洪黔公路，施工场地受限，最大坡高约 53m，开挖坡比为 1：0.1~1：0.5，为典型岩质高陡边坡。洪黔公路为国防公路，且为连通洪江区与洪江市的唯一通道，若边坡失稳将对公众安全和公共利益造成重大影响。因此上游边坡、右边坡 B-1/1、B-1/2 及 B-2 为本工程重点防护对象。根据《水电工程边坡设计规范》（NB/T 10512-2021），确定边坡类别和级别为 A 类 II 级。

1.3 地层岩性及构造

根据工程前期地质勘察及收集的已有资料，洪江枢纽船闸改扩建工程各区域岩层分布情况如表 1 所示。

表 1 船闸各区域岩层分布表

序号	区域	主要岩性及说明
1	上游主、辅导航墙	砂质板岩：灰绿色、黄绿色，薄～中厚层状，板状构造，间夹薄层浅灰色砂岩、板岩，局部发育层间剪切带，岩体较破碎～较完整。按风化程度差异可分为强、中风化。
2	上闸首	板岩：灰绿色、蓝灰色，中厚层～巨厚层夹薄层状，板状构造，属较软岩～较硬岩。按风化程度差异可分为强、中风化。
3	闸室	
4	下闸首	板岩：灰绿色、蓝灰色，中厚层～巨厚层夹薄层状，板状构造，属较软岩～较硬岩。按风化程度差异可分为强、中风化。 石英砂岩：灰色、浅灰色，硅质胶结，中厚层状构造，属较硬岩～坚硬岩，岩体完整。按风化程度差异可分为强、中风化。
5	下游主、辅导航墙	板岩：灰绿色、蓝灰色，中厚层～巨厚层夹薄层状，板状构造，属较软岩～较硬岩。按风化程度差异可分为强、中风化。 石英砂岩：灰色、浅灰色，硅质胶结，中厚层状构造，岩质坚硬，属较硬岩～坚硬岩，岩体完整。按风化程度差异可分为强、中风化。 炭质板岩：黑色，板状构造，薄层状～中厚层状，岩质软，岩体较破碎。 冰碛砾岩：灰黑色、暗绿色，砾状结构，块状构造，砾石母岩成分主要为板岩、砂岩，粒径一般 5 ~ 20mm，含量约 10-20%，属较硬岩。按风化程度差异可分为强、中风化。
6	下游靠船墩、隔水墙及引航道	冰碛砾岩：灰黑色、暗绿色，砾状结构，块状构造，砾石母岩成分主要为板岩、砂岩，粒径一般 5 ~ 20mm，含量约 10-20%，属较硬岩。按风化程度差异可分为强、中风化。

拟建工程位于肖家田背斜南东翼，为单斜构造，局部发育次级褶皱。分布地层古老，历经多次构造运动，岩层扭曲，产状多变、断层、层间剪切带较为发育，构造形迹走向以 NE15° ~ 25° 为主，各岩性单元层岩层产状总体为：90° ~ 120° ∠ 20° ~ 25°，局部岩层扭曲，倾角变陡为 35° ~ 64°。各部位岩层产状汇总见表 2。

表 2 船闸各部位岩层产状分布表

产状	部位					
	库区上游	上闸首	闸室上半段	闸室下半段	下闸首	下游
倾向（°）	116	90	90	107	107~145	111
倾角（°）	26	50	50	25	25~43	25

根据收集的洪江枢纽工程地质资料，船闸区域主要分布两条断层 F1、F2，如图 4 所示。其中断层 F1 产状走向 N76°W，15° ∠ 80° 为张扭性平移正断层，断层面平直，该断层与船闸轴线以小角度（小于 10°）相交，从已建大坝上游开始，经拟建船闸上闸首延伸至闸室上半段，在拟建船闸区域延伸长度约为 63 m。断层 F2 产状走向 N21°E，SE110°~120° ∠ 70°~80°，为压扭性逆断层，断层面平直，该断层沿右岸山坡冲沟向河床延伸发育，与坝轴线小角度相交，延伸至河床后消失。与船闸轴线呈 80° 交角斜交，距离拟建船闸上闸首约 92 m。

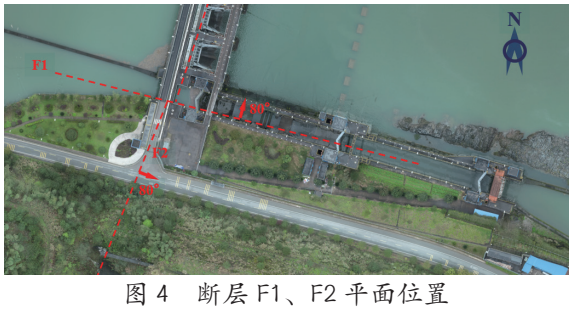


图 4 断层 F1、F2 平面位置

此外，通过地勘探明工程区主要发育的节理面有 7 组，各组节理面均较平直、光滑，呈半闭合～闭合状，多为砂泥质及岩屑成分充填。

2 动态设计支护方案

2.1 边坡破坏模式分析

根据地勘成果及边坡开挖方案，初步分析船闸主体基坑边坡破坏模式有以下几类：

同向顺层边坡：主要分布于船闸上闸首上游侧，边坡岩层倾向坡外，为顺向坡，坡体结构为层状同向结构，边坡失稳模式为沿层面或软弱夹层面的平面滑动，且边坡位于河水位标高以下，层间面连通性强，在地下水的影响下，软化、润滑于层面，岩体抗剪强度急剧减弱，岩体容易沿层面发生顺层滑移。

逆向边坡及横向斜交坡：主要分布于船闸河侧、岸侧及下游侧，岩体整体稳定性较好，存在外倾结构面和组合结构面切割岩体形成的“楔形体”。主要破坏模式为沿外倾结构面发生掉块、崩塌及“楔形体”滑动，“楔形体”滑动面为组合结构面交棱线。

土石质边坡：上部土层赋存孔隙水，孔隙水补给后的下渗，对土体进行浸润、软化，降低了岩土体的力学强度，可能软化岩土分界面附近的黏性土，在自重、降雨和其他因素影响下，上覆第四系土体可能发生土层内部的圆弧滑动或沿岩土分界面的平面滑动。

2.2 动态设计原则

本工程主体基坑边坡破坏模式主要为顺层滑动、“楔形体”滑动及土体滑动三大类。其中顺层滑动产生原因为坡体岩层面与坡面同向，在工程实施前便可判断其主要发生在上游边坡；“楔形体”滑动是由外倾结构面和组合结构面切割岩体形成，而本区域岩体年代久远，经历长期地质运动影响，其节理面发育强烈，且分布具有很强的随机性，边坡开挖前难以准确判断各组结构面的具体分布位置，此外，随基坑深度增加，向下延伸的节理面数量减少。因此对于以“楔形体”滑动为主要破坏形式的边坡，若支护措施选取不合理，则坡体的稳定性难以保证，若对所有坡面均采取强支护措施，又不符合工程建设的经济性原则。

对此，本工程采取了动态设计原则：边坡开挖过程中，每开挖 3~5 m，设计单位对边坡地质情况进行判断，并结合已有地勘成果、现场地质条件、边坡安全监测数据等进行必要的稳定性验算，针对各边坡的破坏模式采取适当的支护措施。待支护完成、坡体稳定后再继续下一级边坡开挖。

2.3 动态支护方案

2.3.1 上游边坡

如前文所述，上游边坡为已知的顺向坡，由于该边坡顶部受原船闸中闸首压载，随着基坑向下开挖，中闸首基岩体应力不断释放，坡体层面完全临空后易沿层面发生顺层滑移，存在整体失稳风险，为本工程重点防护对象。设计方案拟对上游边坡采取预应力锚索 + 框格梁的支护措施，预应力锚索框格梁体系通过锚索的预应力将滑动体与稳定的基岩连接为一体，同时又通过坡面上的框格梁将各个锚索有效地连成一个整体，形成一个由表及里的被覆式加固体系，从而达到防止边坡整体失稳的目的 [4]，如图 5 所示。

预应力锚索拟采用集中拉力型，单根长 12 m，设计锚固力 800 kN，按矩形布置，水平间距 3.5 m，排距 3 m，锚索倾角 10° 。框格梁以锚索为节点布置纵横梁，框格梁截面尺寸为 500 × 500 mm。此外，对全坡面采用挂网喷射砼防护，以防止坡面碎石掉落。

根据地勘成果，中风化岩重度取 27.5 kN/m³；存在最不利层面的倾角为 50° ，中风化岩层面内摩擦角 ϕ=32° ，黏聚力 c=100 kPa。荷载考虑自重及坡顶原中闸首压载，并根据地勘报告地下水位线假定整个滑动面充满裂隙水，作用力垂直于滑动面。

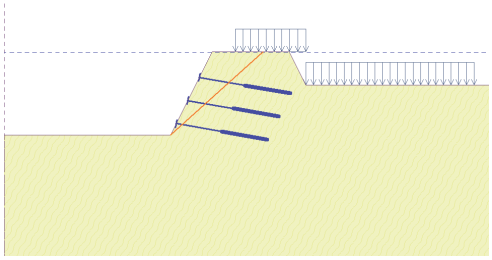


图 5　上游边坡稳定性分析计算模型

采用极限平衡法计算岩质边坡抗滑稳定系数。经计算，上游边坡抗滑稳定系数为 1.31，大于规范 [1] 允许值 1.25。

根据现场开挖情况，上游边坡以中风化板岩为主，出露岩层面倾向坡外，坡体结构为层状同向结构，与地勘成果相符，见图 6。



图 6　上游边坡开挖面及支护完成情况

2.3.2　右边坡 B−1/1、B−1−/2

右边坡 B-1/1 和 B-1-/2 的破坏形式以“楔形体”破坏为主，但边坡开挖前无法确定结构面的具体分布位置，考虑到边坡的重要性，设计方案对右边坡 B-1/1 和 B-1/2 拟采取预应力锚索 + 框格梁的支护措施，如图 7 所示。其中右边坡 B-1/1 采用设计锚固力 900 kN 的集中拉力型预应力锚索，右边坡 B-1/2 采用设计锚固力 800 kN 集中拉力型预应力锚索，锚索单根长 12~18m，按矩形布置，水平间距 3.5 m，排距 2.0~3.0 m，锚索倾角 10° 。框格梁以锚索为节点布置纵横梁，框格梁截面尺寸为 500 × 500 mm，设置坡面排水管用于降低坡体渗透压力。

中风化岩参数同上游边坡，强风化岩重度取 27.0 kN/m³，内摩擦角 ϕ=20° ，黏聚力 c=25 kPa；存在最不利节理面的倾角为 63° ，节理面内摩擦角 ϕ=26° ，黏聚力 c=80 kPa。荷载考虑山体自重、公路汽车荷载及孔隙水压力。

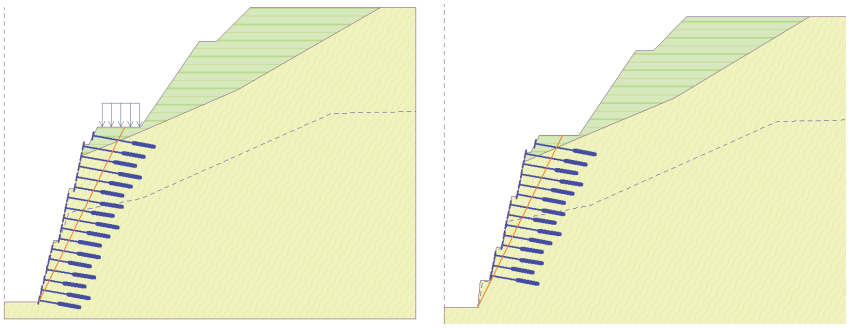


图 7　右边坡 B−1/1、B−1−/2 稳定性分析计算模型

经计算，右边坡 B-1/1、B-1-/2 抗滑稳定系数分别为 1.33、1.40，大于规范 [1] 允许值 1.25。

根据现场开挖情况，右边坡 B-1/1、B-1/2 开挖面以强、中风化板岩为主，强、中风化岩分界面与地勘成果基本吻合，岩石完整性较差，岩质较硬，且均存在较密集的发育节理及断层，见图 8。



图 8　右边坡 B−1/1、B−1−/2 开挖面及支护完成情况

2.3.3　右边坡 B−2

自右边坡 B-2 起，船闸岸侧边坡与洪黔公路间距逐渐增大，洪黔公路可视作一级马道作为上部山体边坡的缓冲，因此右边坡自 B-2 往下游，边坡的危险程度相较于 B-1/1、B-1/2 逐渐降低。且闸室岸侧边墩下部为衬砌式结构，因此在 170.0 m 高程留有 5.7~10.2 m 宽的马道，同样可作为 170.0 m 高程以上边坡的缓冲段，如图 9 所示。

根据地勘钻孔成果，边坡自 170.0 m 高程往下，节理发育程度逐步降低，岩石完整性逐步提升。从工程经济型角度出发，设计方案拟对洪黔公路至 170.0 m 高程坡面采用预应力锚索框格梁体系进行支护，170.0 m 高程以下则考虑以随机锚杆 + 喷锚的表面防护为主。预应力锚索采用集中拉力型（单根长 14~16 m，设计锚固力 800 kN），按矩形布置，水平间距 5.0 m，排距 4.0 m，锚索倾角 10° 。框格梁以锚索为节点布置纵横梁，框格梁截面尺寸为 500 × 500 mm。系统锚杆采用全长黏结型锚杆，单根长 6 m，直径 28 mm，倾角 10° ，梅花形布置，排距 3 m，间距 3 m。坡面设置排水管用于降低坡体渗透压力。

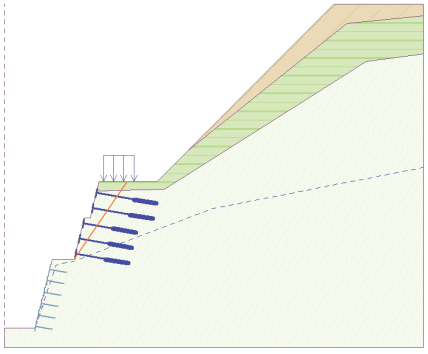


图 9　右边坡 B−2 稳定性分析计算模型

强、中风化岩及节理面参数同上，洪黔公路以上山体顶部素填土重度取 20.0kN/m³，内摩擦角 ϕ=32° ，黏聚力 c=0。经计算，右边坡 B-2 抗滑稳定系数为 1.52，大于规范 [1] 允许值 1.25。

现场开挖后发现，洪黔公路下方局部分布回填土层，回填土层以碎石为主，土质松散，分布长约 35m、高约 7 m，根据锚索钻孔情况可判断土体向坡内延伸约 10 m。由于坡顶已靠近场区围栏且紧邻洪黔公路，无退让空间，因此无法将填土层坡比放缓，见图 10。



图 10　洪黔公路下方出露回填土层

由于现场地质条件相较地勘成果发生变化，根据动态设计原则，应根据现场地质情况对设计方案进行补充计算，复核原设计方案的合理性。

按照现场岩土实际分布情况重新建立计算断面，分别计算岩体沿最不利节理面（倾角 63° ）滑动和沿岩土分界面滑动两种滑动模式下的稳定性。经计算，两种模式下边坡稳定性系数分别为 1.46、2.75，均大于规范[1]允许值 1.25。因此在洪黔公路下方存在填土的情况下，原设计支护方案仍可保证边坡稳定，如图 11 所示。

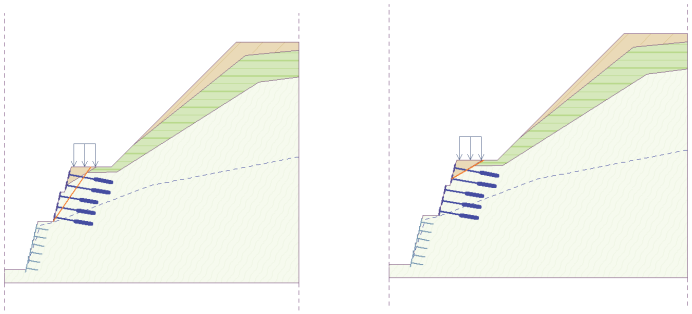


图 11　右边坡 B−2 考虑洪黔公路下方填土层后稳定性分析计算模型

右边坡 B-2 按“开挖一级支护一级”的动态设计原则完成 170.0 m 高程以上边坡的开挖及支护后，在开挖 170.0 m 以下边坡的过程中发现坡体内除存在两组明显的节理面外，其余坡面未见明显结构面。经现场勘测，两节理面产状（见图 12）分别为 355° ∠ 54° 、45° ∠ 52° ，坡顶间距约 12 m。通过赤平投影分析（如图 13 所示）可知，两结构面的组合交棱线产状为 24° ∠ 50° ，与边坡同向，且倾角缓于坡角，为不稳定的“楔形体”，对边坡稳定性不利。为避免出现岩体局部掉块从而导致大范围“牵引式”滑坡，危及坡体、坡顶建筑物和公路的安全，设计对可能出现的滑动体采取“逐一稳固、限制变形”的支护方式。。

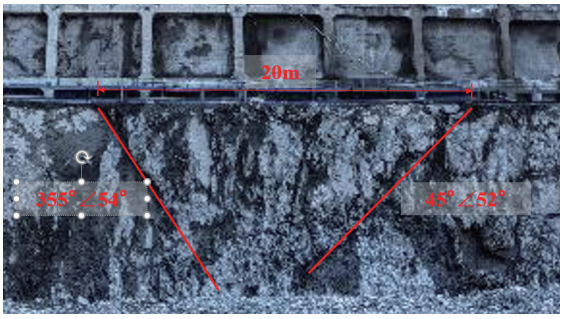
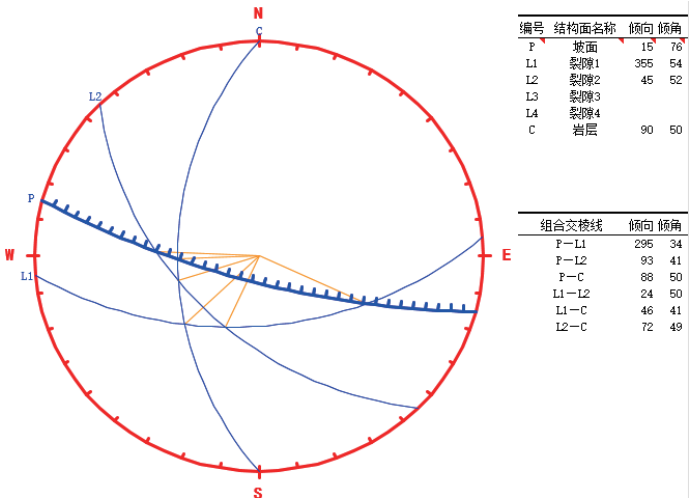


图 12　右边坡 B−2 在 170.0 m 高程马道下方出露两组节理面形成楔形体



编号	结构面名称	倾向	倾角
P	坡面	15	76
L1	裂隙1	355	54
L2	裂隙2	45	52
L3	裂隙3		
L4	裂隙4		
C	岩层	90	50

组合交棱线	倾向	倾角
P−L1	295	34
P−L2	93	41
P−C	88	50
L1−L2	24	50
L1−C	46	41
L2−C	72	49

图 13　两组结构面的赤平投影（北半球投影）

经计算，在不对“楔形体”施加主动锚固力的情况下，“楔形体”安全系数为 0.98，小于规范允许值 1.25。因此考虑在该“楔形体”区域增设锚索以提供主动锚固力。经核算，在两结构面各施加一个 1 000 kN 垂直结构面的锚固力的情况下，“楔形体”安全系数可提高至 1.42，满足规范要求。

因此，将右边坡 B-2 高程 170.0m 以下的支护进行如下动态调整：在楔形体出露区域及附近一定范围内采取预应力锚索 + 框格梁支护，锚索单根长 14m，设计锚固力 800 kN，间距 4 m，排距 3 m，锚索钻孔应尽量垂直结构面。对于其他岩面较完整的区域，则考虑采取以随机锚杆 + 喷锚的表面防护为主。

2.3.4 其余边坡

其余边坡的破坏形式主要为“楔形体”滑动。在实施过程中，对于小型“楔形体”，首先计算其稳定系数，必要时采取锚杆支护措施，以“稳脚、固坡”为原则，控制每一块区域变形的可能，从而避免大范围的“牵引式”失稳；对于中大型“楔形体”，则可参照右边坡 B-2 中的处理方式，通过现场测量结构面的产状，计算确定其抗滑所需的锚固力后，增设相应的预应力锚索 + 框格梁支护。对于本身完整性较好的岩面，大量的钻孔施工反而会破坏其自身稳定状态，在其岩体自身稳定性可满足要求的前提下，考虑采取必要的表面防护措施即可。除此之外，对于局部排水管出水量较大的区域，还应增设排水管以加大其排水能力，降低坡体内的水压力。

3　边坡支护效果分析



图 14　右边坡 B−1/1 布设的 01 号 GNSS 设备沉降位移历时曲线

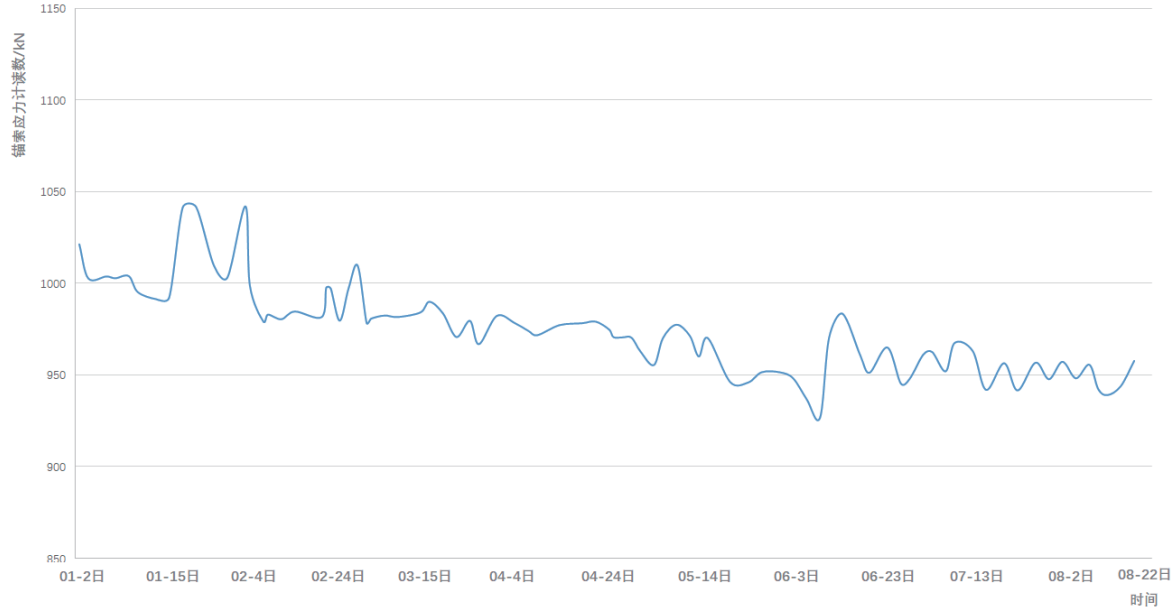


图 15　右边坡 B−1/1 布设的 02−1 号锚索应力计读数历时曲线

目前，洪江枢纽船闸改扩建工程边坡开挖及支护工程已基本完成，设计方案在重点防护的右边坡B-1/1至B-2布设3个监测断面共计8台GNSS自动位移监测仪器，实时监测边坡变形及沉降情况，在右边坡B-3至B-7布设6个监测断面，共计24个临时监测点，用于监测施工期边坡水平及沉降位移情况。此外布设了10个监测断面共计74台锚索测力计用于监测预应力锚索的应力变化情况。

图14所示为右边坡B-1/1布设的01号GNSS设备读数历时曲线，该设备安装于右边坡B-1/1高程170.0 m马道中部，可实现自动采集该测点的位移数据。图15所示为右边坡B-1/1的02-1号锚索应力计读数历时曲线，该设备安装于右边坡B-1/1的2号监测断面锚索（高程193.0 m，设计锚固力900 kN）内。

通过分析锚索应力计及边坡位移监测的数据可知，虽然锚索应力、边坡位移历时曲线的数值受施工天气及爆破振动等扰动的影响均有局部振幅，但锚索应力始终未低于设计锚固力900 kN，各测点的位移值始终未超过设计预警值20 mm，说明预应力锚索对锚固体形成了较好的锚固效果，且边坡岩体在表层及深层均未发生较大变形，边坡基本处于稳定状态。

2024年6月30日，洪江枢纽下泄流量达到9 000 m^3/s，为确保工程安全度汛，启动围堰充水口对船闸主体基坑进行了充水。随着洪峰过境，基坑排水后及时对边坡位移及锚索应力进行了读数，监测数据仍趋于稳定，整个度汛过程中未发生因边坡失稳而造成的安全事故，边坡动态支护设计成果通过了实践的考验。



图16　2024年汛期洪江枢纽船闸主体基坑充水

4　结　论

通过实现洪江枢纽船闸改扩建工程边坡开挖及支护的全过程动态设计，总结主要工程经验如下：

1）船闸改扩建工程周边环境复杂、施工限制因素繁多，为确保边坡的安全稳定，开工前应对边坡划分重点防护区域，通过分析其边坡主要破坏模式、计算边坡稳定性，初步确定边坡支（防）护形式。

2）边坡开挖实施过程中，参建各方应积极遵照“动态设计”原则，相互配合，及时根据现场情况优化边坡支护方式，有效开展边坡全生命周期健康监测，为边坡安全提供有力保障。

3）对于岩质边坡中的局部“楔形体”滑动区域，可现场测量其组合结构面产状后，计算其抗滑所需的锚固力，在该区域针对性提出支护措施，保证边坡安全稳定的同时避免资源浪费。

4）对于船闸改扩建工程中的高陡边坡而言，受施工场地限制，施工期基坑底部往往集中了大量人员设备，

边坡一旦失稳将带来无法估量的后果。“开挖一级支护一级”的动态支护原则在实施过程中虽然会造成工期的延长，但从工程建设的安全性角度来看，此原则的贯彻是十分必要的，建议在今后类似工程建设中推广。

参考文献

[1] 《水电工程边坡设计规范》（NB/T 10512-2021）[S].

[2] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司 . 沅水洪江至辰溪航道建设工程第二批施工图设计 [R]. 长沙：湖南省交通规划勘察设计院有限公司 ,2023.

[3] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司 . 沅水洪江至辰溪航道建设工程岩土勘察报告 [R]. 长沙：湖南省交通规划勘察设计院有限公司 ,2021.

[4] 彭泽权 . 高速公路预应力锚索框格梁体系施工技术 [J]. 山西建筑 ,2009,35(35):282-283.

作者简介：

凌威，湖南省交通规划勘察设计院有限公司高级工程师，主要从事港口与航道工程设计与研究工作

李芃芃，湖南省交通规划勘察设计院有限公司工程师，主要从事港口与航道工程设计与研究工作

王能，湖南省交通规划勘察设计院有限公司水运分院副总工，高级工程师，主要从事港口与航道工程设计与研究工作，（E-mail）1580437148@qq.com,13135218120

“双碳”背景下湖南省内河货运船舶发展现状及对策研究

邓　聪　熊浩奇

（湖南省交通规划勘察设计院有限公司，湖南长沙　410200）

摘 要：在“碳达峰”“碳中和”的愿景下，交通运输是重点降碳领域之一，而水路货运作为交通运输领域碳排放强度较低的方式，未来一段时间内将面临较大降碳压力。本文在阐述湖南省内河货运船舶现状的基础上，针对其进行能源消费和碳排放强度研究分析，研究结果表明在湖南省 3 种典型船型中，碳强度指标从小到大依次为散货船、液货船以及集装箱船，散货船的营运能效较好，且碳强度指标随船舶重载总吨的增加而减小，表明船舶大型化是降低碳排放的重要举措之一。结合研究成果，总结出湖南省内河货运船舶在低碳发展中存在主要问题，最后提出内河货运船舶低碳发展的对策建议。

关键词：内河货运船舶；能源消费；碳排放；碳强度指标；低碳发展

0　引　言

近年来，国家高度重视各领域的绿色低碳高质量发展，并提出 2030 年“碳达峰”和 2060 年“碳中和”的重要目标。为加快实现“双碳”的重大战略决策，国家相继印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《2030 年前碳达峰行动方案》《2024—2025 年节能降碳行动方案》等政策文件，明确作为“碳达峰十大行动”重点任务之一。为深入贯彻国家部委政策，落实“三高四新”战略定位和使命任务，湖南省先后印发《湖南省“十四五”节能减排综合工作实施方案》《湖南省碳达峰实施方案》《湖南省建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》等相关文件，大力推动交通运输领域节能减碳，全面推进经济社会绿色低碳转型，助力实现碳达峰、碳中和目标。

船舶作为交通运输领域最清洁的运输方式，碳排放强度最低，属于低碳环保的运输方式，且在同等里程下的其能耗是公路的 1/14，铁路的 1/2[1-2]。湖南省作为典型内陆省份，具有发展良好内河水运自然条件，拥有发达的“一江一湖四水”内河水系网，航道总里程 11 968 km，占全国内河航道总里程 9.42%，位居全国第三。为如期实现“双碳”目标，推进湖南省绿色低碳循环发展，内河货运船舶降碳行动、发展低碳航运成为至关重要的任务，因此研究湖南省内河货运船舶碳排放现状和发展对策具有重要意义。

1　湖南省内河货运船舶现状

1.1　内河货运船舶的基本现状

近年来，湖南省不断加快水路运输运力结构调整，积极推行船舶标准化进程，对新建船舶全面推行标准化，加速淘汰高耗能、高污染、低性能船舶，推广节能环保型船舶、干支直达及江海直达船舶、专业化船舶等。全省运输船舶总数逐年减少，净载重量逐年提升，船舶朝大型化方向发展趋势明显，如图 1 所示。

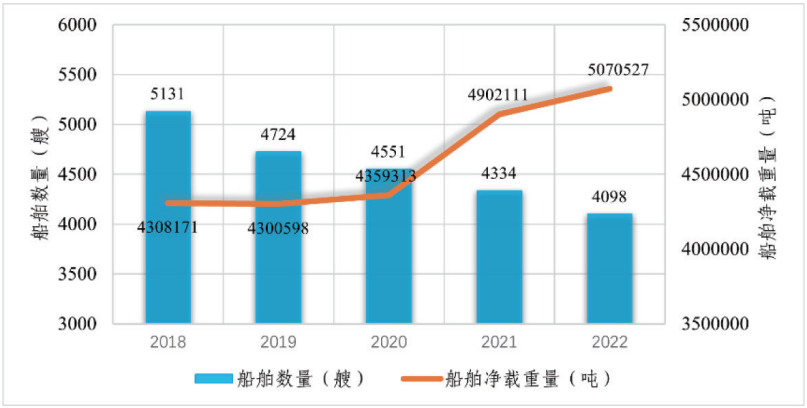


图 1　2019–2023 年湖南省水上运输船舶拥有量情况

根据《2023 年湖南省公路水路交通运输行业发展统计公报》，截至 2023 年底，湖南省共拥有轮驳船 3 524 艘，其中内河运输船舶 3 502 艘，同比减少 14.1%；净载重量 456.3615 万 t，减少 2.6%；集装箱箱位 5 867 TEU，减少 10.2%。具体水上运输船舶构成见表 1。由于湖南省为内陆省份，货运船舶主要以内河运输为主，占比高达 99%，沿海或远洋运输占比较低，因此本文主要针对内河货运船舶开展碳排放强度研究。

表 1　2023 年湖南省水上运输船舶构成（按航行区域分）

	指标	计量单位	实绩	同比增长（%）
内河运输船舶	运输船舶数量	艘	3502	-14.1
	净载重量	吨	4563615	-2.6
	集装箱箱位	TEU	5867	-10.2
沿海运输船舶	运输船舶数量	艘	21	10.5
	净载重量	吨	319237	3.0
	集装箱箱位	TEU	6011	9.9
远洋运输船舶	运输船舶数量	艘	1	0.0
	净载重量	吨	73000	0.0
	集装箱箱位	TEU	—	—

1.2　内河货运船舶碳排放强度现状

货运作为湖南省交通运输行业的第二大碳排放源，随着经济的发展，其碳排放量仍存在较大增长，整体呈现上升趋势。2012 年至 2018 年湖南省货运碳排放量高达 1 000 t，且逐年递增，年均增长 5.92%；2019 年至 2021 年碳排放量降至 500 t 左右，但保持上升趋势，增幅较缓。水路货运碳排放量在 2012 年至 2014 年间逐年递增，从 39.9 万 t 增长至 41.45 万 t；而后受洞庭湖禁止采砂影响，砂石运输量大幅下降，全省货运量出现一定幅度下降，2015 年至 2021 年碳排放量整体呈现下降趋势，从 34.54 万 t 降至 24.70 万 t[3]。

此外，内河货运船舶碳排放量与货运量和油耗直接相关，湖南省内河货运船舶主机能源类基本为柴油。近年来，内河货运船舶能源消费量均在 1.5 万 t 以上，整体呈现增长趋势，增长较慢，而能耗强度均在 6.0 kg 标准煤 /kt・km 以上，逐年递减，具体详见表 2。根据燃料法粗略计算内河货运船舶碳排放量，2020 ~ 2023 年湖南省内河货运船舶碳排放量分别约为 4.92 万 t、5.24 万 t、5.25 万 t 以及 5.11 万 t，仍保持增长趋势。

表 2　2020 ~ 2023 年湖南省内河货运船舶能源消费情况

年份	能耗总量（万吨）	货物周转量（亿吨公里）	能耗强度（千克标准煤 / 千吨公里）
2020 年	1.53	20.90	7.34
2021 年	1.63	21.14	7.72
2022 年	1.64	24.24	6.75
2023 年	1.59	26.47	6.02

注：表中湖南省历年数据来源于企业一套表数据

2 内河货运船舶碳排放强度分析

2.1 船舶碳排放强度指标

船舶碳强度指标（*Carbon Intensity Indicator,CII*），又称船舶能效指标，是指船舶单位运输工作量内的二氧化碳排放量，其指标数值越低，则表明船舶能效水平越高。因船舶碳强度为广义性、指示性的概念，有多种具体表现形式，目前主要分为营运类和技术类两种。船舶营运碳强度指标是指根据船舶一段时间内实际营运数据计算所得，随船舶营运状况而变化，具有一定偶然性，主要包括船舶能效营运指数、船舶营运能效性能指数、年度营运能效指数等；船舶技术碳强度指标是指船舶在理论设计情况下的指数，表示船舶固有设计能效特性，视为恒定不变的常数，主要有新造船能效设计指数、现有船能效指数、现有船舶设计指数等 [4]。

目前，船舶碳强度指标多用于国际航运船舶，内河货运船舶研究较少。本文借鉴国际航运碳强度指标，主要采用船舶能效营运指数、船舶营运能效性能指数和年度船舶能效率 3 项指标开展研究分析。

2.1.1 船舶能效营运指数（Energy Efficiency Operational Indicator，EEOI）

根据《船舶能效营运指数（*EEOI*）自愿使用导则》，船舶在计算周期内航行多个航程得到的平均（*EEOI*）计算公式如下：

$$EEOI = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j} FC_{ij}C_{Fj}}{\sum_{i=1}^{n} M_{cargo,i}D_i}\# \quad (1)$$

式（1）中：j 代表燃料种类（包括轻燃油、重燃油、柴油）；i 代表船舶航次；FC_{ij} 代表船舶在第 i 次航行中所消耗的燃料 j 的总量，t；C_{Fj} 代表燃料 j 的碳转换系数，无量纲；$M_{cargo,i}$ 代表第 i 航次航运时载货量，t；D_i 代表第 i 航次航运对应的运输距离，*n mile*。

2.1.2 船舶营运能效性能指数（Energy Efficiency Perform ance Indicator，EEPI）

EEPI 是由张爽等 [5] 提出的营运碳强度指标，并被国际海事组织推荐为自愿指标以供船舶试用。船舶在计算周期内船舶滚动平均 *EEPI* 计算公式如下：

$$EEPI = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j} FC_{ij}C_{Fj}}{M_{capacity}\sum_{i=1}^{n} D_{laden,i}}\# \quad (2)$$

式（2）中：$M_{capacity}$ 代表船舶载运能力，t；$D_{laden,i}$ 代表第 i 航次的重载航行距离，*n mile*。

2.1.3 年度船舶能效率（A nnual Efficiency Ratio，AER）

AER 是指船舶年度碳排放量与船舶总载重吨及航行距离乘积的比值。船舶在计算周期内的年度能效率计算公式如下：

$$AER = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j} FC_{ij}C_{Fj}}{DWT\sum_{i=1}^{n} D_i}\# \quad (3)$$

式（3）中：*DWT* 代表船舶总载重吨，t。

2.2 碳排放强度指标核算分析

2.2.1 研究船舶样本

本文研究船舶对象为湖南籍内河货运船舶，选取散货船、集装箱船、液货船等三种湖南内河典型船舶，共计 15 艘。研究期为 30 天，对上述 15 艘船舶 30 天内的运输及能源消费信息进行调研记录，最后对其碳排放强度开展研究分析。

2.2.2 营运碳强度指标核算结果分析

根据式（1）~式（3）对研究船舶样本数据进行计算，其结果见表 3。

表 3　湖南省不同类型内河货运船舶营运碳强度指标值

船舶编号	船舶类型	燃油类型	总载重吨（吨）	碳强度指标（[t CO_2·(t·n mile)$^{-1}$]）		
				EEOI	*EEPI*	*AER*
1	散货船	柴油	1150	4.40×10^{-5}	3.82×10^{-5}	3.82×10^{-5}
2			2200	3.71×10^{-5}	3.71×10^{-5}	3.71×10^{-5}
3			3150	1.41×10^{-5}	2.01×10^{-5}	1.34×10^{-5}
4			4020	5.95×10^{-6}	1.56×10^{-5}	5.94×10^{-6}
5			5210	7.21×10^{-6}	1.41×10^{-5}	7.05×10^{-6}
6			6292	5.55×10^{-6}	4.32×10^{-6}	4.32×10^{-6}
7	集装箱船	柴油	1120	8.48×10^{-5}	2.04×10^{-5}	2.04×10^{-5}
8			1794	2.61×10^{-5}	1.92×10^{-5}	1.92×10^{-5}
9			2674	3.45×10^{-5}	1.31×10^{-5}	1.31×10^{-5}
10			3800	1.81×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}
11	液货船	柴油	1504	5.40×10^{-5}	3.26×10^{-5}	3.26×10^{-5}
12			2372	2.08×10^{-5}	3.69×10^{-5}	3.69×10^{-5}
13			2582	2.00×10^{-5}	2.78×10^{-5}	1.86×10^{-5}
14			3229	1.83×10^{-5}	3.13×10^{-5}	1.57×10^{-5}
15			3975	1.54×10^{-5}	2.64×10^{-5}	1.32×10^{-5}

根据表 3 可知，散货船、集装箱船和液货船的 3 种碳强度指标（*EEOI*、*EEPI*、*AER*）均处于 10^{-5} 和 10^{-6} 数量级，其中集装箱船和液货船指标均为 10^{-5} 数量级。在研究船舶中，*EEOI* 指标比 *EEPI* 指标较大，这是因为船舶实际营运中所产生的碳排放量大多高于经载运能力计算下的碳排放量。此外，在散货船和液货船中，出现多艘船舶 *EEPI* 指标大于 *AER* 指标，表明船舶在实际运输过程中出现较多空载航程，船舶营运经济性较弱，而在集装箱船中两者指标均一致，表明集装箱船在实际航行中无空载情况，船舶营运经济性较好。总体上来看，研究船舶中散货船的碳强度指标要小于集装箱船和液货船，核算结果为散货船＜液货船＜集装箱船，表明散货船的营运碳能效较好，其次是液货船，最后是集装箱船，因此需针对集装箱船采取降碳措施，以提高船舶营运能效。

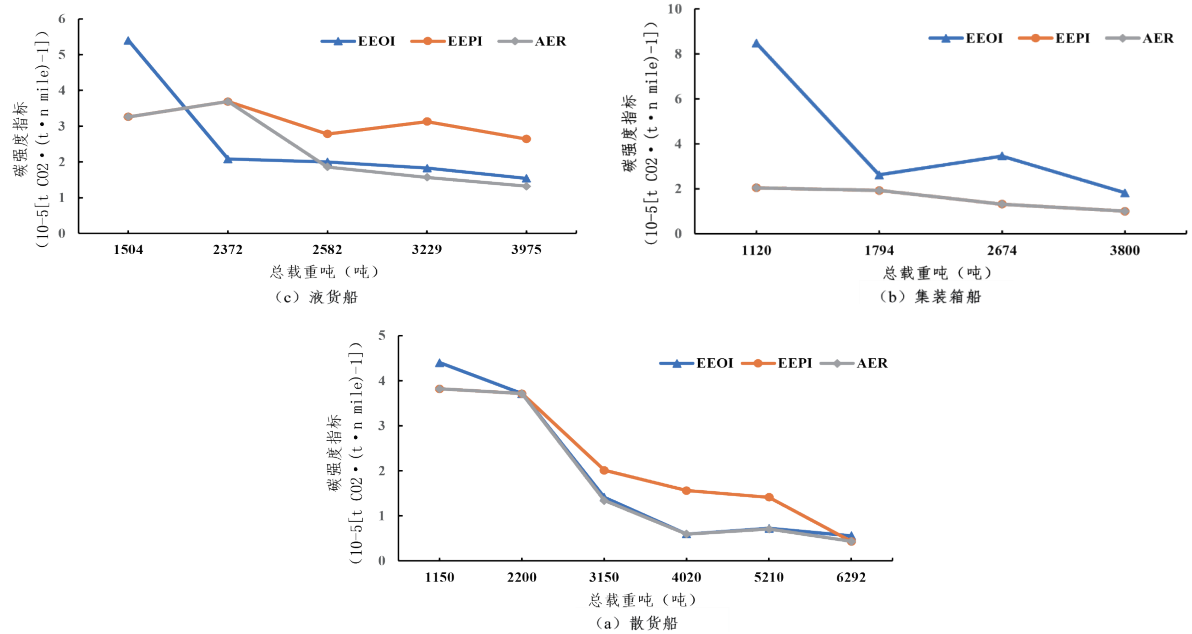


图 1　船舶总载重吨与碳强度指标的关系

由图 1（a）～（c）可知不同船舶类型下总载重吨和 3 种碳强度指标间的相关性。其中图 1（a）表明散货船随船舶总载重吨的增加，*EEOI*、*EEPI* 以及 *AER* 指标均逐渐减小，可知散货船的总载重吨与碳强度指标呈负相关性。而图 1（b）和图 1（c）表明集装箱船舶和液货船的碳强度指标随船舶总载重吨的变化趋势基本一致，总体呈现下降趋势。因此，随着船舶总载重吨的增大，船舶碳强度指标降低，船舶营运能效变强，表明船舶大型化有利于提高船舶能效，减少船舶碳排放量，而大型化趋势成为降碳的关键举措之一。

3 内河货运船舶低碳发展存在的主要问题

3.1 船舶低碳发展缺乏统筹规划

近年来，湖南省大力推进水运领域绿色低碳发展，积极促进船舶运输行业节能降碳。2023 年 7 月，湖南省人民政府印发《湖南省促进水运发展的政策措施》，促进水路运力结构调整，鼓励新能源船舶的应用，鼓励老旧货船提前拆解退出市场，并给予相应奖补资金支持。2024 年 4 月湖南省人民政府又印发《湖南省推动大规模设备更新和消费品以旧换新实施方案》，提出加快淘汰老旧营运船舶报废更新。

虽然湖南省在新能源船舶应用和老旧船舶拆解上给予强有力的政策支持，但是船舶行业低碳发展不仅表现在建新船、拆旧船方面，而是涉及顶层设计、技术创新、管理引导等全方位过程。目前，省级层面缺乏船舶航运绿色发展综合性政策，缺乏船舶低碳发展的顶层设计和统筹规划，制约着湖南省绿色低碳航运的转型，阻碍着绿色低碳强省的发展进程。

3.2 船舶运力及运输组织结构仍需调整

“十四五”以来，湖南省加快水运船舶运力结构调整，货运船舶大型化趋势明显。2023 年湖南省营运货船数量为 2 204 艘，较 2020 年减少 17%；平均净载重量 2 206 吨 / 艘，较 2020 年增长 35%。虽然湖南省货运船舶逐渐大型化，但目前在内河货运船舶中 1 000 吨级以内的船舶占比仍超过 20%，大型化趋势将持续。而在新能源船舶应用方面，湖南省已建新能源船舶均为远洋运输，内河货运船舶尚未采用，且船舶燃料类型基本为柴油，能源单一，导致湖南省已建的 LNG 水上加注站利用率较低，内河货运船舶新能源推广仍需加大力度。

除船舶运力结构能直接影响船舶营运能效外，运输组织水平影响着船舶装载率，进而影响船舶实际营运能效。当前航运市场环境下，湖南省现有水运经营户 804 家，其中企业 281 家，从事水路货运企业 158 家，占比仅 20%，而大型航运企业占比更低，省内仍存在较多以家庭为单位的航运个体。航运企业或个体因经济效益竞争，出现船舶交叉放空等现象，导致实际装载率较低，增加船舶能耗，进而影响船舶营运能效。

3.3 船舶低碳航行的智慧化应用不足

随着国家更加重视以绿色智能理念赋能交通运输高质量发展，内河航运绿色智能转型步伐持续加快，船舶标准化、绿色化、智能化已成为重要趋势。2022 年交通运输部、工业和信息化部等五部门联合印发《关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见》，加快内河船舶绿色智能转型和高质量发展。而智慧航运技术的应用可优化船舶航速，实施碳排放监控和智能运维，提升船舶航行效率，能高效推进船舶绿色低碳发展。

由前文研究结果可知，船舶实际碳排放情况与能耗直接相关，目前湖南省碳排放大多以内河货运企业或个体上报情况而核定，缺少船舶实际营运过程中的统计监测，无法准确反映真实情况。此外，船舶碳排放还与船舶实际使用有关，如航速、浅水效应、船舶过弯等都会影响船舶阻力，增加船舶能耗，进而提高碳排放量。尽管湖南省积极推广智慧水运技术的应用，已建立湖南智慧水运综合监管平台、湖南智慧港航可视化平台等智能体系，但功能主要集中在港口管理、船闸管理、航道管理、航运分析等大型应用方面，需进一步加深在货运船舶智慧航运技术方面的开发应用。

4 内河货运船舶未来低碳发展的对策建议

4.1 强化政府主导，制定省级层面绿色低碳船舶发展规划

在碳达峰和碳中和背景驱动下，国家层面对绿色低碳交通愈发重视，陆续出台了相关政策，为顶层设计和统筹规划奠定了政策基础。以政府部门为主导的统筹规划、规范引导以及相关企业的积极参与是加快船舶绿色低碳发展的关键因素，能加快实现绿色低碳船舶市场化。首先，省级层面可围绕内河货运船舶绿色低碳发展趋势，制定系统性和可操作性的绿色低碳船舶发展规划，以规划引导发展方向，促进省内航运资源的整合利用，

加快实现低碳发展目标。其次，除政府部门的统筹规划下，船舶绿色低碳发展还离不开政策激励，在现有的船舶新建及拆解激励政策上，可加大在低碳船舶研发和运营方面的政策支持，以专项补贴等激励方式带动企业开展技术创新，帮助企业减少因绿色低碳革新带来的负担。

4.2 优化运输结构，推进船舶绿色化以及运输水平高效化

针对内河货运船舶现状情况，湖南省未来仍需加快运力结构调整，加大力度推行船舶绿色化，鼓励航运企业大型化发展以及优化省内运输组织方式。一是，调整能源消费结构，加快淘汰能耗高、污染大及安全性能差的老旧货船，推行 *LNG*、电能、氢能等清洁能源的应用，实现湖南省内河货运船舶的“零突破”。二是，创新内河运输组织模式，鼓励省内航运企业兼并、重组，提高航运企业集团化、规模化、集约化水平，打造结构多样化与合理化的货运船队，发挥船队运输组织方式成本低、能耗低、排放低的比较优势。三是优化调整运输方式，大力发展铁水联运、水水中转等多式联运，充分发挥水运运能大、污染少、能耗低等绿色低碳方面的优势。

4.3 加大技术应用，建立内河货运船舶低碳智能监控体系

为加强船舶运输中碳排放的管控，建立碳排放监控体系是关键措施，通过应用智慧化技术，动态了解船舶实际营运中产生的碳排放量，从而采取有效措施进行降碳控制。为实施船舶碳排放科学化监管，一方面，需加强组织保障体系建设，由交通主管部门负责营运货船能耗、碳排放情况的全面监督管理，加强能耗和碳排放统计监测考核，各级海事管理机构对辖区内船舶的能耗及碳排放数据进行收集上报。另一方面，构建船舶碳排放监管平台，基于船舶全生命周期进行监控。建造阶段，严格遵循相关标准与规范，确定投入运营船舶碳排放满足标准；营运阶段，经信息化平台建设对船舶碳排放信息进行共享，使船舶碳排放信息可监测、统计以及核查，并进行评级，判断其是否达标；退市阶段，制定完善的退出制度，形成船舶碳排放科学化和规范化监管。

5 结 语

在碳达峰和碳中和的发展目标下，国家提出加快水路运输领域的绿色低碳发展，因此开展湖南省内河货运船舶低碳发展研究具有重要意义。本文基于湖南省内河货运船舶现状，采用 3 种船舶营运碳强度指标对 3 种典型内河船舶进行碳排放强度研究分析。研究结果表明，碳排放强度从小到大依次为散货船、液货船和集装箱船，且船舶碳强度指标随载重总吨的增加而较小，表明船舶大型化是降低碳排放的重要举措之一。最后根据研究成果，总结出湖南省内河货运船舶在统筹规划、运力及运输组织调整、智慧化应用等方面存在的不足，并提出未来低碳发展的对策建议。

参考文献

[1] 钟炜 . 低碳概念在内河航运业的应用 [C]. 中国航海学会内河船舶驾驶专业委员会 : 桥区船舶航行安全与管理论文集 . 苏州市城区地方海事处 ,2010.

[2] 田佩宁 , 毛保华 , 童瑞咏 , 等 . 我国交通运输行业及不同运输方式的碳排放水平和强度分析 [J]. 气候变化研究进展 ,2023,19(03):347-356.

[3] 戴利生 , 刘灿 , 方涵潇 , 等 . “双碳”背景下的湖南省交通运输行业碳排放特征分析 [J/OL]. 公路工程 ,2024(08):1-9.

[4] 薛树业 . 国际航运碳强度指标综述 [J]. 世界海运 ,2022,45(03):20-27.

[5] 张爽 . 国际海运船舶营运能效评价方法研究 [D]. 大连海事大学 ,2020.

作者简介：

邓聪，湖南省交通规划勘察设计院有限公司助理工程师，（E-mail）2256531074@qq.com，13319540274

熊浩奇，湖南省交通规划勘察设计院有限公司工程师，（E-mail）504546245@qq.com，18684924028

安徽省智慧交通发展现状与路径研究

吴志刚　杨　凯　殷　亮　黄　淼

（ 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司，安徽合肥 230088 ）

摘 要：安徽省作为中国东部的重要省份，在智慧交通的建设与发展方面取得了显著成就。本文分析了安徽省智慧交通的现状，包括政策引导、项目实施及人才培养，并指出了区域发展不均、数据共享不足、技术创新滞后等挑战。为应对这些问题，提出了发展路径：加强智慧交通基础设施建设，推动政务数字化，加快新型基础设施布局，以及促进科技创新和产业发展。研究旨在为安徽省智慧交通的全面发展提供参考，以期实现更安全、高效、环保的交通环境。

关键词：智慧交通；安徽省；发展路径；数据

0　引　言

智慧交通是指运用现代信息、通信、控制、传感、计算技术等，对交通系统进行全方位、多层次、实时动态的监控、管理和服务，以提高交通系统的运行效率、安全性、便捷性和环保性，实现资源的优化配置和使用。智慧交通的核心在于“智慧”，即通过高度的信息化、网络化、智能化手段，实现对交通流的精准感知、对交通态势的智能分析、对交通问题的科学决策和对交通服务的主动提供。

随着社会经济的快速发展和城市化进程的加快，交通拥堵、环境污染、能源短缺等问题日益突出，智慧交通作为解决这些问题的有效手段，已经成为全球交通发展的新趋势。安徽省作为中国东部的重要省份，地处长三角经济圈，其智慧交通的发展对于推动区域经济一体化、提高交通管理效率、保障交通安全等方面具有重要意义。本文将从国内外智慧交通的发展现状出发，分析安徽省智慧交通的发展现状，探讨其面临的挑战，并提出相应的发展策略与路径。

1　国内外智慧交通发展现状

1.1　国际智慧交通发展现状

全球范围内，智慧交通的发展已经成为交通现代化的重要趋势。发达国家在智慧交通领域的投入和建设上先行发展，形成了较为成熟的技术和管理体系。在美国，智慧交通系统（Intelligent Transportation Systems,ITS）已经广泛应用于城市交通管理、高速公路监控、公共交通服务等多个方面。例如：加利福尼亚州的交通管理中心利用先进的传感器和监控设备，实现了对交通流量的实时监控和动态管理，有效缓解了交通拥堵问题。此外，美国联邦公路管理局（Federal Highway Administration, FHA）也在积极推动车联网（Vehicle-to-Everything, V2X）技术的研发和应用，以提高道路安全性和交通效率。

欧洲的智慧交通系统发展同样迅速，特别是在北欧国家，如瑞典、挪威等国，通过实施智能交通信号系统、电子收费系统等，大幅提升了交通管理的智能化水平。欧盟也在推动跨国界的交通信息共享和交通管理协同，

以促进区域内的交通一体化，见表 1。

表 1　欧盟 ITS 发展规划内容

内容	介绍
智慧出行	合作类和服务类应用服务互操作性走廊；针对从业人员的协作能力培训；欧洲物流信息交换架构；全面的信息平台；专门的互联出行服务平台
生态出行	建立“欧洲物流信息交换架构”；建立可持续城市物流新的合作模式及指导指南；建立合作物流服务中心；进行动态机车道路充电实验、试点
安全出行	制定欧洲道路交通自动驾驶协同发展计划；通过低成本导航卫星与计算机视觉融合，实现车道级导航和自动驾驶地图的生成；欧洲自动驾驶研究项目；车辆与道路自动化

亚洲地区，日本在智慧交通领域的发展尤为突出，其智能交通系统涵盖了自动驾驶、车联网、智能停车等多个方面。日本政府推出的“智能交通城市”项目，通过整合多种交通信息，为市民提供便捷的出行服务。

1.2　国内智慧交通发展现状

中国作为世界上最大的发展中国家，近年来在智慧交通领域的发展速度迅猛。国家高度重视智慧交通的发展，出台了一系列政策文件，如《交通强国建设纲要》等，为智慧交通的发展提供了明确的方向和有力的政策支持。各省市积极响应国家政策，纷纷加大对智慧交通的投入和建设力度，推动智慧交通在本地区的快速发展，见表 2。在技术应用方面，大数据、互联网、人工智能、区块链、5G、北斗导航等新技术与交通行业深度融合，广泛应用于智慧公路、智慧港航、智慧运输、法智交通、信息基础设施等各个领域。例如：在智慧公路建设中，通过基础设施数字化、公路全要素感知以及车路协同等新场景应用，实现了对公路交通的实时监测、智能管控和高效服务，提高了公路的安全性和通行效率。在智慧港航领域，借助物联网、大数据等技术，实现了港口作业的自动化、智能化和信息化，提升了港口的运营效率和服务质量。同时，各地积极打造交通大数据中心，加强数据资源的整合与共享，注重数据质量和治理，为交通决策提供了科学依据。通过对交通数据的深入挖掘和分析，能够更好地了解交通流量、路况信息等，为交通规划、管理和调度提供有力支持。此外，智慧交通的场景创新不断涌现，各地围绕交通运输各业务领域，创新推出了许多数字化应用场景。例如，“互联网 + 监管”综合平台的建设，实现了对交通运输行业的全方位监管；智慧审批系统的应用，提高了行政审批的效率和透明度；智慧出行服务的推广，为人们提供了更加便捷、高效的出行体验。在区域协同发展方面，长三角等地区取得了显著进展。通过加强执法信息共享、电子证照互认、数据共享等工作，实现了区域内交通信息的互联互通。同时，在智慧公路、智慧港口等领域的协同建设，进一步提升了区域交通的一体化水平，促进了资源的优化配置和高效利用。

表 2　国内部分省市智慧交通规划文件

省市	上海	浙江	江苏	山东
规划	印发《上海市智能交通系统顶层设计 (2021-2025 年)》，明确了“十四五”期间本市智能交通发展愿景和总体目标任务。根据《顶层设计》总体框架基础梳理形成了《智能交通顶层设计 2022 年度重点项目清单》，并组织开展宣贯工作。	出台《浙江省数字交通建设方案 2020-2025 年 (试行)》、《浙江省交通数字化改革行动方案》、《浙江省交通领域“大脑”建设方案》等，公路、港航、工程、机场等各领域均出台数字化改革行动子方案，并组织开展工作。	印发《江苏省“十四五”智慧交通发展规划》，围绕围绕“1 个总体目标、6 大主要任务、29 项重点工作、5 个保障措施”来开展，最终全面实现“6 个转变”。即智慧交通底座支撑向统一化转变、基础设施向数字化转变、运输服务向全链化转变、行业治理向精准化转变、创新融合向深度化转变、智慧产业向集聚化转变。	印发《山东省数字交通“十四五”发展规划》，明确发展目标和重点任务。致力于打造全省综合交通运输大数据赋能中心，建设智慧高速、智慧港口两类示范引领试点工程，推动“基础设施、运输服务、行业治理”三个领域的数字化升级，建成 N 个行业典型应用场景。

总体来看，中国的智慧交通发展正处于快速发展阶段，不仅在基础设施建设、技术应用方面取得了显著成就，而且在政策支持、标准制定、国际合作等方面也展现出强大的动力和潜力。未来，随着技术的不断进步和创新，中国智慧交通的发展将更加多元化和智能化，为人们的出行带来更加安全、高效、便捷的服务。

2　安徽省智慧交通发展现状

安徽省积极响应国家关于智慧交通建设的号召，积极推进智慧交通技术在全省的应用与发展。在政策引导、

项目落地、技术应用等方面取得了显著成效，但与此同时，也面临着一些短板和挑战。以下是对安徽省智慧交通发展现状的全面总结。

2.1 政策与法规支持

安徽省政府高度重视智慧交通建设，出台了一系列政策文件，为智慧交通发展提供了强有力的政策支持和顶层设计。例如：《安徽省“数字政府”建设规划（2020-2025 年）》《安徽省人民政府关于贯彻交通强国建设纲要的实施意见》《安徽省交通运输“十四五”发展规划》等文件，均明确了智慧交通的发展方向、目标和任务。这些政策的出台，为安徽省智慧交通的发展提供了清晰的蓝图和路径。

2.2 项目落地与实施

智慧公路建设方面，启动宁芜智慧高速、G205 芜湖段等项目建设，推动公路基础设施全周期数字化交付，构建智慧感知、智慧赋能、智慧管理、智慧应用、智慧交互“五智一体” 的智慧公路智能应用架构，实现主动式安全预警、伴随式信息服务、准全天候安全通行、可视化智能管控。[3-4]

智慧港口仍以借鉴沿海港口先进应用为主，在长三角处于跟跑阶段，但在内河水运智慧化部分领域具有一定优势。船舶过闸系统实现全覆盖，过闸量增长率 144.8%，平均过闸办理时间由 1 小时减至 5 分钟，船舶平均待闸时长从 3 天左右降至 4 小时。合肥港、芜湖港均完成了 5G 全覆盖，实现了生产运营的场景创新应用，内河港口智慧化试点示范初见成效。智慧航道建设方面，引江济淮智慧航道纳入部新基建重点工程，启动建设淮河、沙颍河、合裕线和芜申运河电子航道图等项目，实现船舶航行安全保障、航道运行监测、航运综合信息服务、航道数字孪生、多级船闸调度、电子航道图系统等功能。

智慧运输充分体现规模效应。公共交通基本实现“一卡通行”，与全国 314 个地级以上城市和 607 个县级城市交通一卡通互联互通。二级及以上道路客运站电子客票覆盖率 100%。全省取得网约车许可的平台公司 480 家，车辆约 4.95 万辆，驾驶员约 22.8 万人，网约车订单双合规率位居全国前三。全省取得网络货运经营资质的本地企业 269 家，备案分公司 155 家，企业总数排在全国第二；整合社会运力 267.6 万辆，全国排名第一；网络货运企业完成运单量全国排名第一、货运量全国排名第二。

2.3 人才培养与技术研发

安徽省注重智慧交通领域的人才培养和技术研发。通过与高校和科研机构的合作，培养了一批智慧交通领域的专业人才，并在智慧交通关键技术研究方面取得了一定的成果。

在人才队伍建设方面，本研究对安徽省智慧交通领域的人力资源配置进行了详细分析。省级层面，各厅直属机关单位均已明确信息化相关工作的负责部门，且所有人员均持有本科及以上学历，占比达到 100%, 其中本科学历以上的人员占比为 58%。省属交通企业层面，已有 2 家企业已设立智慧交通专职部门，其中本科学历以上的人员占比为 57%，如图 1 所示。

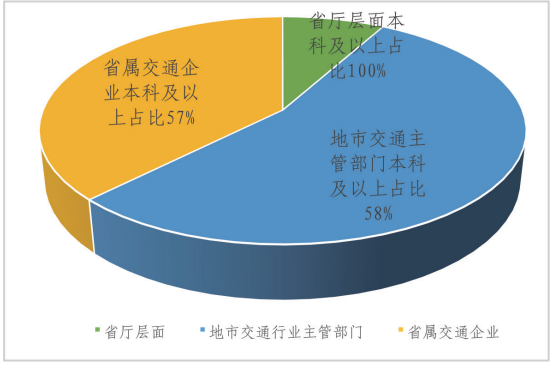


图 1 安徽省智慧交通人才统计

“十四五”以来，安徽省交通运输系统在桥梁建造、工业化智能制造、人工运河成套技术等重点领域科技

攻关，科技创新能力提升，智慧交通落地，推动创新成果转化应用等方面取得了显著成绩，行业科技创新实现了系统布局、重点突破、质并重、融合应用的跨越发展。[1] 安徽交通运输系统各类科技创新成果达 600 余项，10 项成果入选交通运输部重大科技创新成果库；发布地方标准 52 项，取得各类科技奖 100 余项。[2]

2.4 存在问题与挑战

安徽省在智慧交通发展过程中，尽管取得了一定的成果，但仍面临诸多问题和挑战，主要集中在资金投入、技术创新、政策法规以及跨部门协作等多个方面。[5]

区域发展不均衡：部分经济发展较快的地区，如合肥、芜湖等，对智慧交通的投入和建设力度较大，而一些经济相对落后的地区则在智慧交通的建设和应用上进展缓慢；合肥、芜湖等市在智慧交通建设方面的财政投入明显高于其他地区，这导致了省内智慧交通服务水平的不均衡。

数据共享与应用不足：在数据采集共享过程中仍然存在数据对接协调难度较大、采集到的数据质量较低、缺乏数据共享长效运行保障机制等问题。基于综合监管等多业务融合角度的关联数据分析研判不足，对于数据资源的治理管控不足，对综合交通信息数据的深层次挖掘分析应用不足。先发地区如江苏省、浙江省等对夯实以信息化为代表的数据基础设施均比较重视，在《江苏省“十四五”智慧交通发展规划》《浙江省数字交通建设方案（2020-2025 年）（试行）》中均提出要夯实数字化治理基础，打牢智慧交通基础底座。

技术创新与产业转化能力弱：省内智慧交通相关科研项目的数量和质量与发达地区相比仍有较大差距；科技成果转化率不高，缺乏具有自主知识产权的关键技术和产品，导致智慧交通产业化进程缓慢。同时专业人才缺乏，智慧交通的发展需要大量的专业技术人才和复合型人才，省内智慧交通领域的高层次人才和专业人才相对匮乏，尤其缺乏既懂技术又懂管理的复合型人才。

协同推进机制不健全：智慧交通的发展需要多部门的协同合作，但安徽省在跨部门协作、资源共享和综合治理等方面的协同推进机制尚不健全；省内尚未形成有效的跨部门协同机制，影响了智慧交通的整体发展效率。

3 安徽省智慧交通发展路径

3.1 总体发展思路与目标

安徽省在智慧交通的发展上，秉承着前瞻性的视角和战略性的布局，致力于通过科技创新推动交通产业的转型升级。其总体发展思路可以概括为：以智慧化、信息化为主线，以提升交通效率、降低物流成本、增强交通安全性、优化出行体验为目标，全面构建高效、便捷、安全、绿色的智能交通体系。总体目标如下：

数据治理工程：完成智慧交通大数据中心建设，实现政务信息化系统 100% 上云，政务数据资源 100% 挂载，加强数据治理和价值提升，综合交通大数据资源体系初步建成，行业信息化基础设施支撑能力与数据资源共享开放程度显著提升。

场景创新工程：大数据、互联网、人工智能、5G、区块链等新一代信息技术在交通运输各业务领域应用更加广泛，围绕皖美公路、皖美运输、皖美港航、皖美交建、平安皖运、法智皖运 6 个领域，建成一批具有影响力的智慧交通项目和创新应用场景。

交通新基建工程：融合创新、协同高效的智慧公路、智慧航道、智慧港口、智慧枢纽“四大应用”初具规模，建成一批智慧交通基础设施试点工程。在智慧港口、智慧高速公路的设计、建设、运营上取得典型经验，并形成相关意见指南、标准规范。

3.2 具体实施路径

（1）加快构建现代化的智慧交通基础底座

一是建设统筹集约、适度超前的交通信息基础设施。在“数字安徽”建设总体框架下，依托江淮大数据中心、省级政务云资源、电子政务外网以及一体化基础平台，加快建设一数一源、多维服务、高效共享的智慧交通大

数据中心，打造行业数据“一个库”、行业应用“一张图”；持续推动综合交通运行监测与协调指挥平台建设，加强跨部门、跨层级的协调联动，提升综合交通运输运行态势感知、应急调度和响应处置能力；加强对地市交通数据中心、综合运行指挥调度的联动，通过建设指南、联动机制等建立，实现省市信息基础设施的互联互动。

二是加强数据治理能力建设，提升行业数据应用水平。建设行业数据资源采集、共享、更新、应用系列标准，完善数据共享交换平台现有功能，扩大数据治理范围和深度，对规划计划、公路水路建设管养、综合执法、安全应急、运输出行等领域结构化数据和非结构化数据进行数据清洗、转换、质量检测等，为各行业部门提供统一的数据质量标准，从数据源上实现精细化治理。以“交通大数据 + 人工智能 + 知识图谱”为基础，建立行业数据分析挖掘的系列算法库和数据分析应用模板，提升行业数据辅助分析决策的价值。

（2）创新打造交通政务数字化应用场景

一是构建“技术融合、业务融合、数据融合”的行业监管新模式。以 5G、大数据、人工智能、云计算、区块链等技术为支撑，创新和完善行业治理方式，深化非现场监管、信用监管、联合监管等，对旅客运输、危货运输、交通基础设施建设、超限超载等重点领域及重点事项实现数字化监管全覆盖。强化事中事后监管，以建设安全应急、行政执法、联网治超、信用管理、建设管理等数字化治理重点应用为抓手，搭建行业“互联网 + 监管”综合平台，推动实现行业治理“一屏全览、一键触达”。

二是构建“多跨协同、场景聚焦、智能联动”的行业运行管理新模式。以“统”和“联”为主线，深入理顺交通运输业务流程，规划协同领域，聚焦交通运输行业运行管理效率提升，加强部、省、市、县四级联动，强化与发改、公安、经信、市场、应急等多部门的协同，打造皖美公路、皖美运输、皖美港航、皖美交建等一批具有安徽交通运输行业特色的数字化应用场景成果，实现信息高度共享、行政流程优化、业务协同联动、决策智能辅助。

（3）加快布局智慧交通新型基础设施建设

一是加快推进“可视、可测、可控、可服务”智慧公路建设。持续推动宁芜、合宁智慧高速和 G205 智慧公路的建设，围绕公路设计、建设、管理、养护、运营全生命周期，以基础设施数字化、公路全要素感知、伴随式信息服务、车路协同等新场景应用为落脚点，深化 5G、北斗、大数据、人工智能、物联网、BIM 等新一代信息技术在中的应用，推动高速公路服务区等公路沿线充电基础设施建设，逐步提升公路网智能管理和智慧服务水平。

二是加快推进一体化服务的智慧港航生态圈建设。实施引江济淮智慧航道建设，实现江淮运河的航道感知可视化、航运管理智能化、应急处置协同化、公共服务便捷化。推动以合肥港、芜湖港为代表的智慧港口建设，推广应用港口智能化作业装备，实现港口基本作业、服务、监管、控制、调度全要素的信息融合与精准管控，创新基于 5G、北斗、物联网等技术的智慧港口场景，实现“港口 + 通关 + 物流”一体化服务联动的内河智慧港口。

三是加快推进衔接便利的智慧枢纽建设。推动综合客运枢纽、公共交通枢纽的智能化，推动旅客联程运输服务设施建设，实现不同运输方式的有效衔接。引导货运枢纽资源共享共用，大力发展多式联运。依托合肥新桥国际机场航站区改扩建工程，开展智慧机场试点建设，实现保障节点可视化、自助值机、数据自动采集等应用，提升机场运营智慧化水平。建设通航飞行服务平台，为全省通用航空业务提供“一站式服务”。

（4）加速推动智慧交通科技创新和产业发展

一是加快推进交通运输前沿领域技术研发与新兴产业布局。逐步探索构建智慧交通领域以企业为主体、市场为导向，政、产、学、研用相结合的协同创新机制，在科技项目清单、试点示范项目中加强智慧交通方向的技术攻关，强化前瞻性技术的产业化应用。鼓励支持交通企业与工业互联网平台等充分对接，寻找协同切入点，推动传统交通运输业向产业链上下游跃迁。结合省“十大新兴产业”工作部署，推动自动驾驶、车路协同等技术研发应用，促进智能网联汽车产业发展。以交通大数据“聚、通、用”为核心，大力推动与相关部门、行业、

企业数据合作，共同推进“互联网 + 交通运输”“大数据 + 交通 + 旅游”“大数据 + 交通 + 新业态”等模式。打造交通信息产业，鼓励省属交通企业利用资本投资手段积极布局芯片、人工智能等信息技术产业。

二是打造一批在智慧交通层面具有影响力的典型成果。强化工业化智能制造的行业领先地位，持续推动桥面板、轻型 T 梁、桩板式结构、装配式通道等的工厂化预制，鼓励推动智能制造成果规模化、产业化。在智慧交通强国试点、自动驾驶先导应用试点、交通新基建的建设中，加强智慧交通典型经验和案例的成果转化，力争在智慧公路、智慧港口、自动驾驶等方面形成一批可推广、可复制、经济合理、成熟有效的典型成果。借助长三角智能交通创新应用大赛等渠道，搭建高层级、多频次的技术交流和推广应用平台，培育创新型智慧交通产业集群。

4 结 论

综上所述，通过政策支持、项目落地、人才培养和技术研发，安徽省在智慧交通建设方面取得了显著成效，但仍存在区域发展不均衡、数据共享与应用不足、技术创新与产业转化能力弱以及协同推进机制不健全等问题。

为了实现智慧交通的可持续发展，安徽省应明确总体发展思路与目标，加快构建现代化的智慧交通基础底座，创新打造交通政务数字化应用场景，加快布局智慧交通新型基础设施建设，并加速推动智慧交通科技创新和产业发展。未来，安徽省需持续关注智慧交通领域的发展动态，加强与其他省市的交流与合作，不断完善政策法规和协同推进机制，加大对技术创新和人才培养的投入，以推动智慧交通的进一步发展，为经济社会的发展提供有力支持。

参考文献

[1] 安徽省交通运输厅 . 科技创新引领 , 智慧交通加速 .2024.3.22.
[2] 中华人民共和国交通运输部 . 安徽交通加快智能化改造数字化转型 , 科技向“新”发展提“质”.2024.4.8.
[3] 安徽省交通运输厅 . 安徽省智慧高速公路建设指南 . 2023.
[4] 安徽省交通控股集团有限公司 . 智通江淮大地 赋能皖美高速 . 2024.
[5] 孙革新 . 推动数字赋能、建设智慧交通调研报告 . 2023.

作者简介：

吴志刚，安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司总工程师、正高级工程师，（E-mail）490912202@qq.com，18755159149

在役水下工程安全状况智能检测与评定成套技术研究与应用

汪凡文

（安徽省交通科学研究院，安徽合肥　230000）

摘 要：在役水下工程由于长期承受巨大的水压力和水动力作用、河水腐蚀、生物附着等多种原因，所以对结构及表面破损检测有较高的要求。经过调研结果表明，在役水下工程在建成投入使用的数十年后，或多或少的都发生了劣化破损等问题，甚至严重的破损已经危机建筑结构的稳定性，目前在役水下工程检测与评定虽然已经获得了一些研究成果，但仍缺少新技术、新材料、新装备的支持，仍需进一步研究和提高。本文紧跟在役水下工程安全状况检测与评定的研究热点，将目前水下工程安全状况存在的问题作分析，并研究出成套检测与评定技术，用实践验证技术研发成果的可行性，为今后水下工程的检测与评定提供可靠的技术支持。

关键词：在役水下工程；水下工程检测；技术研究与应用

0 引 言

当前，在役水下工程大多为促进城市经济发展的重要公用建筑，对城市交通系统及资源采集等各项功能体系有一定的影响，例如港口、船闸、大坝、桥梁等建筑都有部分构造需要在水中搭建。但是由于位于水面及水位变动区域处的结构发生病害就容易产生安全隐患，严重时甚至会造成经济损失，人员伤亡。为了防护和解决建筑物水下结构的各种安全问题，就必须及时对其安全状况进行检测与评定。然而，目前水下建筑的健康监测技术、材料、装备等正面临淘汰，仍缺乏新技术、新材料、新装备的支持。传统的水下检测作业方法，采用潜水员下水作业的方式，主要凭借潜水员的水下作业技能、经验对水下结构进行判断，较多依赖双手触觉及水体清晰度，并通过实时对话描述记录结构异常情况。这种方法往往受到工作环境、潜水深度和工作时间等条件的制约，实施中具有一定的局限性，如水库、大坝等蓄水较深时人工下水作业难以完成任务。同时传统的水下检测评定技术检测周期长，并且需要长时间修护才能投入使用，往往对城市的交通系统甚至环境产生极大的影响，这就对水下工程检测与评定提出了一定的技术要求。为有效破解水下工程隐蔽性强、病害几率大、研究不系统、成果落地难、诊治队伍少、应急保障弱等难题，安徽省交通科学研究院围绕港口、船闸、桥梁、大坝等在役水下工程开展检测和评定研究，通过建设科创平台、研发新型检测设备、制定和发布地方性标准以及发明专利等有效措施，对共性、关键性核心技术进行攻关。

1 在役水下工程安全现状分析

1.1 病害问题

由于水下工程环境的不稳定性和冲刷作用的不间断性，水下建筑结构的破坏形式也多种多样破坏原因也不

尽相同。水下建筑物破坏形式大致分为由物理冲刷作用导致的磨损、疲劳裂纹、空隙、冲坑、掏洞、蜂窝、渗漏等；以及由于水环境本身的侵蚀或腐蚀作用下发生物理反应及化学反应的腐蚀破坏，主要成因是混凝土由于渗漏或者长期冲刷产生疲劳裂缝，导致其内部钢筋直接长期受水环境影响从而发生锈蚀。而内部钢筋由于锈蚀产生的锈胀力如果达到 30 MPa 将有可能使结构开裂，严重危及使用安全。而导致在役水下工程的安全隐患大致分为冲刷破坏及腐蚀破坏两种形式。

(1) 物理冲刷 : 由于混凝土位于水位变动的区域长时间受到水流冲刷作用，或者位于水下部位的暗流，回流冲刷，以及由于水下工程在施工时由于环境或施工不当导致混凝土工程或多或少都出现了部分破损，而细小裂缝是最为常见的一种破损。由于裂缝的存在，势必影响混凝土的强度和耐久性，裂缝在水流的冲刷下逐渐扩展，不仅会引起严重的渗漏，严重时还可能成继续发展导致大面积混凝土结构破损，影响到建筑物的正常和安全使用。而且位于水下的裂缝由于水环境保养维护相较于陆地环境更加困难繁琐，裂缝等发现时大多都发展到了严重的程序，必须尽快处理。

(2) 化学腐蚀 : 处于水环境的混凝土建筑由于与各种蒸发气体、液体及水中所含的各种离子相互反应，部分有害物质将会直接或间接地导致混凝土整体性能的劣化，这种现状总称为穿透。而根据驱动力、传输物质和传输过程的不同，这些物质侵入混凝土过程又可细分为 : 扩散、吸附、渗透、弥散、氯离子固化和对流等。在水环境的混凝土建筑被有害离子穿透，混凝土出现的各种劣化反应导致结构遭受破坏，或者混凝土出现蜂窝孔隙导致内部钢筋锈蚀，从而使结构失去整体性造成其使用寿命降低。

1.2 检测共性问题

1.2.1 精度和稳定性问题

目前，对于水下仪器，国内和国外存在较大的差距，尤其是仪器的稳定性。在水下，检测人员因受到诸多条件和因素的限制不能像在陆地一样自由地活动，尤其是潜水装置、检测设备和配套设备等限制了人员的活动，同时还增加了水下安装、定位等活动的复杂性，另外受水深、水温、能见度、波浪、潮汐、涌浪、海生物与沉积物等的影响，测量工作的可靠性和稳定性都受到很大影响，即使是进口设备，也必须在合适的条件下才能取得较好的结果。

1.2.2 通用性问题

目前的仪器，不同的原理、不同的介质、不同的测量对象就需要选用不同的仪器或不同的探头，最简单的也要进行重新设置参数，如对于涂层测厚，铁基质和铝基质的结构就不能用同样仪器，至少需要更换探头，测量设备的功能太单一，使测量任务复杂化，不仅工作量大，工作效率也很低。如 检测船体水下部分的状态，不仅要带涂层测厚仪、钢板测厚仪、水下照相机、摄像机，还要根据船体 板材选择合适的探头，调整设备参数。如果是潜水员操作，仪器的切换就相当复杂，一个人甚至都无法完成任务，需要几个人共同协作。

2 在役水下工程检测技术优缺点

水下检测是检查水下建筑物的破损情况，为分析缺陷产生的原因及危害、制定缺陷处理方案提供直观依据。随着科技发展，中国水下工程检测技术水平得到了较大提高，呈现出手段多样化、范围深水化、检测可视化、测量精确化等特点。根据不同原理，水下工程检测方法主要包括潜水员和水下电视结合检测法、水下机器人检测法、声波法、示踪法、电法、电磁法、流场法和水下磁粉探伤技术等。水下工程常用的检测方法包括以下几种。

（1）潜水员和水下电视结合检测法

通过潜水员水下录像或从水面下沉水下摄像头，可及时观察水下结构的运行情况，实现水下工程检测与施工作业的互动，具有精确度高、灵活性强等优点；缺点是潜水员一般潜水深度在 60 m 以内，劳动强度大，工作时间受限。

（2）水下机器人检测法

由水面上的工作人员通过连接潜水器的脐带操纵和控制潜水器，并通过水下电视、声纳等专用设备进行观察，具有安全、经济、高效和作业深度大等突出特点，且可以深入体积狭小部位进行观测。缺点是在水下条件复杂的部位无法实施检测，如上游坝面存在大量模板、钢筋和树枝等情况时，可能存在脐带缠绕的危险。

（3）声波法

通过发出一种高频超声波在水中传播，并用声纳仪检测遇到物体时反射回来的声波，从而实现对水下地形、混凝土裂缝与缺陷、岩体特性等物理量的测量。利用声波在不同水流流向传播时间不同的规律，该方法还可用于渗漏流速场的检测。缺点是由于水下环境特殊，水下检测的方法与手段受到一定限制，水下能见度低、视距短、图像模糊不清，而无线电波难于水中传播，光波的传播距离也比较短，此时声波检测具有独特优势。

（4）水下磁粉探伤技术（MPI 技术）

工作原理是在焊缝表面产生磁场，在有裂纹处磁粉产生堆积（漏磁现象），主要用于水下金属结构焊缝缺陷的检测。缺点是水下磁粉探伤技术不易操作。

3　检测与评定成套技术研究与应用

为有效解决水下工程隐蔽性强、病害几率大、研究不系统、成果落地难、诊治队伍少、检测技术存在的精度和稳定性的问题等难题，省交科院围绕港口、船闸、桥梁、大坝等在役水下工程，全面推进在役水下工程安全状况智能检测与评定成套技术研究落地，建立了内河水下工程健康诊治关键核心技术研究与应用“1+3+10+N”阶段性核心技术体系。其中制定并发布的 4 项安徽省地方性标准填补了当前省内桥梁、港口、船闸、大坝等水下工程结构物检测与评定无标准的空白。通过建设科创平台，引进行业专家等增强诊治队伍，提升队伍能力。研发的新型设备“水下工程多功能检测移动平台 (综合检测车)”，解决了目前检测设备精确度低、工作时间受限等技术性问题。通过在役水下工程安全状况智能检测与评定成套技术研究，将研究成果转化到实际项目中，研究成果已先后在 15 座船闸、43 个港口码头、500 余公里高等级航道和 7 座桥梁等水下建筑健康诊治中应用，在船闸闸门故障抢修保通、码头建设汛期抢险应急、航道局部河床扫障保畅、航道沉船打捞救助实战中成效显著，缩短了整个抢通工作时间并减少处置费用的发生。

3.1　建设科创平台

2020 年 9 月，建设省级科创平台“安徽省水下建筑健康诊治工程研究中心”，形成成套的水下工程病害数据库中心，并形成一套成熟的水下工程检测与评定技术标准规范和专利技术，已于 2023 年 11 月通过省发展和改革委员会验收认定。并制定了中心中短期人才培育引进目标计划，培育和引进工程技术蛙人、病害诊治专家、科研攻关能手、结构修复工匠等人才，打造一支具有水下工程检测与评定成套技术研发能力的核心团队。

同时平台配置了国内最先进的以水为主、陆空兼顾、多维度、全方位的高端智能化仪器设备。主要包括水下三维实时成像声呐、无人测量船、多波束测深系统、侧扫声呐、水下机器人（ROV）、管道机器人、潜水装备、测量机器人、无人机（集成智能测绘系统）等，多类型水下高端智能化仪器设备的配备为水下工程的安全保驾护航。

3.2　研发新型检测设备

水下工程多功能检测移动平台 (综合检测车) 集成创新装备研制下线。自主攻关、联合开发的重大技术装备——“水下工程多功能检测移动平台 (综合检测车)”（图 1）已通过验收，水下工程多功能检测移动平台 (综合检测车) 系统架构由下至上分为检测对象层、基础支撑层、数据层、应用层。检测对象层包括桥梁、码头、船闸、航道等涉水建筑物；基础支撑层包括移动平台、“无人机 + 系统”“无人船 + 系统”“水下机器人 + 系统”等设备，主要是为数据层提供相应数据资源；数据层通过数据接口、文件接口，以及人工录入等方式将数据接入，

包括传感器数据、图像数据、环境数据、分析数据等数据，并经过边缘计算、云端辅助分析、多源数据融合、综合评估决策，将数据处理分析结果传达到应用层。应用层利用前端综合检测、平台处理处置、后端指挥调度，最终实现快速化反应和集成化处置。

水下工程多功能检测移动平台 (综合检测车) 通过水下工程多维度 (水下、水面、水上) 单兵检测系统集成控制，打造了立体化综合检测移动平台，将系统解决水下工程病害检测难、效率低、不全面、数据处理不及时、无法快速综合分析评估决策、不能快速化精准应急处置等行业痛点难点问题，实现水下工程专项检测、环境监测、现场指挥、应急救生等四大功能，同时具备快速化反应、智能化检测、自动化预警和集成化处置等四大特性，以提升水下工程综合检测效率和安全保障能力，如图 1 所示。



图 1　水下工程多功能检测移动平台 (综合检测车)

3.3　技术标准与专利研究

为全面推进试点项目落地，省交科院制定了十四五“1+3+10+N”阶段性科研体系。相关科研项目先后列为省交通运输厅行业重点科技项目，省国资委、省科技厅科技创新关键核心技术“尖 30”“尖 20”等攻关项目。在水下工程结构物检测与评定技术研究方面针对内河水下工程结构物检测与评定有了重大突破，目前已授权 9 项专利，已受理 11 项专利技术。同时，已发布实施安徽省地方标准 5 项、报批 1 项、正在编制 4 项，其中 DB34/T 4307.1-2022《内河水下工程结构物检测与评定技术规范 第 1 部分：桥梁部分》、DB34/T4307.2-2022《内河水下工程结构物检测与评定技术规范 第 2 部分：港口部分》、DB34/T4307.3-2022《内河水下工程结构物检测与评定技术规范 第 3 部分：船闸部分》、DB34/T4307.4-2024《内河水下工程结构物检测与评定技术规范 第 4 部分：拦河坝部分》、DB34/T4342-2022《内河航道健康养护技术规范》等地标的发布实施，为安徽省水下工程检测提供了标准依据，解决我省水下工程结构物 (船闸、大坝、桥梁、港口) 检测内容方法不明确不具体，且缺少评价方法等问题，填补了省内空白。

3.4　典型应用案例

通过自主研发的水下工程多功能检测移动平台集成创新装备的投入使用及多项地标实施的效果来看，目前已基本建成 15 座船闸、43 个港口码头、500 余公里高等级航道和 7 座桥梁等的水下病害数据库，研究成果已先后在 15 座船闸、43 个港口码头、500 余公里高等级航道和 7 座桥梁等水下建筑健康诊治中应用，在船闸闸门故障抢修保通 (见图 2)、码头建设汛期抢险应急 (见图 3)、航道局部河床扫障保畅、航道沉船打捞救助实战中成效显著，缩短了整个抢通工作时间并减少处置费用的发生，后续充分利用省港航集团水运设施等资源优势，通过在船闸、港口码头、航道等临跨河建筑物水下工程典型项目的应用，验证研究成果的可行性与可操

作性，不断优化试点成果。

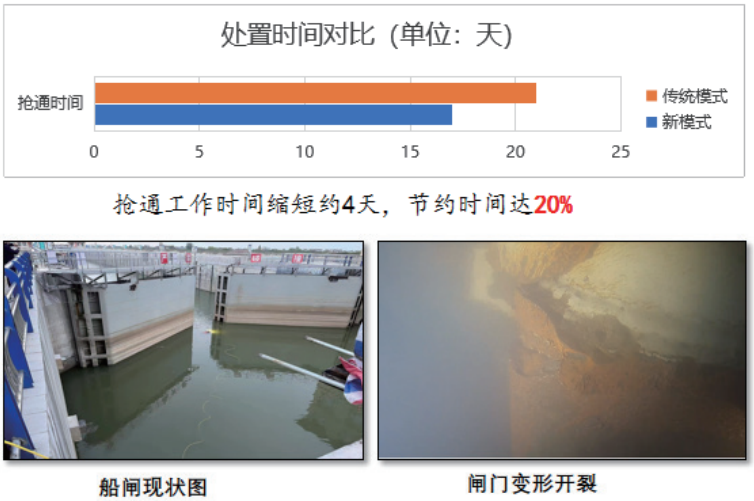


图 2　某船闸闸门故障抢修保通实战

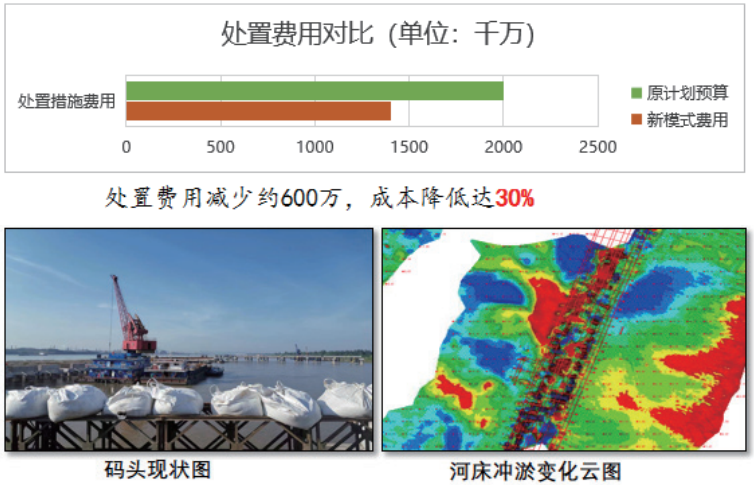


图 3　某码头建设汛期抢险应急

4　结　语

在役水下工程安全状况检测与评定技术是控制水下工程质量的关键，其监测成果对整治工程施工质量评定、工程的维护加固等方面提供重要依据。同时水下工程检测与评定技术研究具有广泛的推广前景，加强水下建筑物质量检测系统的技术研究，形成程序化的检测流程，为促进港口、航道、船闸、桥梁等水下工程检测与评定技术的发展起到重要的作用。目前省交科院已基本建成水下工程安全状况智能检测与评定标准体系，为安徽省内部分在役水下工程安全状况解决了技术性难题，但现阶段水下工程在安全状况的检测与评定仅在船闸、航道水下工程检测、测量等方面得到应用，在港口码头、桥梁涵洞等水下工程检测中应用相对较少。下一步将大力推动港口码头及桥梁涵洞等水下工程的安全状况智能检测与评定技术推广，加快推动成果工程化、产业化和规模化应用。

作者简介：
汪凡文，安徽省交通科学研究院董事长、正高级工程师，（Email）wfw-520@qq.com,13856907276

BIM 技术在临淮岗复线船闸设计和施工中的应用

焦钘宇

（安徽水安建设集团股份有限公司，安徽合肥　430000）

摘　要：在传统的船闸设计和施工模式下，普遍存在各专业设计人员沟通不畅导致设计冲突、施工人员对设计图纸理解偏差导致返工、施工现场“人机料法环”管理不到位导致意外情况发生等情况。本文以临淮岗复线船闸工程为具体案例，对 BIM 技术在船闸设计和施工中的应用进行介绍，探讨如何突破传统模式下的重难点，总结经验为类似工程提供参考和借鉴。

关键词：BIM 技术；船闸设计和施工；协同设计；智慧工地

0　引　言

BIM 技术是将工程项目全生命周期中不同阶段的各种信息集中在一个多维模型中，目的是为了实现项目全生命周期管理、优化资源分配、缩减工程开支、提升工作效率等。

BIM 技术在船闸工程中的应用经过前期的研究和探索，已经逐步形成一些固定模式，并在各个项目上进行推广。目前 BIM 技术在船闸工程设计和施工中的主要应用包括三维协同设计、碰撞检测、工程量统计、可视化交底、智慧工地等。随着应用的不断深入，BIM 已经逐渐成为船闸工程全生命周期不可或缺的重要技术。

在临淮岗复线船闸工程中，通过 BIM 技术在设计和施工阶段的深入应用，并结合项目具体情况运用了多项自主研发的软件工具，克服了传统模式中普遍存在的难点，对降本增效起到了非常重要的作用。

1　工程概况

临淮岗复线船闸工程与现有临淮岗船闸平行布置，轴线间距 120 m，设计等级为 II 级船闸，设计船舶吨级为 2000 吨级，船闸有效尺度为 240 m × 23 m × 5.2 m。复线船闸由船闸主体、导航靠船建筑物、引航道、跨闸桥等工程组成，工程拆除城西湖船闸，退建城西湖蓄洪堤、复建主坝。

2 BIM 应用模式及路径

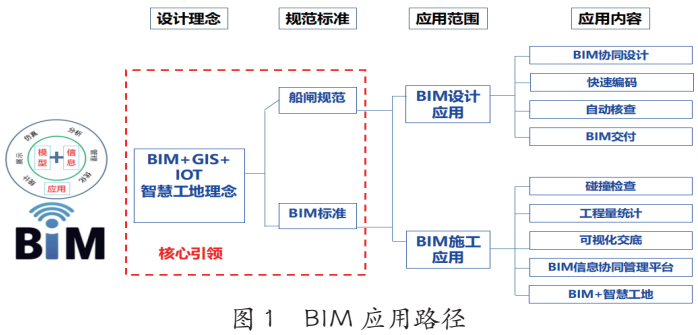


图 1　BIM 应用路径

临淮岗复线船闸 BIM 技术总体应用采用“4+1”模式，即一套 BIM 标准体系，一套 BIM 设计和施工应用方案，一个 BIM 信息协同管理平台，一套工程数据资源，最终构建一套信息全面的数字资产。

3 BIM 设计应用

3.1 BIM 协同设计

传统的船闸设计是以图纸为中心，各专业按照设计流程依次完成本专业的设计任务，设计信息被分散在多个图纸文件中。这样的设计模式往往导致成果不够直观，不容易发现不同专业设计存在的冲突，进行变更时又花费大量的时间在修改图纸和协调沟通上，影响设计效率。

在临淮岗复线船闸工程中基于 BIM 协同设计平台，借助三维引擎轻量化浏览模型，利用网络数据共享、可视化共享、视频会议等手段实现跨部门、跨地域的设计沟通和流程管理。项目经理将船闸初步设计模型按照总图、金属结构、水工、建筑、电气等专业拆分为船闸单体模型、金属结构、跨闸交通桥等不同单体模型，并在平台上分配任务给相应专业。各专业建模人员在同一个平台上，采用工作集或文件链接的方式进行深化设计，并根据模型定期共享规则，在设计关键节点开展专业间的沟通协作。设计模型经轻量化处理、二三维联动校审测试后进行发布。最后将地物模型、地质模型、各专业设计的构建模型进行集成，就形成了项目完整的 BIM 模型。通过分析整体模型，各专业之间可以协调优化，对设计进行检查，给出最佳的设计方案。相较于传统的二维平面设计方式，运用 BIM 技术的三维协同设计的设计成果更加直观，并且可以及时发现各专业间存在的问题和冲突，最终项目设计变更数量仅为传统设计模式下类似项目的 1/5。

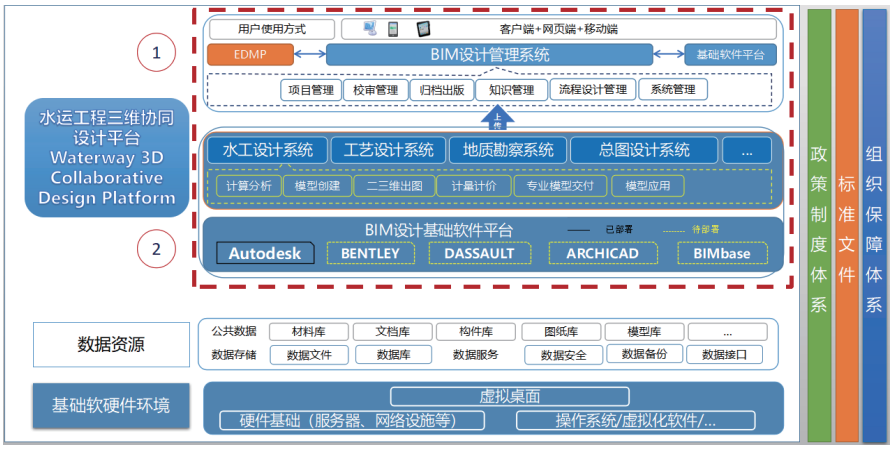


图 2 协同设计管理平台总体架构

3.2 统一构件编码

在 BIM 设计中，所有模型构件都要进行分类和编码，以便于快速和准确的查找构件信息，施工过程中同样需要依靠模型编码进行工程量统计、造价、采购等。由于设计和施工阶段对于构件分类时关注点不同，设计阶段一般按照专业划分，施工阶段则按照工序划分，导致两个阶段构件编码标准不同，最终构件在设计和施工阶段的编码也不同，造成构件在设计和施工阶段的信息无法打通。而后期统一设计与施工构件编码的操作非常繁琐，往往要花费大量人力和时间。

临淮岗复线船闸工程基于交通运输部颁布的《JTS/T-198-1-2019 水运工程信息模型应用统一标准》，在设计和施工阶段采用统一的编码标准。船闸工程信息模型采用面分类方法，分类对象包括成果、进程、资源和属性，编码采用全数字表达方式，模型中信息的分类编码由代码和对象名称组成，分类对象编码由 5 个层级代码组成，相邻代码之间采用“.”间隔，分类对象编码位数不足 5 位时采用“0”补齐。统一编码实现了设计信息向施工高效无偏差的传递，串联了所有业务信息，打通设计与施工阶段的信息孤岛。此外，运用自主开发的希迪模型

编码工具，实现构件的快速编码，编码速度较传统编码方式效率提高 60% 以上。



图 3　希迪模型编码工具

3.3　自动核查

临淮岗复线船闸工程运用自主开发的模型合规自动核查工具，对创建的模型信息内容进行一键自动化检查，确认是否符合《JTS/T-198-2-2019 水运工程设计信息模型应用标准》的相关要求，并对存在的错误信息进行提示，以便设计人员进行复核和修改，自动核查工具的准确率可以达到 98% 以上。

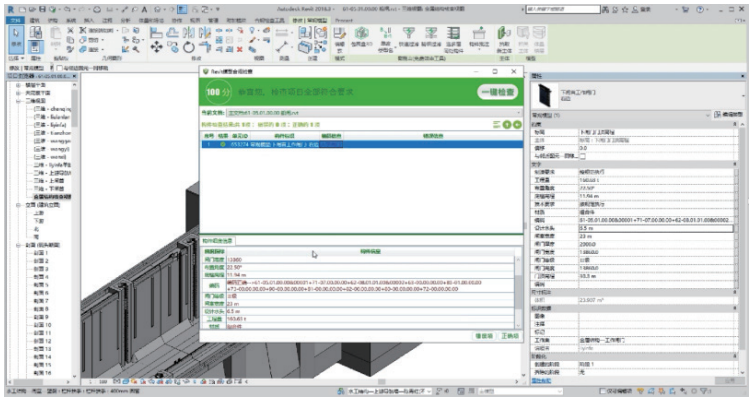


图 4　模型合规自动核查工具

3.4　BIM 交付

临淮岗复线船闸工程运用自主开发的 BIM 交付工具进行模型输出，将所有单体级、构建与设备级、零件级模型有序存储于指定文件夹中。在项目级文件夹内包括单体清单、项目级信息表格；在船闸单体文件夹内包括水工、金属结构两个专业级文件夹，同样包括构件清单和单体级信息表格。

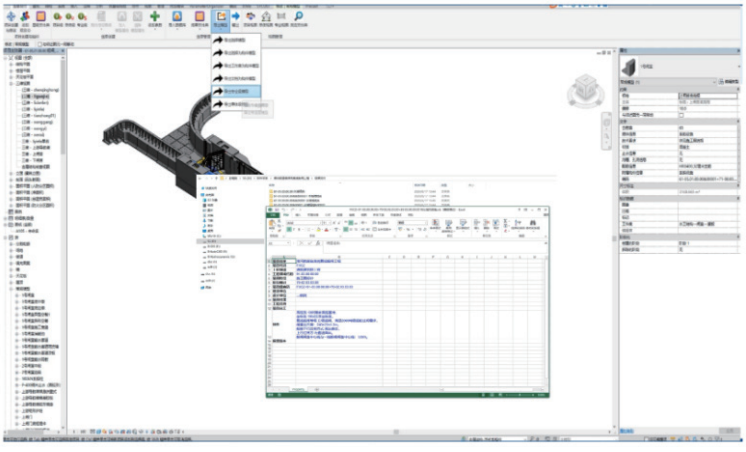


图 5　BIM 交付工具

4 BIM 在施工中的应用

4.1 碰撞检测

在传统船闸设计中，在二维图纸中不能清晰了解闸首等活动结构的走势，导致在施工时才发现可能产生碰撞，造成工期延误和额外费用。

而利用 BIM 技术进行碰撞检查，可以在施工前及时发现问题。在 Revit 软件中将各单体中心文件按专业分别导出 NWC 文件，在 Navisworks 软件导入各单体的 NWC 文件，进行专业内及专业间的协同检查。例如：在钢筋半成品加工前利用 BIM 模型对钢筋、预埋筋进行预拼装，如果发现碰撞问题，可以提前通知钢筋加工班组进行调整，避免返工。在临淮岗复线船闸工程中，通过碰撞检查发现主要问题 12 处，其中以上下闸首的碰撞问题居多，原因主要是闸首结构形式复杂、交叉专业多。根据统计，通过碰撞检查提前发现问题并进行处理，使工程减少了变更 6 个，节省了大量工程费用和工期。

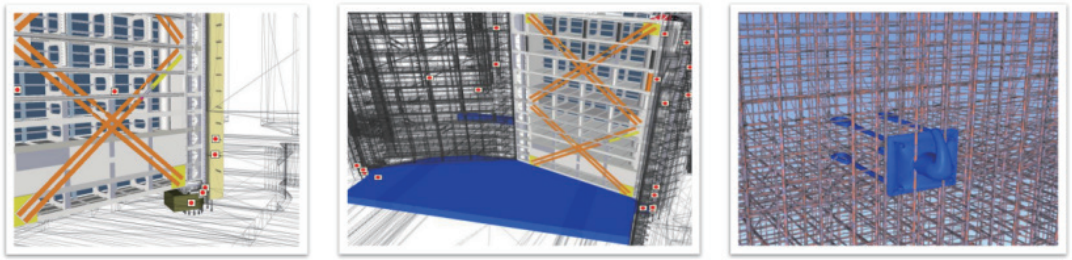


图 6 碰撞检测

4.2 工程量统计

传统的工程量统计方式，依据图纸进行手算或借助软件计算，计算结果相对粗放且容易产生争议。

临淮岗复线船闸工程采用基于 BIM 的计量支付管理技术，将工程量清单细化到每个工程构件，实现了每个构件工程量和 BIM 模型的一一对应，让每个构件有量可依，有价可询，实现了构件级的精细化计量支付管理，并避免了重复计量。此外，运用自主研发的工程量提取插件，结合 Civil3D 和 Revit 快速提取 BIM 模型工程用量（土方、砼、钢筋等）并生成工程量清单，进行数据统计和成本控制，与传统算量方式偏差在 2% 以内，偏差主要来源于非规则形状构件，属于合理范围内。

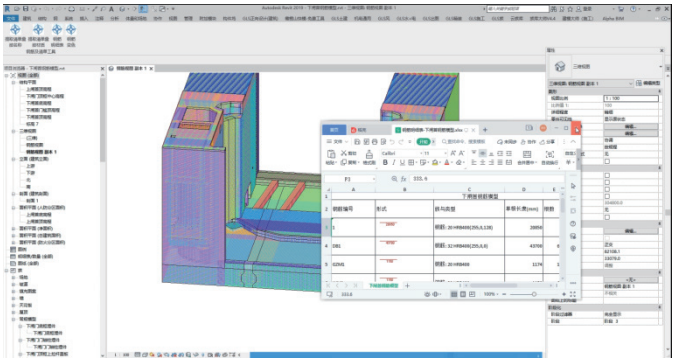


图 7 工程量提取插件

4.3 可视化交底

传统的技术交底模式主要以二维图纸、图片和文字的方式，而安全交底往往流于形式，施工人员往往无法完全掌握设计细节和安全风险点。

临淮岗复线船闸工程利用 Navisworks、3dMax 等软件对 BIM 模型或模型构件进行加工，利用 Fuzor 软件对施工方案进行虚拟仿真模拟，对已有的施工方案进行验证、优化和完善。在施工模拟过程中制作相关交底的三维模型及施工动画，并通过模型、VR、图册等形式进行可视化交底，形象和清晰地反映施工的重难点和安全质量控制点，加深了管理和施工人员的理解。

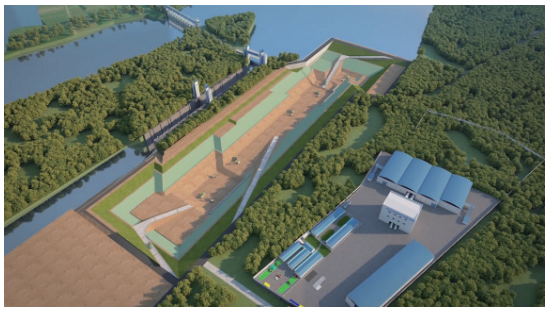




图 8　基坑开挖施工方案模拟及 VR 可视化交底

4.4　BIM 信息协同管理平台

传统的项目施工管理模式，流程审批和过程数据一般采用纸面记录和报表的形式，填报费时且不易归档保存。

临淮岗复线船闸工程采用信息协同管理平台的方式，实现施工过程的无纸化管理。平台包含工程首页、业务平台和 BIM 平台 3 大板块，功能涵盖项目施工的安全管理、进度管理、计量支付、质量管理等。运用 BIM、GIS、物联网、5G 等关键技术手段，为工程建设提供信息化管理支撑、数字化资料存储途径和三维可视化信息表达方式，为项目管理者提供效率更高的管理手段，为项目作业人员提供更便捷的作业记录工具。

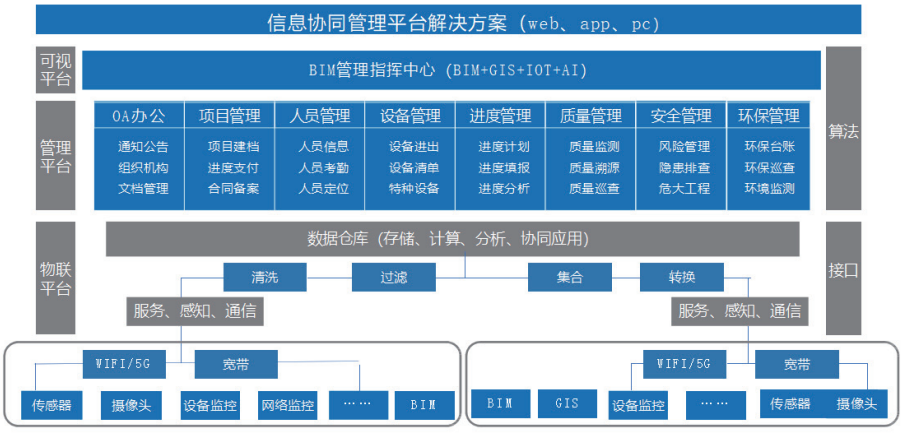


图 9　信息协同管理平台框架



图 10　信息协同管理平台界面

4.5 BIM+ 智慧工地

由于传统的施工现场管理往往存在劳动力密集、管理粗放等特点，导致现场容易发生违规操作和不文明施工，物料信息更新不及时，容易出现环境污染问题等。

临淮岗复线船闸工程将BIM信息协同管理平台与智慧工地系统相结合，集成视频监控、人员管理、设备管理、物料管理、安全监测、环保监测等物联网设备。实现了对现场施工人员的识别和定位等动态管理，对工程车辆和机械等设备状态实时监管，对物料入库和领用的动态管理，对扬尘、噪音等环境参数进行监测和告警，施工人员可使用手机客户端进行质量和安全巡检记录，实现了施工全程数字化、可视化、可留痕和可追溯。

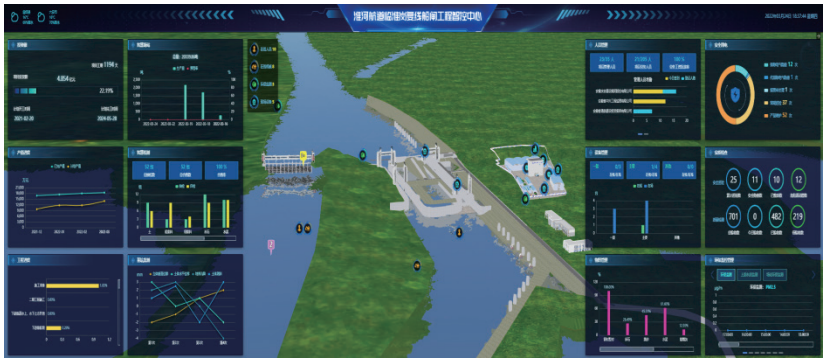


图 11　智慧工地系统

5　结　语

1）BIM 在船闸协同设计中的应用，使设计成果和设计冲突更加直观，方便了各专业间沟通和协调，减少了制图工作量，提高了设计效率。

2）船闸在设计和施工阶段采用统一编码标准，有利于实现了设计信息向施工无偏差的传递。

3）BIM 在船闸碰撞检测中的应用，可以在施工前发现问题，减少返工导致的工期和费用损失。

4）BIM 在船闸项目工程量统计、可视化交底、信息协同管理、智慧工地上的应用，大大提高了船闸施工的科学管理水平，为工程的质量、安全、进度、成本管理提供了保障。

参考文献

[1] 周超，何英发 .BIM 技术在船闸施工中的应用研究 [J]. 价值工程，2022（7）：163-165.

[2] 王学锋，吴鹏程，赵渊，黄天荣 . 基于 BIM+ 理论的船闸工程建设新模式 [J]. 水运工程，2015(12):123-127.

[3] 颜红亮，周坤，李鸿忠 . 船闸工程金属结构模块设计 BIM 技术应用 [J]. 水运工程，2021(8):163-168.

[4] 李玲君，陈璐 .BIM 技术在船闸三角闸门设计中的应用 [J]. 水运工程，2019(6):147-151.

[5] 陈达非，谢明泉，马云飞，张文亮，马嘉霖 .BIM 竣工模型交付应用研究 [J]. 建筑技术，2019（4）：458-460.

[6] 李佩琪，綦春明，韦春昌，蒋金湖 . 基于 BIM 和物联网技术的建筑项目智慧工地施工安全管理的研究 [J]. 项目管理技术，2022（6）：48.

[7] 刘莉，牛作鹏 . 基于 Civil3D 的三维地质覆盖层建模技术及应用 [J]. 水运工程，2021(4):153-157.

作者简介：

焦钘宇，BIM 工程师，中级工程师，（E-mail）379674871@qq.com,15956518584

港航水运的数字化技术应用

金　锐　洪　艳

（安徽建工路港建设集团有限公司，安徽合肥　23000）

摘 要：随着数字化技术的迅速发展，港航水运业也开始探索和应用这些技术以提升运营效率和安全性。本文深入探讨了数字化技术在港航水运中的应用，从智能化管理、数据分析与优化、安全与环保技术及用户体验四个方面入手，提出了一系列的应用策略。本文旨在为港航水运的数字化转型提供理论指导和实践参考。

关键词：港航水运；数字化技术；智能化管理

0　引　言

港航水运作为全球贸易和经济活动的重要支撑，其效率和安全性对全球供应链有着至关重要的 影响。数字化技术的应用不仅能够提高港航水运的 运营效率，还能增强其安全性和环保性。本文针对港航水运的数字化转型进行深入研究，探讨如何有效利用数字技术改进和优化水运系统。

1　智能化管理

1.1　港口物流自动化

港口物流自动化是智能化管理的核心组成部分之一。通过运用机器学习和人工智能技术，港口可以实现货物处理和物流过程的优化。（1）机器学习技术可以分析大量的货物数据和运输模式，以预测货 物到达和离开的时间，从而帮助港口更好地规划和安排货物。（2）人工智能可以用于自动化的货物处理，包括自动起重机和输送带系统，从而减少人工干预，提高处理效率。这不仅降低了港口的运营成本，还减少了货物滞留时间，提高了货物周转率。（3）智能化管理还可以通过优化货物存储和仓储来提高港口的利用率。机器学习可以帮助港口识别最佳存储位置，并根据货物的到达时间和目的地进行智能分配。这种智能的存储和仓储管理可以确保货物以最有效的方式进行处理，减少了拥堵和等待时间。

1.2　船舶运行监控

船舶运行监控是另一个关键领域，通过应用大数据和物联网技术，实现对船舶实时监控和运行管理。大数据分析可以追踪船舶的位置、速度、货物装载状态等关键信息。这使港口管理人员能够实时了解船舶的位置和状态，有助于更好地协调和调；度大数据还可以用于预测船舶抵达时间，帮助港口提前准备和规划。物联网技术则可以实现对船舶各个系统的监控。例如：传感器可以监测发动机性能、燃油消耗、船舶结构的健康状况等。这些数据 的实时监控可以帮助港口管理人员及时识别并应对潜在问题，减少船舶故障和事故的风险。物联网技术还可以用于船舶设备的远程维护和诊断，提高了维护的效率和及时性。

1.3　航道管理优化

航道管理优化通过利用地理信息系统 (GIS) 和远程感应技术来提高航道管理的效率和精度。GIS 技术可以为港口提供详细的地理信息，包括水深、潮汐、浮标位置等。这些信息对于船舶导航至关重要，可以帮助船

舶避免潜在的危险和障碍物。远程感应技术可以用于监测航道的实时情况。例如：港口可以使用远程摄像头和传感器来监测航道的交通情况和气象条件。这些数据可以用于实时导航和决策支持，帮助船舶避免拥堵和不利的天气条件；远程感应技术还可以用于监测航道上的环境状况，如水质和水生生物，以支持环保措施的实施。

2 数据分析与优化

2.1 运输路线优化

通过利用数据分析技术，港口和航运公司可以 更好地规划航线，减少不必要的航程，从而降低燃 油消耗和运输成本。数据分析可以利用历史航运 数据和实时信息来确定最佳航线。通过分析航线上的天气、水深、潮汐和航道情况等因素，可以避免 延误和停滞，提高运输效率。例如：可以根据潮汐和气象条件来规划最佳的抵达和离开时间，以确保船只以最低的燃油消耗安全地通过航道。数据分析 还可以帮助港口和航运公司优化货物装载和卸载顺序，从而减少货物的滞留时间。通过分析货物的类型、数量和目的地等信息，可以合理安排货物的存储和运输，减少装卸时间和成本。

2.2 需求预测与资源配置

需求预测与资源配置是港航水运业中的另一个关键领域，通过分析历史数据预测未来需求，合理配置资源，可以有效降低运营成本并提高运输效率。 数据分析可以用于预测货物运输的需求量和类型。 通过分析历史运输数据、市场趋势和季节性变化，可以预测未来的货物需求。这有助于港口和航运公司做出及时的资源配置决策，以满足市场需求。例如：在需求高峰期增加船只和货物处理设备的投入，以应对需求的增加。数据分析还可以帮助港口和航运公司更好地管理库存和货物存储。通过分析货物的到达时间、目的地和存储需求，可以合理安排货物的存储和运输，减少库存成本和滞留时间。这有助于提高库存周转率，降低货物损耗和运营成本。数据分析还可以用于资源的动态调配。通过实时监测货物流动和运输状况，可以根据需要重新分配资源，以应对突发事件和需求变化，有助于提高运输的灵活性和响应能力，减少运输延误和滞留时间。

2.3 风险评估与应对

港航水运面临各种潜在的风险，包括天气恶劣、 船只故障、货物损失等。数据分析可以用于风险评估和应对计划的制订，以减少风险对运营的影响。（1）数据分析可以用于预测潜在风险。通过分析历史数据和环境条件，可以识别可能导致问题的因素，并进行风险评估。例如：分析天气数据可以帮助预测恶劣天气对航行的影响，从而采取相应的措施，确保航行的安全性。（2）数据分析还可以用于制订应急响应计划。通过模拟不同情景和采取不同的措施，可以确定最佳的应急响应策略。这有助于港口和航运公司在面临突发事件时能够迅速做出决策，并采取适当的措施，最大限度地减少损失。

3 安全与环保技术

3.1 船舶安全监控系统

船舶安全监控系统的引入可以显著提升船舶运行的安全性，从而降低事故风险并减少损失。高级监控系统的使用可以对船舶运行状况实时监控。传感器和监控设备的安装使得船舶能够实时传输各种关键数据，包括船舶位置、速度、航向、货物状态和燃料消耗等。[4] 这些数据的实时监控使得船舶操作人员能够更好地了解船舶的运行情况，及时发现潜在问题并采取措施，从而提高了船舶的安全性。 高级监控系统还可以用于预测潜在的安全风险。通过对历史数据和实时数据的分析，可以识别潜在的 问题和风险因素，如恶劣天气、海盗袭击、设备 故障等。这种预测性分析使得船舶操作人员能够提 前采取措施，避免各种风险对船舶运行造成威胁。高级监控系统还可以提供紧急情况下的应急响应支持。在事故或紧急情况发生时，监控系统可以自动发出警报并

提供详细信息，如位置、状况等。这有助于船舶操作人员更快速地做出决策，并开展紧急救援行动，从而降低事故的严重程度。

3.2 排放控制与环保

在面临日益严重的环境问题的背景下，港航水运需要应用数字技术来监控和控制船舶的排放，以减少对环境的影响。通过在船舶上安装传感器和监 控设备，可以实时监测废气和废水排放的成分和数量。这使得船舶操作人员和监管机构能够更好地了解船舶的排放情况，确保其符合法规要求。数字技术还可以用于控制船舶的排放。船舶可以配备排放控制设备，如废气处理装置和废水处理系统，以减 少排放物的数量。这些设备可以根据监测数据自动调整运行模式，以获得最佳的环保效果。数字技术还可以用于数据记录。船舶可以配备数字记录仪和通信设备，将排放数据实时传输至监管机构和港口当局。

3.3 应急响应机制

建立基于数字技术的应急响应机制是确保港航 水运安全与环保的又一重要方面。这一机制的建立可以有效应对突发事件，如事故、火灾、污染事件等，降低损失并保护生态环境。（1）数字技术可以用于快速检测和识别突发事件。监控设备和传感器可以实时监测船舶和港口区域的情况，并自动发出警报，一旦发生突发事件，操作人员可以迅速获得信息，采取适当的措施。[5]（2）数字技术可以用于协调 救援行动。一旦突发事件发生，应急响应系统可以自动通知相关部门和机构，协调救援人员和资源，确保救援行动的迅速响应和协调。（3）数字技术还可以用于事后分析和改进。一旦事故得到控制和解决，监控数据和事件记录可以用于事后分析，以确定事故的原因和责任，并提出改进建议，以减少类似事件的再次发生。

4 用户体验

4.1 数字化客户服务

数字化客户服务是通过利用数字平台和技术来提供更便捷、高效的客户服务和交互体验。（1）数字化客户服务可以用于客户关系管理 (CRM)。 港航水运公司可以建立客户数据库，并利用数据分析技术 更好地了解的客户需求和偏好。这有助于提供个性 化定制服务，提供更符合客户期望的运输解决方案。 数字化 CRM 系统还可以实现客户服务的自动化，包括在线预订、货物跟踪和支付等，减少了人工操作， 提高了服务效率。（2）数字化客户服务包括在线客户 支持和咨询。通过建立在线客服平台，客户可以随 时随地获取信息、提出问题并获得即时答复。这种实时互动的机制提高了客户满意度，减少了客户等 待时间，提高了客户忠诚度。数字化客服还可以整合多渠道，如电子邮件、社交媒体和手机应用程序， 以满足不同客户的需求。（3）数字化客户服务也包括客户反馈和评估机制。港航水运公司可以利用数字 平台收集客户的反馈和建议，以不断改进服务质量。

4.2 透明化货物跟踪

透明化货物跟踪是指通过数字技术提供实时 的、可视化的货物跟踪服务，以提高物流透明度 和客户信任度。透明化货物跟踪可以实现货物跟踪的实时性。通过在货物和运输设备上安装传感器和 GPS 追踪器，港航水运公司可以实时监测货物的位置和状态。客户可以通过在线平台随时查看货物的 实时位置，了解货物的交付进度。这种实时性的跟踪服务有助于客户更好地管理供应链。透明化货物 跟踪可以提供详细的货物信息。客户不仅可以知道货物的位置，还可以查看货物的运输历史、温度、 湿度等详细数据。这有助于客户更好地监控货物的 状态和质量，及时发现问题并采取措施。数字化货 物跟踪还可以提供异常情况的警报和通知。如果货物发生异常，如延迟、损坏或丢失，系统可以自动发出警报，并通知客户和相关部门。这有助于及时 处理问题，减少损失，并提高客户的信任度。

4.3 增强现实与虚拟体验

增强现实 (AR) 和虚拟现实 (VR) 技术在改用户体验方面具有巨大潜力：AR 和 VR 技术可以用于虚拟港口

导览。客户可以通过 AR 应用或 VR 眼镜 体验虚拟港口导览，了解港口的结构、设施和运营 过程。[6 这种虚拟体验可以帮助客户更好地了解港口运作，提高其对港口的信任度和满意度。这对于 新客户或潜在合作伙伴特别有用，因为他们可以在实际参观之前先进行虚拟导览。AR 和 VR 技术还可 以用于培训和模拟。港航水运公司可以利用 AR 和 VR 技术创建虚拟培训环境，培训员工和船员，模拟各种操作和紧急情况。这有助于提高员工的技能水平，减少事故风险，并提高安全性。AR 和 VR 技术还可以用于客户交互。客户可以使用 AR 应用或 VR 眼镜与港航水运公司开展虚拟会议，讨论合作细节、运输安排和货物状态。这种虚拟交互可以节省时间和成本，增强了灵活性，并提高了客户的满意度。

在数字化技术的推动下，港航水运业正在不断改进用户体验，提高运营效率，增强安全性和环保性。通过数字化客户服务、透明化货物跟踪和 AR/ VR 技术的应用，港航水运公司能够更好地满足客户需求，增加市场份额，并保持竞争力。未来，随着技术的不断发展，用户体验的改进将继续是港航水运业的重要发展方向。

5 结 论

通过对港航水运行业数字化技术应用的深入研究，我们可以看到数字化转型对于提升行业效率、 安全性和用户体验具有重要意义。智能化管理能够 优化运营流程，数据分析为运输路线和资源配置提 供科学依据，安全与环保技术确保了航运的可持续 发展，而优化用户体验则提高了客户满意度。本文强调，港航水运业应积极运用数字化技术，以实现 更高效、安全、环保和用户友好的运营模式。未来，随着数字技术的不断进步，港航水运行业将面临更 多创新和挑战。本文为业界提供了一份宝贵的指导和参考，为行业的数字化转型奠定了坚实的理论和实践基础。

参考文献

[1] 郭胜童，徐凯 . 全球航运数字化发展趋势及应 对建议 [J]. 中国远洋海运，2021(2):62-65.

[2] 王金昌 . 内河水运经济绿色发展探讨 [J]. 现代商 贸工业，2020,41(10):9.

[3] 陈会文 . 港航业“智慧化”建设逐步推进 [J]. 中 国港口，2018(4):21-25.

[4] 张敏 . 港航数字化逐梦“生态圈”[J]. 中国航务 周刊，2022(51):43-45.

[5] 徐凯，郭胜童 . 航运数字化转型发展面临的难 点及建议 [J]. 中国远洋海运，2021(9):30-34.

[6] 叶建国，曹一麟 . 运用数字化航道普查成果加 快港航信息化建设 [J]. 交通科技，2005(2):115-116.

作者简介：

金锐，本科，项目总工，港口与航道专业，19955151020

洪艳，本科，项目副经理，港口与航道专业，15605605512

构建安徽省航道综合管理平台 助力淮河干流航道航运发展

卢　斌[1]　尹小文[2]　姚　路[2]　罗时友[2]

（1. 安徽省港航建设投资集团有限公司，安徽合肥　230000；
2. 中水三立数据技术股份有限公司，安徽合肥　230000）

摘 要：为了贯彻落实《安徽省智慧交通建设方案（2021 – 2023 年）》建设思路，建设安徽省航道综合管理平台，实现对省内内河水上交通动态实时监控、通航环境管理、船舶监管，提升安徽省通航水域监管能力，同时也为管理人员及领导者提供决策依据。充分利用大数据平台开发应用能力提升淮河航道管理信息化水平，提高电子航道图综合服务水平，助力淮河干流航道航运发展，引领安徽省航道信息化建设，促进航运经济转型升级。

关键词：航道综合管理平台；航道管理；航运发展；信息化

1　研究背景

淮河干流航道是《全国内河航道与港口布局规划》中京杭运河与淮河水系高等级航道布局“一纵二线”中的一线，也是安徽省规划建设的“一纵两横五干二十一线”的全省高等级航道网中的“一横”。安徽段西起豫皖两省交界的三河尖，经南照集、霍邱、凤台、淮南、蚌埠、五河至苏皖两省交界红山头，全长 363.9 km，经过安徽省阜阳、六安、淮南、蚌埠、滁州五市，是安徽省北部的主要水运通道，是河南省、安徽省和江苏省物资交流的一条重要水运纽带，也是沿淮城市群融入长三角地区的一条重要水运通道。

近年来，安徽省的航运建设取得了显著进展。航道条件得到明显改善，货运量稳步增长，船舶吨位逐年提高，航运效益显著增加，内河航运的地位和作用进一步巩固和增强。随着合裕线航道按Ⅱ级标准升级的实施和引江济淮工程按Ⅱ级标准沟通长江与淮河，淮河干流航道部分航段仍不足Ⅲ级标准的现状成为安徽省主干航道网中的短板，从而限制了豫皖城市群、沿淮城市群与沿江经济带物资交流。

为响应国家“一带一路”和长江经济带等重大发展战略，增强系统统筹能力，加快干支流协同，实施基础设施标准化，共同建设全国“一张网”，补齐运输短板，安徽省政府提出建设“四个交通”，重点之一就是整治淮河干流航道，发挥淮河干流航道水运运能大、污染小、效能高、占地少的优势。通过贯彻落实《安徽省智慧交通建设方案（2021 – 2023 年）》建设思路，全面提升航道的公共服务能力和水平，缓解当前受自然演变和人类活动影响不断上升的航道养护管理压力，促进航运管理的转型升级，积极筹建了“全面感知、广泛互联、深度融合、智能应用、机制完善”的淮河干流航道整治工程信息化平台 - 安徽省航道综合管理平台。

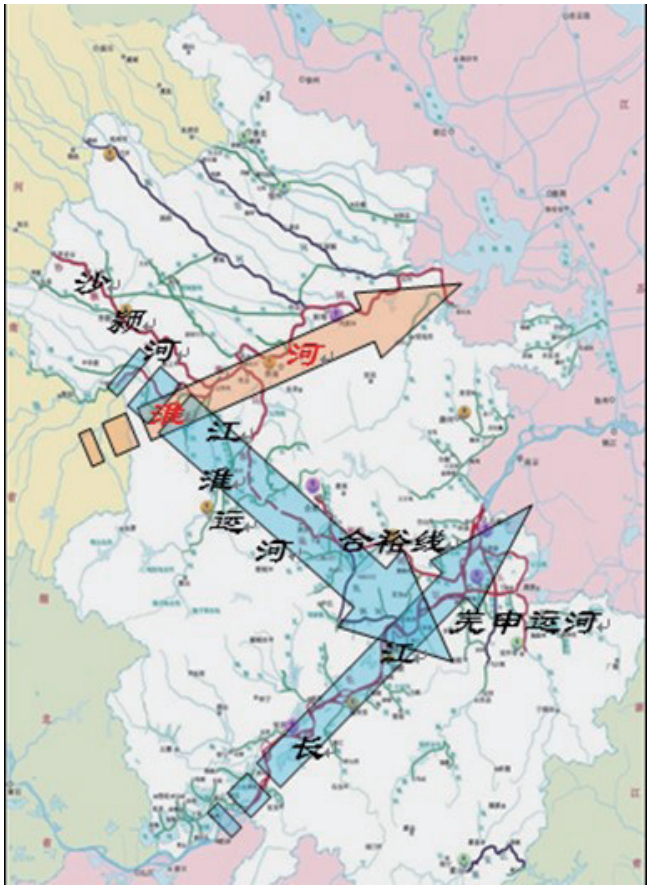


图 1　淮河干流安徽段地理位置图

2　安徽省航道综合管理平台

安徽省航道综合管理平台是通过接入安徽省淮河航道电子航道图数据以及外场感知系统采集数据等，利用区块链技术不可篡改、可追溯和易协作等特点，与港航集团、港投集团与各运营船闸、各运营港口企业等进行数据共享，同时接入安徽省已建的沙颍河、芜申运河、合裕线等内河航道信息化数据，实时展示安徽省内河航道的航道安全状态、船舶运行动态、船闸吞吐量动态以及港口营运情况等，实现对省内内河水上交通动态实时监控、通航环境管理、船舶监管等功能，打造安徽省通航水域综合化、智能化的航道综合管理平台。该平台主要建设内容有：安徽省淮河航道电子航道图制作、航道动态监测系统、航道运行监管系统、涉航工程建设监管系统、航道养护管理系统、航道信息服务系统、航道辅助决策系统、航运可视化展示系统、视频监控系统、船员端 APP 和管理端 APP 等。

安徽省航道综合管理平台主要作用有 10 个方面：

（1）满足航道动态监测的需求。基于淮河电子航道图，提供航道通航状态数据信息，通过通航状态数据的收集，实现实时查看、监督航道的通航状态，并对可能出现航道通航有影响的因素进行预警。

（2）满足航道运行监管的需求。建设航道运行监管系统，显示船闸和港口的基本信息、运营数

据和预警处置等，以及船舶的基本信息和监管等，采用区块链、现代化计算机信息及网络技术手段，结合现代化管理的科学理论和方法，实现对各类业务指标进行实时监控。

（3）满足涉航工程监管服务的需求。涉航工程监管系统通过实现对涉航工程建设过程监管信息，主要包括工程项目概况、项目阶段、项目进度信息等，并对工程项目信息进行多维度统计分析。

（4）满足航道信息服务的需求。通过接入省内已建设的电子航道图，采集航道要素、碍航物、通航环境

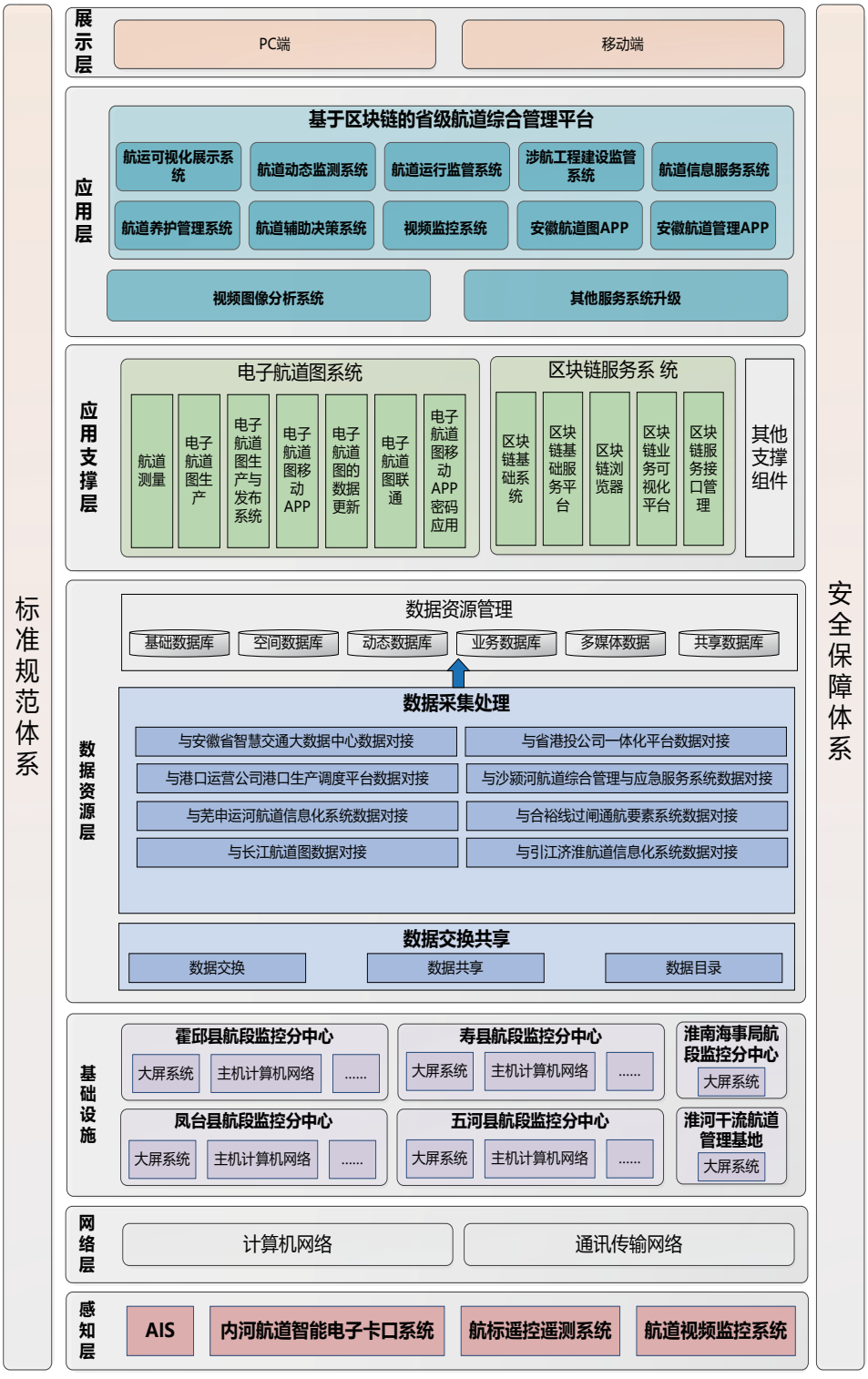


图 2　总体架构图

等相关信息，分析形成航道通航状态信息，并支持将采集到的信息周期性地发布到相关门户网站，便于社会船舶用户、航运企业实时掌握航道通航信息，合理安排船舶出行时间。

（5）满足航道养护管理的需求。建设航道养护管理系统，实现对航道维护工作计划制定和工作执行情况记录、工作船舶地理位置信息以及周边船舶信息显示、掌握船舶使用情况、物资消耗审批全流程在线办理等业务。

（6）满足航道辅助决策的需求。建设航道辅助决策系统，实现对航道通航状态、船闸生产状态、港口运营状态等数据的统计分析，预测预报风险，并针对风险进行评估及应急处置。

（7）满足视频监控的需求。建设视频监控系统，实现各级视频资源的接入与开发，实现对相关单位视频监控的联网及视频数据链上存储以及对所属场地的联合监控和协同调度，降低安全生产事故发生率。

（8）满足航运可视化的需求。基于内河航道电子航道图，构建内河航道通航状态一张图、船闸生产状态一张图、港口运营状态一张图、船舶航行安全一张图、涉航工程建设项目一张图、重点区域视频监控信息展示等业务功能，并建设领导驾驶舱，通过各种常见的图表形象化、直观化、具体化，实时、准确、可信地反映省内所有内河航运情况，满足业务需求。

（9）满足船员端通航服务的安徽航道图 APP 的需求。安徽航道图 APP 供船员用户使用，船员用户主要通过安徽航道图 APP 查询通航环境、通航水深、电子助航、预警提醒、问题上报等协助船员安全通航。

（10）满足监管端内河航道服务监管的安徽航道管理 APP 的需求。安徽航道管理 APP 供监管部门用户使用，监管部门用户通过移动互联网获取内河航道服务及监管内河航道运行状态，通过 APP 实现航道养护日常巡检、通航状态监测发现问题能及时发布公共信息等工作。

2.1 航道动态监测系统

基于航道电子航道图，提供航道通航状态数据信息，主要包括航道船舶流量、水位水深、航道气象、断面流量、货物流量、航标数据的数据信息，通过通航状态数据的收集，可以实时查看、监督航道的通航状态，并对可能出现航道通航有影响的因素进行预警，为领导决策提供数据依据。

2.2 航道运行监管系统

系统提供省内内河各船闸、港口基本信息、相关运营数据、预警处置信息等，使管理者可以清晰、直观地掌握各船闸、港口的生产状态情况，并将相关数据进行链上可信存储；同时，基于获取的相关系统数据，提供大数据分析功能，包括：过闸量分析、过闸船舶分析及过闸货物分析，港口吞吐量分析、泊位统计、货物统计及生产计划统计分析等，为管理决策提供有力的技术支撑。

系统通过整合 GIS（地理信息系统 / 电子航道图）、GPS（全球定位系统）、AIS（船舶自动识别系统）、BDS（北斗卫星导航系统）和 CCTV 等采集到的数据，实现船舶状况巡查、通航秩序巡查等任务目标，通过预警配置，为在航船舶提供航行指导，对异常的航行状态进行预警，及时消除事故隐患。

2.3 涉航工程建设监管系统

涉航工程建设监管系统实现对涉航工程项目建设过程进行监管，主要包括工程项目概况、项目阶段、监管情况、项目档案资料等，并对工程项目信息进行多维度统计分析。

2.4 航道养护管理系统

系统提供养护计划管理、养护作业管理、物资管理等功能，同时对工作船舶进行实时监管，掌握航道养护工作作业情况。

2.5 航道信息服务系统

系统提供电子地图浏览服务，通过接入省内已建设的电子航道图，管理人员可通过电子航道图显示界面对电子航道图进行操作。

系统针对各内河航道通航要素、碍航物以及通航环境进行实时数据采集，并分析形成航道通航状态信息，支持将采集到的信息周期性地发布到相关门户网站，便于社会船舶用户、航运企业实时掌握航道通航信息，合理安排船舶出行时间。

2.6 航道辅助决策系统

系统基于各种数据进行全面的统计分析，实现风险评估和辅助决策功能，并给出有效的建议，同时能够为

航道日常应急管理和突发事件应急决策提供支持。

2.7 视频监控系统

视频监控系统通过统一视频标准与接口，实现各级视频资源的接入与开发，并拓展多终端的视频展示模式，实现对相关单位视频监控的联网，并为后期新建视频监控系统对接预留接口。

2.8 航运可视化展示系统

系统实现对内河航道、船闸、港口等各类数据分析内容在地图的集成，提供可视化、直观高效的分析成果展示系统，通过区块链保证数据不可篡改、历史数据与实时数据的分析与数据挖掘，实现对内河航运的管理决策支持。

2.9 安徽航道图 APP

安徽航道图 APP 供船员使用，提供船员用户助航功能，安装于手机、平板等移动终端设备，通过移动终端应用服务系统，为航行船舶、船员等用户提供更加便捷高效的个性化、公众化及定制化服务，便于用户获取内河航道通航环境、通航水深、电子导航、预警提醒、问题上报等需求，同时对定线制、视频截图、船舶航行等在线查看，在航道内进行航标配布、水位、航道维护尺度信息，以及锚地、航行碍航物、临过河建筑物、境界和地名、沿岸地物、沿岸地貌、沿岸岸线等信息关键字查询浏览功能等操作。

2.10 安徽航道管理 APP

安徽航道管理 APP 供监管部门用户使用，监管部门用户通过移动互联网获取内河航道服务及监管内河航道运行状态，包括内河航道设施信息、内河航道船闸信息、内河航道港口信息、内河航道养护信息、内河航道视频监控信息、内河桥梁通航监测信息、内河航道断面监测信息、内河航道动态监测信息。

基于航道电子航道图，提供航道通航状态数据信息，主要包括航道船舶流量、水位水深、航道气象、断面流量、货物流量、航标数据的数据信息，通过通航状态数据的收集，可以实时查看、监督航道的通航状态，并对可能出现航道通航有影响的因素进行预警，为领导决策提供数据依据。

3 安徽省航道综合管理平台建设进展与展望

3.1 进 展

该项目 2023 年启动建设，由中水三立数据技术股份有限公司负责该系统设计开发、安装和培训等工作，目前已完成预验收，并投入试运行。安徽省淮河航道电子航道图制作标准与“长江航道图”接轨，其中包括自动收集、分析和处理河床数据、航道尺寸、航道发展、水文数据、航标和其他辅助航行设施、水位变化以及历史演变资料等信息，并建立数字化模型等。通过全新的信息化管理模式提升航道维护管理水平，提供航道发展的预测以及维护决策支持等。从而进一步提升了淮河航道综合管理服务水平，为淮河航运提供科技助力，促进淮河航道现代化与管理信息化、智能化的发展。

3.2 展 望

安徽省航道综合管理平台的构建将成为推动淮河干流航道航运发展的强劲引擎，引领航运经济迈向智能化、高效化、绿色化的新时代。平台深度融合大数据、区块链、物联网等前沿技术，实现对航道资源的全面感知、动态监测与智能调度，构建起一个集信息汇聚、数据分析、决策支持、服务提供于一体的综合性管理体系。

通过安徽省航道综合管理平台的开发应用，能够实时收集分析航运数据，包括但不限于船舶航行轨迹、水位变化、航道通行能力、气象环境信息等，为航运管理部门提供了数据支撑和决策依据，提升航道管理的精细化水平和应急响应能力，优化了航道资源配置，减少船舶等待时间和能源消耗，提高航运效率和安全性。

平台促进航运经济的转型升级。一方面，通过数据共享与业务协同，推动航运产业链上下游企业的紧密合作，形成优势互补、互利共赢的发展格局；另一方面，利用大数据分析挖掘市场潜力，为航运企业提供精准的市场

信息和个性化的服务方案，助力其拓展业务领域、提升竞争力。此外，平台还将积极探索绿色航运的发展路径，通过智能监控和数据分析，促进节能减排措施的实施，推动航运业向低碳、环保方向转型。

安徽省航道综合管理平台的构建将是一次深刻的行业变革，它将以大数据为引领，推动航运管理模式的创新升级，为淮河干流航道航运的繁荣发展注入强大动力，助力安徽航运经济的转型升级和高质量发展。

参考文献

[1] 赵志明 . 淮河数字化航道建设提高航道管理信息化水平 [C]. // 安徽省第十届航海论坛论文集 . 2011:17-19.

[2] 邵丽萍 . 数字化航道及智能综合系统在淮河航道管理上的应用 [C]// 安徽省航海学会 . 安徽省第十届航海论坛论文集 . 中国安徽省蚌埠市 ,2011:20-22.

[3] 许道满 . 以信息化带动海事港航管理现代化 [C]. // 安徽省第九届航海论坛论文集 . 2010:23-25.

[4] 朱乐礼 . 长江干线数字化航道管理优化研究 [D]. 江苏 : 江苏大学 ,2023.

[5] 胡仲达 . 内河航道现代化水平测度及评价研究 [D]. 湖北 : 武汉理工大学 ,2020.

作者简介：

卢斌，副部长 / 高级工程师，（E-mail）18905517501@qq.com，18905517501

内河航道保障船舶安全航行的应用技术探讨

白翠洪　梁　云　常大海

（中水三立数据技术股份有限公司，安徽合肥　230000）

摘 要：船舶航行安全，是保障航运业稳定发展的关键要素。为保障水上船舶航行的安全性，减少船舶航行过程中的安全事故。需要深入分析船舶航行的航道环境特征，剖析和排查可能影响船舶安全航行的风险因素。论文结合智慧航道信息化建设和船舶航行的基本特征，从对航道感知体系构建、实时监测数据的线性分析和船舶航行安全保障关键技术研究等三个方面对船舶航行安全体系进行综合考虑，为内河航道水运事业的稳定发展提供坚实的保障。

关键词：船舶航行；内河航道；安全航行保障；航道感知；监测数据；线性分析

0　引　言

智慧航道是在现代信息技术、人工智能技术与航道业务的融合牵引下，由数字航道演化而来的新一代航道信息化发展战略，对提升内河船舶航行安全性及航行效率具有重要的促进意义。船舶航行安全，是保障航运业稳定发展的关键要素；由于船舶航行环境的特殊性，船舶营运过程中会存在诸多的安全问题，造成不可预估的安全事故。因此，需要深入分析影响船舶航行的安全因素，创新研究保障船舶安全航行的应用技术方案，借此在航道智慧化发展的今天，促进船舶航运事业的可持续发展。本文从分析船舶航行安全影响因素，到提出降低或减少影响因素的方式方法，构建船舶航行安全的航道感知体系，分析航道通航要素及通航水文气象在保障船舶安全航行起到的作用，最后通过研发桥梁防撞预警技术、船舶碰撞预警技术、通航要素及通航气象实时预警技术和航道通航信息发布技术，完成构建船舶航行安全保障关键技术体系，以期减少船舶航行事故风险；深入分析船舶航行的航道环境特征，剖析和排查可能影响船舶安全航行的风险因素，进一步确保船舶航行的安全，为内河航道水运事业的稳定发展提供坚实的保障。

1　船舶航行安全影响因素分析

内河航道是我国综合交通网络的关键构成部分，其基础性、先导性和服务性功能在内河水运的发展中不可或缺。截至目前，全国内河航道总通航里程已突破 12.8 万公里大关，这不仅是水路运输能力的重要体现，更成为支撑“一带一路”倡议、交通强国战略及长江经济带发展等国家重大战略实施的关键基石。面对如此纵横交错且庞大的内河航道交通网，船舶在内河航道的航行安全所受到的影响因素，大致可以分为船舶因素、航道因素、自然因素等三个方面，船舶因素不是本文研究方向，此次主要就航道因素和自然因素对船舶航行安全的影响重点阐述。

1.1　航道因素

影响船舶安全航行的航道因素主要包括航道水下地形、航道水位水深、航标、电子围栏、碍航物、桥梁等。

在面对这些航道影响因素时，实时获取和掌握航道通航要素的准确信息就显得尤为重要，以保障船舶在航道内的安全航行，如果对于航道水下地形和航道水位水深等数据信息不清楚且做不到实时性和准确性，就可能造成船舶受损和搁浅等事故；如果没有航标指引和电子围栏划定的航道范围，船舶航行也无法准确把握航向，容易偏离航道；如果无法及时准确获知碍航物和桥梁等实时状态信息，船舶在航道内航行也容易产生碰撞等事故，造成船民生命财产的损失。

1.2 自然因素

影响船舶安全航行的自然因素主要涵盖恶劣天气条件，如暴风雨、强风、浓雾及极端寒冷等。这些自然因素构成了对船舶安全航行的重大挑战，可能直接引发船舶损坏、碰撞事故、甚至搁浅等严重后果，同时也增加了船员操作设备的难度。因此，确保航行安全要求船员不仅需具备丰富的航海经验和敏锐的应对能力，还需深入了解各种天气状况的特性及其对航行安全的潜在影响，并熟练掌握相应的航行技巧和紧急应对措施，以有效预防和应对各类安全风险。

2 构建船舶航行安全的航道感知体系

2.1 航道监控

航道监控通常是指通过布设和安装具有监视和控制功能的设备或装置以达到通过视频或图像的方式实时了解航道通航情势（图 1）。我们普遍认知下的具有航道监控功能的设备或装置包括 CCTV 视频、电子卡口、雷达系统、桥梁防撞预警系统等。按照其功能及作用，CCTV 视频作为航道监控站点布局中使用频率最高，安装密度最大的设备，主要安装在航道沿线、重点航道设施、船闸等地，能够全天候不间断的监控航道状况及船舶行驶情况；电子卡口主要安装在省界、市界和船闸处，用于监控船舶流量和判断航道繁忙程度，尤其是安装在省界处的电子卡口，可以较准确的监控入省和出省的船舶数量，从而辅助分析全省航道或船闸的运营情况；雷达系统和桥梁防撞预警系统相较于前两种设备，在保障船舶安全航行方面起到的作用更加直接和明显，可用于监控船舶当前航行状态和判断船舶是否可安全通过桥梁。

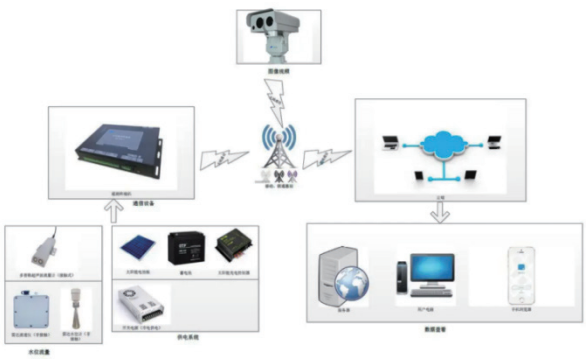


图 1　航道监控网络图

2.2 航道监测

航道监测确保航道交通畅通与安全的关键环节。运用现代科技手段，如卫星遥感、雷达探测、水下声纳等，对航道进行全天候、全方位的实时监测。通过收集航道的水深、水流、泥沙淤积等关键数据，结合地理信息系统（GIS）进行数据处理与分析，航道监测能够实时反映航道的实际状况。通过布设安装水文站、水位站、气象站和航标遥测终端实时监测水位、水深、气象及航标状态数据，并判断航道的通航条件，按航段划分该区域航道的实际通航水位是否满足通航条件，并通过信息发布系统由官方发布航道通航信息，限制船舶航行并提醒船民注意航行安全。

2.3 船舶监测

船舶监测实现对船舶的全方位、多角度实时监控。现代船舶监测整合了先进的传感器技术、卫星定位系统和通信技术，能够实时获取船舶的位置、速度、航向等基本信息，并监测船舶的航行状态、货物装载情况、设备运行状态等关键数据。船舶监测系统的运行依赖于船载设备的精准测量和实时传输，它能够实时记录船舶的航行轨迹，确保船舶按照预定航线安全航行。同时，系统还能够对船舶的航行速度、航向进行监控，确保船舶在规定的航行参数内运行，防止超速、偏离航道等危险行为的发生。除了基本的航行参数监测，船舶监测系统还能够对船舶的货物装载情况进行实时监控，确保货物的安全运输。系统能够及时发现货物的异常情况，如超载、移位等，并采取相应的措施进行处理。

3 船舶安全航行的航道通航要素及通航水文气象数据分析

3.1 航道通航要素分析

本文聚焦于船舶在航道内的安全高效航行，核心通航要素涵盖水下地形、航标、碍航物标识、桥梁净空及泊位管理，为保障船舶能够在航道内安全且高效航行，航道水下地形及底部高程数据的准确度是船舶在航道内安全航行的基础，通常航道水下地形及底部高程数据的获取都是在航道测量过程中得到的基础数据，航道水下地形数据精准是航行安全之基，需定期（全航道两年一次，重点航段半年一次）复测以应对地形变化。

航标使用显著减少船舶事故，但传统航标无法实时监控状态，影响夜间航行安全，长江和淮河等航道上逐步采用智能航标（遥测终端航标）来代替传统普通航标，能够实时获取航标工作状态，极大的降低航标养护频次和养护风险。碍航物标识作为提示船舶在航道内安全航行的重要标志之一，需要在全航道范围内根据碍航物类别布设碍航物标识。

桥梁净空的数据监测是通过雷达等系统，实时提供桥梁净空信息并分析过往船舶宽高，判断满足船舶通过所需要的净空，对不能通过或不能安全通过的船舶发起预警。服务区泊位和锚地泊位的动态监测能够保障船舶随时查看剩余泊位情况，以便于船舶临时停靠，在航道繁忙时，服务区和锚地的动态监测配合上下游船闸过闸调度，最大限度提高船舶过闸效率及保障船舶在航道内航行的安全。

3.2 航道通航水文气象分析

航道通航水文数据指水深、水流、水位、波浪、冰等对船舶交通有影响的各种因素。航道的水位、流速、流态以及河床演变等因素对船舶航行具有直接影响。水位的高低直接决定了船舶的通航水深，流速的快慢则影响船舶的航行速度和稳定性。航道通航气象数据是指能见度、大风和台风等条件。风力的大小和方向会直接影响船舶的航行轨迹和稳定性，尤其是在开阔水域或狭窄航道中，强风更可能导致船舶偏航或倾覆。此外，能见度的高低也至关重要，雾、霾等天气会降低能见度，增加船舶碰撞的风险。同时，降水、温度等气象要素也可能间接影响航道通航，如降水可能导致水位上涨，而低温可能引发航道结冰，影响通航安全。

4 船舶航行安全保障关键技术研究

4.1 桥梁防撞预警技术

桥梁防撞预警技术采用了多种传感器和监测设备，如雷达、AIS（船舶自动识别系统）、激光扫描仪等，用于实时收集航道信息、船舶动态和桥梁状态数据。这些设备能够精确测量船舶的位置、速度、航向等参数，并实时监测航道的水文气象条件，为预警系统提供准确的数据支持。预警系统利用先进的算法和模型，对收集到的数据进行分析和处理，识别出潜在的碰撞风险。系统能够自动分析船舶的航行轨迹和习惯航线，与桥梁的警戒区域进行对比，判断船舶是否存在异常行为。当船舶进入警戒区或偏离正常航线时，系统会自动触发预警机制。预警方式多样且高效。一方面，系统通过声光报警、LED 屏幕显示等方式，向船舶驾驶员发出直观的预警信息，提醒其注意避让桥梁。另一方面，系统还可以将预警信息通过无线通信网络传输到船舶调度中心或海

事管理机构，以便及时采取相应的管理措施。桥梁防撞预警技术旨在减少船舶与桥梁之间的碰撞风险。

4.2 船舶碰撞预警技术

船舶碰撞预警技术是现代水上交通安全保障体系中不可或缺的一环。它通过集成先进的传感器、数据处理系统和通信技术，实现了对船舶航行状态的实时监控和潜在碰撞风险的精准预测。船舶碰撞预警技术通过安装在船舶上的传感器，实时收集船舶的位置、速度、航向等基本信息，并结合卫星定位系统和雷达探测技术，获取船舶周围的航道信息、障碍物分布等关键数据。这些数据经过高速处理和分析，能够形成船舶航行的三维动态图像，为预警系统提供准确、全面的信息支持。预警系统利用先进的算法和模型，对收集到的数据进行深度挖掘和分析，识别出潜在的碰撞风险。例如，通过对比船舶的实时位置和航道信息，系统能够判断船舶是否偏离了预定航线，从而预测出与障碍物发生碰撞的可能性。同时，系统还能够根据船舶的速度、航向等参数，计算出船舶的碰撞时间和碰撞角度，为驾驶员提供更为直观的风险评估。在预警方式上，船舶碰撞预警技术采用了多种手段。一方面，系统通过声光报警、显示屏提示等方式，及时向驾驶员发出预警信息，提醒其注意潜在风险并采取相应的避碰措施。另一方面，系统还能够将预警信息通过无线通信网络传输到港口管理部门或船舶调度中心，为相关部门提供决策支持，实现船舶碰撞风险的远程监控和管理。

4.3 通航要素及通航气象实时预警技术

通航要素与通航气象实时预警技术是保障水上交通顺畅与安全不可或缺的两个重要方面。通航要素为船舶的航行提供基础保障。航道条件是其中的重要一环，包括航道的宽度、深度、弯曲度等，它们决定了船舶能否顺利通行。船舶性能则是另一个关键因素，不同的船舶因其排水量、吃水深度、动力系统等性能差异，对航道条件的要求也不同。此外，航行规则是确保船舶有序航行的基础，包括航行顺序、避让规则、信号传递等，它们保证了船舶在航道中的安全和效率。然而，仅仅依赖通航要素并不足以完全保障船舶的安全航行。因为天气因素也是影响通航安全的重要因素之一。这时，通航气象实时预警技术就显得尤为重要。

通航气象实时预警技术通过集成先进的观测设备、数据处理系统和预警模型，能够实时监测和预测航道区域的气象条件。这些气象条件包括风速、风向、降水、能见度等，它们直接影响船舶的航行安全。通过实时收集和处理气象数据能够迅速生成预警信息，并通过多种渠道传递给船舶驾驶员。驾驶员根据预警信息，可以及时调整航行计划，采取相应的安全措施，从而确保船舶在恶劣天气条件下的安全航行。

4.4 航道通航信息发布技术

航道通航信息发布技术是航道信息化至关重要的技术支撑，通过集成先进的通信技术、信息技术和数据处理能力，实现了航道通航信息的实时、准确发布。本技术通过 AIS 技术、电子航道图技术和水文气象实时数据监测，实现内河航道通航要素、碍航物以及通航环境进行实时数据采集，确保分析形成的航道通航状态信息的准确性和可靠性，航道通航信息发布技术能够支持多平台、多渠道的信息发布，包括信息系统、APP 和官方网站等，确保信息的全面覆盖和及时传递。便于社会船舶用户、航运企业及时掌握航道通航信息，合理安排船舶出行时间。本技术具备强大的数据分析和处理能力，能够对航道通航数据进行深入挖掘和分析。航道通航信息发布技术以其高效、准确、便捷的特点，为航运业的发展提供了强有力的支撑。

5 结 论

综上所述，船舶航行安全至关重要，任何疏忽都可能危及船舶与船员的生命财产安全。为确保航行安全，我们需综合考量影响航行的多重因素，深入研究并应用船舶航行安全技术，以有效降低航行事故风险。技术革新与应用固然重要，但驾驶人员的专业素养同样不可或缺，他们需具备高度的安全意识、精湛的操作技能及强大的心理素质，在紧急情况下能迅速、准确地做出避让决策，从而最大限度地预防事故。此外，还应充分利用现代信息技术，提升船舶航行的稳定性和安全性，为水运交通安全保驾护航。

参考文献

[1] 严新平 , 柳晨光 . 智能航运系统的发展现状与趋势 [J]. 智能系统学报 ,2016,11(6):807-817.
[2] 毛雪城 . 影响船舶航行安全因素分析与应对措施 [J]. 水上安全 ,2023(7):153-155.
[3] 中共中央、国务院 ,《国家综合立体交通网规划纲要》,2019 年 4 月 19 日 .
[4] 吕永祥 , 何乐 , 陈琳 , 等 . 长江数字航道和智能航道的分析与思考 [J]. 交通科技 ,2013(2):161-164.
[5] 张风良 . 船舶极地航行的安全规则与风险管理研究 [J]. 中国水运 ,2023(2):51-53.
[6] 孟安 . 航海技术对船舶安全航行的影响 [J]. 船舶物资与市场 ,2022,30(9):1-3.
[7] 韩栩晨 , 王焕然 , 梁冬泰 , 等 . 基于机器视觉的船舶检测与航行安全距离监测 [J]. 机械制造 ,2022,60(8):67-73,94.
[8] 刘维民 , 刘侠 . 基于集对分析的内河船舶航行安全评估方法研究 [J]. 珠江水运 ,2022(12): 53-55.
[9] 李杰 , 李秉哲 . 桥梁主动防撞预警系统的设计与实现 [J]. 中国交通信息化 2022,271(Si):462-464.
[10] 顾捷 . 防止船舶碰撞是引航工作的重点 [J]. 中国水运 (下半月),2016(06):35-36.
[11] 李成海 , 孙艳丽 , 王建涛 . 船舶航行安全影响因素量化分析 [J]. 广州航海学院学报 ,2021,29(1):13-17.

作者简介：

白翠洪，中水三立数据技术股份有限公司大数据中心产品部总监，主要从事智慧航道、智慧船闸等信息化建设和管理工作，（E-mail）baicuihong@163.com,15755119928

浅谈内河智慧航道的发展趋势

韩久春　吴继成　张玉明　史晓涛　邱　征　赵晓舒　王　宁

（安徽建工交通航务集团有限公司，安徽合肥　230011）

摘 要: 研究探讨内河智慧航道的发展趋势，重点分析智慧航道的关键技术和应用实践。通过对北斗导航、大数据、物联网等现代信息技术的整合，智慧航道逐渐实现了对内河航道的动态监测和智能管理。研究重点考察了长江和京杭运河的智慧航道建设与实践，结果显示，这些地区通过智慧航道系统的部署，有效提升了航道管理的科学性与效率。研究结论认为，智慧航道的发展将推动内河航运向数字化、智能化和绿色化转型，进一步促进内河经济的高质量发展。

关键词：内河智慧航道；北斗导航；大数据；物联网；智能管理

0　引　言

内河航道作为我国综合立体交通运输体系的重要组成部分，在经济发展中发挥着关键作用。近年来，随着“一带一路”、长江经济带等国家战略的实施，内河航道的重要性愈加突出。智慧航道的概念随着信息技术的发展逐渐兴起，通过整合北斗导航、大数据、物联网等现代技术，智慧航道旨在提升航道管理和服务水平，增强运行保障能力，促进精细化管理。智慧航道的兴起标志着内河航道向数字化、智能化转型，推动内河航运迈向高质量发展的新阶段。

1　内河智慧航道的发展现状

1.1　国内内河航道的总体情况

长江、京杭运河等主要内河航道是我国内河运输的关键通道，承担着巨大的运输任务。长江航道贯穿中国东西，连接众多重要城市，京杭运河则是世界上最长的人工运河，横贯南北，是中国古代重要的经济命脉。随着国家对内河航运的重视，这些航道的基础设施不断升级，通航能力提高。目前，全国内河航道的总通航里程已达到十几万公里，形成了覆盖全国、纵横交错的航道网络。这些航道主要分布在经济发达和物流需求旺盛的地区，如长江中下游、珠江三角洲、京杭大运河沿线等，为区域经济的持续发展提供了强有力的支撑。

1.2　智慧航道的技术基础

智慧航道的建设依赖于现代信息技术的广泛应用，特别是北斗定位系统、物联网、大数据等技术的引入。这些技术为航道的动态监测、数据分析、决策支持提供了坚实的基础。北斗定位系统能够为船舶提供高精度的位置服务，物联网技术则可以实现对航道设备和环境的实时感知和监控。大数据技术通过对海量航道信息的处理和分析，为智慧航道的运行管理提供了重要的决策依据。随着技术的发展，内河航道逐渐从传统的数字化管理迈向智能化管理，智慧航道成为数字航道的高级发展阶段，进一步推动了内河航运的现代化。

1.3 智慧航道的建设与实践

在智慧航道的建设与实践方面，长江干线和京杭运河是重要的示范案例。长江干线率先启动了数字航道与智能航运的示范工程，建设了集成航道感知、信息共享、智能决策等功能的智慧航道系统。京杭运河在智慧航道建设中也取得了成果，通过建设电子航道图、智能调度系统等，实现了航道管理的智能化升级。广东、江苏、浙江等地区也在积极推进智慧航道的建设，利用先进的信息技术提升航道的管理效率和服务水平。这些典型地区的成功经验为全国内河航道的智慧化建设提供了宝贵的借鉴。

2 内河智慧航道的关键技术

2.1 航道感知技术

航道感知技术是内河智慧航道的基础，其核心在于多源数据的融合与动态监测技术的广泛应用。这些技术通过集成遥感、北斗定位、物联网等多种先进的感知手段，实现对航道环境的全面、实时感知。通过这些手段，航道管理部门能够建立起一个立体感知网络，该网络能够实时监测航道的关键要素，如水位、水流速度、河床地形、航标状态等，这些数据对于保障航道的安全与通畅至关重要。

立体感知网络不仅涵盖了水面上的信息，还包括水下的地形地貌监测以及空中的气象数据采集，使得航道管理从传统的二维视角延伸到三维的全方位覆盖。通过对这些信息的实时监测和收集，管理者能够全面掌握航道的运行状态，及时发现潜在问题并采取有效的预防措施。

环境监测作为航道感知的重要组成部分，能够实时获取航道沿线的气象条件、水质状况、生态环境等信息。这种全面的感知能力使得航道管理者能够从过去的被动应对转变为主动监测，预见和解决可能出现的问题。例如，当水位过低或水质出现异常时，系统可以自动预警，提示管理者采取相应的应对措施。

航道感知技术的成熟与广泛应用，为智慧航道的建设奠定了坚实的技术基础。这些技术不仅提高了航道管理的科学性和精准度，也为航道的安全性和可靠性提供了强有力的保障，确保内河航运能够在更为安全和高效的环境中进行。随着技术的不断进步，这些感知技术将在未来进一步完善和优化，为智慧航道的发展提供更加全面的支持。

2.2 智能决策支持系统

智能决策支持系统是内河智慧航道的重要组成部分，主要依托于大数据和人工智能技术的深度应用。通过大数据技术，航道管理系统能够对航道运行中的海量数据进行高效的收集、存储、处理和分析，这些数据包括船舶的动态信息、气象条件、水文数据等，为管理决策提供了全面的数据支持。人工智能技术在此基础上发挥关键作用，通过对历史数据的分析和实时数据的处理，智能决策支持系统能够进行精确的预测和分析，为航道管理提供科学的决策依据。智能化管理与调度系统的构建，使得航道管理能够根据实时监测数据进行动态调整，优化航运调度，减少航道拥堵，提高航道利用效率。同时，该系统能够有效应对突发事件，通过快速的数据分析和决策支持，及时采取应对措施，降低风险，保障航道的安全性和可靠性。这种智能决策支持系统的应用，不仅提高了航道管理的效率，也增强了整个内河航运系统的应急反应能力和服务水平。

2.3 智慧服务平台

智慧服务平台是内河智慧航道的重要组成部分，为航运企业和管理机构提供了关键支撑，主要依托电子航道图和数字孪生技术来实现。电子航道图通过将航道的各类数据进行数字化处理和可视化呈现，能够为航运企业提供精确的导航工具，使船舶能够在复杂的内河航道中安全高效地航行。管理机构也可以利用电子航道图进行实时监控和管理，及时掌握航道的运行状态和潜在风险。

数字孪生技术进一步增强了智慧服务平台的功能。通过构建一个与真实航道完全对应的虚拟环境，管理者可以在这个数字孪生的航道中进行全方位的模拟和管理操作。这不仅包括日常的航道维护和监控，还涵盖了应

急情况下的预演和决策支持。数字孪生技术使得管理者能够在虚拟环境中测试不同的管理策略，预见可能出现的问题，并在问题发生前制定相应的应对措施。

智慧服务平台的智能化和个性化特点，使得它能够根据不同用户的需求提供定制化的服务。对于航运企业，智慧服务平台可以提供实时的航道信息、天气预报、航道拥堵情况等关键数据，帮助企业优化航运路线和时间安排，降低运营成本。对于管理机构，平台提供了高效的管理工具，支持对航道的综合管理、调度和维护，提升了管理的科学性和精准度。通过智慧服务平台，航道服务实现了从传统的被动响应向主动服务的转变，大大提升了航运效率和服务质量，为内河航运的现代化和智能化发展提供了有力保障。

3 内河智慧航道的发展趋势分析

3.1 技术融合趋势

新一代信息技术的迅猛发展正在深刻改变传统航道管理的方式，使其与智慧航道的深度融合成为内河航运发展的核心趋势之一。通过将北斗定位、物联网、大数据、人工智能等前沿技术引入航道管理，智慧航道的系统架构得到持续优化和完善。这种技术融合不仅提高了航道的感知和管理能力，还推动了航道管理从依赖传统经验的模式转向基于数据的精准管理。这一转变使得航道管理更加科学、高效，能够更好地应对复杂多变的内河航运环境，为航运的安全性和效率提供了更强有力的技术支撑。

3.2 服务个性化趋势

随着智慧航道的发展，智能服务的个性化趋势愈加明显。智慧航道系统通过对用户行为的深入分析和数据建模，能够为不同用户提供量身定制的服务，满足其特定需求。无论是航运企业、船员，还是航道管理者，都可以根据自己的需求获取不同层次、不同类型的服务。这些服务从最基本的导航功能延伸到更复杂的物流调度、航道信息查询以及智能应急响应等多样化应用场景。智慧航道的个性化服务不仅提升了用户的便利性和满意度，也在一定程度上推动了航运行业的数字化转型，使用户体验得到了提升。

3.3 绿色发展趋势

智慧航道在推动内河航运向低碳、环保方向发展的过程中发挥着重要作用，成为实现绿色发展的关键支撑。通过智能调度系统的应用，智慧航道能够优化航运路线和调度计划，减少船舶在航道中的等待时间，从而降低燃油消耗，减少碳排放。这种优化不仅有助于减少航运过程中的能源浪费，还能有效降低航运活动对环境的负面影响。智慧航道通过实时监测和分析航道及其周边的环境数据，为生态环保措施的制定和实施提供了科学的依据，确保在发展航运的同时实现生态保护的目标。这些努力正在促使内河航运向着更加可持续和环保的方向发展，逐步实现绿色航运的目标。

3.4 安全与应急管理趋势

内河航道的安全与应急管理正随着智能化技术的发展而变得更加高效和精准。智能监控系统的应用使得智慧航道能够对航道的运行状态进行实时监控，迅速识别并预警可能出现的安全隐患。这种实时监控不仅能够帮助航道管理者提前发现问题，还能够在事故发生时提供迅速的响应措施。内河航道的应急管理系统正在不断向智能化方向发展，通过结合实时数据和智能算法，系统可以快速制定应急预案并执行，使应急响应更加及时和有效。这种智能化的安全与应急管理，不仅提升了航道的整体安全水平，也为内河航运的顺畅与安全提供了更可靠的保障，确保航运活动能够在更为安全的环境中进行。

4 结束语

综上所述，随着信息技术的飞速发展，内河智慧航道的建设逐步走向深入，各类先进技术的广泛应用为航道的管理与服务带来了前所未有的变革。通过对感知技术、智能决策支持系统和智慧服务平台的不断完善，内

河航运的管理效率和服务水平得到了显著提升。展望未来，智慧航道的发展将继续朝着技术融合、个性化服务、绿色发展以及安全与应急管理的方向推进。尤其是在国家政策的推动下，智慧航道有望成为内河航运现代化的重要支撑，助力我国实现更为安全、高效、环保的内河航运体系。

参考文献

[1] 洛佳男 , 耿雄飞 , 文捷 , 李春旭 . 我国内河智慧航道现状、问题与展望 [J]. 水运工程 ,2023(2):123-128.

[2] 吴鹏 , 杨宗默 , 李延伟 , 李玉林 , 肖山民 . 内河智慧航道的发展及工程应用 [J]. 船海工程 ,2023,52(S01):55-59.

[3] 孙俊锋 .BIM+GIS 技术在内河智慧航道建设中的应用 [J]. 现代交通技术 ,2023,20(6):90-94.

[4] 李学祥 . 内河智慧航道发展研究 [J]. 中国水运 ,2023(4):15-19.

作者简介

韩久春，高级工程师，（E-mail）942650093@qq.com,15956057250

长江珠三角背景下安徽航运业高质量发展的路径探索

谢旭东

（安徽建工路港建设集团有限公司，安徽合肥　231600）

摘 要：随着信息技术的飞速发展和全球环境问题的日益严峻，智慧水运、绿色环保、数据助航及高质量发展已成为航运业的重要趋势。本文将从这四个方面入手，详细探讨智慧水运在推动绿色环保、数据助航以及实现高质量发展中的关键作用。通过对智慧水运技术、绿色航运理念、数据应用以及发展策略的深入剖析，为航运业的可持续发展提供理论依据和实践指导。

0 引　言

航运业作为全球经济的重要支柱，安徽是外贸大省、科技大省，也是航运大省，对推动国际贸易、促进经济发展具有重要作用。今年 1-6 月份，我省水运生产指标继续保持稳步增长。全省累计完成水运固定资产投资 35.33 亿元，占年度计划投资任务的 54.2%，较去年同期增长 7.2%，其中航道完成投资 7.17 亿元、港口完成投资 28.16 亿元。全省累计完成货运量 7.67 亿吨、货物周转量 3 745 亿吨公里，同比分别增长 6.9% 和 7.1%；累计完成客运量和旅客周转量 107 万人和 1 458 万人公里，同比分别增长 2.7% 和下降 7.8%。全省累计完成吞吐量 3.35 亿吨，同比增长 7.3%。其中芜湖、池州两市港口吞吐量已超 7 000 万吨，马鞍山市港口吞吐量已超 6 000 万吨。累计通过水运发运汽车 47.90 万辆（含集装箱和滚装两种方式），其中出口 40.05 万辆，同比分别增长 43.4%、34.3%。然而，传统航运模式存在效率低、能耗高、污染重等问题，严重制约了航运业的可持续发展。智慧水运、绿色环保、数据助航及高质量发展的提出，为航运业带来了新的机遇和挑战。

1 智慧水运建设的重大意义

1.1 智慧水运的定义与内涵

智慧水运是指利用现代信息技术手段，对航运活动进行智能化管理和运营，以提高航运效率、降低能耗、减少污染，实现航运业的可持续发展。智慧水运涵盖了多个方面，包括智能船舶、智能港口、智能物流、智能监管等。

1.2 绿色环保的重要性

随着全球环境问题的日益突出，绿色环保已成为全球共识。航运业作为碳排放大户，其绿色转型对于全球环境保护具有重要意义。绿色航运不仅有利于减少污染排放，还有助于提升航运企业的国际竞争力。

习近平总书记在参加十三届全国人大一次会议广东 代表团审议时强调：“发展是第一要务，人才是第一资 源，创新是第一动力。”这一重要论述高度概括了推动 高质量发展需要牢牢把握的三个关键：新时代发展

的 核心要义就是高质量发展，这是实现中国由“富起来到 强起来“的关键；高质量发展要靠创新驱动，只有创新，才能解决我国“大而不强”的问题；创新要靠大量高素 质人才，既需要技术人才，也需要管理人才，还需要技 能型人才。高质量发展是贯彻新发展理念的发展，只有全面贯彻“创新、协调、绿色、开放、共享”的新发展理念， 高质量发展才能行稳致远；“高质量发展是创新成为第 一动力、协调成为内生特点、绿色成为普遍形态、开放 成为必由之路、共享成为根本目的的发展”。

1.3 数据助航的意义

数据是航运业发展的重要资源。通过收集、分析和利用航运数据，可以实现航运活动的精准管理、优化调度和决策支持。数据助航有助于提高航运效率、降低运营成本、提升服务质量。

航运高质量发展要靠高素质航运人才的支撑，因此 必须加强航运人才培养与引进工作。大力支持在皖高等 院校培养包括本科、硕士、博士在内的多层次航运人才 培养体系；重点支持新筹建的合肥工业大学设立航运业急需的专业，比如航运金融与保险、船舶与海洋工程、 邮轮工程管理等专业；鼓励省内高校与国内外海事院校 开展多种形式合作办学，比如合作开办航运 MBA 教育、合作建立博士后流动站或者举办航运高端人才培训项目 等；由政府出资建立航运高端智库，举办高规格、国际性航运论坛，为航运高端人才提供交流、合作、培训的平台；通过对海员、管理团队及航运服务高端人才实施 税负减免措施及其他优惠政策，吸引国内外高素质航运 人才来皖工作，并为航运人才及企业管理团队提供良好 的生活和工作环境。

1.4 高质量发展的目标

高质量发展是航运业未来发展的必然要求。通过智慧水运、绿色环保、数据助航等手段，推动航运业实现质量变革、效率变革、动力变革，提高全要素生产率，实现航运业的可持续发展。

自引江济淮工程试通航以来，我省多措并举积极打造江淮运河航道，一是提升完善航道船闸桥梁等配套工程，二是构建引江济淮智慧航道，三是制定航道试运行方案，四是落实航道救援队伍和预案。截至 2024 年 2 月底，引江济淮工程航道共累计通行各类船只 16110 艘次，调度闸次 6284 次，通过船闸总吨位约 3337 万吨。引江济淮工程江淮沟通段、菜子湖线航道先后于 2023 年 8 月 16 日、9 月 16 日通航试运行（菜子湖线因冬候鸟保护已于 2023 年 11 月 1 日禁航），标志着江淮运河全线通航。航道的开通极大改善了淮河地区与长江地区之间水运通道现状条件，优化了运输线路，降低了运输成本，提高了航运时效，更好促进经济社会发展。

2 智慧水运的技术基础

2.1 物联网技术

物联网技术是实现智慧水运的重要基础。通过物联网技术，可以实现船舶、港口、物流等各个环节的互联互通，实现信息的实时传输和共享。物联网技术还可以应用于船舶远程监控、故障诊断、维修保养等方面，提高船舶运营效率和安全性。安徽河网密布，坐拥长江淮河两条黄金水道，但一江一河遥遥相望，南北割裂，无法联通。2023 年，长江“牵手”淮河，江淮运河通航，在安徽境内实现淮河、长江两大流域航运联通，新辟了一条贯穿南北的安徽水运大通道。作为新中国建成的最大运河，江淮运河是全国规划“四纵四横”高等级航道之“纵二”组成部分，是长江、淮河以及黄河三大流域经济要素流通的关键通道。江淮运河重构了安徽省内河航运格局，形成安徽长江、淮河、江淮运河“一纵两横”的高等级主航道，打通了长三角与中原经济区之间的水运大动脉，显著加强长三角与中原地区联系，加快安徽融入长三角一体化进程。

2.2 大数据技术

大数据技术是智慧水运的核心技术之一。通过大数据技术，可以对航运数据进行深入挖掘和分析，发现数据背后的规律和趋势，为航运决策提供科学依据。大数据技术还可以应用于船舶航行优化、航线规划、物流调

度等方面，提高航运效率和降低成本。水运，作为大宗货物最主要的物流方式之一，水运与产业发展息息相关，水运兴，则产业兴，近年来，安徽加快水运高质量发展的步伐，航线布局加密优化，加速产业集聚发展，有力支撑经济高质量发展。数据显示，安徽省 80% 的汽车企业、83% 的钢铁企业、71% 的有色金属冶炼及加工企业、92% 的家电生产企业，都聚集在长江黄金水道区域。而煤化工、盐化工、生物化工、水泥建材等重点产业集聚在沿淮地区，大量煤炭、粮食、矿建材料等物资也都依托淮河航道运输。

2.3 人工智能技术

人工智能技术在智慧水运中发挥着重要作用。通过人工智能技术，可以实现船舶自动驾驶、智能避碰、智能调度等功能，提高船舶航行安全性和效率。人工智能技术还可以应用于港口作业自动化、物流智能配送等方面，推动航运业向智能化方向发展。

3 绿色环保在智慧水运中的应用

3.1 绿色船舶技术

绿色船舶技术是航运业绿色转型的关键。通过采用低碳燃料、节能设备、排放控制技术等手段，降低船舶能耗和排放。同时，结合物联网、大数据等信息技术，实现船舶能效的实时监测和管理，提高船舶绿色运行水平。

3.2 岸电技术应用

岸电技术是指船舶靠港期间使用岸上电源供电的技术。通过岸电技术，可以减少船舶在靠港期间的燃油消耗和排放。智慧水运可以通过物联网、大数据等技术手段，实现岸电设施的智能调度和管理，提高岸电设施的使用效率和安全性。

3.3 绿色港口建设

绿色港口建设是航运业绿色转型的重要组成部分。通过建设绿色港口，实现港口作业的低碳化、循环化和生态化。智慧水运可以通过物联网、大数据等技术手段，实现港口作业的智能化管理，提高港口作业效率和资源利用效率。

据悉，目前安徽港航集团共开行航线 64 条，每周开行 257 航次，航线数量居内河港口首位，到达港口下游至上海、连云港、太仓、南通，上游到宜宾、重庆、武汉、长沙、南昌、周口、淮滨等，通过上海港中转至国内沿海和全球主要港口。全省主要集装箱港口至上海航线，运输时间减少一半、运输效率提升一倍，从以前的“货等船”变为了现在的“船等货”。派河港地处合肥经开区，江淮运河通航后，合肥派河港成为江淮联运的枢纽港，不少企业看好江淮运河这条便捷的物流大通道，纷纷提前布局，临港建厂，周边聚集了新能源汽车、白色家电、光伏以及装备制造等产业集群。芜湖港是安徽规模最大的港口之一，每天都有数千辆汽车整装待发，准备运往全球各地，2023 年集装箱吞吐量达到 140 万标准箱，占安徽整体比重约 60%。

4 数据助航在智慧水运中的实践

4.1 数据采集与传输

数据采集与传输是数据助航的基础。通过物联网、传感器等技术手段，实现航运数据的实时采集和传输。采集的数据包括船舶位置、速度、油耗、排放等信息。通过数据传输网络，将采集的数据实时传输到数据中心进行处理和分析。

4.2 数据处理与分析

数据处理与分析是数据助航的核心。通过大数据技术，对采集的航运数据进行深入挖掘和分析，发现数据背后的规律和趋势。数据处理与分析的结果可以用于船舶航行优化、航线规划、物流调度等方面，提高航运效率和降低成本。

4.3 数据应用与服务

数据应用与服务是数据助航的最终目的。通过数据处理与分析的结果，为航运企业提供智能化服务。例如，通过数据分析，为船舶提供最优航线规划；通过数据挖掘，为物流企业提供精准的物流解决方案；通过数据服务，为政府监管部门提供实时监管和决策支持。近年来，安徽加大水运基础建设，“一纵两横五干二十线”内河航道主骨架加快形成，芜湖马鞍山、安庆江海联运枢纽，蚌埠、淮南淮河航运枢纽和合肥江淮联运中心等“两枢纽一中心”港口体系全新升级，协同沪苏浙加快打造长三角世界级港口群，通航能力大幅提升。截至 2023 年底，安徽省内河航道通航里程达 5811 公里，四级及以上干线航道共 2202 公里，干线航道覆盖全省 70 个县（区），县级区域通达率达 67%。除六安市区外，全省其他各市市区均实现干线航道网全覆盖。

5 高质量发展的实现路径

5.1 推动技术创新

技术创新是推动航运业高质量发展的核心动力。在智慧水运、绿色环保、数据助航的背景下，应加大对新技术、新工艺、新材料的研发和应用力度。具体来说，可以从以下几个方面入手：

5.1.1 加强基础研究

加大对航运相关基础科学研究的投入，如流体力学、材料科学、信息技术等，为技术创新提供坚实的理论支撑。同时，鼓励高校、科研机构与企业建立产学研合作机制，促进科研成果的快速转化和应用。

5.1.2 推广先进适用技术

积极引进和推广国内外先进的航运技术和设备，如智能船舶技术、绿色能源技术、自动化港口技术等，提高航运业的整体技术水平。通过示范项目、政策引导等方式，推动先进技术在航运业的广泛应用。安徽省将牢固树立“向海而兴、借船出海”的开放意识，充分发挥安徽省“拥江达海”水运优势，加快建设安全、便捷、高效、绿色、经济的现代水运体系，服务好新能源汽车和智能网联汽车、先进光伏等世界级战略性新兴产业集群发展需求，构建区域联系水运战略通道，提升集约高效港口枢纽能级，完善高效融合现代航运服务，塑造向海而兴产业发展高地，加快从内河水运大省向内河水运强省转变。

5.1.3 鼓励自主创新

加大对航运企业自主创新的支持力度，鼓励企业加大研发投入，培养创新型人才，建立创新激励机制。通过技术创新，推动航运业向智能化、绿色化、高效化方向发展。

6 完善政策法规体系

完善的政策法规体系是保障航运业高质量发展的重要基础。政府应加强对航运业的政策引导和监管，推动航运业健康发展。

6.1 制定发展规划

根据航运业发展的实际情况和未来趋势，制定科学合理的发展规划，明确发展目标、重点任务和保障措施。通过规划引领，推动航运业实现高质量发展。

6.2 完善法规标准

加强航运业相关法规标准的制定和修订工作，完善航运市场的法律法规体系。通过制定严格的环保法规、能效标准等，推动航运业向绿色环保方向发展。同时，加强与国际标准的接轨和互认工作，提高我国航运业的国际竞争力。

6.3 加强监管执法

加大对航运市场的监管执法力度，打击违法违规行为，维护市场秩序和公平竞争。通过加强监管执法，推

动航运业实现规范化、法制化发展。

7 加强国际合作与交流

航运业是全球性的产业，加强国际合作与交流对于推动航运业高质量发展具有重要意义。

7.1 拓展国际合作渠道

积极参与国际航运组织、航运联盟等合作机制，加强与世界各国在航运技术、政策、法规等方面的交流与合作。通过拓展国际合作渠道，共享航运业发展的经验和成果。

7.2 推动“一带一路”建设

积极参与“一带一路”建设，加强与沿线国家在航运基础设施、航运服务等方面的合作。通过推动“一带一路”建设，促进航运业在更大范围内实现互联互通和互利共赢。首先，要加强对航运企业创新发展的政策扶持。一是建立与国际接轨的政策支持体系，落实好国家减税降 费措施，为航运企业营造公平竞争环境；二是鼓励航 运企业兼并重组，提高航运业市场集中度，发挥规模经 济效应；三是积极研究有关船舶节能减排国际公约，为航运企业更新改造船舶提供指导及给予适当补贴；四是 对航运新技术的研发及运用进行资助，鼓励航运企业进 行业务模式创新，提高航运服务效率与质量；五是鼓励 航运企业与供应链上下游企业等紧密合作，提供以有形 服务（航运服务）和无形服务（贸易、技术、金融方案 等）协同配合的一体化服务，建立以航运服务为核心的 全程物流供应链。

7.3 加强人才培养与交流

加强与国际航运人才培养机构的合作与交流，引进和培养具有国际视野和专业技能的航运人才。通过人才培养与交流，提高我国航运业的整体素质和创新能力。

8 结论与展望

智慧水运、绿色环保、数据助航及高质量发展是航运业未来发展的必然趋势。通过推动技术创新、完善政策法规体系、加强国际合作与交流等措施的实施，可以推动航运业实现高质量发展。未来，随着信息技术的不断发展和全球环保意识的不断提高，航运业将迎来更加广阔的发展前景和更加艰巨的挑战。要加快航运业创新步伐。以制度创新、管理创新、技术创新和服务创新为突破口，实现航运发展方式转变，由要素驱动逐渐转变为创新驱动，积极培育航 运新模式、新业态和新服务，促进航运全要素生产率的 提升。大力推广 5G、无人驾驶、大数据、区块链等技术在航运业中的应用，创新“互联网 + 航运”新模式，加快数字航运和智能航运建设步伐。航运业应紧紧抓住历史机遇，积极应对挑战，努力推动自身实现高质量发展，为全球经济的可持续发展做出更大的贡献。

作者简介：

谢旭东，工区负责人，助理工程师，（E-mail）1725648462@qq.com,13083013989