

浙江港航

ZHEJIANGGANGHANG

主办单位：浙江省航海学会 浙江省港口协会 浙江交通职业技术学院

2025 年第一期
总第 105 期

季刊

2025 年 3 月出版

1

省港口协会七届理事会第一次常务理事会议、省港口协会内河港口分会成立大会在杭州召开
浙江省航海学会八届五次理事会暨团体会员单位联络员会议在宁波宁海圆满结束

船舶智能柴油机的比较研究及故障案例分析

船载液氢储罐热力学特性的数值仿真研究

励志报国 荣耀出征——我校举行 2022 级定向培养军士生入伍欢送会

与包乐史驾帆航行 | 兰伯蒂的南太平洋航海冒险



浙江省港口协会常务理事以上单位名录

协会职务	单位名称
理事长单位	浙江省交通运输厅
常务副理事长单位	浙江省港航管理中心
	浙江省海港投资运营集团有限公司
	杭州市交通运输局
副理事长兼秘书长单位	浙江交通职业技术学院
副理事长单位	杭州市公路与港航管理服务中心
	嘉兴市港航管理服务中心
	湖州市交通运输局
	宁波市港航管理中心
	温州市港航管理中心
	舟山市港航事业发展中心
	台州市港航事业发展中心
	杭州港务集团有限公司
	浙江数智交院科技股份公司
常务理事单位	舟山市交通运输局
	绍兴市交通运输行政执法队
	金华市交通运输行政执法队
	衢州市公路港航与运输管理中心
	丽水市公路港航与运输管理中心
	浙江省交通运输科学研究院
	浙江海港内河港口发展有限公司
	浙江公路水运工程集团有限公司
	自然资源部第二海洋研究所
	浙江省水利河口研究院
	宁波舟山港舟山港务有限公司
	温州港集团有限公司
	浙江海港嘉兴港务有限公司
	台州港港务有限公司
	杭州港航有限公司

浙江港航

ZHEJIANGGANGHANG

2025 年 3 月出版（第一期）总第 105 期

主办单位：浙江省航海学会 | 浙江省港口协会 | 浙江交通职业技术学院

季刊

浙江港航

ZHEJIANGGANGHANG

2025 年 3 月出版（第一期）
总第 105 期（季刊）

主办单位：浙江省航海学会
浙江省港口协会
浙江交通职业技术学院
地址：杭州莫干山路 1515 号
电话：13757123482
邮编：311112
E-mail：bjhui@zjvtit.edu.cn

《浙江港航》编委会

主 任：夏炳荣
副主任：沈亚军 徐 斌
胡适军 付昌辉
委 员：（以姓氏笔划为序）
于京阳 万 丽 王 辉
毛旭东 方志浩 卢金树
卢 斌 刘洪义 杨 利
杨挺理 何振镐 张云康
陈永芳 陈 彤 陈晓峰
罗扬扬 金 虹 周祥寿
郑彭军 赵列克 倪彦博
龚银交 葛 军 董 军
主 编：胡适军
副主编：付昌辉
编 辑：鲍军晖 史善训

港航要闻

- | | |
|----|---|
| 04 | 2025 年浙江省航海学会理事长办公会议在杭州召开 |
| 05 | 省港口协会七届理事会第一次常务理事会议、省港口协会内河港口分会成立大会在杭召开 |
| 07 | 浙江省航海学会八届五次理事会暨团体会员单位联络员会议在宁波宁海圆满结束 |



学术探讨

- | | |
|----|--|
| 10 | 船舶智能柴油机的比较研究及故障案例分析
◎ 宁波海运股份有限公司 / 蒋译苇 刘士光 赵国宝 |
| 13 | 船载液氢储罐热力学特性的数值仿真研究
◎ 浙江海洋大学 / 江真珍 吴文锋 刘 冲 邓 炎 沈禹禄 |
| 18 | 从海事监管角度浅析浙江海上风电建设从沿岸向深远海发展安全风险和建议
◎ 台州海事局 / 庄林锋 |
| 23 | 多船复杂会遇局面的安全避让策略
◎ 宁波引航站 / 贾志华 曹桂荣 唐晓虎 |
| 27 | 基于主动防御思维的引航风险防控策略研究
◎ 宁波大港引航有限公司 / 郑浩亮 周俊杰 安成达 丁得勇 |
| 31 | 恶劣天气下渔船航行危险评价系统研究
◎ 浙江海洋大学 船舶与海运学院 / 毛超进 艾万政 刘 琪 王家宏 |
| 36 | 扩展卡尔曼滤波算法在智能船舶多源罗经信号融合中的应用研究
◎ 浙江国际海运职业技术学院 / 贾爱鹏 吴晓红 |

行业动态

- 40 励志报国 荣耀出征——我校举行 2022 级定向培养军士生入伍欢送会
- 43 国内首艘沿海混合电力车客渡船“平湖造”
- 44 航运浙江 | “数字脉络”串起浙江内河航运智慧链

视野拓展

- 46 与包乐史驾帆航行 | 兰伯蒂的南太平洋航海冒险



2025 年浙江省航海学会理事长办公会议在杭州召开

2025 年 1 月 17 日，2025 年浙江省航海学会理事长办公会议在杭州召开，参加会议的有学会理事长、副理事长、党支部成员、秘书处和监事会成员等。

会议由理事长沈亚军主持，主要议程有：

一、通报 2024 年党支部工作情况，学习上级有关文件精神；

二、汇报并审议 2024 年度学会工作报告和财务报告；

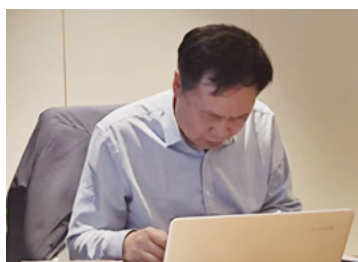
三、研究确定 2025 年度学会主要工作计划；

四、通报 2024 年监事会工作情况；

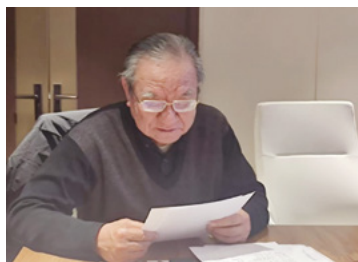
五、审议由秘书处提交的关于《章程》条款修订、团体会员单位增补和理事会成员调整等事宜。



图为会议现场



图为胡适军秘书长作理事会年度工作汇报



图为副秘书长马坚作年度财务收支情况汇报



图为沈亚军理事长主持会议

首先，沈亚军理事长向代表通报了浙江省航海学会党支部 2024 年工作情况，主持学习和传达上级最新会议精神和有关文件。

会议审议通过胡适军秘书长作的《浙江省航海学会 2024 年工作总结和 2025 年工作打算》的报告、审议通过马坚副秘书长作的《浙江省航海学会 2024 年

度财务情况》的报告。监事长张燕萍向各位代表介绍了 2024 年监事会工作情况。全体与会代表对学会过去一年的工作表示非常的满意，也对今后工作充满信心。大家围绕 2025 年工作打算和《浙江省航海学会 2024 年度主要工作计划》进行认真的讨论，提出许多新的工作思路和建议。秘书处按会议精神 and 代表建议修订了工作报告和工作计划。

会议对秘书处提交的相关议题进行认真的讨论和审议。会议代表一致同意对《章程》中关于党建工作部分和个人会员入会条件部分的修订。一致同意学会党支部关于建立工会、青年工作委员会、妇女工作委员会和提名由胡适军、方诚、张



图为监事长张燕萍作监事会年度工作情况汇报

燕萍分别担任负责人的决定。一致同意新增杭州汽车高级技工学校为常务理事单位；同意方诚（浙江交通职业技术学院）为副理事长；同意龚银交（舟山航运

省港口协会七届理事会第一次常务理事会议、 省港口协会内河港口分会成立大会在杭州召开



3月7日下午，省港口协会七届理事会第一次常务理事会议、省港口协会内河港口分会成立大会在杭州召开。省港口协会理事长，原省交通运输厅一级巡视员夏炳荣参加会议并讲话。会议由省港口协会常务副理事长杨挺理主持。

省港口协会七届理事会第一次常务理事会议审议通过了省港口协会理事会2024年工作总结和2025年工作要点。批准七届理事会新增会员单位27家、理事单位16家，增补副理事长、理事长助理、副秘书长等人选名单。随后，现场审议批准成立省港口协会内河港口分会，并举行内河港口分会成立授牌仪式。内

河港口分会会长赵列克，会员代表浙江沙王建材有限公司副总经理徐利民现场交流发言。

夏炳荣强调，展望未来，省港口协会的工作任重而道远。2025年，是“十四五”收官、交通奋战冲刺之年，也是“十五五”谋划、深化改革全面推进之年。协会2025年工作要点、任务目标已经明确，关键是要紧紧围绕省委省政府关于建设世界一流强港和“航运浙江”战略部署，充分发挥行业协会桥梁和纽带的作用，不断提高承接服务能力，加强交流合作，维护企业权益，助推全省港口建设与发展，为我省世界一流强港和航运浙江建设做出新的贡献。

和船东协会）、叶晓飞（宁波大学海运学院）、钱勇（杭州汽车高级技工学校）、陈赟（金华市交通运输行政执法队）、王厚成（衢州交通运输行政执法队）、熊照（丽水交通运输行政执法队）、鲁国平（浙江富兴海运股份有限公司）为常务理事；同意任明星（宁波引航站）、汤岳忠（舟山航运和船东协会）、叶彗娥（丽水交通运输行政执法队）为理事。

沈亚军理事长作会议总结讲话，他充分肯定学会在过去一年中所取得的成绩，并强调指出此次会议对

学会新一年工作定标并能取得更大进步具有十分重要的意义。他感谢会议代表、各团体会员单位对学会工作的大力支持，感谢为学会作出奉献的航海科技工作者，更希望大家一如既往地支持学会工作，争取更大的进步。

最后，沈理事长代表学会向全省航海科技工作者及家属拜早年并致以节日的问候，祝大家身体健康、工作顺利、阖家幸福！

浙江省航海学会秘书处供稿



内河港口分会成立仪式



省港口协会理事长，原省交通运输厅一级巡视员夏炳荣参加会议



内河港口分会会长赵列克交流发言



会员代表浙江沙王建材有限公司副总经理徐利民交流发言

夏炳荣要求，省港口协会围绕行业发展，要架设“连心桥”，当好政企“翻译官”。倾力打造 24 小时在线“政策咨询台”，将企业诉求翻译成政府听得进的“行业语言”，把政府出台的政策文件转化为企业“操作手册”。要力争成为港口建设与发展的“智囊团”、把脉行业发展难点痛点“老中医”、预判行业发展趋势的“预测师”和提供行业发展难题解决方案的“工程师”。要升级“服务包”，当好会员企业“贴心人”。要始终把服务会员放在首位，积极提供政策咨询、信息交流、业务培训竞赛等多元化服务支持，打造融通的信息交流平台、开放的资源共享平台和高效的行业合作平台，力争“事事有回音、件件能落实”。要抢占新赛道，勇当创新发展“弄潮儿”。挖掘广大会员单位潜能，发挥协会在学术研究、政策咨询、服务企业、省际互动等方面的优势，大力组织开展科创学术活动，拓展国际合作领域和渠道，重点围绕绿色港口、智慧港口建设的科技前沿、创新应用，聚焦浙江港口“双碳”标准

浙江省航海学会八届五次理事会暨团体会员单位联络员会议在宁波宁海圆满结束

以“坚强党建引领和创新发展、建设高质高效服务型社团”为主题的浙江省航海学会第八届第五次理事会暨团体会员单位联络员会议于3月14日-15日在山水秀丽、风景如画的宁波市宁海县举行。来自全省航海界各条战线的理事会成员、联络员及航海科技工作者代表和嘉宾120余人参加会议和相关活动。



大会主席台领导

3月14日14:30时，全体代表汇聚宁海金海开元名都大酒店，隆重召开浙江省航海学会第八届第五次理事会暨团体会员单位联络员大会。学会原理事长王德宝，本届理事会理事长沈亚军，副理事长董军、潘国华、金虹、陈彤，秘书长胡适军，理事会监事长张燕萍等学会主要领导参加会议。



大会会场全景



宁波市航海学会理事长董军致欢迎辞

会议由秘书长胡适军主持。首先，浙江省航海学会副理事长、宁波市航海学会理事长董军代表会议举办地学会向大会致辞，他对本次会议落地宁波宁海和各位代表、嘉宾的到来，加强各地学会和航海科技工

化体系的研究、制定和推广。要锻造硬实力，争当协会“模范生”。继续发扬优良工作作风，准确把握职能定位，团结会员企业、壮大会员基础，将协会建成一个行为规范、运作有序、专业精湛、诚信公正的现代型行业协会，增强行业感召力和凝聚力。

省港航管理中心党委副书记、副主任王竹凌参加会议并对省港口协会内河港口分会的成立致以热烈的祝贺。他表示，成立省港口协会内河分会恰逢其时、意义重大，是顺应“航运浙江”建设的战略需要，是契合内河港口高质量发展的客观需要，也是补齐浙江内河港口发展短板的现实需求。他希望，站在新的历史起点，

分会的未来发展要围绕战略发展建言献策。重点围绕航运浙江、世界一流强港建设等重大战略，落实工作力量，搭建工作平台，完善工作机制，积极建言献策，当好政府部门和行业企业的桥梁纽带。要推动内河港口安全绿色智慧发展。要坚持生态优先、数字赋能，聚焦安全韧性，积极参与内河绿色智慧港口评价体系建设和内河港口应急能力建设。要推动内河港口集约协同发展。要为推进内河小散码头改建提升，推动规模化集约化建设建言献策，坚持港产城协同，积极打造“以港兴城、港产融合”的现代化发展样板。

来源：省交通运输厅融媒体中心 省港航管理中心

作者之间的合作与交流表示由衷的感谢和热烈的欢迎，充分表达了宁波市航海学会和航海科技工作者的诚意、并预祝大会圆满结束！

本次大会主要分三个阶段。

第一阶段为大会工作报告及报告审议。由学会理事长沈亚军作“浙江省航海学会八届五次理事会工作报告”，副秘书长马坚作“浙江省航海学会2024年财务工作报告”，胡适军秘书长介绍“浙江省航海学会2025年主要工作计划”。经与会代表审议，大会一致通过“浙江省航海学会八届五次理事会工作报告”、“浙江省航海学会2024年财务工作报告”和“浙江省航海学会2025年主要工作计划”。大会工作报告和财务工作报告，充分体现了学会在2024年党建和学会各项工作中所取得的成绩。沈亚军理事长指出，在过去的一年里，学会工作取得了不少成绩，并得到上级部门的认可和表扬。这是中国航海学会、省科协、省民政厅的关心指导，是各会员单位、航海科技工作者的大力支持和全体工作人员共同努力的结果，希望各方能一如既往地关心和支持学会工作。他强调，在新的一年里，学会将以党的二十大和二十届二中、三中全会精神为指导，紧密团结在以习近平同志为核心的党中央周围，贯彻落实省科协十一届四次全委会会议精神，按我会2025年理事长办公会议



沈亚军理事长作工作报告



马坚副秘书长作财务工作报告



监事长张燕萍作监事会工作报告



副理事长金虹宣读文件

的决策和布署开展工作，争取更大的进步。

学会监事会监事长张燕萍作2024年监事会工作报告。她表示在过去一年中，学会工作成绩显著，工作程序合法、合规、公开、透明，无不良反响。监事会履行职责，为学会工作的正常、安全运行以及发展起到了保障、护航的作用。

副理事长金虹向大会通报2025年理事长办公会议相关决定和2025年浙江省航海学会常务理事会第一次会议“关于增补常务理事、理事的决定”。

之后，由学会监事会组织，全体理事代表和会员代表对学会党支部领导班子和理事会进行民主测评。

大会第二阶段是2024年度各级学术交流优秀论文表彰、荣誉通报与颁奖仪式。由副理事长陈彤，潘国华、董军、监事长张燕萍、秘书长胡适军分别宣读了和通报了浙江省航海学会“关于表彰2024年获奖优秀论文的通知”、“2024年苏浙闽粤桂沪湘皖航海学会学术研讨会获奖论文表彰决定”、“中国航海学会2024年度学术年会优秀航海科技论文奖通知”、“2024年度中国航海学会科学技术奖/技术发明奖获奖项目”通报、“2024年“科创中国”科技服务团项目推荐入选结果”通报等文件。大会对2024年获奖优秀论文举行颁奖仪式，主席台领导为获奖代表颁奖，



副理事长陈彤宣读文件



副理事长潘国华宣读文件

全体代表向他们表示祝贺，会场响起热烈的掌声。

第三个阶段为会议交流。宁波市航海学会秘书长毛旭东、杭州汽车高级技工学校校长钱勇分别代表会员单位作大会主题交流发言。

他们不仅总结各自单位近些年来所取得的工作成效，还将工作经验、办会(学)特色和发展思路奉献给大



毛旭东秘书长作主题交流发言



钱勇校长作主题交流发言



2024年获奖优秀论文颁奖仪式

家，具有很好的借鉴作用。部分嘉宾代表和新任理事会成员先后进行自我介绍和发言，纷纷为学会建设、人才培养和发展航海事业进言献策，提出许多宝贵的建议。

最后王德宝老理事长讲话，他充分肯定了过去一年学会所取得成绩，并给学会继续积极服务社会、创新发展指明方向。会议在热情、欢快的气氛中圆满结束。

本次会议还安排代表参观了宁海美丽乡村，领略了东海之滨城乡之人文风情，感受到祖国的大好河山绽放的春天的气息，深刻领会到习总书记“绿水青山就是金山银山”的远略。全体代表倍受鼓舞，表示在新的一年里，要以党的二十届三中全会精神为指导，不忘初心、立足根基、勇于创新，努力工作，为我省港航事业发展做出更大的贡献。

浙江省航海学会秘书处 供稿



嘉宾、代表作交流发言

船舶智能柴油机的比较研究及故障案例分析

◎ 宁波海运股份有限公司 / 蒋译菁 刘士光 赵国宝

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

关键词：柴油机；智能；比较研究；案例分析

0 引言

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

1 智能柴油机的结构特点

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

Tier II 和 MANB&W6G50ME-C9.5。

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

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

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

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

作为一种先进的燃料供给方式，共轨系统给船用柴油机带来了许多优点。首先，该发动机具有可灵活调整的喷油压力，可以根据不同的工作状态来决定最优的喷油压力，进而对发动机的综合性能进行优化，达到节能降耗、节能降耗的目的。本项目提出了一种

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

2 故障案例及分析

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

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

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

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

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

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



图 1 气缸压力动态监测

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

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

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

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

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

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

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

3 结论

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

在船舶行业中,智能柴油机的发展已经取得重大进展,成为推动船舶性能和可持续发展的关键技术之一。通过引入先进的数字技术和自动化系统,智能柴油机可以实时监测和控制柴油机的运行状态和性能,提高燃烧效率和能源利用率,降低燃油消耗和排放物排放。船舶智能柴油机的比较研究对船舶行业的技术进步和发展具有重要意义。通过比较不同制造商的智能柴油机的性能和功能,可以为船主和船舶设计师提供选型和优化方案,以满足不同船舶的需求和应用场景。然而,船舶智能柴油机的比较研究也面临一些挑战和限制。首先,不同制造商的智能柴油机可能采用不同的技术和系统架构,导致比较结果的不一致性。其次,智能柴油机的性能和效果受到船舶操作和维护的影响,需要考虑到实际运行环境和条件的差异。此外,智能柴油机的发展仍处于不断演进和改进的阶段,可能存在一定的技术局限性和成本挑战。然而,在面对这些挑战和限制的同时,船舶智能柴油机的比较研究依然具有重要的意义。只有通过深入的研究和比较分析,才能更好地了解和评估智能柴油机的性能和效果,为船舶行业的可持续发展提供科学的依据和指导。

参考文献

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

船载液氢储罐热力学特性的数值仿真研究

◎ 浙江海洋大学 / 江真珍 吴文锋 刘 冲 邓 炎 沈禹禄

摘要: 当前,氢能因具有能量密度高、使用无污染等优势,成为我国实现碳达峰、碳中和目标的有力抓手。其中,液氢以其理想的质量储氢密度和体积储氢密度,成为了氢大规模储存或长距离运输的最优形式。然而,由于液氢储存温度极低,即使采取了保温措施,外界热量仍会传递到储罐内部,导致液氢沸腾和热分层现象。特别是在海上运输时,长时间的热泄露,给液氢的安全储运带来隐患。本文通过数值模拟的方法分析了外部热泄露对低温液氢储罐内热力学行为的影响,包括储罐内流体的温度场、流场和气相空间压力变化情况。研究结果表明,在储罐顶部由于大量的热量积累,形成了高温区,并且靠近储罐碟形封头的区域由于受到顶部和封头热量的共同影响,形成了明显的自然对流,这对储罐气相区的换热具有促进作用,加强了热分层的形成。本文的研究为液氢储运系统的优化提供了理论基础和技术支持,对确保液氢的安全储运具有重要意义。

关键词: 海上运输;液氢储罐;热泄露;温度分层

0 前言

随着氢能作为清洁能源在全球范围内的迅速发展,液氢储运技术的研究变得尤为重要。液氢以其高能量密度和零排放的特点,成为未来能源发展的重要方向。由于液氢储存温度极低,尽管采取了保温措施,外界热量仍会传递到储罐内部,导致液氢沸腾和热分层现象。大量液氢蒸发会导致储罐内压力迅速上升,并在流经阀门时产生气蚀现象。特别是海上长时间运输时,热量不断积累,给液氢的安全储运带来隐患。因此,研究漏热作用下低温液氢储罐的热力学特性,对于确保液氢的安全储运具有重要意义。长时间的漏热作用更加符合海上运输过程中的实际情况,对于预测液氢储罐日蒸发率具有重要意义。

自然对流在储罐内的形成是由于外部热量的渗入,使得被加热的液体向上移动并在蒸汽和液体区域的顶部积聚,同时热能向下传递,形成液体的热分层现象。对静态液氢储罐内流体的分层行为,已有许多学者进行了广泛的研究。例如,Kanazawa^[1]等人通过实验研究了高 Rayleigh 数的自然对流传热,以考察不同漏热位置对流体流动的影响。Li^[2]等人通过实验研究了低温储罐真空条件下的热分层现象,结果表明保温失效丧失会导致严重的流体热分层,并且当低温储罐发生保温失效时,内部流场会发生剧烈的变化。Belmedani^[3]等人对液氮罐对低温储罐侧壁界面热边

界层中的传热现象进行了实验研究。

目前与液氢的相关实验数据较少,大多数研究集中于提出和开发理论模型来预测压力增长过程并预测储罐中液氢的热行为。Oh^[4]等人通过数值模拟研究了液态氢储罐在不同热流密度和真空压力下的蒸发特性,发现随着真空压力的降低,蒸发速率显著增加,影响了储罐的绝热性能,特别是在低真空压力下热传导增强的情况下。Liu^[5]等人研究了绝热层设计对液态氢储罐的热传导和蒸发率的影响,发现通过优化蒸气冷却屏障(VCS)的设计,可以显著减少热量传递,从而降低液态氢的蒸发损失,这对于氢气的储存和运输至关重要。Wang^[6]等人使用改进的热多区模型研究了液态氢储罐的自增压过程,发现蒸汽温度和界面质量传输速率是影响增压速率的关键因素,此外,热泄露和初始过热度也对增压过程有显著影响。Lv^[7]等人通过数值模拟分析了在晃动条件下,带有隔板的大型液态氢储罐的热力学行为,发现隔板能有效抑制液氢波动,但同时作为“热桥”加速了储罐内的增压和蒸发速率。晃动幅度、频率以及储存压力也显著影响了储罐的热力学特性。Huerta and Vesovic^[8]使用 CFD 建模研究了低温液体在储罐中的等压蒸发,开发了一个新模型,将热量分别引入气相和液相,能够准确预测蒸汽流动的动态、相间热传递以及蒸发速率,为改善低温储罐的设计和提供了有价值的见解。Shirai^[9]等人研究了液态氢在垂直加热管内的传热特性,涵盖

了从无沸腾到膜态沸腾的不同流动状态,发现随着热生成率的增加,传热系数上升,尽管质量流量有所减少。研究结果被用来开发一个预测液氢传热特性的模型,并与实验数据验证,表现出良好的一致性。

综上所述,低温储罐热行为已经在实验、理论分析和数值模拟中得到了广泛研究。然而,针对保温措施良好的储罐在持续漏热作用下的热力学特性的数值仿真研究仍然十分必要,这对预测储罐增压速率以及日蒸发率的预测具有重要意义。本研究将通过数值模拟方法,系统分析外部热泄漏对低温液氢储罐内热力学行为的影响,为优化液氢储运系统提供理论基础和技术支持,并为液氢储罐蒸发率的预测提供依据。为完成氢的气-液两相流的模拟,首先将流体视为密度与能量均随温度变化的粘性可压缩流体,并根据质量守恒、动量守恒、能量守恒构建控制方程,再通过流体体积法(VOF)构建体积因子输运方程实现自由液面的捕捉。对于湍流模型,选取传热计算结果较好的两方程模式标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型实现湍流现象的描述。储罐持续发生的漏热将导致液氢温度上升,当温度超过当前储罐工作压力对应的临界温度时,液氢蒸发为气态氢。分析了漏热对储罐内流体温度分布和压力的影响。本研究对深入了解液氢储罐的热物理过程具有重要意义,为液氢储罐在海上运输时的长时间储存提供理论依据。

1 数值模型建立

1.1 基本控制方程组

在液氢储罐内部,流体流动较为复杂,可以利用质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒律对流体体积微元分别建立连续性方程、动量方程和能量方程的微分形式进行描述。方程求解后可以获得包括流体速度、压力、温度在内的参数关系式。

(1) 连续性方程

对于具有连续性的流体来说,流体质点是处于连续状态且无缝隙占满流动的空间,流体的质量保持守恒,控制体内部流体的变化量等于从控制体表面流入或者流出的流体的质量,所有的流动问题都满足质量守恒定律:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = S_m \quad (1)$$

式中 ρ ——流体密度 (kg/m^3); t ——时间 (s);
 v ——控制体速度 (m/s); S_m ——质量源项 ($\text{kg}/(\text{m}^3\text{s})$)。

(2) 动量方程

液氢储罐内气液两相流体的动量的时间变化率等于作用于系统上的外力的总和:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla P + \nabla \cdot \{(\mu + \mu_t)[\nabla v + (\nabla v)^T]\} + \rho g + F_{VOL} \quad (2)$$

式中 P ——控制体压力 (Pa); μ ——流体的动力粘度系数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$); μ_t ——流体的涡流粘度系数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$);
 g ——重力加速度 (m/s^2); F_{VOL} ——体积力。

(3) 能量方程

液氢储罐气液两相微元体中能量的变化量等于进出微元体热量差与体积力对微元体所做功之和:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [v(\rho E + P)] = \nabla \cdot (K \nabla T) + S_h \quad (3)$$

E ——能量项 (W/m^3); K ——流体的导热系数 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); S_h ——能量源项

本文将上述基本控制方程中的源项均通过用户自定义函数(UDF)引入模型,并作用与整个计算域。

1.2 湍流模型

湍流是一种空间上不规则、时间上无秩序的非线性流体运动。低温环境下的湍流十分复杂,想要准确模拟液氢储罐在晃荡激励下的复杂流场需要选取合适的湍流模型。 $\text{Realizable-}k-\varepsilon$ 模型考虑了流体流动的各项异性问题、湍流漩涡和近壁区域的处理,在模拟弯曲壁面流动时不会出现失真问题,结合本文研究的储罐特点和弯曲壁面的问题,选用 $\text{Realizable-}k-\varepsilon$ 模型作为湍流模型。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho v \varepsilon) = & \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \\ & - C_{1k} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_c \end{aligned} \quad (4)$$

公式中, $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ 。

1.3 两相流模型

本文选用流体体积法来捕捉流体的运动。VOF是一种描述系统内各种流体体积分数的方法来模拟一种及以上互不相溶流体的方法。该方法通过引入一个值为1或0的函数来表示单个控制体内某种流体的体积分

数,其中 0 表示控制体内不含有该流体,1 则表示流体布满控制体内部。

$$\alpha_l + \alpha_v = 1 \quad (5)$$

其中, α_l 和 α_v 指的是液体和气体的体积分数

1.4 物理模型的建立

本文使用液氢中科富海设计制作的 30L 液氢存储充装测试平台作为仿真对象。储罐的简图如图 1 所示,该储罐为卧式储罐,由一个高度为 480mm,直径为 270mm 的圆柱体,以及高度为 65mm 的碟形封头组成。由于本研究主要关注漏热对储罐内部的影响,因此简化了储罐的结构,忽略了储罐连接件以及加注管等与本研究无直接联系的部分,储罐保温层结构等也被忽略,对于热边界条件将在后续详细说明。为尽可能详细了解储罐内部温度场的分布,在储罐气相区设置了 9 个监测点,在液相区设置了 1 个监测点。图 1 显示了传感器的位置。

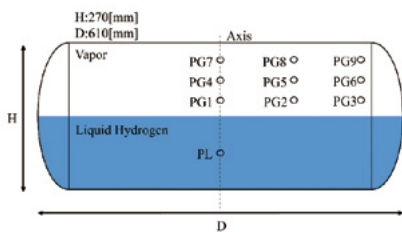


图 1 低温液氢储罐

1.5 模型验证

为验证模型的可靠性,在储罐中使用液氮进行了静态自加压试验,并将压力增长曲线与数值模拟结果进行了比较。如图 2 所示,模拟结果与实验数据的偏差一般在 10% 以内,模拟得到的压力曲线与实验结果比较吻合。

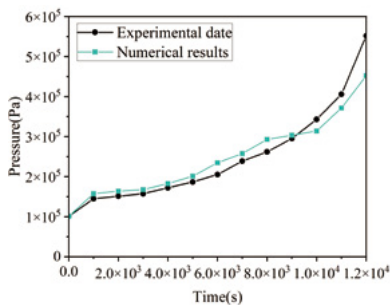


图 2 液氮模拟结果与实验数据的比较

1.6 边界条件与初始化

由于储罐保温结构复杂,本文通过热传导和对流复合传热公式计算出储罐的传热系数。

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_2} \quad (6)$$

其中, h_1 为外壁与空气之间的对流换热系数, k 为

保温层的导热系数, h_2 为液氢与内罐壁之间的对流换热系数。初始压力设为 0.1MPa, 初始温度为当前压力下液氢的饱和温度 20.43K。储罐初始装载率为 50%, 剩余空间充满气态氢。

2 数值实现

根据所建立的物理模型,利用 Fluent Meshing 软件对液氢储罐计算域进行非结构性网格划分。考虑到热量进入液氢储罐后,在壁面产生较大的温度梯度,故在靠近壁面的网格进行加密处理。同时考虑到气液两相的蒸发作用,故在气液界面处同样进行细化处理。利用 VOF 方法处理液氢储罐气液两相问题,主相为液相,第二相为气相。物性参数数据,如质量、饱和温度、饱和压力等来自物性查询软件 REFPROP v10.0。不同温度下的物性参数如表 1 所示。通过对不同温度下的物性参数进行多项式拟合,将得到的多项式输入到求解器中作为计算依据。

表 1 不同温度下气态氢的物性参数

Temperature (K)	Cp (J/kg·K)	Therm.Cond.(W/m·K)	Viscosity (Pa·s)
21	11.818	0.017887	1.0359e-6
25	11.138	0.020755	1.2662e-6
29	10.869	0.023632	1.4748e-6
33	10.719	0.026460	1.6700e-6
37	10.624	0.029225	1.8552e-6
41	10.559	0.031923	2.0321e-6
45	10.516	0.034558	2.2020e-6
49	10.488	0.037136	2.3659e-6
53	10.476	0.039663	2.5244e-6

对于液体的密度采用 Boussinesq 假设近似处理,气体密度采用理想气体模型。本文采用瞬态计算,计算方法选择压力-速度耦合计算。SIMPLE 方法用于耦合压力场和速度场,并加强连续性,采用二阶迎风格式对动量和能量的离散格式进行处理,对于湍流动能和湍流耗散率,采用一阶迎风格式。计算时间步长为 0.05s,将质量和动量的残差值设置为 10⁻³,而能量残差值设置为 10⁻⁶。

3 结果与讨论

由于液氢在不同压力下的饱和温度不同,发生相变的温度不同,所以本文对于饱和温度的处理和前文提到的物性参数的处理类似,采用了多项式拟合的

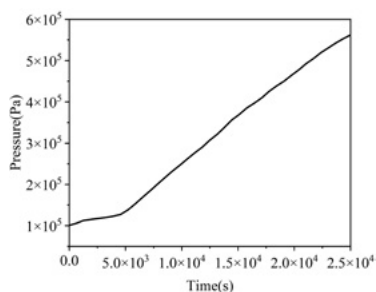


图3 气相空间压力随时间变化

方法得到不同压力下的液氢饱和温度函数。本文初始压力为 0.1MPa, 气态氢温度为初始压力下对应的饱和温度 20.43K, 液态氢温度为 20.40K。

仿真计算时,在储罐对称轴上,位于气相空间的中点设置了压力监测点,获取的气相空间压力数据如图2所示。可以看出,随着漏热的进行,导致液态氢出现蒸发效应,进而导致压力上升。在初始阶段,液氢储罐内压力上升缓慢,这是因为开始时液态氢处于过冷阶段,进入液氢的热量都用来使液氢升温,而且气液交界面的温差仅为 0.002K,此时液氢仅存在细微的蒸发现象。当液氢温度加热到饱和温度时,此时液氢的界面处甚至出现沸腾现象,加强和气相空间的换热,导致压力快速升高。

为监测气相区温度的变化,本文在气相空间设置了9个监测点,相关温度分布如图3所示。通过理论计算将储罐漏热简化为单位面积上的热通量作为边界条件加载到储罐罐壁,根据储罐对称的结构,在仿真计算中将储罐中轴线设置为对称边界条件,使得数值计算在不影响计算结果的情况下减小计算量,加快计算速度。

从图3可以看出处于同一垂线的监测点存在明显的温度差异。监测点 PG1, PG4, PG7 位于储罐中间,受

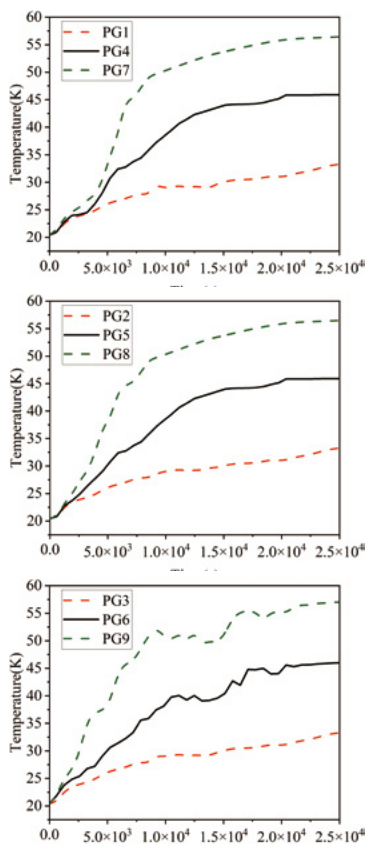


图3 气相监测点温度变化

到两侧的热流影响较小,故温度上升的幅度相对于其余垂直分布的监测点较小。对于监测点 PG4, PG7, 出现热分层的时间存在差异,监测点 PG7 在 2500s 时就出现了可观测的热分层现象,温差相对于监测点 PG4 达到了 1.217K,而此时对于监测点 PG1,在仿真进行到 10000s 时温度从 29.555K 下降到了 28.987K,这是由于气液界面出现了核态沸腾现象,波动的液氢对该点的冷却作用。

对于监测点 PG2, PG5, PG8, 这3个监测点的温度变化趋势与 PG1, PG4, PG7 相似,可以解释为,此处受到罐壁附近形成的热对流而产生的热浮力影响较小,故而整体温度上升趋势和监测点 PG1, PG4, PG7 类似。可以看到探测点 PG2 在整个计算过程中并未出现温度下降的情况,这可以说明在仿真过程中,并没有出现明显的沸腾现象。与监测点 PG4, PG7 不同的是,监测点 PG5, PG8 在 1920s 时就出现了明显的温度差异,此时相对于监测点 PG5, PG8 的温度达到了 24.917K。

对于监测点 PG3, PG6, PG9, 由于这3个监测点比较靠近罐壁,在热量的输入作用下和罐壁处自然对流的影响,受到热浮力的驱动,热量被带到储罐顶部并聚集,监测点 PG9 测到了储罐中的最高温度 57.004K。类似的,受到热对流的影响,监测点 PG6 和 PG9 在热分层的发展过程中温度产生了明显的波动。从图中可以明显的看到,监测点 PG6, PG9 出现热分层的时间早于之前分析的几个探测点,这是由于该位置的探测点除了受到储罐顶部的加热,还受到了储罐侧面封头加载的热量的影响。基于以上分析,可以得出结论,在靠近储罐封头位置受到漏热的影响最大,温度变化有明显的波动,并且升温幅度最大。

综合对比以上监测点的结果可以获得储罐气相区整体的温度分布情况,储罐顶部由于大量的热量积累,在储罐顶部形成了高温区。热量从顶部开始向下传递,越靠近储罐顶部获得的热量也越

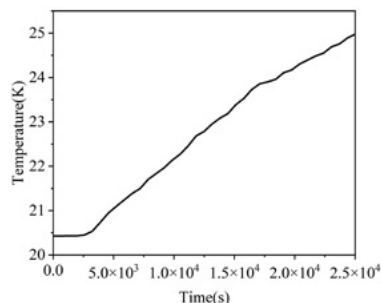


图4 液相监测点温度变化

多,较早出现热分层。此外,由于靠近气液界面,监测点 PG1,出现了温度下降的情况,可以推测在气液界面附近可能会有更多的温度波动。

由于液氢气化潜热达到了 448760J/kg,而本次数值仿真单位时间加载的热量远远小于液氢的气化潜热,在仿真的过程中液氢整体的温度不会发生很大变化,所以在液相区设置监测点时只对储罐液相区的中间位置的温度数据进行了记录。图 4 显示了液相区监测点测得的温度数据。温度整体呈现上升的趋势,到仿真结束时达到 24.980K 的最高温度。对于仿真前期,液态氢温度上升较慢,可能的原因是,此时气相区还没有形成明显的热分层,从气相区传递到液相区的热量较少,此时对于液相区温升的主要贡献来自于加载到底部的热量。随着气相区热分层的不断发展,液相区的温度也逐渐升高,另外由于压力的不断升高,氢的饱和温度也在不断升高,因此液态氢可以在超过 20.43K 时仍不发生气化。根据以上分析可以看出,液氢在储罐中不仅受到来自罐壁的热量,气相区也在不停的向其输送热量,随着热分层的发展,由气相区向下输送热量的效率也越高。

4 结论

本研究通过数值模拟深入探讨了漏热作用下低温液氢储罐的热力学特性,揭示了储罐内热量传递和液氢沸腾的关键机制。研究结果表明,外部热量的持续渗入会导致储罐内流体的显著温度分层,储罐顶部形成高温区,并且靠近储罐碟形封头位置的区域受到了顶部和封头热量的共同影响,形成了明显的自然对流。这种对流增强了气相区的换热过程,加速了液氢的蒸发和压力上升。

随着漏热的进行,液氢在储罐内经历了从缓慢蒸发到气液界面的沸腾现象。数值模拟显示,在储罐顶部和侧壁附近区域的温度上升最快,并出现了明显的温度梯度和压力变化。研究还表明,不同位置的监测点显示出热分层发展的不同阶段和特征,靠近储罐顶部和封头的区域热量积累最为明显,温度波动也最大。

此外,研究发现液氢储罐的保温性能和储罐内的流体动量、能量传递密切相关。使用合理的保温材料和

优化的结构设计,可以显著减缓储罐内部的热量积累,降低蒸发率,从而提高液氢的储存稳定性和安全性。

这些发现对于理解液氢储运过程中的热力学行为具有重要意义,特别是在长时间海上运输的情境下。本研究结果为液氢储罐的设计和操作提供了理论基础和技术支持,有助于提高液氢储运的安全性和效率。未来的工作可以进一步探讨不同保温材料和技术对热量传递的影响,优化储罐结构以更有效地控制内部热力学变化。同时,通过实验验证和改进数值模型,可以更准确地预测液氢储罐在不同运输条件下的热力学行为,为液氢的大规模应用提供更可靠的技术保障。

参考文献

- [1] Kanazawa T., Kudo K., Kuroda A., Tsui N. (2004) Experimental study on heat and fluid flow in LNG tank heated from the bottom and the sidewalls. *Heat Transfer*,33(7):417–30.
- [2] Li X., Xie G., Wang R. (2010) Experimental and numerical investigations of fluid flow and heat transfer in a cryogenic tank at loss of vacuum. *Heat and mass transfer*,46:395–404.
- [3] Belmedani M., Belgacem A., Rebiai R. (2008) Analysis of natural convection in liquid nitrogen under storage conditions. *Journal of Applied Sciences*,8(14):2544–52.
- [4] Oh S.J., Kwon J., Jeon K.S., Yoon J.H. (2024) A numerical analysis study on the characteristics of evaporation in liquid hydrogen tank with vacuum layer according to changes in heat flux and vacuum pressure. *International Journal of Hydrogen Energy*,50:542–57.
- [5] Liu Y., Zhou P., Jeong B., Wang H. (2023) Design and optimization of a type-C tank for liquid hydrogen marine transport. *international journal of hydrogen energy*,48(89):34885–96.
- [6] Wang H., Wang B., Pan Q., Wu Y., Jiang L., Wang Z., et al. (2022) Modeling and thermodynamic analysis of thermal performance in self-pressurized liquid hydrogen tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*,47(71):30530–45.
- [7] Lv H., Chen L., Zhang Z., Chen S., Hou Y. (2024) Numerical study on thermodynamic characteristics of large-scale liquid hydrogen tank with baffles under sloshing conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*,57:562–74.
- [8] Huerta F., Vesovic V. (2021) CFD modelling of the isobaric evaporation of cryogenic liquids in storage tanks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,176:121419.
- [9] Shirai Y., Shiotsu M., Matsumoto T., Kobayashi H., Naruo Y., Nonaka S., et al. (2021) Heat transfer characteristics of liquid hydrogen flowing inside of a vertical heated pipe under quasi-stationary heat input. *Cryogenics*,113:103230.

从海事监管角度浅析浙江海上风电建设从沿岸向深远海发展安全风险和建议

◎ 台州海事局 / 庄林锋

摘要：随着我国海上风电从沿岸向深远海快速发展，施工安全风险剧增，安全问题日益突出，给海事安全管理带来巨大压力和挑战。浙江省海上风电产业在全国范围内起步较晚，但发展速度和规模已呈现后来居上的趋势，可是相应的海上风电海事监管监管机制和配套制度尚不完善，存在较高履职风险。笔者从海事监管的角度，调研梳理了浙江沿岸、近海、深远海风电建设过程中存在的风险，提出一些浅显的建议，希望为“十四五”后期近海风电以及“十五五”期间深远海风电建设提供一些帮助。

关键词：深远海风电；海事监管；安全风险；建议

一、研究背景

在“碳达峰、碳中和”的目标背景下，海上风电作为新能源的排头兵，正在成为全球绿色低碳技术的制高点，海上风电发展速度呈现越来越快的趋势。从全国来看，“十四五”期间全国海上风电总规划装机超 100 GW。从《浙江省海上风电发展规划》来看，到 2025 年，全省海上风电累计并网装机达到 600 万千瓦以上；到 2030 年，全省海上风电累计并网装机达到 1500 万千瓦以上；到 2035 年，全省海上风电累计并网装机达到 2500 万千瓦以上。

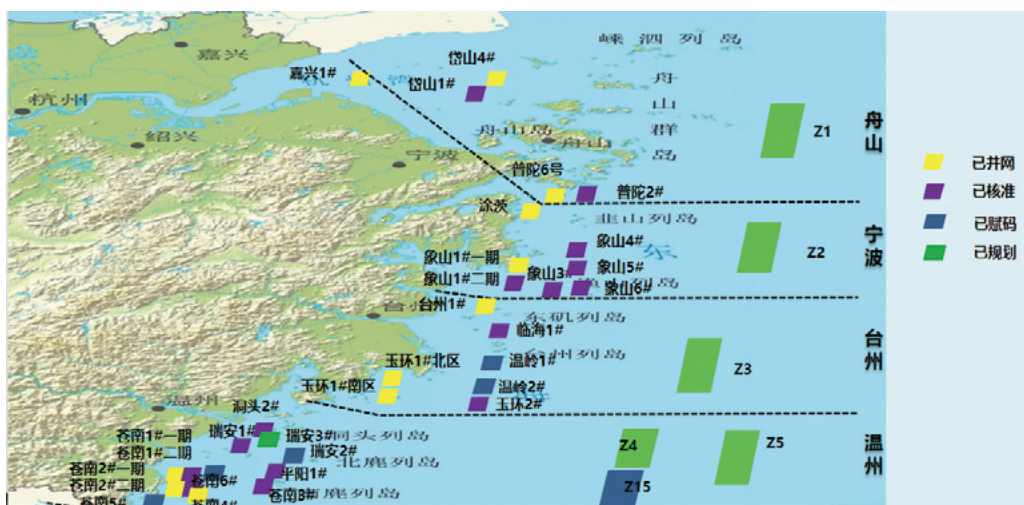
从海上风电开发区域来看，‘十四五’期间，海上风电项目基本以省管近浅海海域为主，近海海域受海洋生态红线、港口、锚地、航道、军事区、渔业养殖等影响，可用于海上风电开发的海域十分有限。在经历了 2019-2021 年国内海上风电“抢装潮”以后，20 米水深以内规划的海上风电已基本开发建设。为缓解各方用海矛盾，海上风电逐渐向深远海快速发展。业内普遍认为，水深 30~60m、离岸距离 30~130km 的海上风电项目，将成为“十五五”期间的主流。笔者从海事监管的角度，结合自身工作实际，借鉴学习浙江、江苏、广东等地兄弟海事局海上风电监管经验，梳理海上风电从近浅海水域向深远海海域建设期间的安全风险，提出服务保障海上风电产业发展对策建议，希望为“十四五”后期近海风电以及“十五五”期间深远海风电建设提供一些帮助。

二、建设环境

从建设海域来看，深远海风电较沿岸风电离岸距离较远，水深更大。目前业内对深远海风电存在两个层面的定义。在规划角度，习惯于将我国专属经济区、大陆架及所管辖的领海外其他海域的海上风电项目，看作深远海项目。也就是说，领海基线外 12 海里是领海属省管区，往外 200 海里是国管区，即深远海海域。在工程角度，一般认为水深大于 50m 的为深海，场区中心离岸距离大于 70km 的为远海。

根据《浙江省海上风电场工程规划报告（2021-2035 年）》，浙江沿海领海基线以内风电场 14 个，省管区规划海上风电场 18 个，分布于舟山、宁波、台州和温州海域，规划总装机容量 850 万千瓦，规划海域面积 1080 平方公里，场址离岸直线距离约 23-55 公里，水深 15m-49m。国管区共规划海上风电场 6 个，装机容量 2800 万千瓦，规划海域面积 4424 平方公里。截止 2024 年 7 月，浙江沿海已建成并网发电海上风电场共有 11 个，其中宁波 4 个、舟山 2 个、温州 3 个、台州 2 个，11 个海上风电场共有装机容量 290 万千瓦，使用海域面积 385 平方公里，布置风机 494 台，年发电量超过 100 亿度。

以温州外海的浙江深远海海上风电示范暨信息能源骨干管网试点项目（Z15）为例，总装机规模 200 万 kW，海域面积约 271km，场址中心离岸直线距离约 105km，位于浙江沿海公共航路外航路东侧，水深



量风电机组,可以有效降低风电场度电成本,减少风电场占用海洋面积,进一步缓解能源用海和交通用海矛盾。

为支撑起大兆瓦风力发电机组,适应深远海水深条件,海上风电项目基础型式也从多桩承台和单桩向导管架和

约 55~67m。

该水域存在风险主要有：①自然条件复杂，施工难度大。该水域常年风力在 6 级及以上，风力 8 级以上天气占比 1/4 以上；水深达 60m 左右，水深较深，施船舶抛起锚困难，如遇风、浪、流叠加的情况，船舶的实际可操纵性较差，控制船位的能力较弱。同时警戒船存在较长时间的巡航警戒，或漂航警戒，或旁靠勘探船舶，人员容易发生精神松懈。②沟通渠道不畅，相互协调能力较弱。该水域航行多为外轮和远洋渔船，施工船舶和此类船舶沟通存在一定难度，加之渔船活动的不规律，渔船碍航等因素导致航经船避让难度较大，增加避让施工水域风险。③监管手段不足，感知体系不完善，施工水域出现看不见、叫不到、管不住、救不及的窘境。由于雷达、VTS、VHF 等海事监管手段未覆盖外海水域，考虑到海巡艇的抗风等级和海事人员实际，很难实现外航路外常态化巡检，需要付出巨大的成本，承担极大的风险。

项目	风机容 / MV
浙能台州 1 号	7.5
国电象山 1 号	9.0

漂浮式基础演变，且桩径越来越大、桩长越来越长、导管架重量越来越重。海风基础主要包括海塔（塔筒）、管桩、导管架，目前水面以下海风基础按照是否连接海床，主要分为固定式和漂浮式，一般深远海适用漂浮式风机。一般认为，20 米水深以下的海风，使用单桩基础和高桩承台基础为主，20 米 -60 米使用导管架基础为主，60 米以上水深以漂浮式基础为主。

单桩基础：是目前海上风电工程中应用最广泛的一种基础型式，主要由钢管桩构成，由桩腿插到海床以下实现固定。单桩基础由于其结构简单、易于建造、无需过多前期准备等特点，是目前中国海上风电应用最广泛的基础类型。以台州 1 号海上风电为例：7.5MW 风机单桩单桩基础水深在 -8m ~ -14m，单桩直径 7.5 m -8.5，桩长 80-102m，最重约 1750 t。

浙江海域风电单桩基础参数

项目	风机容量 / MW	单桩直径 / m	单桩桩长 / m	单桩桩重 / t	单叶片 长度	起重船
浙能台州 1 号	7.5	7.5-8.8	80-102	1300- 1750	100	宇航起重系列 (3200、 3800t 全回转起重船)
国电象山 1 号	9.0	7.5-10	75-110	1500- 2000	110	宇航起重系列 (3200、 3800t 全回转起重船)

三、风机发展趋势

单座风力发电系统包括风电机组、风电基础以及输电控制系统三大部分。近年来,从沿岸风电向近海发展的过程中,风力发电机组也正朝着大兆瓦风力发电机组发展,机组容量从最早的 3、6、8 MW 快速跃升至目前的 12、15、18 MW,通过采用大兆瓦、大容

导管架基础：导管架基础结构因其在深水海域的优势，占比将会逐渐增多，是除单桩基础外，使用最多的类型，适用于 20-50 米水深海域。通常有 3-4 个桩腿，桩腿之间用撑杆相互连接，形成一个有足够强度和稳定性的空间桁架结构。桩腿主要使用小钢管桩，根据小钢管桩和导管架结构施工的先后顺序，分为先桩导管架和后桩导管架两种。导管架式基础安装

前，需要首先在海底钻孔，装入导管，之后一般采用整体吊装或滑落入水压载竖立的方式将其安装至预先准备好的导管内，再顺着导管打桩，最后在导管与桩之间浇灌水泥，使其成为一体。以玉环2号海上风电为例：16 MW、18MW 风机导管架基础水深范围 -36m ~ -40 m，桩长 89 m ~ 104 m，单根桩最重约 350-400 t，导管架重 2200-2550t。

大兆瓦风机基础设计参数导管架参数

项目	风机容量 / MW	导管架 高度 / m	钢管桩 桩长 / m	钢管桩 桩重 / t	导管架 重量 / t	叶片长度 / m	起重船
华能玉环2号	16	74	89	350	2200	123	华西 5000(5000t 全回转起重船)
	18	76	104	400	2550	126	海建 3000(3000t 全回转起重船)

漂浮式基础：本质上是漂浮在海面上的平台，利用系泊或锚针在海底进行位置的固定，通过三力的平衡来维持海上风电机组基础结构的稳定性，适用于深远海域风电发展。目前浙江沿海尚未建设和实验浮式风电，笔者了解到的均为试验案例：2022 年我国首个海上浮式风电——中国海装“扶摇号”漂浮式风电装备在平均水深 65m 的广东湛江海域进行试验；2023 年 5 月 20 日，中海油“海油观澜号”漂浮式机组在离岸 136km、水深 120m 的海域完成了安装，并入海上油田电网。

四、风电建设流程

海上风机的安装工作主要包含 3 个部分：风机基础安装、风机发电机组安装（包括叶片、机舱和塔架等）以及海缆安装；如果是漂浮式风机基础，还包括锚链系统的安装及对接工作。施工期结束以后，风场投入并网运行后，主要是后期消缺、运维和风机故障大部件更换。

（一）大部件运输：风电设备主要有风机、风叶、塔筒、导管架等物件，都属于超重、超长、超高且贵重的大型不可解体构件。其中海上升压站又是海上风电工程中体积最大、重量最重的构件。一般风机部件装船运输方式选用“一船一套塔筒”、“一船两套机舱轮毂”、“一船一套叶片”等方式运输，不同于相对成熟的集装箱、干散货等大宗货物的海上运输，这些大型构件运输船在将大型设备运至风场进行组装

具有专业性强、技术要求高、风险大的特点，它是海上风电建设最为关键的环节，是影响施工进度的重要因素，更是许多施工单位安全生产的重中之重。

（二）风机基础安装：

单桩基础由全回旋式起重船配套一个稳桩平台和液压锤进行单桩基础施工作业，基础自重入水后，对单桩基础进行液压锤沉桩施工。桩顶标高达到预

定高度后，起重船绞锚离开机位，后续单桩基础防冲刷保护等

工作由吹填船及运输船完成。如此反复完成所有沉桩作业。部分风场还会进行多作业面同步施工。

导管架基础安装分为基础桩安装和导管架施工。基础桩安装和单桩基础安装使用船舶和施工工艺相同，导管架施工包含下放、对位及安装。根据计算，单个机位的四桩导管架基础桩施工总时长约 72 小时，单个机位导管架安装施工总时长约 24 小时。

（三）风机安装：根据作业特点，可将风电安装船分为漂浮式、坐底式、自升式、自升自航式和半潜式。漂浮式安装船可用于不同水深海域，移动速度快，但作业时稳性较差，尤其当波浪引起船舶运动时，会引起安装部件的运动，给安全作业带来很大风险；坐底式安装船在浅水海域虽然适用性较好，但移动速度慢且无法在深水海域使用；自升自航式安装船兼具移动速度快、作业水深大和稳定性高等优点；半潜式安装船各方面表现均较优异，但租金高昂。目前最常见的风电安装船是自升式（包括自升自航式）安装船。

（四）海缆敷设：随着风电场址距岸越来越远，海上风电海缆路由的长度和施工工期也相应增加。以玉环2号海上风电场海缆路由为例，场区中心点离岸距离约 34km，风电场通过两回 220kV 海缆自东向西依次穿越东航路、西航路、沿岸小型船舶航路 3 条公共航路，月均交通流约 10000 余艘。220kv 升压站至登陆点海缆 2 根长度约 56km，共 112km。66kV 风场内共 8 条回路，海缆总长度 54.6km。预计施工工期约 3 个月，使用万吨级配置 DP1 定位系统，四角侧推的主缆敷设船，配合拖轮、锚艇、警戒船等辅助船。

(五)运维管理:目前,无论是海事部门还是业主单位对运维作业的管理都属于粗放型,只关注了运维船舶的“交通”属性,没有考虑风电桩基、升压站的靠泊能力和风电场水域风浪特点,缺少对运维船舶吨级、抗风性能等的要求,低标准船舶参与运维作业突出,易引发水上交通事故。此外,辖区目前投产运营的风电场尚处于质保期,运维作业主要由厂商承担,业主单位更多关注风机是否正常运转,很少对运维船舶进行管理。

五、风险总结

从风险研判角度,笔者将其分为交通运输风险、施工作业风险和其他风险三部分。

(一)海上交通运输风险

①船舶操纵风险:大型构件高度大,特别是导管架和升压站等部件,高度超20米,在航行过程中一定程度上会阻碍驾驶员视线;受风面积大,船舶操纵难度大。

②船舶碰撞风险:大部件出运码头基本都在浙江范围以外,多在江苏广西等地,运输航行路线较远,航经的部分水域非正式航道、无助导航标志的复杂水域,在此期间若瞭望疏忽或操纵措施不当,存在较高的船舶碰撞、搁浅和缠绕渔网等风险。同时,施工船舶运输路程长,运输过程增加了附近水域的交通流量,加大了船舶之间的碰撞概率。

③绑扎、系固、配积载风险:绑扎、系固、配积载方案不科学,大部件重量大,对甲板局部压力大,对船舶结构强度要求高,装载不当将严重影响船舶甲板的稳性和强度。造成大部件入海、甲板变形或破裂,未采取正确的绑扎、系固、衬垫等措施,受海上风浪影响,可能会产生移动造成磕碰、损坏乃至滑入海中灭失。

④安全管理风险:大部件运输施工单位缺少完整合规的装载方案或操作规范指引,海上风电大件运输装载方案编制多靠经验,理论依据不够充分,编制的应急预案不完善。公司及项目负责人对选配船、工装布置、绑扎加固、海上航行与运输、风场靠泊整个作业过程,监管松散。码头方与船舶方缺乏有效沟通,信息交互传递不及时,现场工作人员盲目装载,产生

安全隐患。

⑤商渔船碰撞风险:浙江沿海是我国传统渔业捕捞密集区,含有舟山、鱼山和温台三大渔场,三条公共航路和一条小型船舶习惯航路贯穿南北,开渔后沿海日均通过商船约3500艘次、作业渔船约15000艘次。拟建风电场位于东、外航路之间,与三大渔场高度重叠,将严重挤压渔船捕捞作业空间,可能导致渔船进入风场和公共航路内开展捕捞作业,风机和船舶缠绕渔网风险将大幅增加。

(二)施工作业风险

①大型船舶应对恶劣天气风险:此类船舶受风面积大、受台风、强对流大风天气影响大,无自航能力,避风需拖轮协助,操纵能力受限,船舶撤离慢、航行时间长。自升式安装船支腿抛锚对锚地要求高,溜桩、穿刺等风险突出,产生的支腿孔破坏锚地正常功能。此外,浙江沿海避风锚地和待泊水域缺乏规划设置,部分大型无动力施工船需要跨区域台风避风,面临的风险和挑战增加。

②碍航风险:无动力起重船、打桩船工作时抛八字锚,定位锚缆及主牵引钢缆会对航经该水域的渔船、小型船舶具有碍航性,存在船舶碰撞施工船舶、主牵引钢缆及定位锚缆的风险。在风机基础沉桩施工完成、机组及上部构件尚未安装时,受潮汐的影响风机桩基础的出水面可能会被海水淹没或难以被船舶发现,对附近水域通航船舶具有很高的碍航性。

③转卸吊装风险:大件货物吊装对船舶稳性影响较大,引起船舶倾斜,容易引起货物移动,对船壳造成破坏,严重造成船舶稳性消失,船舶倾覆和人员伤亡。而且大件货物的吊装较为复杂,如操纵不当,容易引起人员伤亡,另外,本工程为海上作业工程,风浪流对船舶大件货物吊装影响较大,容易引发事故

④人员管理风险:施工人员数量多,作业工种多种多样,虽然部分人员接受了海上安全培训,但依然缺乏海上实践经验,人员的素质各不相同,对海上施工风险预估不够。加上海上风电施工过程涉及单位较多,各家单位人员归属主体不同,分散于项目不同区域,管理异常艰巨,部分管理人员以电力行业为主,对海上施工风险预估不足,仍存在抢工期、重生产轻安全的情况。

⑤多作业面相互影响风险：施工期间需投入大量船机设备，船舶管理难度大，施工船在进场、移位及避风期间，多需要采用拖带方式进出施工水域，且施工船舶需交叉、配合作业，施工中可能会出现相互干扰的情况，存在施工船舶之间发生相互碰撞或触碰定位锚缆的风险。

（三）其他风险：

①运维风险：随着已建成风电场区数量的不断增加，运维船舶、运维人次随之大幅上升，但目前浙江尚无运维母港，运维登乘点设施简易，未取得港口经营许可证，运维船舶靠泊、人员上下无法得到安全保障，出海船舶、出海人员无法有效管控，留下水上安全隐患。同时，在港口规划修订时，地方政府未充分考虑海上风电发展对运维母港的现实需求，运维基地、配套码头、运维船舶临时停泊点等未纳入港口规划布局。

②应急救助能力不足风险：海上风电因其特殊性，大型应急救助船艇、救助直升机进入风电场水域受到较大限制，对应急救助要求相对较高。现阶段，辖区缺乏适应风电水域应急救援特点的装备投入和应急救援队伍，海上风电应急救援未纳入地方应急管理体系，各部门间仍存在机制体制壁垒，未形成相互统筹、相互兼顾的“一盘棋”式应急救援体系。

六、建议

海上风电场安全管理是一项系统工程，应强化系统谋划，以长远发展、协同共治和智慧管控为理念，统筹推进产业一体发展和优化升级。基于近海风电场海事监管经验对深远海风电建设提出以下建议：

（一）强化事前预防，统筹海风产业发展与通航安全。海上风电场安全管理是一项长期工程，特别是深远海风电场，建设规模大，工程时间长，对通航安全影响大，海事等部门应注重前期把关，发挥专业性、进行专业指导、提出专业建议。①指导建设单位做好选址、设计、建设、运营全生命周期不同阶段专项研究和评估，科学客观评估项目实施对通航安全的影响和存在的风险，协调处理好风电场建设与船舶通航之间的关系，优化风电场平面布置方案和海缆路由方案，开展风电场配套防撞、导助航、电子围栏等安

全设施配备专题研究，制定相应的保障措施。

（二）强化科技赋能，完善基础设施设备。将基础设施设备配置纳入深远海风场建设必要条件，不断加强风场感知能力、通信能力和新质保障能力建设，督促业主和建设单位按照“三同时”要求配齐配全，实现了海上风电场“看得见、管得住、叫得应、可追溯”。包括①加强气象和海况监测，建议通过购买当地气象部门的气象服务、签订第三方的专业气象服务协议等措施来有效预测和监测施工窗口期。②配套建设 AIS 收发基站、风场雷达、VHF 通信设备、具有夜视、长视距、防爆功能的视频监控（CCTV）等通信和感知设备，确保能够接收、识别、主动探测场区内及周围足够范围内的船舶动态信息，实现船舶 VHF 通话和自动广播功能。③配套网络传输通信设备，通过卫星、微波通信等基础设施设备，确保满足场区周边信号覆盖、电传、数据实时传输，实现相关数据、图片、音频、视频等信息的在“场区—船—岸”间交互。④搭建海上风电安全监管平台，融合雷达、GIS、AIS、CCTV、气象海况、船舶人员动态和风电场产能等数据信息，实现一屏集成、动态一屏展示、人船实时可联和产能实时更新。⑤开展利用风机和升压站开展孤岛生存保障研究，打造海上应急救助站，提高风电场海上突发事故下人员自救及求救的机会。

（三）强化主体责任落实，加强施工安全管理。①完善保障方案。聚焦海上风电施工标段多、大型施工船舶多、施工人员多、分段分区多作业面施工，科学分析不同施工标段、不同施工阶段相互影响，推动合理安排施工组织，科学确定施工警戒、拖轮值守等针对性保障措施。②完善安全管理体系，推动海上风电施工安全风险管控的标准化、规范化，为海上风电安全作业提供指导，规范作业人员行为，避免或减少海上风电安全事故的发生。③加强人员安全培训教育。提高员工安全意识和辨识危险因素、安全作业、应急处置的能力。④加强船机设备安全管理，根据风电场的气象、海况、水文地质环境，风机装备的情况选择合适的船舶进行作业，指导施工单位根据不同船舶作业特点针对性地制定安全专项施工方案和应急处置方案。

（四）强化协同共治共享，打造海风综合监管格局。海上风电安全管理涉及多个部门，需各部门协同

多船复杂会遇局面的安全避让策略

◎ 宁波引航站 / 贾志华 曹桂荣 唐晓虎

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

关键词：多船会遇；复杂局面；船舶安全；避让

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

置，考验的不只是驾引人员的技术能力，更考验了驾引人员的安全素养。

1 多船会遇局面的定义

船舶会遇态势分为两船会遇局面和多船会遇局面，两船会遇局面就是《规则》所规定的船舶会遇态势，包括互见和能见度不良时两种情况，而多船会遇局面只适用于《规则》第二条责任条款，并没有具体规定。结合《规则》相关条款和目前研究多船会遇局

发力，统筹形成工作合力，实现海上风电多方共管格局。①加强顶层设计。在五部委《关于加强海上风电项目安全风险防控工作的意见》文件基础上，结合海上风电安全监管存在问题，在省级层面研究制定海上风电项目安全管理指导意见、出台海上风电建设运维安全技术标准。②明确各方职责。按照“管行业必须管安全、管业务必须管安全、管生产经营必须管安全”，推动市县属地政府发文明确海上风电安全监管各部门职责、属地政府职责，实现海上风电多方共管。③健全跨部门协同工作机制。协同谋划海域布局、科学分配用海资源、着重解决商渔矛盾、合力保障建设安全、共同服务投产运维，建立跨部门海上风电联合执法体系，对海上风电建设和营运全周期协同监督管理。④协同提升风电保障能力。推动海上风电集中的县（市、区）政府成立海上风电建设运维安全生产

专业委员会，定期研判海上风电安全形势，一体化推进运维母港建设、应急救助能力、避风待泊水域划定等工作，同向发力提升海上风电保障能力。

参考文献

- 1.《深远海风电，“十四五”蓄力正当时》作者：赵靓 来源：风能。
- 2.《海上风电工程施工安全管理现状与对策分析》作者：黄辉；徐浩；胡红亮；胡华宾；周国兴；张强 来源：水电与新能源。
- 3.《海上风电开发基础选型先行》作者：杨润思 来源：国信证券。
- 4.《海上风电工程施工安全管理现状与对策分析》作者：黄辉；徐浩；胡红亮；胡华宾；周国兴；张强 来源：水电与新能源。
- 5.《海上风电通航安全自主监控系统及应用》作者：李剑锋 来源：实验室研究与探索。
- 6.《海上风电项目中导管架基础施工技术综述》作者：田伟丽 来源：中国港湾建设。
- 7.《重大件货物海运市场现状和未来发展趋势》作者：陈矗立 来源：世界海运。

面可界定如下：在一定水域内，当三条及以上船舶相互接近时，若本船同时与各目标船均形成两船会遇，或者本船仅与其中一条目标船形成两船会遇，但因其他目标船的存在，本船所必须采取的避碰行动受到限制，则称本船处于多船会遇局面。

2 多船会遇局面时的责任划分

《规则》对船舶会遇局面的划分、避让责任和义务的确定是以两船相遇为前提，当多船会遇并存在碰撞危险时，《规则》没有做出具体规定。但是在航海实践中，多船会遇局面是客观存在的，尤其是在港口水域内，多船会遇的情况是经常出现的。

当多船会遇局面出现并存在碰撞危险时，如何适用《规则》条款，一直存在不同的看法。一种观点认为：多船会遇属于特殊情况，适用于《规则》第二条“责任”条款，处在多船会遇局面中的各船应“按海员通常做法或当时特殊情况的要求”采取相应的避让行

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

目前比较普遍且容易被人们接受的观点是：(1) 互见中多船会遇并存在碰撞危险时，对于每一船舶而言，首先应分析本船与其周围每一船舶的避让关系，如果这些避让关系之间不存在矛盾，则该船与他船之间的避让关系成立，可以按照两船适用《规则》相应的条款；(2) 如果这些避让关系之间存在矛盾，则应将整个局面当作一种特殊情况，适用《规则》第二条“责



图1 “B轮”“G轮”“R轮”三船会遇示意

任”条款；(3)能见度不良不在互见中的多船会遇局面，每一船舶均应遵守《规则》第十九条，各船负有同等的避让责任和义务。

3 多船会遇局面船舶避让实例

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

1756：“B 轮”中远船厂对开，前进二，速度 9 节，引航员发现动态不明的“G 轮”立即减速到前进一；“G 轮”此时正处于六横岛和西白莲之间条帚门出口航道边缘，船首向大概 350，速度 2.5 节，引航员 16 频道联系得知“G 轮”刚从西白莲鑫亚船厂出来，准备到佛渡 8# 锚位抛锚；“R 轮”条帚门进口刚过六横煤电码头，速度 10.2 节，计划 7# 警戒区左转去靠梅山。

当时困境：“B 轮”快到 7# 警戒区，临近转向，“G 轮”却在“B 轮”的出口航道边缘。“G 轮”的过慢船速及左侧空间有限，再加上急落流，这些都不利于“B 轮”提早转向与“G 轮”过红灯，因为可能被压向 -10 米等深线；“B 轮”即使加速过“G 轮”船头，右转及与“R 轮”

的会遇也是问题。“R 轮”同样快要左转，强抢到“G 轮”船头转向绝非上策；即使提早转向过“G 轮”船尾，也面临与“B 轮”的会遇问题。“G 轮”刚从船厂出来，不能过多加车，再者其距锚位也不远，本身也不愿过多加车。

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

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

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

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

“B 轮”“G 轮”“R 轮”三船会遇雷达图见图 2。

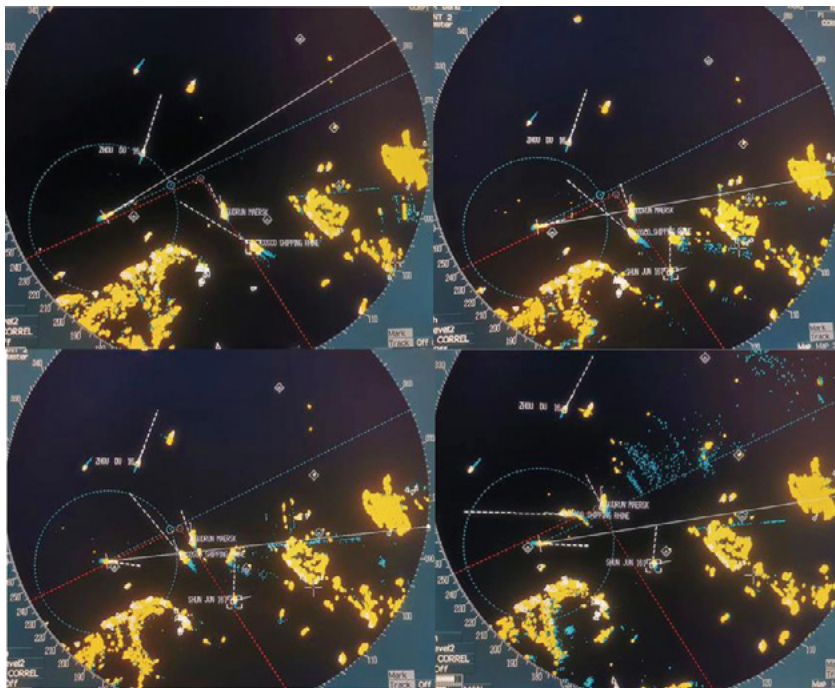


图 2 “B 轮”“G 轮”“R 轮”三船会遇雷达图

4 多船复杂会遇局面的安全避让策略

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

4.1 正规瞭望,争取主动

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

4.2 保持警惕,慎重操作

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

4.3 抓住矛盾,化繁为简

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

4.4 换位思考,互相理解

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

4.5 摆正姿态,善于沟通

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

4.6 以身作则,良好船艺

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

5 结束语

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

基于主动防御思维的引航风险防控策略研究

◎ 宁波大港引航有限公司 / 郑浩亮 周俊杰 安成达 丁得勇

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

关键词：船舶引航；主动防御思维；风险防控

0 前言

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

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

1 概念

基于主动防御思维的引航风险防控策略借鉴自军事领域里的主动防御理念，要求引航员在规划和执行引航任务的每个阶段都采取积极的风险管理措施。如图1所示，这种方法的核心就在于强调引航员的主观

能动性，减少在引航过程中因人为因素导致的事故。即在制定引航计划时，对各个节点中可能遇到的各种风险进行预判和准备，预先制定应对策略；在引航过程中，根据实时收集的信息，对船舶所面临的风险进行早期精确分析、预判和做出决策，及早地采取相应措施规避风险^[1]。不仅主动避免自身产生的风险，还应避免被卷入因其他船舶的行为而产生的相关风险。

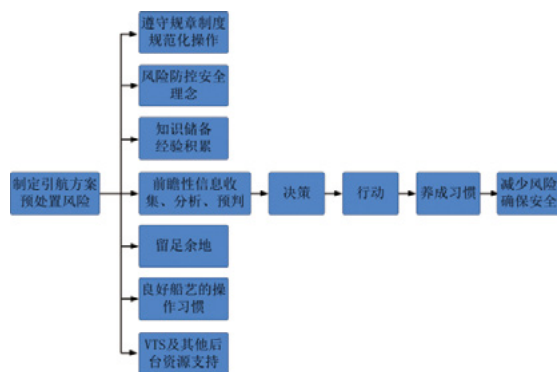


图1 主动防御思维在引航环节中的应用示意图

基于主动防御思维的引航风险防控策略是引航安全管理的重要组成部分，它体现了预防为主、积极应对的管理理念。要求引航员不仅具备高超的专业技能和丰富的航海经验，还要具备高度的责任心、敏锐的风险识别能力和果断的决策能力，在整个引航过程中掌握船舶安全的主动性，确保船舶在复杂多变的港区环境中安全、顺利地进出港口。

2 对船舶驾引人员的要求

引航员与船长作为基于主动防御思维下的引航风险防控策略的主要实施者，在风险防控时须秉持积极主动的态度，具备一定的前瞻性和预见性，在面对

潜在风险时能迅速做出反应,并且能基于丰富的知识储备和实践经验,发展形成出一套主动防御式的思维模式和行为习惯。

2.1 须具备强烈的风险防控意识

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

2.2 充足的信息储备

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

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

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

2.2.3 对港内各类船舶的资料有充足的收集、归纳和总结,熟悉其操纵特性。

2.3 出色的沟通能力

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

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

2.5 良好的心理素质

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

2.6 具备敏感的态势感知能力

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

2.7 始终保持高度戒备

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

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

3 在引航中操作中的应用

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

3.1 引航员登轮前

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

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

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

3.2 引航员登轮后

3.2.1 交流船舶信息。

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

3.2.2 良好的安全理念和引航操作习惯

(1) 节点意识

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

(2) 船舶领域理念

始终保持对船舶位置的精准控制,确保船舶处于有充足安全余量的空间范围内。

(3) 保持安全航速

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

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

在面对港内交通环境的复杂局面时,保持高度敏

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

(5) 养成符合良好船艺的规范化操作习惯,如:

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

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

③对口令和船舶设备状态核查确认,如核查车舵令、转速和舵角指示表等。

(6) 对特殊情况保持高度的戒备

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

3.3 离轮前

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

3.3.1 做好离泊船的交接工作:

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

3.3.2 做好靠泊船的交接工作:

告知船方本码头稳泊注意事项的提醒。

3.3.3 做好港内抛锚船的交接工作:

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

4 案例分析

案例一:2007年11月7日0830时,“中远釜山”轮在引航员的引领下,在浓雾中离开加州的奥克兰第56号泊位,穿越连接奥克兰和旧金山水域的海湾大桥时,因引航员的失误而使船舶偏离航道,最终

导致船体与海湾大桥的桥塔护墩发生碰撞,如图2所示,造成重大经济损失和大量海域受到污染的严重后果。

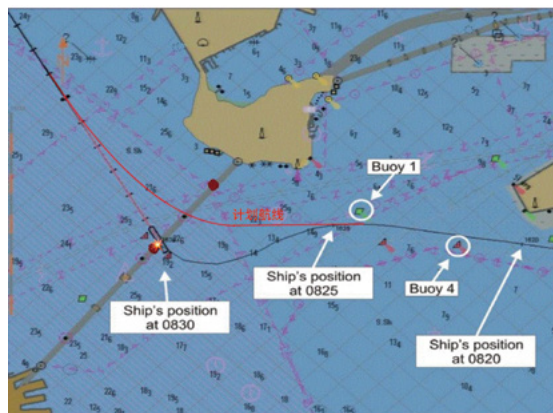


图2 “中远釜山”轮轨迹示意图

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

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

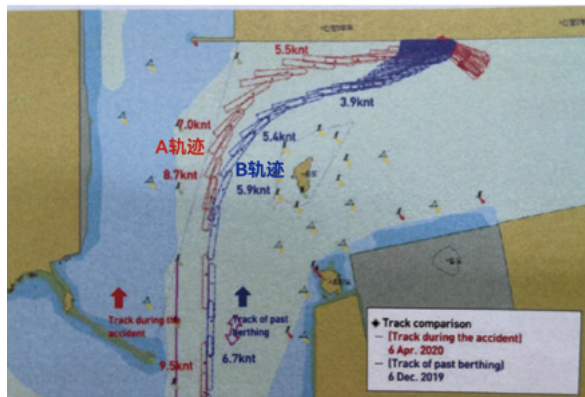


图3 “米兰桥”轮轨迹示意图

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

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

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

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

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

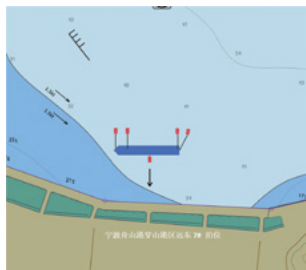


图4 抽屉式靠泊法

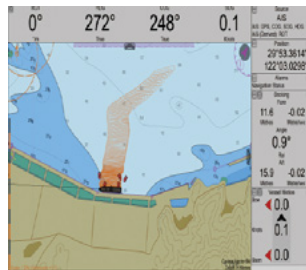


图5 船舶入泊轨迹图

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

“凡事预则立”，在通航条件复杂的港区内，存在诸多复杂多变的不确定因素，唯有高度重视驾引人员基于主动防御思维下的引航风险防控策略的培养和提升，加强相互的信息共享，有效利用各方资源，提前充分评估和判断船舶所将面临的状况，及早地达

成规避风险的最佳决策及采取行动，才能保障船舶、人员和港口的安全。

5 效果评估

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

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

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

6 总结与展望

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

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

未来船公司和引航机构可基于这一理念，融合大数据、人工智能等先进技术，开发智能化引航辅助系统和远程监控与指挥系统。岸基管理人员能够实时掌握船舶动态，对港区交通流进行实时监控，为驾引人员提供全面、准确的后台信息支持，实现船舶定位、

恶劣天气下渔船航行危险评价系统研究

◎ 浙江海洋大学 船舶与海运学院 / 毛超进 艾万政 刘 琪 王家宏

摘要: 浙江省的沿海地区与东海紧密相连,其作为中国最重要的渔业海域之一,拥有丰富的海洋渔业资源,包括各类鱼类、虾类、贝类等。随着这几年国家对东海渔场的修复保护,渔业资源日益丰富,渔船数量日趋增加。然后,受恶劣天气等因素影响,渔船易发生安全事故,对人民群众的生命财产安全造成了极大的损害,研究台风等恶劣天气下渔船安全具有重要意义。本文主要从自然条件、航线条件、船舶条件和船员条件四个重要船舶安全影响因素出发,明确各因素的隶属函数,构建台风天气下航行渔船风险度综合评价系统;并基于 MATLAB 平台的 FIS 提出台风天气下渔船航行风险度综合评价模型并通过较危险台风天气下基本位于同一海域的三艘不同渔船为算例验证其合理性,以期台风天气下不同航行渔船风险度定量分析提供参考,也为航行渔船风险度分析的计算机辅助实现提供方法。

关键词: 渔船避台; 风险度; 隶属函数; FIS

0 前言

浙江地处中国东南沿海地区,其内许多河流、湖泊和山脉,又位于东海和台湾海峡之间,处在太平洋西北太平洋暖池路径上,极易受到台风的影响。而其丰富的水域资源也带来了多样的海洋资源,渔业在浙江的经济中扮演着重要的角色,浙江省被称为“渔业大省”。随着浙江渔业的不断发展,渔船数量日趋增多,渔业作业日趋频繁,如何在台风等恶劣天气下保证渔船安全成为了众多学者关注和研究的重点课题。

文献^[1]提出在“履职尽责,失职追责”的国家安全生产新形势下,船舶防台要适应新形势的变化,树立远离台风中心、重在于防的原则,结合时代发展的需要,妥善做好船舶防台工作。这对船舶海上安全航行具

有一定的指导意义。文献^[2]以港航工程建设项目为依据,又以经历过的 15 个台风经验进行总结,分析了台风对船舶安全性有一定的影响,从而提出一系列船舶防台安全措施和船舶防台应急预案的应用,但没有充分考虑船舶在台风期航行的实时风险性。文献^[3]为了降低人为因素干扰,通过应用层次分析法和模糊综合评判法计算渔港防灾系数、渔港脆弱度等安全指数,为量化评估渔港防台等级提供一定支持。文献^[4]提出基于台风网格强度数据和动态路径规划算法,开展船舶航行海区的风险区划评估,建立不同代价系数的风险地图,可以为船舶台风期航行提供更加安全和有效的避台优化方案。文献^[5]提出通过了解各避风港锚地的避台等级以及地形走向、地理环境、气候极值的情况下,指导渔船就近进入安全的避风港锚地,可以更好的做好渔船避台决策气象服务。文献^[6-7]通过对防台水域、天气、航

避碰预警、航线优化等功能,提高引航作业的精准度和安全性。进行远程指导和干预。在紧急情况下,系统能够迅速启动应急预案,协调各方资源,实现快速响应和高效处置。

在制度建设上,从安全管理体系、人员培训、科技应用、法规制度等多个方面入手,将风险防控策略转化为安全体系文件,全面提升驾引人员风险防控能

力。通过采取以上措施有助于改善港口的海上交通安全环境,保障全球物流链的顺畅与稳定。

参考文献

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

线、船舶性质进行分析,针对台前、台中、台后快速恢复生产提出防台措施和建议,并且研究表明选择正确的防台水域和防台方法将决定防台工作的成败,因此船舶需始终坚持“及早进入防台锚地选择可靠锚位”原则,但还需要结合实际进行风险评价。文献^[8]通过采用了FVCOM浪-潮-流耦合模型,对霞关渔港防台风等级进行评估,根据结果对渔船航行、停泊安全问题提出防台建议,但没有进一步提出针对台风天气下渔船安全航行的有效模型。

通过上述研究可知各位专家学者对保障渔船安全的研究有很多,但是很少有人结合具体实际对台风天气下航行渔船的风险度做出实时定量评价,而这种具有时效性的风险评价对渔船有效规避风险在紧急情况下做出正确决策具有关键作用。

本文根据风险分析理论,结合模糊综合评定数学模型,提出一种对台风天气下航行船舶危险度进行定量估算的模型。运用MATLAB平台,将FIS的模糊推理功能与simulink相结合,建立台风天气下航行渔船风险度综合评价模型,通过改变参数就可以方便地求得在台风影响过程中,某个时间点下渔船的风险度。该模型的建立不仅可以对不同渔船所面临的风险进行定量评估还可以为台风天气下航行渔船风险度分析的计算机辅助实现提供方法。

1 风险综合评价系统的构建

通过文献^[9]、文献^[10]和文献^[11]的查询,对台风天气下航行渔船安全构成较大威胁的因素包括自然条件、航线条件、船舶条件和船员条件四方面。其中,自然条件中的关键因子有气压下降量(A1)、渔船与台风距离(A2)、风力(A3)、风向(A4)和浪高(A5);航线条件中的关键因子有累积转向角度(B1)、交通密度(B2)和助航条件(B3);船舶条件中的关键因子有渔船旋回性(C1)、渔船追随性(C2)、船龄(C3)和装载情况(C4);船员因素中的关键因子有工作经验(D1)、专业技术水平(D2)、应急操纵能力(D3)和工作态度(D4)。

将上述因子进行分类,构建双输入单输出的模糊评价子系统,最终形成风险综合评价系统如图1所示,其中,W、T、S、U分别表示上一级的评价结果。

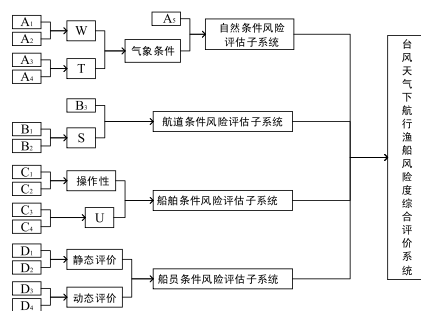


图1 台风天气下航行渔船风险度综合评价系统

Fig.1 Comprehensive evaluation system for the risk degree of fishing boats sailing in typhoon weather

2 风险评价系统中各因子隶属函数的确定

台风天气下航行渔船风险度综合评价系统中各因子的论域均为连续变量且定义在实数集上,采用模糊分布的常用图式法中的梯形和广义钟形确定各因子隶属函数。这里重点阐述与台风天气下特定环境关系密切的因子的隶属函数的确定。

2.1 气压下降量(A1)隶属函数

用“较危险”、“危险”和“很危险”三个模糊集合表示其隶属。在气旋接近过程中,一般认为当气压下降超过1hPa/h时,即应引起高度重视;当气压下降量超过2hPa/h以上时,即应根据情况改向避开。因此,可以定义论域[1, 2.75],气压下降量为1hPa/h时对“较危险”和“危险”两个模糊子集的隶属度均为0.5,1hPa/h为“危险”和“很危险”两个子集的临界值,采用四分法确定分布梯形各参数,其隶属函数曲线如图2所示。

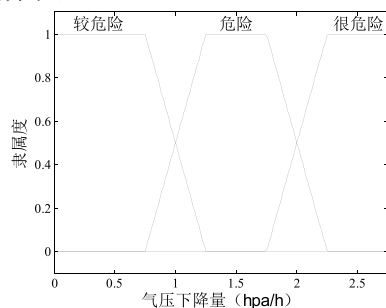


图2 气压下降量(A1)隶属函数曲线

Fig.2 Pressure drop amount (A1) membership function curve

2.2 渔船与台风距离(A2)隶属函数

台风水平范围分为4个区:外围区:半径270—500 n mile,风力6级以下;强风区:半径100—270 n

mile, 风力 6—7 级; 涡旋区: 半径 50—160 n mile, 风力 8—12 级以上; 眼区: 直径 5—16 n mile。用“较危险”、“危险”和“很危险”三个模糊集合表示渔船与台风距离的风险度隶属, 定义论域 $[0, 500]$ 。在避台规则中迫不得已时船舶也要距台风 100 n mile, 因此小于 100 n mile 则完全隶属很危险模糊子集; 定义进入强风区即 300 n mile 就完全隶属危险子集; 涡旋区半径 160 n mile 对较危险和危险两个模糊集合的隶属度均为 0.5; 270 n mile 对危险和很危险两个模糊集合的隶属度均为 0.5, 据此可作隶属函数曲线如图 3 所示。

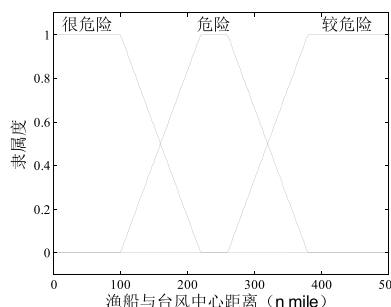


图 3 渔船与台风距离 (A2) 隶属函数曲线
Fig.3 Function curve of the distance between fishing boat and typhoon (A2)

2.3 装载情况 (C4) 隶属函数

2005 年 5~6 月辽宁省长海县海域发生的三起渔业运输船舶沉没事故, 均存在超载浮载现象。辽庄渔运某号船装载渔货约 70 吨, 辽普渔某号船装载 60 多吨, 辽长渔运某号船装载 100 多吨。而它们的实际舱容只能装 30 吨~40 吨。利用实际载货量和核定载货量的比值能够恰当地反应渔船装载渔货情况。从数据可以看出, 渔船超载严重时实际载货量为核定载货量的 2~3 倍, 以 $[0, 3]$ 为论域划分“较危险”、“危险”和“很危险”三个模糊集合, 比值为 1 时为超载的临界值, 对较危险和危险两个子集的隶属度均为 0.5, 方便起见将区间长度四等分得到其隶属函数曲线如图 4 所示。

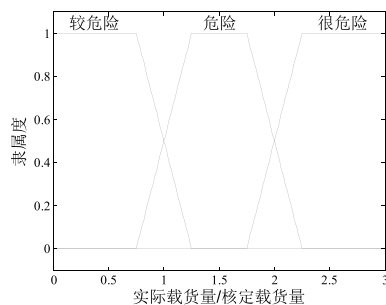


图 4 装载情况 (C4) 隶属函数
Fig.4 Loading status (C4) membership function

2.4 船员条件风险评估子系统隶属函数

近年来在船舶安全管理中普遍认为高达 80% 的事故是由人为因素引起的, 对船员专业技术水平、工作态度、工作经验和应急操纵能力采用便于区分的 5 分制打分法进行评价。论域为 $[0, 5]$, 采用广义钟形图形表示其隶属度, 隶属函数曲线如图 5 所示。

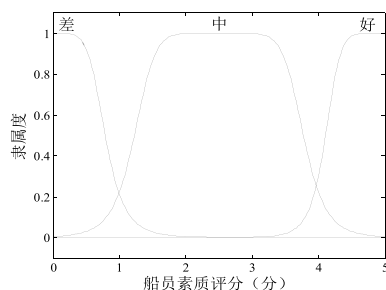


图 5 船员条件隶属函数
Fig.5 Crew conditional membership function

3 台风天气下航行渔船风险度综合评价模型

按照图 1 构建好的风险评价模型, 利用 MATLAB 软件中的 Mamdani 型模糊推理系统, 得到台风天气下航行渔船的风险综合评价结果。

(1) 输入变量为风险评价系统中的各因子, 定义输出变量的语言值为“危险度低”、“危险度较低”、“危险度一般”、“危险度较高”和“危险度很高”, 用分明的三角形表示, 如图 6 所示。各种模糊运算方法如下:

```
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
```

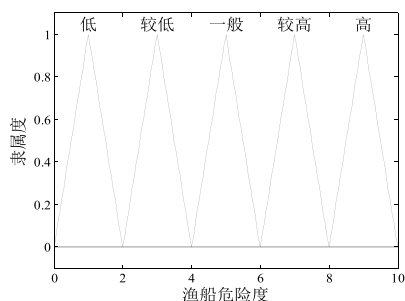


图 6 渔船危险度隶属曲线
Fig.6 Fishing boat risk affiliation curve

(2) 根据相关统计数据和经验确定模糊规则, 现将 W 子系统的 9 条规则给出, 其中 input1 为气压下降量; input2 为渔船与台风距离; output1 为 W 子系统风险度评价价值。输出的 W 子系统风险度评价曲线如图 7 所示。

- 1. If (input1 是较危险) and (input2 是很危险) then (output1 是高)
- 2. If (input1 是较危险) and (input2 是危险) then (output1 是较高)
- 3. If (input1 是较危险) and (input2 是较危险) then (output1 是一般)
- 4. If (input1 是危险) and (input2 是很危险) then (output1 是高)
- 5. If (input1 是危险) and (input2 是危险) then (output1 是较高)
- 6. If (input1 是危险) and (input2 是较危险) then (output1 是一般)
- 7. If (input1 是很危险) and (input2 是较危险) then (output1 是很危险)
- 8. If (input1 是很危险) and (input2 是危险) then (output1 是较危险)
- 9. If (input1 是很危险) and (input2 是较危险) then (output1 是一般)

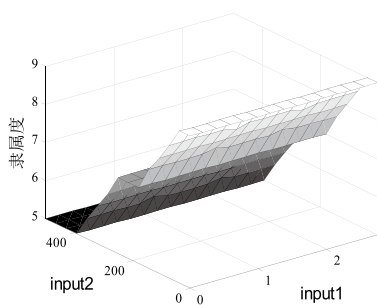


图 7 W 子系统风险度评价曲线
Fig.7 W subsystem risk assessment curve

(3) 上一级评价子系统的结果都作为下一级评价子系统的输入值, 在进行下一级评价时需要将上一级隶属函数的边界模糊化, 如图 8 所示, 四个子系统进行综合评价时, 由于已经进行了解模糊计算, 因此取平均值即为最终风险度评价价值。将建好的模型保存, 即可得到台风天气下航行渔船的风险综合评价模型。

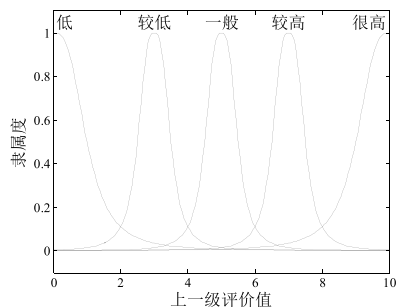


图 8 子系统风险隶属函数曲线
Fig.8 Subsystem risk membership function curve

(4) 基于台风天气下航行渔船的风险综合评价模型通过 simulink 建立模糊控制器模型如图 9 所示, 即可对任意天气情况下的渔船风险度进行定量评价。

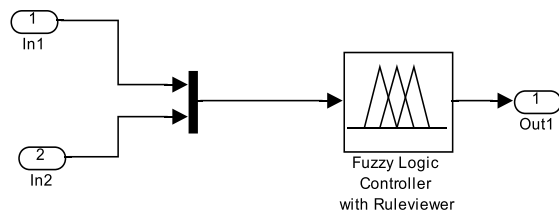


图 9 台风天气下渔船风险度模糊控制模型
Fig.9 Fuzzy control model of fishing boat risk in typhoon weather

4 模型验证

以较危险台风天气下基本位于同一海域的三艘不同渔船为例, 采用控制变量法对模型的合理性进行验证, 相关参数及其所求得的风险度如表 1 所示。

表 1 危险台风天气下渔船风险度表

Tab.1 Risk table of fishing boats in dangerous typhoon weather

	渔船 1	渔船 2	渔船 3
综合风险度	4.53	6.16	5.46
A1	0.04	0.03	0.1
A2	380	390	300
A3	5	4	7
A4	60	58	63
A5	2.2	2.1	2.3
自然条件风险度	6.66	6.27	6.97
B1	75	80	87
B2	2.3	3.4	3.1
B3	63%	71%	80%
航道条件风险度	3.24	4.86	4.97
C1	2.2	2.6	2.1
C2	2.7	2.3	2.5
C3	10	5	7
C4	1.1	2.4	0.7
船舶条件风险度	6.5	6.69	4.92
D1	4.7	2.1	2.1
D2	4.3	2.7	3
D3	4.1	1.3	2.7
D4	3.9	1.5	4.7
船员条件风险度	1.73	6.83	4.97

分析如下:

在台风天气影响下, 三艘渔船均处于较危险的自然环境之中, 由于处于同一海域, 航道条件的危险度也基本一致。

(1) 渔船 1 船龄较大船况较差, 而且存在略微超载的情况, 就船舶安全性来讲较为危险, 但是所配船员整体素质高, 应急操纵能力强, 在台风天气下能够按照规定进行了望, 使得渔船 1 的综合危险度有所下

降,渔船航行较为安全;

(2) 渔船2的船龄小船况好,但是超载极其严重,船员整体素质差,导致渔船航行危险度较高;

(3) 渔船3的船龄船况一般,船员虽然相对缺乏经验但是态度良好,因此渔船航行的危险程度也能保持在一般的状态下,可以较为安全的航行。

通过以上算例分析,该台风天气下航行渔船风险度评价模型所得结果与航行经验一致,符合心理预期,能够较为合理地对台风天气下航行渔船的危险性做出评价。

5 结语

本文基于 FIS 提出了台风天气下航行渔船的风险度定量评价模型,可以对渔船的航行风险进行实时评价;利用 simulink 建立风险评估模型,在实际中只需要输入少量参数就能够快速地得出风险评价值,应用方便;可以作为基础模型为台风天气下渔船风险评价的计算机辅助实现提供支持。

同时该系统模型还要很多不完善之处。在渔船密度隶属函数确定方面,由于缺少数据,其合理性还有待验证;在进行子系统综合评价时未能考虑权重系数的分配;所取算例较少未能充分验证;在因子较多时 FIS 模型计算复杂效果不好;根据所求出的风险度,添加辅助决策系统可以使本模型功能更加完善。

参考文献

- [1] 陈森亮.新形势下大型船舶防台安全探讨[J].天津航海,2023,(04):8-9+19.
CHEN S L. Discussion on the safety of large ships against typhoon under new situation[J]. Tianjin Navigation, 2023, (04): 8-9+19. (in Chinese)
- [2] 路晓明.港航工程船舶防台安全实践与探讨[J].珠江水运,2022,(18):55-57.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2022.18.007.
Lu X M. Practice and discussion on the safety of harbour and navigation engineering ships against typhoon[J]. Pearl River Water Transport, 2022, (18): 55-57. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2022.18.007. (in Chinese)
- [3] 黄福鑫.大连市渔港防御台风风险等级评估[J].黑龙江水利科技,2023,51(02):146-149.DOI:10.14122/j.cnki.hskj.2023.02.028.
Huang F X. Assessment of the risk level of defence against typhoons

- in fishing ports in Dalian[J]. Heilongjiang Water Conservancy Technology, 2023,51 (02): 146-149. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2023.02-028. (in Chinese)
- [4] 靳卫卫,肖强,罗教彬等.台风期船舶航行海区风险评估和避台规划[J].中国水运,2022,(06):30-32.
Jin W W, Xiao Q, Luo J B, et al. Risk assessment of sea area for ship navigation and typhoon avoidance planning during typhoon[J]. China Water Transport, 2022, (06): 30-32. (in Chinese)
- [5] 何彩芬,徐彬,金靓等.宁波渔船避风港锚地风力特征分析及决策服务思考[J].中国水运(下半月),2017,17(10):116-118.
He C F, Xu B, Jin L, et al. Analysis of wind characterisation and decision-making service thinking of anchorage of Ningbo fishing vessel typhoon shelter[J]. China Water Transport (Second Half of the Month), 2017, 17 (10): 116-118. (in Chinese)
- [6] 朱润资.琼州海峡客滚船舶防台对策研究[J].珠江水运,2021,(24):112-114. DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2021.24.042.
Zhu R Z. Research on typhoon prevention measures for passenger and roll off ships in the Qiongzhou Strait[J]. Pearl River Water Transport, 2021, (24): 112-114. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2021.24.042. (in Chinese)
- [7] 吴灿平,王亚郁,钟三新.惠州海港船舶防台存在问题和对策研究[J].珠江水运,2018,(23):107-110. DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2018.23.052.
WU C P, WANG Y Y, ZHONG S X. Research on the problems and countermeasures of ship typhoon prevention in Huizhou harbour[J]. Pearl River Water Transport, 2018, (23): 107-110. DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2018.23.052. (in Chinese)
- [8] 韩小燕,梁连松,董宇佳等.渔港防台风等级评估研究——以霞关一级渔港为例[J].海洋开发与管理,2020,37(05):57-62. DOI:10.20016/j.cnki.hykyfjgl.2020.05.012.
HAN X Y, LIANG L S, DONG Y J et al. Study on the assessment of typhoon protection level of fishing harbours - A case study of Xiaguan first-class fishing harbour[J]. Ocean Development and Management, 2020, 37(05): 57-62. DOI:10.20016/j.cnki.hykyfjgl.2020.05.012. (in Chinese)
- [9] 王军,朱芑颐,王冠卓等.气象不确定下的船舶避台路径优化[J].大连海事大学学报,2021,47(02):56-62+70.
WANG J, ZHU S Y, WANG G Z et al. Optimisation of ship avoidance routes under meteorological uncertainty[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(02): 56-62+70. (in Chinese)
- [10] Yingxian H, Xueyan D, Yanan Z, et al. T_GRASP: Optimization Algorithm of Ship Avoiding Typhoon Route[J]. Nanjing University of Information Science Technology, Nanjing, 210044, China, 2023, 4(2): 85-95.
- [11] Wenjun S, Yingni L, Hanbao C. Research on the mooring arrangement of a small ship against typhoon in harbor[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 621(1): 012080-.

扩展卡尔曼滤波算法在智能船舶多源罗经信号融合中的应用研究

◎ 浙江国际海运职业技术学院 / 贾爱鹏 吴晓红

摘要: 本研究针对智能船舶导航系统中的多源罗经信号融合问题进行了深入分析,采用扩展卡尔曼滤波(EKF)算法来整合卫星罗经、光纤罗经和电罗经的数据,实现对船舶航向的精准估计。通过对融合前后的航向数据进行误差分析,结果显示融合后的平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)均有显著降低,证明了EKF算法在提升航向精度和系统鲁棒性方面的有效性。此外,通过时间序列分析,展示了融合技术在抑制数据波动和提高导航稳定性方面的显著优势。本文的研究不仅为智能船舶的导航提供了可靠的技术支持,也对其他领域如无人驾驶和航空导航系统的技术发展具有重要启示。

关键词: 扩展卡尔曼滤波算法; 罗经; 船首向; 精度

1 引言

随着智能船舶技术的快速发展,船舶导航系统的精度和可靠性成为提高航行安全和效率的关键因素。传统的导航系统在面对复杂海洋环境时可能会受到多种因素的干扰,而多源罗经信号融合技术能够有效提升导航的精度和鲁棒性。通过综合利用卫星罗经、光纤罗经和电罗经的优点,不同类型罗经的信号特性相互补充,形成了具有更高精度和稳定性的智能导航系统。这一技术的应用不仅满足了智能船舶的导航需求,也为海事行业的智能化转型提供了重要支撑。当前,数据融合技术在多源信息处理中的广泛应用为船舶导航系统的设计和优化提供了丰富的经验和方法支持。通过研究和实现多源罗经信号的有效融合,能够进一步推动船舶导航系统的智能化发展,提高船舶的自主航行能力。

2 文献综述

在智能船舶导航系统中,多源罗经信号融合技术是提升导航精度和可靠性的关键所在。不同罗经系统各具优势,卫星罗经通过全球导航卫星系统提供高精度位置和航向信息,适合在开放海域使用^[1]。光纤罗经利用光纤陀螺仪测量角速度,具备高精度和抗电磁干扰能力,常用于需要精确惯性导航的场景^[2]。电罗经通过旋转陀螺仪保持真北指向,提供稳定可靠的航向信息,适

合在多变的海洋环境中作为传统的导航工具^[3]。

唐浩然等人的研究证明了多源数据融合在燃气管道高后果区识别中的有效性^[4],表明这种方法可以提高系统的精度和可靠性。这种技术为智能船舶的多源信号融合提供了理论支持和应用实例。

梁鑫等人提出了基于多源数据融合的城市洪涝模拟高分辨率地形构建方法^[5]。通过整合多种地形数据和水文信息,该研究提高了洪涝风险预测的准确性,为智能船舶在复杂海况下的导航提供了数据处理的技术支持。

钱俊楠等人通过研究扩展卡尔曼滤波(EKF)在农机路径跟踪中的应用^[6],证明了EKF在处理多源传感器数据时的有效性。这一研究结果为智能船舶的多源罗经信号融合提供了实践依据,EKF能够实时优化传感器数据,提高船舶导航系统的精度和动态响应能力。

通过上述研究可以看出,多源数据融合技术在提高智能船舶导航精度、增强系统稳定性及优化数据处理方面具有重要作用。这为未来智能船舶的自动化导航和复杂环境下的应用奠定了技术基础。

3 方法与技术

3.1 数据采集

本研究的数据采集于宁波舟山港的典型海域,利用卫星罗经、光纤罗经和机械罗经三种设备,以确保在不同航行条件下获得高质量的导航数据。数据采集

涵盖了从平静水面到中等波浪条件的各种海况,确保其在不同环境下的稳定性和精确性。

光纤罗经利用高精度的光纤陀螺仪测量船舶的角速度和航向角。设备经过专业校准,以降低环境因素对测量精度的影响。卫星罗经数据采集过程中,卫星罗经安装在船舶的最佳位置,以获得清晰的卫星信号,并设置每秒采集一次,以捕捉船舶的微小航向变化。机械罗经采用传统的陀螺罗经,为船舶提供可靠的航向信息。经过静态条件下的校准,机械罗经在动态航行中也能保持稳定的方向指示。数据采集覆盖了不同的海洋环境,以验证机械罗经在实际操作中的性能。

所有罗经设备的数据通过标准化接口(NMEA 0183/2000)实时传输到中央处理系统,并安全存储于数据库中,以备后续分析。数据监控系统不断监测数据流,识别并标记任何异常值,确保输入数据的完整性和准确性。通过这种系统化的数据采集策略,本研究为多源罗经信号的融合提供了可靠的数据基础,助力智能船舶导航系统精度和可靠性的提升。

3.2 数据预处理

在多源罗经信号融合研究中,数据预处理是确保后续分析和信号融合准确性的重要步骤。数据预处理主要包括数据清洗、数据对齐和数据标准化,具体如下:

3.2.1 数据清洗

数据清洗的目的是识别并处理数据集中的异常值和缺失值,以提高数据的整体质量和可靠性。

异常值检测:使用统计方法检测异常值。采用 3σ 原则,即判断某个数据点是否偏离其所在数据集的均值超过3倍标准差。对于航向数据 H_i ,异常值的识别公式如下:

$$|H_i - \bar{H}| > 3\sigma_H$$

其中, $\bar{H}$ 为航向数据的平均值, σ_H 为航向数据的标准差。

缺失值处理:使用线性插值法来填补缺失值,确保时间序列数据的连续性。线性插值公式为:

$$H_{\text{interp}} = H_{\text{prev}} + \frac{H_{\text{next}} - H_{\text{prev}}}{t_{\text{next}} - t_{\text{prev}}} \times (t_{\text{interp}} - t_{\text{prev}})$$

其中, H_{interp} 为插值点的航向数据, H_{prev} 和 H_{next} 分别为插值点前后的数据, t 为相应的时间戳。

3.2.2 数据对齐

为了保证不同罗经数据在融合时的有效性,需要确保各个传感器的数据在时间上同步。

使用线性插值法对时间戳进行时间对齐,将各传感器数据统一到相同的时间基准。设定一个统一的时间步长 Δt ,对各数据源进行插值,以生成同步数据序列。

3.2.3 数据标准化

为了消除不同数据源之间的量纲差异,通常对数据进行标准化处理。

标准化公式:对于每一个数据源 X_i ,进行标准化处理的公式为:

$$X_{\text{norm}} = \frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X}$$

其中, μ_X 和 σ_X 分别为数据的均值和标准差。

通过以上数据预处理步骤,确保多源罗经数据在进行信号融合前的质量和一致性,为后续的分析 and 结果提供可靠的基础。

3.3 多源信号融合

在本研究中,扩展卡尔曼滤波(EKF)被选作多源信号融合的核心算法。EKF以其在非线性系统中处理多源传感器数据的能力而著称,能够为船舶导航提供精确的状态估计。以下是EKF算法的具体实现步骤:

3.3.1 状态与观测模型定义

状态方程:船舶的状态由向量 $\mathbf{x}_k$ 表示,包括航向、速度和位置等信息。状态方程用于描述系统的动态演变,其公式为:

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) + \mathbf{w}_{k-1}$$

其中, f 表示状态转移函数, $\mathbf{u}_{k-1}$ 为控制输入, $\mathbf{w}_{k-1}$ 为过程噪声。

观测方程:各种罗经提供的观测数据用向量 $\mathbf{z}_k$ 表示,观测方程则用于连接状态与观测,其公式为:

$$\mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k$$

其中, h 为观测函数, $\mathbf{v}_k$ 为测量噪声。

3.3.2 EKF 的滤波过程

初始化:确定初始状态向量 $\mathbf{x}_0$ 和协方差矩阵 $\mathbf{P}_0$,根据初始传感器读数和航行条件进行初始化。

状态预测公式为:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1})$$

协方差预测公式为:

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_{k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1}$$

其中, F_{k-1} 为状态转移矩阵的雅可比矩阵, Q_{k-1} 为过程噪声协方差矩阵。

3.3.3 更新步骤

卡尔曼增益计算公式:

$$K_k = P_k |_{k-1} H_k^T (H_k P_k |_{k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$$

其中, H_k 为观测矩阵的雅可比矩阵, R_k 为测量噪声协方差矩阵。

状态更新公式:

$$\hat{x}_k |_{k-1} = \hat{x}_k |_{k-1} + K_k (Z_k - h(\hat{x}_k |_{k-1}))$$

协方差更新公式:

$$P_k |_{k-1} = (I - K_k H_k) P_k |_{k-1}$$

其中, I 为单位矩阵。

4 结果与分析

4.1 误差分析

在多源罗经信号融合的研究中, 误差分析是验证融合算法有效性的重要手段。本研究中, 我们采用扩展卡尔曼滤波 (EKF) 算法对卫星罗经、光纤罗经和机械罗经的数据进行融合, 并通过计算平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 来量化融合效果。

MAE 是航向估计误差的平均绝对值, 表示估计值与参考值之间的平均偏差。MAE 提供了一个直接的误差度量, 表示平均情况下, 估计值偏离实际值的程度。公式为:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{H}_i - H_i|$$

H_i 是第 i 次的实际航向 (或参考值), $\hat{H}_i$ 是第 i 次的估计航向, N 是数据点的数量。

RMSE 是航向估计误差的平方均值的平方根, 反映了估计值与参考值之间的平均平方偏差。RMSE 对大误差更加敏感, 因为误差被平方, 因此对于检测大偏差更为有效。公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{H}_i - H_i)^2}$$

其中, $\hat{H}_i$ 为 EKF 估计的航向, H_i 为原始航向, N 是数据点的数量。

表 1 多源罗经信号融合前后误差对比

罗经类型	融合前 MAE (°)	融合前 RMSE (°)	融合后 MAE (°)	融合后 RMSE (°)
卫星罗经	0.25	0.35	0.19	0.24
光纤罗经	0.30	0.40	0.19	0.24
机械罗经	0.35	0.45	0.19	0.24

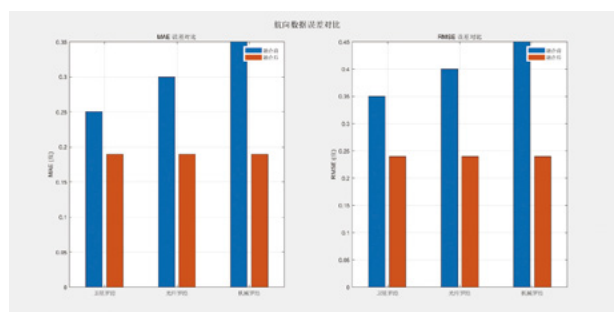


图 1 多源罗经信号融合前后误差比较图

由表 1 和图可见, 误差指标分析结果表明, EKF 融合显著降低了所有罗经系统的误差, 尤其是在机械罗经中, 误差改善最为明显。卫星罗经在融合后 MAE 和 RMSE 分别降低至 0.19° 和 0.24° , 显示出对环境噪声的良好抑制效果。光纤罗经尽管本身精度较高, 但通过多源融合, 误差进一步降低, 增强了系统的鲁棒性。机械罗经作为传统导航工具, 通过多源融合, 其误差大幅减少, 验证了 EKF 算法在处理高噪声数据中的有效性。

整体来看, EKF 算法通过对多源罗经信号的融合, 大幅提高了船舶航向估计的精度和稳定性, 为智能船舶导航提供了更可靠的技术支持。这一研究结果不仅验证了 EKF 在信号融合中的有效性, 也为未来在复杂海洋环境中应用多源导航技术提供了实用的参考依据。

4.2 不同海况对误差的影响

在智能船舶的导航精度研究中, 不同海况下的罗经误差对比极为关键。本节分析了静水、轻风浪以及中等风浪三种海洋条件下, 卫星罗经、光纤罗经和机械罗经的误差表现。通过绘制平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 的对比折线图 (如图 2 所示), 我们可以直观地看到各种海况对导航设备误差的影响。

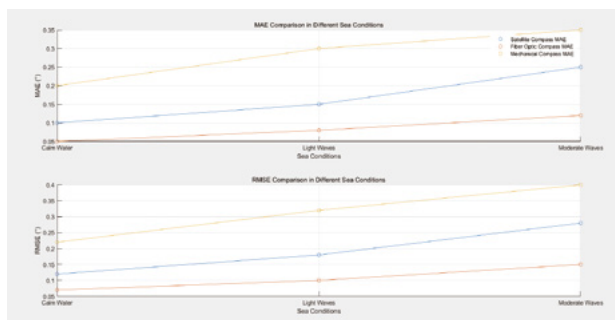


图2 不同海况下罗经误差比较图

在静水条件下,所有类型的罗经误差较低,其中光纤罗经的误差最小,显示了其在稳定环境中的优异性能。然而,随着海况变化到轻风浪和中等风浪,所有罗经的误差均显著增加。特别是机械罗经,在中等风浪条件下,其误差增加最为显著,这可能是由于机械罗经对海况变化的敏感度较高。

此外,光纤罗经即使在较差的海洋条件下也展现了较低的误差增长,表明它具备较强的环境适应能力。对于卫星罗经而言,虽然误差增长幅度适中,但在所有海况下的性能仍稳定,说明卫星罗经能在不同海况下保持一定的导航精度。

这些结果强调了在设计和实施智能船舶导航系统时,必须考虑到海况对罗经性能的影响,以确保航行安全。通过对不同海况下误差的深入分析,可以更好地理解各类型罗经在复杂环境中的应用潜力及其限制。

4.3 时间序列分析: 原始数据与 EKF 融合后航向数据对比

在本研究中,为了直观展示扩展卡尔曼滤波(EKF)融合效果对智能船舶航向数据的改善,制作时间序列对比图,如图3所示。该图表对比了融合前后航向数据的变化,显示了EKF融合技术在稳定航向估计中的效果。

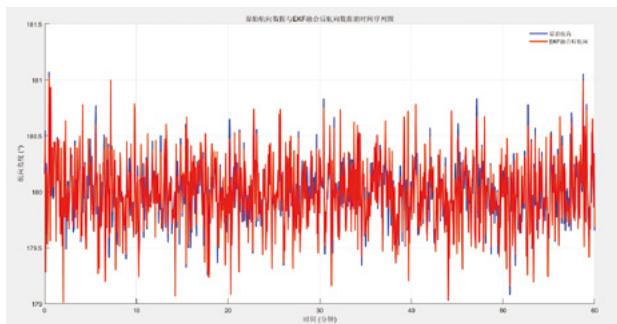


图3 时间序列对比图解析

图3展示了融合前后的航向数据波动情况。红色线表示EKF融合后的数据,蓝色线表示原始航向数据。从图中可以观察到,原始数据显示出较大的波动性,这些波动可能源自传感器噪声、环境干扰或系统误差。相比之下,EKF融合后的数据显著平滑,波动幅度减小,表明融合处理有效地抑制了噪声和减少了随机误差。

5 结论

本研究通过实施扩展卡尔曼滤波(EKF)技术,成功实现了智能船舶中多源罗经信号的有效融合,显著提升了航向估计的精度和系统的鲁棒性。融合后的误差分析显示,所有罗经系统的平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)均得到了显著降低,尤其是在机械罗经中,误差降低最为明显,这证明了多源信号融合技术在降低噪声和提高导航精度方面的有效性。

此外,本研究还探讨了不同海况对罗经性能的影响,结果表明,即便在较差的海洋条件下,多源融合技术仍能有效保持导航系统的精度,强调了在复杂环境中应用多源导航技术的重要性和可行性。

尽管这些成果在智能船舶导航领域具有显著的实际和理论价值,但研究仍需继续优化。未来工作将关注算法在不同导航场景下的适应性,以及如何进一步整合更多类型的传感器数据,以提高航向估计的准确性和系统的适应性。希望这些研究能够为全球航海安全和智能化船舶技术的发展做出贡献。

参考文献

- [1] 陈汝军, 孟政. 卫星罗经组成原理探讨 [J]. 广州航海高等专科学校学报, 2006, (02): 23-25.
- [2] 卞鸿巍, 马恒, 王荣颖, 等. 国内船用光纤陀螺罗经最新技术发展 [J]. 海军工程大学学报, 2021, 33 (03): 1-7.
- [3] 李赞. 从三种新型罗经的比较中看商船用陀螺罗经发展趋势 [J]. 中国远洋海运, 2022, (01): 78-81.
- [4] 唐浩然, 熊俊楠, 雍志玮, 等. 多源数据融合的燃气管道高后果区识别与分级方法 [J/OL]. 油气储运, 1-9.
- [5] 梁鑫, 侯精明, 王添, 等. 基于多源数据融合的城市洪涝模拟高分辨率地形构建方法 [J/OL]. 水利水电科技进展, 1-13.
- [6] 钱俊楠, 冯桑, 利航, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的农机路径跟踪控制算法研究 [J]. 中国农机化学报, 2024, 45 (07).

励志报国 荣耀出征——我校举行 2022 级定向培养军士生入伍欢送会



旌旗猎猎展豪情，热血丹心赴征程。3月17日上午，我校隆重举行2022级定向培养军士生入伍欢送会。学校党委书记孙校伟，党委副书记、校长陈凯，党委副书记孙常强，党委委员、副校长顾凯锋，党委委员、副校长潘国强，党委委员、智慧交通学院院长戎成，汽车学院院长朱福根、海运学院院长蒋更红，各相关职能部门负责人、士官学院全体师生、军士生专业相关分院教职工代表和班主任等，以及余杭区人民武装部副部长王传捷，东部战区海军某部接兵干部出席本次活动，共同见证这一荣耀时刻。

现场276名2022级定向培养军士生历经思想政治淬炼、军事技能锤炼和作风磨炼，顺利通过兵役机关层层审批核准，已从一位普通青年蜕变成一名合格的准军人。

在激昂的《强军战歌》旋律中，22级军士生身着戎装、英姿勃发，迈着整齐步伐步入会场。当国旗护卫



队以标准的托枪姿势护送国旗入场后,全场千余人齐声高唱国歌,歌声与军号声交织成震撼人心的强军交响。

仪式上,孙校伟书记深情致辞,他代表学校全体师生,向即将奔赴部队的276名22级军士生表示热烈祝贺,向各位支持国防事业的家长们致以诚挚敬意,向莅临现场的领导和为征兵工作辛勤付出的工作人员表示衷心感谢!孙书记从四个方面对即将奔赴军营的军士生表示殷切期望:一是要坚定理想,不忘从军初心,将个人理想融入强军伟业,使献身国防进一步成为矢志不渝的人生追求;二是要励志力行,牢记强军使命,紧贴军队现代化建设需要,锤炼能打胜仗的过硬本领;三是要严守纪律,锤炼过硬作风,用铁的纪律凝聚铁的意志、锤炼铁的作风;四是要矢志奋斗,笃行报国之志,以实际行动践行“请党放心、强国有我”的青春誓言。



随后,王传捷副部长宣读入伍批准命令,在场领导嘉宾和老师们共同为22级军士生佩戴“光荣入伍”大红花。



礼炮轰鸣中,接兵干部白帅宇中士作为领誓人,带领22级军士生进行庄严宣誓,铿锵誓言表达了他们携笔从戎、报效祖国的坚定决心。



仪式结束后,为22级军士生壮行的文艺汇演在开场表演《战鼓》中拉开帷幕。《黄河大合唱》中战士们的一声声咆哮与奔腾的黄河一起化作新时代军人的热血与担当;《军魂拳韵》中匕首与军体拳完美融合诠释着“练为战”的铁血信念;师生共演的《送别》将温情推向高潮,通过歌舞将不舍之情缓缓诉说;一首《哥哥》是对学长们的叮嘱,也是对未来重逢的美好憧憬。最后,情景剧《当这一刻真的来临》成为全场泪点,军士生们用情景剧形式展现了三载时光里在军事训练、技能锤炼和思想淬炼上收获的成长,“儿子”在集合登车前突然转身的那一声“妈”和那一瞬有力的敬礼,让许多家长和师生纷纷拭泪。

欢送会在不舍但憧憬、严肃但温情的气氛中落下





帷幕。欢送会结束后，22级军士生们与领导嘉宾们进行了合影留念。在王江涛教官的点名声中，一位位背着行囊的军士生与老师家长们挥手告别，踏上了驶向军营的新征程。23级军士生们在道路两旁组成人墙，

向出征的22级军士生们敬礼致敬。

近年来，我校积极响应国家和政府号召，深入学习贯彻习近平强军思想，军士生培养规模持续扩大、专业设置更加科学合理、人才培养质量稳步提升，构建了“四融合”军士人才培养课程体系，形成了富有交通国防特色的“层级递进”实践教育模式，定向培养军士工作已成为学校人才培养的特色名片和标志成果。学校将进一步加强与部队的深度合作，积极对接部队需求落实人才培养工作，不断探索创新人才培养模式，全方位提升军士生培养水平和质量，努力为国防和军队建设培养输送更多的高素质专业化新型军士人才。

（浙江交通职业技术学院士官学院供稿）



国内首艘沿海混合动力车客渡船“平湖造”

近日，国内沿海首艘“混合动力动力”车客渡船“浙象汽渡 12”在平湖华海造船基地顺利完成接水仪式。这是继去年省内首艘箱式电池动力集装箱货船交付后，平湖船舶制造业在新能源领域的又一重大突破，标志着平湖向打造平湖特色船舶修造基地目标迈出关键一步，也是平湖高水平建设“航运浙江”的成果之一。



作为省“尖兵”“领雁”研发攻关项目，“浙象汽渡 12”实现两大核心技术突破——绿色动力系统采用柴油发电机组 - 锂电池混合动力推进技术，相比传统燃油船舶，能耗降低 30%，预计每小时减少碳排放超 70 千克，污染物排放下降 20% 以上；智能减摇装置首创“直翼舵桨 + 全航速直翼减摇技术”，在 9.5 节航速下仍可降低船舶横摇幅度超 20%，显著提升载车稳定性与乘客舒适度。



“这些拥有核心制造技术的船厂，是平湖绿色航运发展的‘孵化器’。”平湖市港航管理服务中心相关

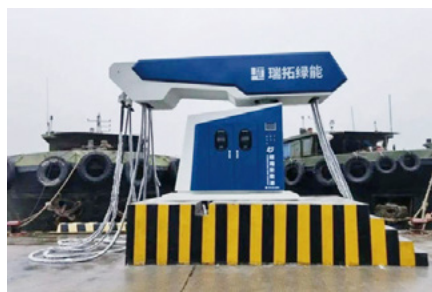
负责人表示。近年来，平湖以“两新”政策为指引，已构建起技术链、制造链、服务链“三链协同”发展格局，实现产业从“单点突破”到“生态构建”的蝶变跃升。

“我们依托产学研合作，与浙江大学、浙江工业大学、上海交通大学等院校开展船舶制造技术研发，形成新能源船舶制造体系。”该负责人说。依托院校大脑，平湖积极推动新能源船舶的建造与应用，助力内河航运绿色转型硕果颇丰。去年 8 月，浙江省首艘内河 64 标箱纯电动集散两用船“吴兴瑞港 001”在平湖顺利接水，标志着平湖市海河联运正式开启纯电动运输新时代；成功建造了内河 LNG 双燃料动力货船、公务船、纯电池动力客船等多种新能源船舶，进一步丰富了新能源船舶种类与数量……目前，全市已建成各类新能源船舶 14 艘，待建 10 艘，新能源船舶建造应用开启绿色航运新引擎。

如果说主体建设是平湖积极探索“绿色航运”发展的第一步，那么设施保障则是关键一环。

近年来，平湖高度重视新能源船用充电设施的建设，通过智能化、网联化、电动化深度融合，进

一步畅通绿色能源补给链。去年，嘉兴航区首个新能源船用充电桩在平湖市横塘桥水上服务区顺利完成安装，不仅为新能源船舶的运营提供了关键支持，还填补了嘉兴航区新能源船舶动力补给的空白。目前，平湖全市已建成新能源船用充电桩 1 处、待建 5 处，为新能源船舶织牢了动力“保障网”。



航运浙江 | “数字脉络”串起浙江内河航运智慧链

自古以来，浙江人“择水而栖，择江而居”，人与水紧密相连。在这片濒海临江的富饶之地，水脉纵横交织，自古水运昌盛。从京杭大运河的古韵悠扬，到宁波舟山港的巨轮穿梭，江河湖海间，一艘艘船舶承载着经济发展的重任，绘就了通江达海的壮丽画卷。

《浪涌潮头 航运浙江》专栏聚焦内河航运高质量发展，感受我省打造现代化内河航运体系示范样板的实干担当。

近年来，随着新发展格局加快构建，长江经济带、长三角一体化、碳达峰等重大战略深入实施，内河航运在综合交通运输体系中的地位作用愈发凸显。智能航运作为交通领域信息化、智能化、智慧化变革的关键力量，正重塑内河航运格局。凭借得天独厚的地理优势与雄厚的水运基础，浙江再次在这场变革中崭露头角。

在内河智能航运发展道路上，浙江做了哪些努力？从杭州下沙港的智慧港口建设，到东宗线湖州段智慧航道的创新实践，再到嘉兴船岸协同内河智能航运试点示范的大胆尝试，这些内河航运深度探索与创新实践的生动注脚，正为我们探寻浙江内河航运智慧化发展路径提供了关键线索。

“数字脉络”锻造智慧强港



2023年7月，千吨级的下沙港开港运行。作为京杭运河二通道上重要节点的下沙港，是继东洲港之

后，杭州地区第二个集装箱吞吐量破10万标箱的内河港口。

开港仅一年，下沙港吞吐量就轻松超越10万标箱，服务的企业数量已从390家增至730余家……

“2岁”不到的下沙港，为何能取得如此傲人成绩？

事实上，自2021年开工建设起，“智慧港口”的理念便深深融入下沙港的规划和设计蓝图。

物联网、云计算、北斗等前沿技术如看不见的神经脉络，贯穿于整个港口，为其智能化发展奠定了坚实基础。



以堆场门机远控为例，依托先进的智能技术，操作人员无需亲临现场，就能精准控制门机作业。借助智能算法和高清监控，门机可依据货物位置和运输需求，自动规划吊运路径，极大地提升了作业效率，显著减少了人工操作可能带来的失误和安全风险。数据显示，该系统实现了对位、抓箱和内集卡落箱的全自动化，作业流程时间从人工远控模式下的4分钟缩短至2分钟以内，综合提升系统作业效率15%以上。



在生产作业管理系统构建上,下沙港深入分析海港与内河港口作业流程的差异,对系统操作流程展开一系列优化、改造与开发。通过与智能闸口、无纸化理货、5G无线通信、港机自动化远控系统等功能模块的有效联动,成功打造出一套适用于内河港口的定制流程,为省内其他内河港口建设自动化作业系统提供了极具价值的开发指南。

下沙港还引入省海港集团生产业务管理系统,与相关系统实现数据共享,并与杭州交投下属船闸管理公司共同开展“港-闸-船”协同信息服务课题研究。目前已初步达成行业管理部门、港口、船闸、船户的“四方协同”,有效减少船舶待闸时间,提高船闸运行效率和降低物流成本。

此外,下沙港大力推广“5G+智慧码头”多场景应用,构建起“1+3+9”的创新模式,覆盖到港口作业的各个环节,实现从货物装卸、仓储管理到运输调度的全方位智能化管控,填补了内河港口缺乏先进港口作业系统的空白。

在杭州,下沙港正凭借“数字脉络”,生动演绎着锻造智慧强港的精彩故事。

“数字底座”构筑未来航运样本

内河环境复杂、航道尺度有限,对船舶航行控制与决策提出了极高要求,在内河水域实现自主航行面临重重挑战。

然而,浙江内河航运的数字化、智能化探索并未止步。



在嘉兴,船岸协同内河智能航运试点聚焦船岸高效协同,以船舶智能化为契机,系统性推进物联网、

云计算、大数据、人工智能等高新技术在船舶、航道、航行保障、安全监管以及运行服务等领域的创新应用。同样依托“数字底座”,该试点实现了船舶与港口岸基设施之间的数据实时交互与共享,优化了航运组织和物流路径。

在煤炭、粮食、纸浆、集装箱等物流运输中,嘉兴试点大力拓展长江、淮河、江淮运河、京杭运河等沿线港口航线,实现海河联运航线全面覆盖长三角主要内河港口,极大提升了内河航运的整体效率和竞争力。

东宗线湖州段航道位于“两河一江”主骨架关键节点,是湖州地区联系嘉兴地区、杭州地区的货物运输纽带,也是长三角省际联通航道联动的海河联运数字化转型大通道的关键枢纽,在浙江内河航运智慧化进程中至关重要。

2021年,借东宗线湖州段四改三航道整治工程立项,湖州市港航管理中心前瞻性地智慧航道作为配套工程同步推进,旨在打造全省内河智慧航道建设示范标杆。

以往的航道业务管理和信息系统难以满足用户对多样性、个性化航道动态信息的需求。此次智慧航道建设将综合运用大数据、大模型、人工智能等先进技术,构建“智慧大脑一平台、数字航道一张图、视频监控一幅画、智能感知一张网、管理服务多应用”体系,实现航道要素全面感知、资产精细化管理、运行智能监测等,进一步加强航道运行管理,保障航道设施运行安全。

目前,东宗线湖州段示范工程正全面高效推进,智慧航道预计2025年2月底开工建设

从嘉兴船岸协同内河智能航运试点到东宗线湖州段智慧航道示范工程,浙江内河航运在基础设施数字化转型、运输服务智能化升级以及标准规范体系构建等方面持续发力,即将形成一套可复制可推广的智慧化发展模式。

未来,浙江内河航运将继续以智慧航道示范工程和“一网一图一平台”港航数字底座为核心,不断拓展智能航运的应用边界,持续引领全国内河航运智慧化发展,为打造内河现代化航运样板贡献更大的力量。

来源:省交通运输厅融媒体中心 省港航管理中心 潮新闻

与包乐史驾帆航行 | 兰伯蒂的南太平洋航海冒险

“首次经历，独一无二；
初生的太阳，南太平洋的岛屿，
独成记忆，触碰心灵的纯真。”

——罗伯特·路易斯·史蒂文森

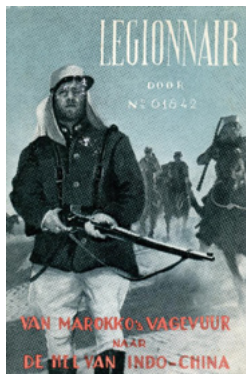
在上一篇关于勒图梅兰(Le Toumelin)的故事中，曾简要提到过“荷兰人威廉·兰伯蒂(Wilhelm Lamberty)”。由于沉迷于爱情冒险，他驾驶着他的帆船“克罗亚”号(Kroya)在法属波利尼西亚的马尔克斯群岛的一个岛屿——希瓦瓦岛(Hiva-Oa)，附近触礁沉没了。



厄恩斯特·威廉·兰伯蒂(Ernst Wilhelm Lamberty)的肖像(本文图片均为包乐史教授供图)

有关兰伯蒂的人生经历，包括他的后续冒险生活，已经被他的同乡扬·舒尔赫斯(Jan Schurgers)精心重建。根据兰伯蒂出版的作品、大量的信件、报纸文章，以及对他热心家人和或近或远的相识者的调查研究，舒尔赫斯一点一滴成功地还原了这位环球旅行者的生活故事。以下关于兰伯蒂航海冒险的内容，主要基于兰伯蒂的个人著作和舒尔赫斯写的传记。

在31岁开始航海生涯之前，兰伯蒂已经过着一种动荡不安的生活。他是一个叛逆的少年，在学校期间经历了一段混乱的时光，随后又中断了海事学校和海军的一系列课程。1935年，他加入了法国外籍军团，这一冲动的决定给他带来了五年的痛苦。由于战争爆发，他或多或少地回到了“正轨”。作为一名外籍军团士兵，他参加了在纳尔维克(挪威)的失败的盟军行动，在非洲服役，后来成功逃脱外籍军团抵达英国，随后又加入了荷兰皇家海军。在战争的剩余时间里，他一直在巡航于印度洋和大西洋的军舰上服役，所到之处都留下了破碎的心和空空的酒瓶。这也成为他之后生活的一个固定模式：失败的婚姻、数不尽的孩子遍布在各大洲、许多欢乐以及随之而来的失望。兰伯蒂确实符合“水手无法在陆地上安定下来，每个港口都有一个情人”的老套说法。尽管他有诸多缺点，但根据那些与他亲近的人所言，他是一个友善的，略带内向的伙伴，一旦他打开话匣子，就能讲出令人惊叹的故事。甚至在他的书信中，也体现了



兰伯蒂的作品《军团士兵，从摩洛哥的炼狱到印度支那的地狱》封面

一种大胆而自信的写作风格。

1946年退役后，兰伯蒂开始寻找一艘小型帆船，准备进行他梦寐以求的环游世界之旅。当时，他已经与英国姑娘琼(Joan)结婚，妻子也愿意与他一起踏上这段海上冒险之旅。这对年轻夫妻找到了一艘状况良好、改装成帆船的救生艇，花了7000荷兰盾的价格买下来。这艘船被命名为“克罗亚”号(Kroya)，长30英尺，宽9英尺，吃水深度为3.5英尺，航行表现相当不错，而且，作为一艘救生艇，它非常适合海上航行。

1946年9月29日，是时候出发了：“克罗亚”号带着厄恩斯特、琼和一位计划在英国登陆的偷渡客。此外，一小批走私货物在最后一刻也被带上了船：200公斤的郁金香球根。一上岸，事情就败露了。这艘船被英国警方扣押，这对年轻夫妇在琼的叔叔和婶婶处暂住了下来，直到1947年1月法院做出判决。船员们只被罚了20英镑，算是轻判，但幕后的走私商被判处了两年半的监禁。

1947年7月，“克罗亚”号再次驶出港口，但随即就遇到一场猛烈的风暴，船只险些沉没。幸运的是，它被一艘货船拖到了奥斯坦德(Oostende)。在那里，这艘救生艇被放置在码头进行修理。当时，有两位驾着一艘摩托艇沿莱茵河而下的瑞士人主动提出帮忙，随后决定与兰伯蒂一同航行前往美国。在西班牙的拉科鲁尼亚(La Corunna)，其中一名瑞士人被换成了一名荷兰人，名叫赫里特·巴尔内维尔德(Gerrit Barneveld)，他打算碰碰运气，去苏里南为家人建立新的生活。一路上，他们经历了各种疯狂的冒险。身处这些粗鲁的男士中，琼很快就受不了了，决定回到她叔叔和婶婶那里，约定等“克罗亚”号横渡完大西洋，她将过去会合。这是一个明智的决定，因为和三个不洗澡的男人一起挤在小艇上生活，简直难以忍受。

令人惊讶的是，在二战结束后不久，像“克罗亚”号这样奇特的小型游艇在航行途中几乎随处都能受到

非常热情的款待。记者们前来采访，游艇俱乐部免收停泊费，不相识的人们主动提供物资给养，在没有这些帮助的情况下，兰伯蒂也能从停靠港口的荷兰商船管事那里采购到所需的物资。

还有那些在公海上的商船，它们除了特地转向，询问船上是否一切安好，还做了什么呢？航行于荷兰-美国航线上的客轮“沃伦丹”号（Volendam）搭载着1600名移民从魁北克前往蒙得维的亚（Montevideo），甚至在浩瀚的大西洋中停下来，在乘客们的众目睽睽下，为“克罗地亚”号运送了给养和饮用水。接下来就是与瑞典的蒸汽船“哥特兰”号（Gottland）的相遇！当一位船员告知“克罗地亚”号距离加勒比海的岛屿特立尼达还有950海里后，两船各自继续航行。数小时后，“哥特兰”号又掉头返回并靠近“克罗地亚”号，兰伯蒂一行惊讶万分。“哥特兰”号的船长从指挥桥走下来，通过船上的广播大声说道：“非常抱歉……我们告诉你们的距离是错误的……距离特立尼达还有450海里！”随后，“哥特兰”号才继续返回原来的航线。

抵达特立尼达的西班牙港后，钱花光了，船员们不得不去找工作。瑞士人奥托（Otto）在港口找到了一份工作；厄恩斯特和赫里特则加入了一艘双桅纵帆捕鲨渔船。不久后，琼搭乘客轮抵达。“克罗地亚”号被拖上岸。夫妻俩带着船上的猫咪在港口不远处找了一间小屋安顿下来。后来琼发现自己怀孕了，就于1949年3月返回英国，在那里生下一个女儿，克里斯蒂娜（Christina）。赫里特和奥托也相继离开，于是兰伯蒂于5月5日与一名当地招募的船员彼得一起启程前往库拉索（Curaçao）。在库拉索，他受到了热烈的欢迎，因为他和哥哥古斯（Guus）重新团聚了，古斯是一艘壳牌油轮的船长。“开始时他只是友好但冷淡地点了点头。直到他意识到站在面前的是同胞兄弟时，才像我们在林堡家里那样跟我打招呼。”

尽管经常没有风，但穿越圣布拉斯（San Blas）群岛前往巴拿马运河的后续旅程进展得很顺利。然而，兰伯蒂对这些原始岛民的风俗习惯印象深刻：“我常常想，我们白人真的比这些所谓的半野蛮人更文明吗？我经常得出结论，我们仍然可以从他们身上学到很多东西。”

就像勒图梅兰（Le Toumelin）一样，兰伯蒂也在想，如何在没有发动机的情况下通过巴拿马运河。他比那个脾气暴躁的法国人更顺利地解决了这个问题。通过

直接给巴拿马运河区的最高当局纽科默（Newcomer）将军写了一封信（并附上一张小船的照片），两天之内，港务局就通知兰伯蒂，会为他免费提供一艘摩托艇，帮助将“克罗地亚”号拖过运河。

彼得在巴尔博亚（Balboa，位于巴拿马运河的另一端）也离开了“克罗地亚”号，船员只剩下猫咪汤姆（Tommy）和小黑（Blackie）：“它们是我最好的朋友，我们一起吃饭、睡觉。当我担心坏天气时，它们常常跟我一起待在驾驶舱里，就像我们在一起商量着该怎么做。”猫咪的伙食好极了，吃的是落在甲板上的飞鱼。兰伯蒂则是亲自射杀大鱼，再拖上船。一个月后，蔬菜和水果吃完了，但还有充足的罐头食品和来自荷兰的三年陈年饼干，以及用来预防坏血病的每日维生素片和鳕鱼肝油。1949年9月5日至6日的夜晚，“克罗地亚”号穿越了赤道。就是在那晚，船员小猫汤姆不知道在什么时候悄无声息地掉进海里，让船长心痛不已。

从巴拿马运河不间断航行到马克萨斯群岛的82天里，船基本上是自己航行。在经过洪堡德洋流时，尽管“克罗地亚”号靠近赤道航行，但海上的温度异常寒冷，兰伯蒂白天在驾驶舱里看书还得穿着长裤、卡其色衬衫和毛衣，并披着一条毯子。他带了足够多的书上船。

1949年11月2日，希瓦瓦岛出现在天际线上，经过近三个月的孤身一人航行，兰伯蒂终于可以在塔哈-乌库湾抛锚停船。在由火山喷发形成的马克萨斯群岛，周围环绕着令人震撼的美丽自然景色，他仿佛置身于天堂。他旅行游记的后半部分，全是关于他在南太平洋岛屿的经历，以及他与友善的当地居民相遇，最重要的是，他与美丽的丽贝卡·弗雷博（Rebecca Frébault）一见倾心、坠入爱河的故事。用他自己的话说：“丽贝卡是‘克罗地亚’号无法离开这里的原因。因为我一直推迟出发，这



兰伯蒂和丽贝卡在希瓦瓦岛上的塔哈-乌库湾

也导致‘克罗地亚’号抛了锚，最终毁于这里的海滩上……在此之前，我一直过着相对无忧无虑的生活，但我开始意识到，我的生命里不能没

有她。她与我同甘共苦，因此当我由于财务原因离开这些岛屿时，我心如刀绞地与丽贝卡和猫咪小黑告别。”

如果有人认为这位来自林堡的奥德修斯永远放弃了他那段异国恋情，在航行三年后回到英国妻子身边，那就错了。回到荷兰后，兰伯蒂四处发表演讲和接受采访，并出版了他的游记，到处大肆宣传他正在寻找一艘船并招募船员，准备再次启航。这既有正面效果，也有负面影响。通过演讲，兰伯蒂收到了“一个无法拒绝的工作”：一位船舶经纪人慷慨地为他提供了一艘几乎全新的船，并约定等兰伯蒂抵达波利尼西亚时，他将登船同行。“安娜·伊丽莎白”号（Anna Elizabeth）是一艘优雅的帆船，尺寸为 11.44 米长、3.28 米宽、1.65 米深。船员方面也不成问题，一位林堡老乡、一位德国人和一位比利时人，自愿作为付费船员加入。但关于兰伯蒂浪漫冒险的所有炒作也起到了反效果。消息传到了他在英国的妻子那里，琼在这段时间一边抚养着他们已经两岁的女儿，一边一直等待着他。她写了一封愤怒的信给荷兰各大报纸，很快，媒体对这位林堡罗密欧的浪漫南太平洋故事的热情就消退了不少。



“安娜·伊丽莎白”号帆船设计图和线描图

1951 年 8 月 7 日，“安娜·伊丽莎白”号在艾默伊登（Ijmuiden）下水，随后直接航向库拉索。5000 海里的航程在 47 天内完成，成绩相当不错。船员们再次在岛上受到热烈的欢迎。那么旅程接下来将如何呢？目前看来没有太多问题。经过仔细检修，那台在整个航程中都无法启动的发动机，竟然将游艇安全地引导通过了巴拿马运河。但是，离开巴尔博亚后，船上的友好气氛就不复存在，尤其是在德国船员一直偷喝船上酒水储备的事情曝光后。在加拉帕戈斯群岛逗留期间，兰伯蒂想尽快启航，但德国人和比利时人都违背了他的意愿，去拜访在一个小岛上独居的德国人维特默（Wittmer）一家。由于迷路，他们没有按约定的时间回来。对船长来说，这是压垮骆驼的最后一根稻草，他积攒的怨气彻底爆发了。第二天早晨，当德国人和比利时人回到停船点时，发现他们的行李堆在海滩上，而“安娜·伊丽莎白”号已经不见踪影。原来兰伯蒂和他的老乡前一晚就已经起锚，启程前往兰伯蒂心上人所在的马克萨斯群岛。当这一切后来被曝光后，在国际上引起了

轩然大波，甚至对兰伯蒂发出了逮捕令。但在帕皮提（Papeete）警察局的严厉审讯后，一切又平息了。当兰伯蒂到达希瓦瓦岛时，并没有如预期那样见到丽贝卡。几周前，她因严重的肺炎被转送到帕皮提的一家医院治疗。幸运的是，她在接下来的几周里恢复了健康。

他们从此过上了幸福的生活吗？起初是的。他们有了孩子，根据当地的风俗习惯，孩子们立即被家族其他成员共同抚养。但遗憾的是，生活不是童话故事，就算是这对爱侣也概莫能外。虽然他们深爱着彼此，但丽贝卡还是无法适应在“安娜·伊丽莎白”号上的生活。兰伯蒂必须做出选择，但在做出选择前，他先把游艇开去新西兰，进行彻底的整修。在前往新西兰的航行中，其中一名船员恰好是保罗·法尔日（Paul Farge）——就是当年勒图梅兰航行中留在帕皮提的航海伙伴。

最后，兰伯蒂决定接受一份工作，在新赫布里底群岛（New Hebrides）的埃斯皮里图桑托岛（Espiritu Santo）一家椰子干公司担任经理。丽贝卡过来与他团聚，还带着之前他们托付给亲戚照顾的孩子们。然而，兰伯蒂在陆地上待了不超过四年就难以忍受。大海的召唤让他无法抗拒！作为一艘沿海货船的船长，常年往返于各岛屿之间，这位不安分的浪子忍不住又沾花惹草，直到最后悲伤的丽贝卡再次带着孩子们离开了他，返回帕皮提。这位老水手显然在每个港口都拥有一个情人。引人注目的是，在 1969 年，他遇到了一位新的丽贝卡，并于 1972 年跟这个岛上的女孩结婚。当时兰伯蒂已经 54 岁了，而女孩比他小了整整 37 岁。兰伯蒂也跟她生了几个孩子。

有趣的是，作为一个爱写信的人，兰伯蒂在他晚年重新与他在南林堡的家人取得了联系。双方从此联系不断。1982 年的平安夜，他的外甥弗雷德·多伦（Fred Dorren）终于从希尔弗瑟姆（Hilversum）的一个工作室打电话给他。但是，接电话的却不是厄恩斯特·威廉·兰伯蒂：他在前一天因为从船的舷梯上跌落去世了。

还有一个无法回避的问题：“安娜·伊丽莎白”号，她的结局如何呢？将船借给兰伯蒂的船舶经纪人再也没有见到他那美丽的游艇。“别指望能把它拿回来，”兰伯蒂的英国妻子在“安娜·伊丽莎白”号驶离荷兰时就警告过他。她是对的。当船主准备前往波利尼西亚时，兰伯蒂早已无影无踪了。看来兰伯蒂在新赫布里底群岛将这艘游艇卖掉了，据说它最终因疏于修缮而沉没。

文 / 包乐史（Leonard Blussé）译 / 孙蕴琦 来源：澎湃新闻

