

智能船舶协同研发关键平台研究现状与发展趋势

孙 旭¹, 郑佳楠^{2*}, 李纪强³, 张国庆³, 董传明³

(1. 中国船级社 科创试验中心, 北京 100082; 2. 水上载运与装备安全研究院, 北京 100082; 3. 大连海事大学 航海学院, 辽宁大连 116026)

摘 要: [目的]针对智能船舶协同研发关键平台系统研发需求, 阐述智能船舶的协同研发现状、关键平台及发展方向, 为智慧航运的高质量发展提供参考。[方法]对国内外智能船舶研究的文献进行总结, 分析有关智能船舶协同研发体系和协同研发平台的研究现状, 从协同算法优化平台、多源信息互联平台、协同仿真测试平台、协同集成平台和水上综合测试试验平台等方面总结智能船舶协同研发关键平台关键技术。[结果]根据我国智能船舶协同研发实际需求, 从智能船舶生态圈、船岸协同、市场驱动和多领域合作研发等方面指出我国智能船舶协同研发体系的发展方向。[结论]该研究可助力我国智能船舶及智慧航运的高质量发展。

关键词: 智能船舶; 协同研发; 关键平台; 发展趋势

中图分类号: U671.99 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2025.09.05

Research Status and Development Trends of Key Platforms for Collaborative R&D of Intelligent Ships

SUN Xu¹, ZHENG Jianan^{2*}, LI Jiqiang³, ZHANG Guoqing³, DONG Chuanming³

(1. Science & Technology Innovation and Test Center, China Classification Society, Beijing 100082, China; 2. Institute for Maritime Transport Equipment Safety, Beijing 100082, China; 3. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: [Purpose] Aiming at the research and development requirements of key platform systems for collaborative intelligent ship development, this study elaborates on the current status, key platforms, and development directions of intelligent ship collaborative R&D, providing a reference for the high-quality development of smart shipping. [Method] By reviewing domestic and international literatures on intelligent ship research, it analyzes the current state of intelligent ship collaborative R&D systems and platforms, summarizing key technologies in critical areas such as collaborative algorithm optimization platforms, multi-source information interconnection platforms, collaborative simulation testing platforms, collaborative integration platforms, and water-based comprehensive test experimental platforms. [Result] Based on the actual needs of intelligent ship collaborative R&D in China, it outlines the development direction of the country's intelligent ship collaborative R&D system from the perspectives including the intelligent ship ecosystem, ship-shore collaboration, market-driven mechanisms, and multidisciplinary cooperative R&D. [Conclusion] This research can contribute to the high-quality development of intelligent ships and smart shipping in China.

Key words: intelligent ship; collaborative research; key platform; development trend

收稿日期: 2024-11-07; 修回日期: 2025-01-24

基金项目: 工业和信息化部高技术船舶专项; 国家自然科学基金(52442104)。

作者简介: 孙 旭(1981—), 男, 硕士、工程师。研究方向: 智能船舶技术研究及试验验证。

通信作者: 郑佳楠(1991—), 女, 工程师。研究方向: 智能船舶技术。E-mail: jnzheng@ccs.org.cn

0 引言

智能船舶通常是指利用先进的控制系统、传感器和通信互联技术实现自主航行、智能驾驶、动态感知、智能数据处理和智能能耗管理等功能的船舶,具有安全可靠、节能环保和经济高效等特点^[1]。国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)海上安全委员会(Maritime Safety Committee, MSC)于2017年正式采用海事自主水面船舶(Maritime Autonomous Surface Ship, MASS)的概念,并于2018年将其分为4个层级^[2-4],见表1。目前商船的智能化等级基本上处于S级,即配备有自动系统和辅助决策系统,如配备有智能机舱、自动舵、自动压载水和驾驶台辅助决策系统等智能化装备。欧洲多国、日本、韩国和我国已联合开展无船员在船的远程遥控船舶研发^[5-10]。目前小型智能船舶(包括无人艇、无人船和岸基遥控水面船等)、部分从事专业海事任务的船舶和科研院所的海事测试船发展较快,其智能化等级能达到A级,国内外均有相关的理论基础和工程试验基础,且相关产品已实现商用,如云洲智能公司的用于进行水面监测和海事搜救的系列无人艇,具有较好的机动性和快速性^[11]。图1为MASS的发展历程和分类。当前智能船舶研究处于“船端人船协同船”阶段,以无人水面艇研究为主,主要集中于安防、科研和军事等领域。

表1 MASS 的智能化分级

Tab. 1 Intelligence Levels of MASS

智能程度	IMO MASS 等级	T/CIN003 标准
配备自动系统和辅助决策的船舶	MASS 1	S
有船员在船的遥控船舶	MASS 2	R1
无船员在船的遥控船舶	MASS 3	R2
完全自主航行船舶	MASS 4	A

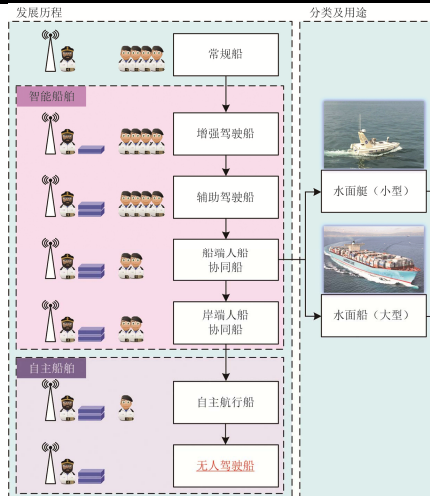


图1 MASS 的发展历程和分类

Fig. 1 Development History and Classification of MASS

大型运输船舶因具有大惯性、长时滞和对环境干扰响应显著等操纵性特点,在智能化进程中遭遇了诸多挑战,如技术攻克难度大和成本高等,目前其智能化研究仍处于起步阶段。

智能船舶研发一直是海事领域的热点,目前国内外船舶行业在智能船舶研发领域已取得一定的成果^[12-14],见图2。据统计,目前至少有48个国家启动智能船舶研发项目,部分发达国家预计到2030年能实现表1中的R1/R2海上营运。如,2012年欧洲Fraunhofer CML公司等8家单位合作启动了海上智能无人导航系统项目(Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks, MUNIN),该项目期望借助雷达、船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)和智能控制系统实现无人散货船自主航行,并计划于2034年之前实现自动化无人操控货船^[15];2015年,芬兰启动了高级无人驾驶船舶应用开发计划(Advanced Autonomous Waterborne Applications, AAWA)项目,该项目采用多元合作模式,即由高等院校、船舶设计研究院、船企、海事装备制造制造商和船级社等多家单位合作开发智能船舶,旨在为下一代高级船舶制定规范和初步设计方案,到2035年实现真正意义上的远洋船舶无人自主航行^[16];2020年,日本启动了完全自主船舶计划MEGURI 2040,相继完成了6种船型的智能航行系统开发和实船测试,该项目包含5个合作联盟,汇集航运、造船和船舶设备制造等领域的40余家日本企业^[17];2021年,挪威成功研发了全电动无人驾驶货船,可实现自主避碰和自主靠离泊等功能^[18];2022年,韩国超大型天然气运输船Prism Courage号完成了远洋智能航行试验^[19]。

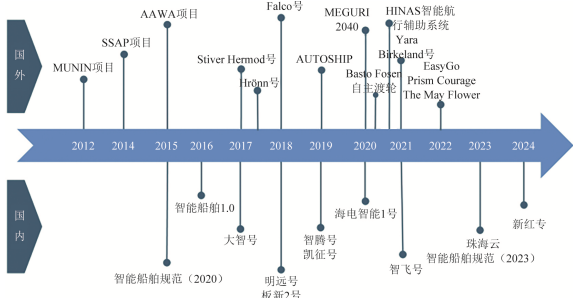


图2 国内外部分智能船舶研发进程

Fig. 2 Research and Development Progress of Intelligent Ships Domestically and Internationally

我国在智能船舶研发领域已取得一系列成果,但与国外造船强国相比还有一定的差距^[20-23]。2017年12月,中国船级社、珠海市政府、武汉理工大学和云洲智能共同启动了全球首艘小型无人货船筋斗云项目。该船规划为500吨级无人货船,船长为50 m,采用电力推进,在一定条件下具备自主靠离泊能力,

为智能船舶的发展提供了新的实践方向。为推动我国智能船舶高速发展,《智能船舶2023》指出了智能船舶的六大模块,即智能航行、智能船体、智能机舱、智能能效管理、智能货物管理和智能集成平台。但,我国的智能船舶研发具有产业离散程度高的特点,智能船舶研发涉及多个领域、多个部门,如一些新技术、新方法通常由高等院校和船舶设计院中的各部门进行有针对性的理论研究和试验测试,这些新技术、新方法的集成需要多方协同配合。因此,梳理智能船舶协同研发现状有助于提升智能船舶商用进程,助力我国智慧航运建设。

1 国内外智能船舶协同研发现状

1.1 智能船舶协同研发体系概述

船舶工业是一个规模庞大且繁杂的离散化生产行业,产品研究设计涉及的部件多、生产研究数据多,且开发环节需要多方协同合作。因此,当前普遍存在设计效率低、设计返工频繁和数字化产品全生命周期断点等问题。为解决这些问题,船舶设计建造公司须借助三维仿真建模数据,提升协同开发技术,构建一个完整的数字化设计工作平台,实现产品设计生命周期链的无缝衔接,逐渐形成并行、协调、集成的造船数字化设计工作平台。

1.1.1 韩国的船舶产业协同研发体系

韩国船舶产业在协同研发方面取得了显著成果。韩国政府设立韩国船舶与海洋工程研究院(Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO)作为中心机构,与船舶设计、制造和海洋工程等领域的企业和高校建立紧密合作关系。通过共享数据和资源推动产学研合作,在船舶设计、制造和测试等领域实现协同创新。此外,韩国船舶产业协同研发体系主要由现代重工、三星重工和大宇造船等三大船企牵头,主导船舶产业协同研发的主要方向,依托韩国互联网等信息技术的优势,以点带面,协同相关企业和政府推动船舶产业的发展^[24]。

现代重工从2009年就开始进行智能船舶研发,并与韩国电子通信研究院(Electronics and Telecommunications Research Institute, ETRI)合作,将信息技术与传统的船舶建造技术相结合,推进和实施了“智能船舶1.0”和“智能船舶2.0”计划。2018年,韩国大宇造船与英特尔韩国公司和Naver Business Platform(NBP)合作,推动“智能船舶4.0”基础设施建设,以期实现基于物联网和云计算等信息技术的船舶管理架构体系。此次三方合作为大宇造船引领未来全球智能船舶物联网基础设施建设奠定了基础。2022年,三星重工集团与美国船级社签订合作协议,联合开发全新的船体应力监测系统,以提升船舶的安全性能。

1.1.2 日本的船舶产业协同研发体系

日本船舶产业建立有较为完善的协同研发体系。日本政府通过设立造船技术研究中心(Shipbuilding Research Center, SRC)和船舶试验场等机构促进产学研合作。在此背景下,日本航运、造船和船舶检验等领域的合作和交流显著加强,形成了“无人船舶联盟”等新技术合作体系。在日本国内,尽管政府未组织大型科研项目,但相关企业和科研机构共同研发创新,在无人船舶和智能船舶方面进行了大量研究,在数字化技术、虚拟仿真和自动化等方面取得了显著进展,提高了船舶设计和制造的效率和质量^[25]。

不同于韩国的船舶研发体系,日本航运相关企业和科研院所共同主导船舶的协同研发方向,其特色是由具有航运背景的社会团体联合船级社、企业和船东等利益群体从事智能船舶研发工作。如,三井造船、商船三井联合、东京海洋大学、日本船级社、日本船舶技术研究协会和国家海事研究所等机构组成研究联合会,充分发挥各自的专业优势紧密合作,分别从造船、船舶运营、船舶导航、船舶评估和船舶法规分类等角度推动自主船舶技术的发展。

1.1.3 欧盟的船舶产业协同研发体系

欧盟的船舶产业协同研发体系也值得关注。欧盟通过制定相关政策、资助科研项目和支持创新产业等举措,鼓励成员国在科技、工业和服务等领域进行合作与创新。欧盟的船舶设计和制造企业通过建立跨国合作项目,共享资源和技术,推动创新和科研发展。欧洲船级社、科研机构 and 高校之间建立合作,积极推进船舶技术的协同研发。在此背景下,涌现出了一系列代表性项目,如MUNIN、AAWA和AUTOSHIP等^[26]。

MUNIN项目由德国的MarineSoft公司于2012年发起,联合瑞典的查尔姆斯理工学院、挪威的SINTEF和Aptomar AS公司等企业和高校进行协同研发。该项目的目标是构建无人船舶技术框架,并指出在欧洲水域内,小型短途运输船舶更有希望率先应用自主船舶相关技术。2015年,芬兰阿尔托大学与罗尔斯·罗伊斯公司合作启动了AAWA项目。该项目汇聚了芬兰境内多所顶尖学术研究机构,以及罗尔斯·罗伊斯、NAPA、Deltamarin、挪威船级社和Inmarsat等船舶产业集群的领先企业,致力于无人船舶协同研发。

1.1.4 挪威船舶产业协同研发体系

挪威作为欧洲的造船和航运大国,其船舶产业协同研发体系较为完善,以康斯伯格集团、挪威科技大学、SINTEF和挪威船级社为主形成的产、学、研、用、检联合体在IMO拥有话语权。2017年9月,挪威的肥料生产商Yara公司与康斯伯格集团合作,

共同推进Yara Birkeland智能集装箱船研发项目。该船可实现纯电动运行, 于2021年11月前往挪威首都奥斯陆首航。此外, 挪威船公司Grieg Star联合G2 Ocean、挪威科技大学、挪威海事局、挪威国油和SINTEF Ocean、IFE等单位开展了“安全自主船舶(SFI Autoship)”研究项目, 并于2020年6月获挪威研究委员会资助。该项目旨在保持挪威航运业在船舶自动化发展中的领导地位。

1.1.5 我国的船舶产业协同研发体系

我国是造船大国, 拥有中国船舶集团、中国远洋海运集团和招商局集团等众多船舶建造与运营企业。2017年, 为加快我国智能船舶的产业化发展, 由上海船舶研究设计院牵头, 在上海成立了“中国智能船舶创新联盟”。该联盟的成员涵盖国内智能船舶主要用户、骨干科研院所、高等院校、配套企业、检验机构和信息技术(Information Technology, IT)企业等70余家单位, 其宗旨是联合船舶和智能系统业的龙头企业, 促进产学研用全产业链融合, 提升智能船舶产业技术的创新力和竞争力, 实现智能船舶装备突破, 解决智能船舶全产业链配套问题, 探索智能船舶共性技术, 研究拟定智能船舶标准规范, 创新智能船舶运营模式, 为智能船舶行业发展提供政策建议、技术指导及支撑^[27]。

“十三五”期间, 该联盟在推动我国智能船舶发展方面发挥了重要牵引作用, 通过协同合作研发, 成功交付了全球首艘智能船舶大智号、全球首艘40万t超大型智能矿砂船和全球首艘30.8万t超大型智能原油船等示范船舶, 引领我国全面进入智能船舶技术应用及商业落地新阶段。该联盟在推动智能船舶核心关键技术研究、制定智能船舶相关标准、促进跨行业协同, 实现我国智能船舶全产业链良性发展方面发挥了积极作用。

1.2 智能船舶协同研发平台概述

当前船舶系统中软件应用的普及、多供应商设备与系统集成的复杂性增加以及系统工程方法的支撑不足, 导致船舶研发的复杂性持续攀升, 设计、建造、操作和维护等工作面临着前所未有的挑战。在这种背景下, 开放仿真平台(Open Service Platform, OSP)应运而生, 成了应对这些挑战的关键技术工具。OSP是一项开源行业计划, 用于对海事设备、系统和整艘船舶进行联合仿真。该平台通过为海事行业提供技术系统工程的关键工具和工作流程, 有力推动了数字孪生技术在系统集成、测试和验证中的应用, 从而在保障船舶及其他海事/近海资产安全的同时, 实现成本和环境足迹与安全性之间的平衡。除了OSP之外, 全球还有很多其他船舶协同研发平台。这些平台各具特色, 在不同程度上推动了智能船舶及相关技术的协同研究与发展。下

面介绍一些较为知名的船舶协同研发平台。

1.2.1 日本的智能船舶应用平台

2012年, 日本启动了“日本智能船舶应用平台”(Ship System and Equipment Advanced Proving Ground, SSAP)项目, 支持智能船舶所需物联网应用服务, 使其能轻松访问船舶设备数据, 进行更多应用服务开发。船舶数据中心可提供一个访问船舶物联网的平台, 标准ISO格式数据具有安全、简单、合理的特点。利用SSAP, 所有船舶供应商都能轻松地利用船舶物联网数据, 加强船舶物联网应用服务的开发和运营。图3为SSAP协同流程图。

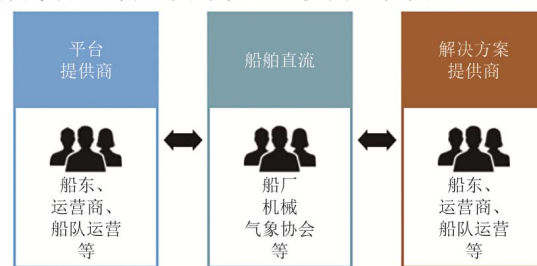


图3 SSAP协同流程图

Fig. 3 SSAP Collaboration Flow Chart

1.2.2 英国的 AVEVA Marine 平台

AVEVA Marine平台是目前广泛应用的海工与船舶设计平台, 支持多人协同设计、数据共享和实时协同工作。该平台利用人工智能和虚拟现实技术, 帮助船舶设计师和工程师完成船舶模型设计、结构分析和系统集成等工作。依托该平台, 来自不同地点、不同专业的工程师和设计师能在同一个模型数据库上并行工作, 高效且零风险地创建、开发、管理、利用工程和设计数据。该平台采用突破性技术, 能有效提升海工设计效率, 同时使全集成、并行开发工程和三维设计数据成为可能, 从而使工程师和设计师能在同一个设计项目中协同工作, 与其他解决方案相比能节约成本达30%。

1.2.3 加拿大的 ShipConstructor 平台

加拿大ShipConstructor Software Inc (SSI) 设计的ShipConstructor平台是一种非常容易操作的三维船舶建筑设计平台, 适合在各种规模的船厂利用。该平台支持多人协同设计、三维模型构建和制造工艺规划, 为船舶行业提供数字化解决方案。该平台在船舶协同研发中通过提供多人协同设计、实时数据共享、三维模型协同和制造工艺协同规划等功能, 有力地促进了不同部门之间的协同工作, 提高了船舶设计建造的效率和质量。

这些智能船舶协同研发平台实践案例展现了各国在推动船舶数字化转型方面的阶段性成果。通过引入先进的技术和工具, 船舶设计和建造行业得以向更高效、安全和环保的方向发展。

2 智能船舶协同研发关键平台

智能船舶研发涉及多个技术领域,单一企业要建立完整的全产业链面临着极高的挑战。如,各智能模块和关键技术的研发创新能力、完善的仿真与实船测试技术以及智能装备的生产加工能力等,都对企业提出了很高的技术要求。值得注意的是,智能船舶各模块的研发往往涉及多个学科和技术领域。不同学科通过交叉融合与协同创新,共同推动智能船舶技术的不断进步。智能船舶协同研发平台各模块之间的逻辑关系见图4。

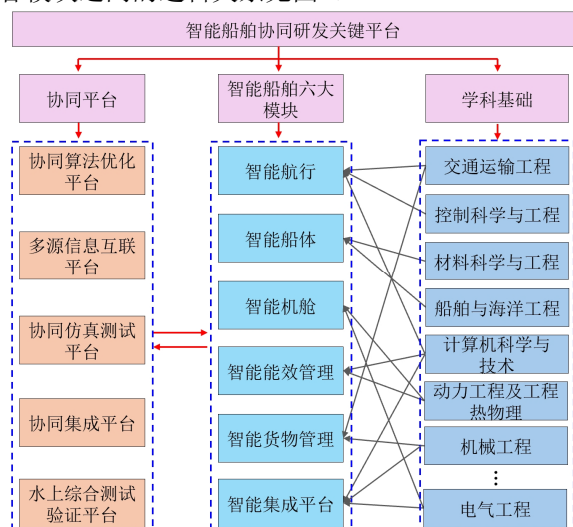


图4 智能船舶协同研发平台相关模块逻辑关系

Fig. 4 Logical Relationship of Relevant Modules of the Intelligent Ship Collaborative R&D Platform

我国的智能船舶研发通常是由政府出台政策和标准进行引导,研发机构负责技术创新和测试,船舶企业进行生产制造,尚不具备由单一集团进行全产业链研发与生产的能力。此外,我国从事智能船舶研究的企业、高校和科研院所众多,具有从事智能船舶各相关领域研究的专家学者,也具备相关独立模块的测试能力,但缺少系统性的总体设计能力。为此,构建具有优化、互联、仿真、集成和验证能力的智能船舶协同研发技术对于加快智能船舶建造和运营而言至关重要^[28-32]。图4展示了智能船舶协同研发关键平台的构成框架,五位一体的协同平台为整个研发流程提供了全面支持,有效推动了智能船舶六大模块的高效研发与创新。下面对协同平台的各子平台进行详细介绍。

2.1 协同算法优化平台

智能船舶六大模块的实现需依赖智能算法提供核心技术支持,智能算法也是船舶智能化的重要体现。随着信息技术、人工智能和自动化技术的快速发展,智能船舶相关的智能算法层出不穷^[33-41],如智能航行模块中的航向保持、路径跟踪、动态避障、

人工势场和鲁棒控制等先进的自主控制算法、决策算法和感知算法等^[42-54]。在CNKI数据库中以“智能船舶”“自动化”“控制”为关键词检索,约有6万余篇学术论文;在Web of Science中以“Ship”“Control”“Algorithm”为关键词检索,约有3万篇学术成果。这说明船舶智能算法众多,但多数局限于理论研究层面。如何对众多理论算法进行快速选取、对比和优化,将其应用到智能船舶研发中,是当前理论算法与工程应用之间存在的一个关键问题。

智能算法协同优化平台旨在建立一个能在线更新、对比和仿真验证智能算法的平台,研究者可将理论研究核心算法实时传输到协同优化平台上,由该平台自动对算法编译语言进行解码、更新,形成具有一致性、兼容性的编程语言。通过该平台实现对各理论算法的模块化验证,为智能船舶研发提供先进、安全、稳定、可靠的核心理论算法。该智能算法协同优化平台的建立能加速智能船舶各模块理论算法的工程应用进程。

2.2 多源信息互联平台

智能船舶配备有AIS、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、声呐、雷达和远程控制等多种航行、机舱、货运和保障传感器,涵盖多源海事数据信息,要构建多源信息互联平台,共享数据信息,为智能船舶研发提供更符合工程实际的数据支持。多源信息互联平台能对智能船舶上下游研发机构所需数据信息进行整合,达到资源高效利用的目的。此外,多源信息互联平台能自动对各种传感数据进行解码,为数据对接提供支持。

智能船舶运营需依托“空-天-海-地”域通信网络与高精度导航定位系统的深度融合,通过构建弹性可重构的网络架构,融合Long Term Evolution (LTE)、5G、卫星、地面无线电、海上安全信息播发和高精度组合导航定位等技术手段,实现船舶位置状态信息、控制信令和传感数据泛在互联,以充分发挥不同通信方式的优势,形成高效的空基/地基计算、统一的资源调控和高效灵活的移动管理与路由机制,构建基于感知、决策、控制和保障的全船信息交互网络系统。

2.3 协同仿真测试平台

建立数字化协同仿真测试平台,集成船舶设计软件和协同仿真软件,实现虚拟仿真、数字化设计和优化^[55-57]。我国船舶设计软件研发企业要在初步建立的三维设计软件基础上,加强全领域仿真覆盖集成,助力制造企业实现三维工艺数据全面指导生产,实现三维模型一张图用到底,提高设计效率,降低设计成本。数字化协同仿真测试平台应具有5种功能:

1) 船舶设计自动化和智能化。通过开发一系列设计工具和软件, 实现船舶设计自动化、智能化, 从而提高设计的效率和准确性。

2) 船舶结构仿真。运用有限元方法等技术对船体结构进行全面的仿真分析, 充分了解船舶的结构特点, 从而提高设计的质量和效率。

3) 船舶性能仿真。运用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)和海洋动力学等技术, 对船舶的水动力性能、气动力性能和操纵性能等进行全面的仿真分析, 为设计者提供重要的技术支持。

4) 船舶运动控制仿真。利用MATLAB、Python、VB和C++等软件对船舶运动控制算法进行仿真验证, 在全航程任务下对智能船舶进行运动仿真测试, 包括常规海况和恶劣海况下的运动响应测试。如, 在路径跟踪、动态避障、狭窄水域、岛礁和港口等模式下对控制算法进行验证, 提升设计的控制算法的工程应用性。

5) 航海模拟器验证。航海模拟器系列产品不仅满足多种航海业务培训需求, 而且能用于对智能船用设备的有效性进行验证等。

2.4 协同集成平台

未来智能船舶将向完全意义上的智能化方向发展, 即达到MASS的A等级, 在无人员干预的情况下, 仅凭接收的任务指令就能实现自动规划航线并执行任务。在此过程中, 协同集成平台起着至关重要的作用, 具有核心功能:

1) 任务指令下达与执行。协同集成平台接收并解析外部任务指令, 通过智能决策系统自动规划最优航线和执行任务, 确保船舶能自主完成各项任务。

2) 资源调度与优化。协同集成平台能根据任务需求进行资源调度, 促使船舶内各模块(如动力系统、导航系统、通信系统等)协同工作, 确保任务高效执行。

3) 数据共享与实时监控。协同集成平台通过集成多方数据源实现船舶各系统间信息共享, 同时进行实时监控和故障诊断, 确保船舶安全、可靠航行。

4) 全模块集成生产链。协同集成平台将推动智能船舶各模块深度集成与标准化, 最终形成完整的智能船舶生产链, 确保大型智能船舶能实现全航程的自主任务执行。

当前小型智能船舶研究已取得阶段性成果, 可实现近距离无人自主控制, 未来必然是朝着达到A级“智能化”的方向发展, 实现全航程自主任务执行。因此, 协同集成平台仍需迭代优化, 以支撑智能船舶应对更大规模作业场景及更高复杂度的多任务协同需求。通过持续对该平台进行优化, 未来大型智能船舶将逐步具备更高效、智能的航行能力。

2.5 水上综合测试验证平台

目前智能船舶测试验证技术仍处于发展初期阶段, 智能船舶的智能化和无人化关键技术被西方国家垄断, 亟须建立满足国际公约要求的面向智能船舶的水上综合试验验证平台, 为智能船舶的试验、验证、评估和检验提供服务。该平台涉及岸基保障设施、适用于多种海况及航行场景的海上测试区域和高效稳定的协同通信网络等, 具有以下功能:

1) 模块化测试。应将测试验证的重点放在智能船舶关键功能模块上, 逐步实现完备的智能船舶测试验证方法体系 and 水上测试试验平台。

2) 完备的测评指标与标准体系。应具备系统的、完整的智能船舶测试验证评估标准体系和格式化的智能船舶测试规程。

3) 多场景构建。区别于虚拟仿真试验和水池模型试验, 水上综合试验验证平台需获取真实的水域信息(包括气象参数、水深和水流变化等), 能实时构建不同的航行工况和航行场景(多船会遇和障碍物环境等)。

4) 可靠水上测试保障设施。在水上实际测试环节, 不可控、不可预测的情况随时会发生。水上综合测试平台具备应急救助、打捞和通信修复等功能。

3 国内外智能船舶协同研发现状

3.1 智能船舶协同研发体系概述

目前智能船舶协同研发生态圈主要依托传统船舶制造固有的研发体系构建。随着智能船舶的深入发展, 原有的协作研发模式逐渐暴露出了缺乏信息化改造的实战经验、协同研发体制不健全、冗余信息重复传递的不足, 造成了大量资源浪费, 阻碍了智能船舶的进一步发展^[58]。因此, 重塑智能船舶协同研发生态圈刻不容缓。为实现船舶协同技术的创新与研发, 亟须在行业内部重建船舶研发生态圈, 明确生态圈内各利益相关方的角色和职责, 形成更高效的协同机制。图5为智能船舶协同研发生态圈, 主要内容如下:

1) 协同技术创新与研发。建立数据互通体系, 构建集智能控制算法验证、协同信息互联、协同仿真测试平台、海洋测试验证体系和协同集成技术于一体的先进协同研发体系, 提高船舶研发的效率和实用性; 开展多领域合作研发, 整合智能船舶研发涉及的多个领域的专业知识和技术, 加强船舶智能系统总体设计, 整合行业内外的创新资源, 突破智能船舶的基础共性技术和关键核心技术, 实现跨域合作模式下的创新迸发和技术飞跃, 为船舶智能化提供全面的解决方案。

2) 协同技术交流与合作。船舶协同研发要打破信息壁垒, 在相关职能机构和船舶研发上下游建立

高效的技术交流和合作平台,促进知识共享和技术融合,进一步推动船舶研发数据的开放共享,并同步完善配套基础设施,提升整个研发产业的创新能力和国际竞争力。

3) 协同发展生态体系。促进形成“岸基为辅、船岸协同”的船舶航行架构,推动船岸云数据通信平台的建立,实现船-岸-港之间航行信息和货物信息的互联互通;围绕智能船舶运营需求,推动船舶航行、靠离泊、营运管理和货物装卸等方面的智能应用软件开发;促进船舶设计、建造、配套、营运和检验等环节的协同研发与管理,逐步完善智能船舶协同发展生态体系。

4) 产学研融通创新。智能船舶协同研发离不开产、学、研之间的深度合作,产业界、学术界和研究机构要在船舶智能化研发的科研项目、人才培养和实验室共建等方面开展广泛合作,支持船舶智能共性技术研究,推进绿色智能船舶研发技术集成应用,加大“技术+”指向型多维人才培养,实现资源共享、优势互补,加速科技成果转化。

5) 协同技术试点与推广。结合《智能航运发展》等国家相关发展计划,组织开展智能船舶协同研发示范工程,支持地区先行先试,形成可复制、可推广、可持续的船舶协同研发发展新模式,在试点建设过程中建立有效的监测和评估机制,及时了解进展情况,评估效果,发现问题并进行调整,为示范性协同研发示范工程推广提供范本。

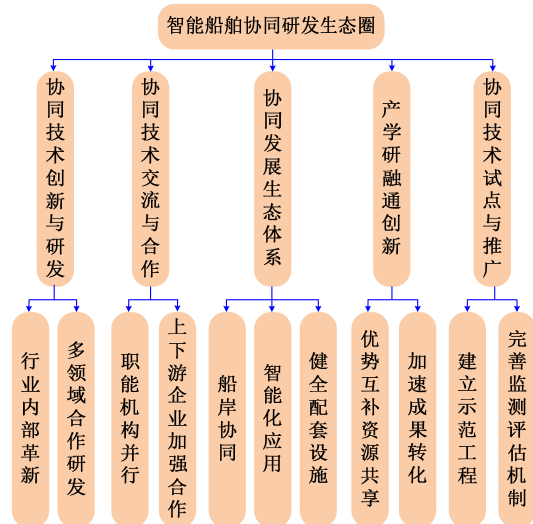


图5 智能船舶协同研发生态圈

Fig. 5 Collaborative Research and Development Ecosystem of MASS

3.2 构建智能船舶协同研发新模式

推进智能船舶的发展必将推动协同研发模式的整体转变。构建协同研发新模式时,应坚持“2个驱动,3个导向”(见图6),即以创新驱动和人才驱

动推进智能船舶领域创新性成果的产出,以政策导向、市场导向和结果导向推进智能船舶协同研发产业链的形成,将科技成果快速转化为实际生产力。

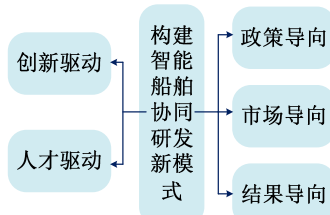


图6 智能船舶协同研发新模式

Fig. 6 New Pattern of Collaborative Research for MASS

智能船舶的发展必定以多学科交融、原创性成果高度集中的科技产出作为动力推动行业变革,协同研发要涉及船舶设计、自动化技术、人工智能、物联网和能源管理等多个领域,通过跨领域合作实现核心技术相互融合,实现研发技术的全面创新和应用^[59]。

在智能化转型驱动船舶行业产业升级的背景下,协同研发产业链亟须推进人才结构优化,对复合型船舶人才提出了全流程贯通、跨领域协同的多元化能力要求。智能船舶产业链的持续性技术支撑,依赖跨学科复合型人才基于全域模型数据库实现多学科协同,以保障项目全生命周期的高效推进和风险控制。

近年来船舶市场的定制化需求越来越高,智能船舶逐步向定制化、规模化和精细化管理方向发展,以市场为导向,充分服务于船东等利益相关方,形成有附加价值的产业联盟,构建全生命周期的智能船舶产业链。通过整合研发设计、生产制造和社会服务等各个环节,形成一个完整的产业链条。例如,中国船舶集团整合了原中船工业集团的建造优势和原中船重工集团的研究设计优势,打造一个覆盖动力、机电和信息系统等多个领域的全产业链条。产业链的形成更应强调以工程化应用为重点,推动协同创新,探索产业新业态。这有助于推动智能船舶的建设进程,促进船舶工业的高质量发展。

4 结论

本文梳理了智能船舶协同研发体系的现状和国际上知名的协同研发平台,指出实施智能船舶协同研发有助于充分发挥各研究团队的专长,提升智能船舶研发进程。对我国智能船舶协同研发现状进行了调研,认为后续要进一步完善我国智能船舶协同研发生态圈,构建协同研发新模式。此外,从协同算法优化平台、多源信息互联平台、协同仿真测试平台、协同集成平台和水上综合测试试验平台等5个方面提出了加速实现协同研发进程的关键技术平

台。智能船舶协同研发能助力我国实现现代航运系统智能化目标。

参考文献:

- [1] 张雨婷, 徐立新, 曹林, 等. 智能船舶的技术发展现状与展望[J]. 船舶工程, 2023, 45(增刊 1): 185-187.
ZHANG Y T, XU L X, CAO L, et al. Technological Development Status and Prospect of Intelligent Ships[J]. Ship Engineering, 2023, 45(Suppl. 1): 185-187.
- [2] 袁雪, 于博. 国际海事组织海上自主水面船舶的法律规制进程及中国因应[J]. 国际法研究, 2023(1): 38-57.
YUAN X, YU B. The Process of International Maritime Organization's Legal Regulation on Maritime Autonomous Surface Ships and China's Response[J]. Chinese Review of International Law, 2023(1): 38-57.
- [3] 孙旭, 蔡玉良. 《海上自主水面船舶试验指南》研究[J]. 船舶标准化工程师, 2020, 53(5): 11-15.
SUN X, CAI Y L. Research on "Interim Guidelines for MASS Trials"[J]. Ship Standardization Engineer, 2020, 53(5): 11-15.
- [4] 李文华, 张君彦, 林珊颖, 等. 水面自主船舶技术发展路径[J]. 船舶工程, 2019, 41(7): 64-73.
ZHANG W H, ZHANG J Y, LIN S Y, et al. Development Path of Maritime Autonomous Surface Ships Technology[J]. Ship Engineering, 2019, 41(7): 64-73.
- [5] 李宪伟. 无人船无线传感网络远程遥控系统[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(8): 10-12.
LI X W. Unmanned Ship Remote Control System Based on Wireless Sensor Network[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(8): 10-12.
- [6] 何进. 基于无线传感网络的无人船舶远程遥控系统设计[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(16): 172-174.
HE J. Design of Remote Control System for Unmanned Vessels Based on Wireless Sensor Network[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(16): 172-174.
- [7] 孙旭, 蔡玉良. 远程遥控船舶发展研究[J]. 中国船检, 2020(7): 66-68.
SUN X, CAI Y L. Remote Control Ship Development Research[J]. China Ship Survey, 2020(7): 66-68.
- [8] 王远渊, 刘佳仑, 马枫, 等. 智能船舶远程驾驶控制技术研究现状与趋势[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 18-31.
WANG Y Y, LIU J L, MA F, et al. Review and Prospect of Remote Control Intelligent Ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 18-31.
- [9] 孙晓雪, 王胜正, 殷非, 等. 智能船舶远程辅助驾驶 3D 场景构建关键技术研究[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(增刊 1): 173-179.
ZHANG X X, WANG S Z, YIN F, et al. Key Technologies of 3D Scene Construction for Remote Assisted Driving of Intelligent Ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(Suppl. 1): 173-179.
- [10] 马枫, 陈晨, 刘佳仑, 等. 船岸协同支持下的内河船舶远程驾控系统关键技术研究[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 125-133.
MA F, CHEN C, LIU J L, et al. Key Technologies of Ship Remote Control System in Inland Waterways Under Ship-Shore Cooperation Conditions[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 125-133.
- [11] 李佳佳, 汪晓菲, 王炜. 国内海洋无人系统智能装备重点企业事业单位技术创新模式分析[J]. 船舶工程, 2020, 42(2): 28-31.
LI J J, WANG X F, WANG W. Analysis of Technology Innovation Model of Domestic Key Enterprises and Institutions in Intelligent Equipment Industry for Maritime Unmanned Systems[J]. Ship Engineering, 2020, 42(2): 28-31.
- [12] 马勇, 王雯琦, 严新平. 面向新一代航运系统的船舶智能航行技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(11): 1795-1806.
MA Y, WANF W Q, YAN X P. Research Progress of Vessel Intelligent Navigation Technology for the New Generation of Waterborne Transportation System[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2023, 53(11): 1795-1806.
- [13] 许凯玮, 张海华, 颜开, 等. 智能船舶海上试验场建设现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(15): 1-6.
XU K W, ZHANG H H, YAN K, et al. The Development Status and Trend of the Autonomous Ship Test Area[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(15): 1-6.
- [14] 严新平, 王树武, 马枫. 智能货运船舶研究现状与发展思考[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 1-6.
YAN X P, WANG S W, MA F. Review and Prospect for Intelligent Cargo Ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 1-6.
- [15] RETSCHMANN L, RODSETH A, TJORA B, et al. Maritime Unmanned Navigation Through Intelligence in Networks-Qualitative Assessment[R]. 2015.
- [16] JOKIOINEN E, POIKONEN J, HYVONEN M, et al. Remote and Autonomous Ships-the Next Steps. AAWA Position Paper[M]. London: Rolls Royce PLC, 2016.
- [17] HIRATA E, WATANABE D, LAMBROU M, et al. Shipping Digitalization and Automation for the Smart Port. Supply Chain Recent Advances and New Perspectives in the Industry 4.0 Era[M]. Rijeka: Intech Open Publications, 2022.

- [18] RODSETH J. Assessing Business Cases for Autonomous and Unmanned Ships. Technology and Science for the Ships of the Future[M]. Amsterdam: IOS Press, 2018.
- [19] 张宝晨, 耿雄飞, 李亚斌, 等. 船舶智能航行技术研发进展[J]. 科技导报, 2022, 40: 51-56.
ZHANG B C, GENG X F, LI Y B, et al. Development Status and Trend of Intelligent Navigation Technology[J]. Science & Technology Review, 2022, 40: 51-56.
- [20] 蒋聪汝. 世界船舶产业发展趋势及其对中国船企的启示[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 78-83.
JIANG C R. The Development Trend of the World Ship Industry and its Enlightenment to Chinese Ship Enterprises[J]. Journal of Northwest Minzu University (Natural Science Edition), 2021, 42(1): 78-83.
- [21] 张毅, 丁宁. 新时代船舶制造企业技术创新模式的思考[J]. 船舶物资与市场, 2020(10): 11-12.
ZHANG Y, DING N. Thoughts on the Technological Innovation Mode of Shipbuilding Enterprises in the New Era[J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2020(10): 11-12.
- [22] 刘佳仑, 陈然, 李诗杰, 等. 智能水路运输系统的发展与应用: 案例分析与前景展望[J]. 交通信息与安全, 2023, 41(3): 175-181.
LIU J L, CHEN R, LI S J, et al. Development and Application of Intelligent Waterway Transportation System: Case Study and Prospect[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2023, 41(3): 175-181.
- [23] 李越翌, 郑卓, 吴拓, 等. 工业 4.0 时代智能船舶发展趋势与挑战[J]. 船舶工程, 2023, 45(增刊 1): 224-229.
LI Y Z, ZHENG Z, WU T, et al. Introduction to Development Trend and Challenges of Smart Ships in Era of Industry 4.0[J]. Ship Engineering, 2023, 45(Suppl. 1): 224-229.
- [24] 王思佳. 韩国智能船舶发展路径[J]. 中国船检, 2021(3): 14-17.
WANG S J. Development Status and Trend of Intelligent Ship[J]. China Ship Survey, 2021(3): 14-17.
- [25] 王思佳. 日本船舶智能化策略[J]. 中国船检, 2021(3): 18-22.
WANG S J. Intelligent Ship Strategy in Japan[J]. China Ship Survey, 2021(3): 18-22.
- [26] 丁杰. 智能船, 一路好风景[J]. 中国船检, 2019(1): 29-34.
DING J. Smart Ships, a Beautiful Journey[J]. China Ship Survey, 2019(1): 29-34.
- [27] 中国水运网. 聚焦中国智能船舶, 展望未来发展路径[EB/OL]. [2024-03-20]. https://info.chineseshipping.com.cn/cninfo/News/202107/t20210712_1354831.shtml.
MAERSK. Focusing on China's Smart Ships and Looking Forward to the Future Development Path[EB/OL]. [2024-03-20]. https://info.chineseshipping.com.cn/cninfo/News/202107/t20210712_1354831.shtml.
- [28] 李永杰, 张瑞, 魏慕恒等. 船舶自主航行关键技术研究现状与展望[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 32-44.
LI Y J, ZHANG R, WEI M H, et al. State-of-the-Art Research and Prospects of Key Technologies for Ship Autonomous Navigation[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 32-44.
- [29] 邢玉林. 海事航海保障智能船舶关键技术发展思考[J]. 航海, 2023(6): 7-10.
XIN Y L. Maritime Navigation Support Development of Key Technologies for Intelligent Ships[J]. Navigation, 2023(6): 7-10.
- [30] 刘晓鹏, 魏剑, 何新, 等. 从专利布局看全球智能船舶关键技术发展路径[J]. 船舶工程, 2023, 45(4): 34-39.
LIU X P, WEI J, HE X, et al. Development Path of Key Technologies for Global Intelligent Ships from the Perspective of Patent Layout[J]. Ship Engineering, 2023, 45(4): 34-39.
- [31] 张宝晨, 张英俊, 王绪明, 等. 基于船岸协同的船舶智能航行与控制关键技术研究[J]. 中国基础科学, 2021, 23(2): 44-51.
ZHANG B C, ZHANG Y J, WANG X M, et al. Key Technologies of Ship Intelligent Navigation and Control Based on Ship-Shore Cooperation[J]. China Basic Science, 2021, 23(2): 44-51.
- [32] 刘智心, 初秀民, 郑茂, 等. 智能船舶船岸协同实验关键技术研究[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(2): 63-70.
LIU Z X, CHU X M, ZHEN M, et al. Ship-to-Shore Cooperative Simulation System for Intelligent Ship[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38(2): 63-70.
- [33] 曹诗杰, 曾凡明, 陈于涛. 无人水面艇航向航速协同控制方法[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(6): 74-80.
CAO S J, ZENG F M, CHEN Y T. The Course and Speed Cooperative Control Method for Unmanned Surface Vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(6): 74-80.
- [34] 王文新, 刘上, 张国庆, 等. 考虑舵机故障的船舶鲁棒自适应航向保持控制[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 116-123.

- WANG W X, LIU S, ZHANG G Q, et al. Robust Adaptive Course-Keeping Control of Under-Actuated Ships with the Rudder Failure[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(1): 116-123.
- [35] 张显库, 韩旭. 船舶运输安全保障下的智能船舶运动控制策略[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(增刊 1): 1-6.
- ZHANG X K, HAN X. The Motion Control Strategy for Intelligent Ships Based on Ship Transportation Safeguard[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(Suppl. 1): 1-6.
- [36] 祝亢, 黄珍, 王绪明. 基于深度强化学习的智能船舶航迹跟踪控制[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 105-113.
- ZHU K, HUANG Z, WANG X M. Tracking Control of Intelligent Ship Based on Deep Reinforcement Learning[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 105-113.
- [37] 徐博, 张娇, 王超. 一种基于人工势场多 AUV 集群的实时避障方法[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 66-71.
- XU B, ZHANG J, WANG C. A Real-Time Obstacle Avoidance Method for Multi-AUV Cluster Based on Artificial Potential Field[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(6): 66-71.
- [38] 李纪强, 张国庆, 张显库, 等. 基于混合阈值事件触发机制的船舶自适应神经滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(9): 1665-1671.
- LI J Q, ZHANG G Q, ZHANG X K, et al. Adaptive Neural Sliding Mode Control for USV with the Hybrid Threshold Event-Triggered Mechanism[J]. Control Theory & Applications 2023, 40(9): 1665-1671.
- [39] 李纪强, 张国庆, 黄晨峰, 等. 考虑执行器故障的无人帆船事件触发控制[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(1): 242-249.
- LI J Q, ZHANG G Q, HUANG C F, et al. Event-Triggered Control for Unmanned Sailboat with Actuator Failures[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(1): 242-249.
- [40] 李纪强, 张国庆, 尚洪达. 基于鲁棒自适应扰动观测器的船舶航向保持控制器设计[J]. 中国航海, 2020, 43(4): 15-19.
- LI J Q, ZHANG G Q, SHANG H D. A Novel Course-Keeping Control Based on the Robust Adaptive Disturbance Observer[J]. Navigation of China, 2020, 43(4): 15-19.
- [41] 张国庆, 李纪强, 王文新, 等. 基于速度调节的无人帆船机器人自适应航向保持控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(11): 2383-2390.
- ZHANG G Q, LI J Q, WANG W X, et al. Adaptive Course-Keeping Control for Unmanned Sailboat Robot with the Speed Regulating Mechanism[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(11): 2383-2390.
- [42] LI J Q, ZHANG G Q, ZHANG W J, et al. Cooperative Path Following Control of USV-UAVs Considering Low Design Complexity and Command Transmission Requirements[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(1): 715-724.
- [43] LI J Q, ZHANG G Q, CABECINHAS D, et al. Prescribed Performance Path Following Control of USVs via an Output-Based Threshold Rule[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023: 1-12.
- [44] LI J Q, ZHANG G Q, SHAN Q H, et al. A Novel Cooperative Design for USV-UAV Systems: 3-D Mapping Guidance and Adaptive Fuzzy Control[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2023, 10(2): 564-574.
- [45] ZHANG G Q, ZHANG X K. Concise Robust Adaptive Path-Following Control of Underactuated Ships Using DSC and MLP[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(4): 685-694.
- [46] ZHANG G Q, LIU S, ZHANG X K, et al. Event-Triggered Cooperative Formation Control for Autonomous Surface Vehicles Under the Maritime Search Operation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(11): 21392-21404.
- [47] ZHANG G Q, HAN J, LI J Q, et al. APF-Based Intelligent Navigation Approach for USV in Presence of Mixed Potential Directions: Guidance and Control Design[J]. Ocean Engineering, 2022, 260: 111972.
- [48] ZHANG G Q, SHANG X Y, LI J Q, et al. LPVS Guidance and Adaptive Event-Triggered Control for an Underactuated Surface Vessel with the Prevention of Obstacle's Vicious Maneuvering[J]. ISA Transactions, 2024, 145: 163-175.
- [49] LIU S, ZHANG G Q, GUO G, et al. Adaptive Output-Feedback Event-Triggered Formation Control for Underactuated Ships with Obstacle Avoidance Mechanism[J]. Ocean Engineering, 2024, 299: 117373.
- [50] LI J Q, ZHANG G Q, JIANG C Y, et al. A Survey of Maritime Unmanned Search System: Theory, Applications and Future Directions[J]. Ocean Engineering, 2023, 285(1): 115359.
- [51] ZHANG G Q, DENG Y J, ZHANG W D, et al. Novel DVS Guidance and Path-Following Control for Underactuated Ships in Presence of Multiple Static and Moving Obstacles[J]. Ocean Engineering, 2018, 170: 100-110.

(下转第 57 页)