

文章编号:1000-4653(2024)02-0145-08

# 水路交通系统的发展现状与未来展望

严新平<sup>1,2,3</sup>, 韩亚<sup>1,2,3,4</sup>, 吴兵<sup>1,2,3</sup>, 李梦霞<sup>1,2,3</sup>, 张笛<sup>1,2,3,4</sup>

1. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063;
3. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;
4. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063)

**摘要:**水路交通系统是以船舶等为载运工具、以港口为节点、以海洋、江河、湖泊等水域为通道的一种运输方式,能够实现货物、人员的搭载与时空位移,是综合交通体系中不可或缺的重要组成部分。本文分析了国内外水路交通系统发展现状,梳理了水路交通系统未来需求及技术特征,提出了水路交通规划与组织优化、绿色船舶动力系统及供给体系、人机共融船舶岸基驾控系统、海域立体综合运输系统、水路交通系统控制体系、气象导航与安全航行等未来水路交通系统发展方向,为提高水路交通系统运营效率与服务质量提供理论基础与技术参考。

**关键词:**水路运输;新一代航运系统;岸基驾控;新能源动力;海域立体运输系统

中图分类号:U692.5+1 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2024.02.019

## Current development and future prospects of waterborne transportation systems

YAN Xinping<sup>1,2,3</sup>, HAN Ya<sup>1,2,3,4</sup>, WU Bing<sup>1,2,3</sup>, LI Mengxia<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Di<sup>1,2,3,4</sup>

1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. Intelligent Transportation System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
4. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** The waterway transportation system is a mode of transportation that takes ships as the means of transport, ports as nodes, and oceans, rivers, lakes and other waters as channels, which can realize the carrying and space-time displacement of goods and personnel, and is an indispensable and important part of the comprehensive transportation system. This paper analyzes current development of waterway transportation systems, sorts out the future requirement and technical characteristics of waterway transportation systems, and puts forward the future development directions of waterway transportation systems, such as waterway transportation planning and organizational optimization, energy-efficient ship propulsive system and supply system, human-machine integrated ship shore-based driving control system, sea area multidimensional integrated transportation system, waterway transportation control system, meteorological navigation and safe navigation, etc., so as to provide theoretical basis and technical support for improving the operational efficiency and service quality of waterway transportation system.

**Key words:** waterborne transportation; new generation of water bore transportation system; shore-based control; new energy power; multidimensional integrated marine transport system

收稿日期:2023-12-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51920105014,52272422,52071248)

作者简介:严新平(1959—),男,中国工程院院士,教授,工学博士,研究方向为交通系统安全性、智能化和绿色技术研究。

E-mail:xpyan@whut.edu.cn

通信作者:吴兵(1986—),男,研究员,工学博士,研究方向为水路交通安全的研究。E-mail:bing.wu@whut.edu.cn

引用格式:严新平,韩亚,吴兵,等. 水路交通系统的发展现状与未来展望[J]. 中国航海,2024,47(2):145-152.

YAN X P, HAN Y, WU B, et al. Current development and future prospects of waterborne transportation systems[J]. Navigation of China,2024,47(2):145-152. (in Chinese)

水路交通系统是以船舶等为载运工具,以港口为节点,以海洋、江河、湖泊等水域为通道的一种运输方式,能够实现货物、人员的搭载与时空位移。水路交通具有成本低、运距长、货量大和能耗低等显著特点。党和国家领导人高度重视水路交通发展,习近平总书记指出:“经济强国必定是海洋强国、航运强国。”此外,在北外滩国际航运论坛贺信中进一步强调:“顺应绿色、低碳、智能航运业发展新趋势。”

2022年,全国完成水路货运量85.5亿吨,完成货物周转量121 003亿吨公里,货物周转量占有交通方式的53%。此外,我国90%以上的外贸运输通过水路交通完成,港口承担了我国98%的进口铁矿石、93%的进口原油、89%的进口煤炭、97%的进口粮食装卸和绝大部分外贸集装箱的运输任务。水路交通是综合交通体系中的重要组成部分,是区域发展的有效载体和国际合作的重要依托,在支撑区域经济协同发展的同时,也为国家“一带一路”倡议中海上丝绸之路的建设与发展提供了核心保障,在世界经济运行中起到不可替代的作用。

随着全球经济的持续发展,贸易和物流需求将继续增长,水路交通系统作为重要的物流方式将发挥更大的作用。然而,国际治理体系中各方力量的不平衡可能会给水路交通系统的未来发展带来不确定性,水路交通系统整体韧性需进一步提升,船舶、港口、航道等组成部分的智能化、绿色化要求也需要不断提高。因此,有必要分析水路交通系统现状,梳理水路交通系统未来需求及技术特征、探索未来水路交通系统发展方向,提升水路交通系统运营效率与服务质量,从而更好地满足社会和经济发展的需求。

## 1 水路交通系统的国内外发展现状

2021年,欧盟提出进一步调整运力结构,将75%的公路运输转移为铁路和水路运输<sup>[1]</sup>。为此启动的先进、高效、绿色的多式联运系统(Advanced, Efficient and Green Intermodal Systems, AEGIS)项目,旨在开发面向近海和内河航运发展挑战的新型技术,开创欧洲下一代绿色环保、智能高效、自主协同的可持续性和强竞争力的水路交通系统。我国自2018年起相继出台了《智能航运发展指导意见》《内河航运发展纲要》《交通强国建设纲要》等建设性文件,推动绿色低碳动力船舶及供给设施、内河绿色综合服务体系、新一代智能交通管理、智能航运技术协同创新集成平台的发展,提出了到2025年成为全球智能航运发展创新中心的战略目标。对接国家战略部署,新一代航运系统是利用人工智能、数据挖掘、

云计算等高新技术驱动的一种智能航运新业态,呈现了“岸基驾控为主,船端值守为辅”的新型水路运输模式。新一代航运系统由绿色智能船舶、数字生态设施、可靠岸基支持、韧性运营服务4个部分组成,总体呈现绿色化、智能化和韧性化的特征。

### 1.1 数字生态设施发展现状

数字生态设施主要包括数字生态航道、智慧绿色港口和信息基础设施建设3个方面<sup>[2]</sup>,目前的研究以智慧港口和数字航道为主,运用的高新技术有物联网、大数据、5G、数字孪生等<sup>[3]</sup>。天津港应用自动化技术和智能技术,提升港口的信息基础设施综合服务能力 and 港口的运营管理智能化程度,通过港航大数据的管理,实现了数据资源应用能力的全面增强。鹿特丹港通过信息技术和人工智能技术,构建完善的信息化港口基础设施、港口运营管理系统、Port-base System 信息平台及大数据中心,提升港口运营效率与服务水平<sup>[4]</sup>。新加坡港计划以高度自动化、智能化的集装箱港口大士港(Tuas Port)建设为核心,通过新型技术的融合应用,打造稳定高效、可持续发展的未来港口。

数字航道利用智能传感器、物联网、自动化、人工智能等技术,在电子航道图的基础上,自动获取航道要素信息,通过融合处理与深度挖掘,动态发布航道有关信息。2020年,我国长江数字航道全面应用,长江航道数字化、信息化、智能化建设取得阶段性成果。美国构建了完整的内河航道网,其密西西比河区域是世界上现代化程度最高的内河航道网。欧洲的内河航运信息服务(River Information Service, RIS)系统应用标准化电子报文及其支持系统,实现了内河航运信息数据采集、录入、交换、处理的电子化、规范化、无线化与智能化,提高内河航运的效率及安全性。

### 1.2 绿色智能船舶发展现状

近年来,水路交通系统的运载工具呈绿色化、智能化发展,在全球节能减排、绿色发展的理念下,内河船舶、沿海及远洋船舶已开始开发使用低碳或碳中和燃料的绿色智能船舶动力系统<sup>[5]</sup>。在内河、沿海运营中已有部分非货运输船舶或短途货运船舶货船使用清洁能源作为替代燃料<sup>[6]</sup>,部分甲醇动力船舶用于远洋运输甲醇<sup>[7]</sup>。国外绿色智能船舶的研究发展迅速,欧洲、日本等发达国家提出了使用氨、氢等脱碳燃料作为船舶动力的研究计划<sup>[8]</sup>。日本23家国际企业与船级社合作开发氨燃料船舶<sup>[9]</sup>。2021年,韩国船级社发布了开发氨燃料动力船舶的设计指南。欧洲计划2024年推出氨燃料发动机。

在船舶智能化方面,国内外开展了大量的智能

航行研究,如英国的 MUNIN、芬兰的 AAWA、荷兰的 Machine Odyssey、日本的 MEGURI2040 等项目。通过这些研究,确定了智能船舶发展的路径,定义了智能船舶的功能等级,攻克了典型场景下船舶智能航行的关键技术,在内河、沿海和远洋等船舶上开展了系列功能测试<sup>[10]</sup>,为实现智能船舶的商业化运行奠定了基础。挪威“Nellie Bly”号拖船完成了在内河弯曲航道的远程驾控辅助的自主航行试验。2022年,“智飞”号集装箱船在沿海成功试航,完成了自主避碰、远程驾控、航行环境智能感知等多项测试<sup>[11]</sup>。同年,挪威的智能集装箱船“Yara Birkeland”号投入商业运营,主要航行于沿岸短途固定航线,具备自主避让、自动靠离泊等功能<sup>[12]</sup>。日本智能集装箱无人船“SUZAKU”号实现了繁忙海域长距离远程驾控航行测试,初步实现了自主导航、远程驾控等功能。韩国天然气运输船“Prism Courage”号完成了跨太平洋航行试验,在后程测试了自主规划航线、自主避碰等功能<sup>[13]</sup>。欧洲国家大多倾向于在拖船、渡轮等小型船舶上开展研究,我国智能船舶的发展注重整体智能化水平的提升,遵循着从增强辅助驾驶、远程辅助驾驶、自主航行的渐进式发展路线<sup>[14]</sup>,内河、近海、深远海船舶呈谱系化演进,以实现标准化、规范化,合理优化调整运力结构,提高船舶运输效率。

### 1.3 可靠岸基支持发展现状

岸基驾控中心可推行港航一体化综合调度,将船舶、港口、货主等服务方和监管方全部关联起来,使各类资源要素转变为航运过程中的可控状态,实现对航营运船舶的实时监控、控制和驾驶权切换响应,强化新一代航运系统的岸基支持能力。2017年,罗罗公司(Rolls-Royce)与全球拖船运营商 Svitzer 合作,在丹麦哥本哈根港成功展示了拖船远程遥控系统。2018年,罗罗公司与芬兰渡轮运营商完成了“Falco”号渡轮的远程控制航行<sup>[15]</sup>。2019年,瓦锡兰自主船舶在 Intelli Tug 系统的海试中成功实现了远程控制与避障<sup>[16]</sup>。2020年,SEAFAR 公司对驳船“Zonga”号进行了全航程远程驾驶测试<sup>[17]</sup>。2022年,日本智能集装箱无人船“SUZAKU”号实现了繁忙海域长距离远程驾控航行测试。

我国目前正在加快可靠岸基支持相关设施的研究建设。珠海云航智能技术有限公司在岸基指挥与控制中心完成了“筋斗云 0 号”的远程离泊和桥区航行试验。武汉理工大学开发了基于航行脑系统的远程驾驶平台,完成对 7 m 自航模型船“求新号”的洲际远程航行控制,开展了江苏水网运河的集装箱船舶试验,验证了系统的自动避让操作的能力<sup>[18]</sup>。

交通运输部水运科学研究院、智慧航海科技有限公司联合中船重工 704 研究所共同建造我国首个智能船舶远程驾驶与控制中心。随着 5G 技术的高速发展,5G 技术也逐步应用于智能航运的研究,为我国可靠岸基支持的研究建设奠定了良好的基础<sup>[19]</sup>。

### 1.4 韧性运营服务发展现状

韧性运营服务包括交通流量预测、航运风险评估、物流组织调度、水上应急救援和船舶运行控制等<sup>[20]</sup>。我国在逐步完善监管服务、组织运营、物流调度、应急救援等体系,建立韧性的航运运营服务。国内大多数学者主要关注的是水上应急救援的关键设备与技术体系、应急预案的构建。王炳通过挖掘船舶会遇热点区域来评估水域中的重点危险区域,然后基于船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)数据进行了水上应急救援基地选址的研究<sup>[21]</sup>。张杨等提出一种针对北斗三号 B2a 信号的捕获方法,旨在减小水上应急救援定位设备完成触发报警的耗时<sup>[22]</sup>。

开展内河船舶全周期安全状态的智能辨识<sup>[23]</sup>,构建全要素安全风险模型,建立海事动态监管网格方法,对水域内的船舶、船员等风险进行跟踪和辅助监管。通过引入地理信息系统(Geographic Information System, GIS),集成水路的船舶、航行和应急资源,可实现应急态势和应急资源的直观显示和推演,能更好地指导船舶安全航行。利用无人机、水下航行器、岸基传感等电子化检测手段,开展在航船舶的外观结构、配置设施、运行状态等安全要素的非接触检测。随着新能源车辆和新能源船舶的出现,滚装船运输新能源车辆成了新业态,其安全风险问题需要重点关注<sup>[24]</sup>。随着“岸基管控为主,船端值守为辅”的新业态发展,并行的船-船、船-岸综合业务通信增加,有待发展可靠和新型的通信技术来应对通信与网络安全的挑战。

## 2 水路交通系统未来需求及技术特征

2017年起我国陆续制定了水路交通相关的政策、规划,如《关于推进长江经济带绿色航运发展的指导意见》《智能航运发展指导意见》《交通强国建设纲要》等,为未来绿色、智能、安全、和谐的水路交通系统的发展提供了明确的指导和支持。这些政策和战略不仅指明了水路交通系统的发展方向,而且为水路交通的发展提供了更广阔的空间和更多的机遇。

### 2.1 水路交通系统绿色化需求与技术特征

2023年7月7日,国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)海环会第80次会议通过

了《2023年船舶温室气体减排战略》:在2050年之前或该年前后达到净零排放。习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上郑重宣布:“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。”水路交通行业用能目前仍严重依赖不可持续性发展的化石能源,在双碳目标背景下,我国水路交通运输行业碳减排压力巨大,绿色化低碳化是我国乃至全球水运交通发展的必然趋势,是实现双碳目标和交通强国战略的有力支撑。

为了满足水路交通系统绿色化需求,其技术途径主要集中在四个方面:

1) 加强管理。提升船、港运营管理能力,改进港口集疏运组织方式,发展先进运输组织方式;推进老旧船舶适时报废,提升船队绿色化、谱系化水平;研发碳排放和污染物协同监测技术与装备;创新探索航运碳税、碳汇、碳排放交易等市场机制。

2) 能效提升。优化船舶设计的能效指数;研发船舶减阻、新型动力推进、余热利用等创新型技术;加大节能减碳改造力度,控制船、港装备能耗水平,全面推进节能型通用设备在港口的应用;加快开发航速优化、航线优化、能效优化等智能系统与设备。

3) 防污减阻。推广使用水润滑尾轴承技术及装备;实施船舶污水、垃圾集中转运的同时,研发船舶属地处理技术;推广船舶减阻涂料使用。

4) 能源替代。推广使用清洁能源船港装备,鼓励港航企业开展电池、液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)、氢、甲醇、氨、生物燃料等低碳、碳中和能源试点应用;积极应用分布式风力发电、光伏发电等可再生能源;加强港口码头新能源加注等配套基础设施建设。

## 2.2 水路交通系统智能化需求与技术特征

智能化的目标是构建新一代航运系统各要素融会贯通、自洽共享的“岸基驾控为主、船端值守为辅”的新型运输系统,实现船、港、航和客、货等各方信息互联共享,实现乘客和货物的舒适搭载与个性化、高效精准位移。

2018年IMO定义了自主水面船舶的四个功能等级:L1船舶具有自动化程序操作和决策支持功能;L2船舶具备远程遥控功能,同时有船员在船;L3船舶具备远程遥控功能,无船员在船;L4船舶完全自主。自主水面船舶(L1)已经取得显著进展,发展船舶远程驾控(L2和L3)是国内外共识、世界科技前沿、学科交叉热点。2024年将非强制性执行自主水面船舶规则(MASS Code);2028年将强制性执行自主水面船舶规则(MASS Code)。

水路交通系统的智能化技术特征主要体现在以

下几个方面:

1) 数字化技术。利用高新技术,打造数字底座,创建数字水路交通系统的技术体系。通过数字化技术,将水路交通系统的各个环节进行数字化建模和模拟,实现数据的实时采集、传输和处理,涵盖了航道、船舶、港口等基础设施的数字化,以及航行过程中产生的各种数据的数字化。

2) 网联化技术。以船舶为载体、港口为节点、客货为对象,实现“船港货”多节点互联互通及“人员、装备及环境”交互网联运营。网联化技术作为实现水路交通系统智能化的重要手段,将通过物联网、移动互联网等技术,实现船舶、港口、航道等各个节点的互联互通,实现信息的共享和协同工作。

3) 智能化技术。按照“人主机辅、人机混智、机主人辅”分阶段迭代,按照增强驾驶、辅助驾驶、人机共驾、自主航行的路径逐渐演进。建设新一代航运系统的控制体系将助推智能航运发展,航运系统的装备运行控制将由单体控制向网联控制转变;航运系统的状态控制将由局部水域控制向广域协同控制转变;航运系统的安全控制将由事故被动响应向全过程主动控制转变;智能化决策和控制是水路交通系统智能化的核心,提高运营效率和服务质量,提高水路交通系统的安全性,减少事故发生的概率。

## 2.3 水路交通系统韧性化需求与技术特征

韧性是衡量一个系统抵御风险、适应内外部条件的变化、维持系统正常运转能力的重要指标。韧性概念为有效降低水路交通系统面对外界环境冲击造成的损失和加快恢复提供了新视角。韧性系统四大特征为可靠性(reliability)、冗余性(redundancy)、鲁棒性(robustness)、恢复能力(recoverability)。

水路交通系统的韧性化技术特征主要体现在以下几个方面:

1) 风险识别与动态评估。韧性化技术能够实现水路交通系统风险的识别和动态评估;通过对航运系统中的各种风险因素进行识别和分析,对事故时空特征分析,建立统一风险评估框架,及时发现潜在的风险,并采取相应的措施进行防控。

2) 预警与运行防控。韧性化技术能够实现水路交通系统的预警和运行防控;通过建立预警机制,可以及时发现潜在的风险,并采取相应的措施进行防控;通过韧性化技术对航运系统的运行进行监控和调控,确保系统的正常运行;航运系统风险预警与运行防控还能进行水域气象灾害预警,可优化双控预防机制。

3) 危机处置与应急救援。韧性化技术能够实现水路交通系统的危机处置和应急救援;在应对气

候变化、自然灾害以及其他突发事件时,韧性化技术通过应急资源配置与优化,可以迅速响应,采取有效的措施进行处置和救援,减少损失和影响,保障生命安全、提高应急保障能力。

### 3 未来水路交通系统发展思考

#### 3.1 水路交通运输规划与组织优化

水路交通运输规划与组织优化是指根据水路交通运输的需求、资源、环境等因素,通过科学的方法和手段,对水路交通运输系统进行合理的规划、设计和组织管理,以提高水路交通运输的效率、安全性和可持续性。水路交通运输规划与组织优化具体实施路径分为以下两条:一是水路交通运输网络建设、运输模式优化和多式联运构建,二是水路交通运输市场的合理组织与优化。

关于水路交通运输网络建设、运输模式优化和多式联运构建。通过深化内河航道、海上航线间的链路,打造江海航路网络,改善港口基础设施,实现水路交通运输网络建设;结合航运需求,优化船舶设计、改进运输管理、引入先进导航技术、推动绿色航运,优化新一代运输模式;打造公-铁-水-空多式联运体系,构建跨模式运输协调机制,挖掘高效、可持续的运输模式。

关于水路交通运输市场的合理组织与优化。从政策激励与制度改革顶层设计出发,整合小型运输企业,促进不同运输方式合作,实现运输协同增效,推动多式联运应用,引入智能化技术,如物联网、大数据分析和人工智能,提高水路运输市场的数智化水平,改变“小、散、杂”的运输现状,实现一体化的运输组织模式。

#### 3.2 绿色船舶动力系统及供给体系

绿色船舶动力系统及供给体系是通过绿色动力系统研制、能效管理、动力系统运维管理等方式,实现船舶节能减排,提高经济效益。绿色动力是实现船舶绿色转型的核心,分为低碳和零碳动力两种类型,按照燃料不同包括 LNG、液氨、甲醇、氢动力和锂电为主的电驱动。混合动力系统是未来绿色动力系统的主流<sup>[25]</sup>,LNG 双燃料发动机、液化石油气双燃料发动机、乙烷双燃料发动机和甲醇双燃料发动机等技术相对成熟,减排效果明显<sup>[26]</sup>。但绿色低碳动力系统的研究仍处于起步阶段,研究不同的绿色低碳动力系统,匹配不同航行环境或不同种类的航行船舶,形成绿色船舶动力系统谱系,是绿色船舶未来研究的重点。同时在港口开展岸电、新能源设备与自动化加注系统建设。在港船舶使用岸电,可以有效减少船舶靠岸时的燃油消耗。国际港口中

靠港船舶的岸电使用率已超过 80%。构建绿色航运物流网络,建设替代燃料补给设施网点与低碳航线<sup>[27]</sup>。目前部分港口已经开始着手氢燃料补给设施建设<sup>[28]</sup>,德国以北德氢能战略为基础,依托汉堡港组建汉堡氢能网络,建设低碳航运能源产业链。综上,低碳、碳中和船舶动力系统构成与谱系是未来的研究重点。

此外,能效管理与运维管理也是船舶绿色转型的重要手段。动力系统的可靠性、可用性对船舶节能减排起着相当重要的作用。而能效管理与运维管理能够快速检修排除故障,对节能减排起着积极贡献。未来随着智能船舶的发展,船舶将逐渐少人化,远程智能运维显得尤为重要,是未来研究重点之一。

#### 3.3 人机共融的船舶岸基驾控系统

人机共融的船舶岸基驾控系统是指远程驾驶人员在岸基驾控中心通过远程通信方式接收到船端回传的环境、船舶运动等信息,进行态势感知与分析,并在岸基驾控中心执行操控,控制指令将输出至船端对船舶运动进行控制<sup>[29]</sup>。其由岸基驾控中心、云平台、受控船舶等组成,岸基驾控中心可完成在航船舶的驾控,对航运全过程进行监管,并在紧急情况下介入操作,船东和海事监管机构可在移动终端或第三方平台实时监测和获取信息。

随着感知、控制、通信和人工智能等技术的不断发展,远程驾驶和自主航行技术逐渐成熟,为实现船舶的远程驾驶提供了可能<sup>[30]</sup>。内河、沿海和远洋由于通信条件和通航环境不同,在实现技术路线上有较大的差异,但均需克服不稳定的船岸链路、较差的操控性、繁忙的会遇等难题,更需要建立完善的组织架构来保障稳定性和安全性<sup>[31]</sup>。构建船员、船载智能系统、岸端驾控中心的互动框架,降低对通信链路可靠性与带宽的依赖<sup>[32]</sup>;研发远程驾控、自主航行成套装备,实现岸基人员、辅助设施(航标等)、船载值守智能、船员的有机协作乃至互为备份,在船端丢失指令或接收错误指令时,保障船舶航行安全<sup>[33]</sup>;设计船岸通信联络,提高其稳定性与可靠性,为船岸协同提供保障;开发船载机器人系统,实现远程运维。未来必将实现内河、近海水域“远程驾控为主、船端值守为辅”的新业态。

#### 3.4 海域立体综合运输体系

海域立体运输系统由水面运输系统、水中运输系统、水底至水面运输系统构成,旨在充分发挥水路不同运输方式的比较优势,推进多网融合、资源共享,形成网络层次清晰、功能定位合理、衔接一体高效的运输系统,海域立体综合运输体系概念图如图 1 所示。

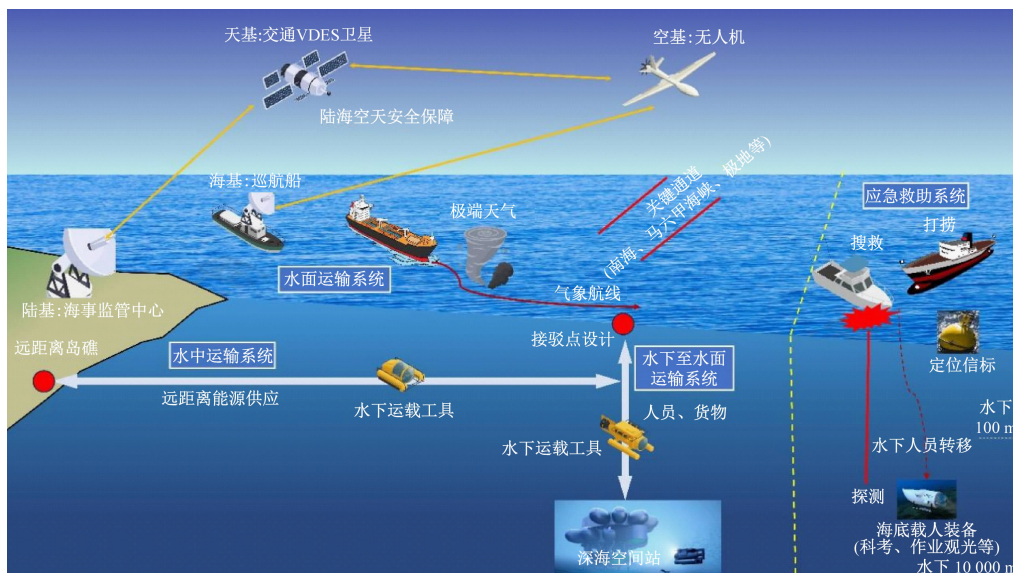


图1 海域立体综合运输体系概念图

Fig. 1 Conceptual diagram of a multidimensional integrated maritime transport system

海域水面运输系统主要由船舶、港口、各种基础设施及服务机构组成,其优点是运量大、通用性强、安全经济环保、基础设施相对完善、组织管理机制完备等<sup>[34]</sup>。海域水中运输系统由水下运载工具(无人潜航器、军用潜艇等)、水下运输交通网络、接驳点、水下仓储、海底港口、水下定位与通信等组成,其优点有减少土地资源占用、不受海洋冰期或极端恶劣天气、隐蔽性好、不受空间资源约束、缩短航线距离、安全性高(如运输危化品)等。海域水底至水面运输系统由海底资源开采设备(钻具、海底油气管道、油气平台、控制系统等)、海底设施(海底空间站、海底仓储等)、水下运载装备、通信设备等组成,其优点是不受台风等恶劣环境条件的影响、海底资源开发效率高、便于科考等。

### 3.5 水路交通系统控制体系

水路交通系统的控制对象包括船舶及船载装备运行控制、水路交通系统状态控制、水路交通安全控制等三方面。水路交通系统控制体系的技术架构,包括了数字基础平台和若干应用子系统。

数字基础平台包含了“一网一图”,“一网”是指水路交通融合感知网,通过陆基、水面水下探测、空基和天基感知系统为水路交通平行管控和海事监管提供技术支撑;“一图”是指全息航行场景图,为远程驾控自主航行船舶提供高精度导航信息。对于若干应用子系统,其中船载装备智能控制系统需要攻克运行状态在线监测技术、使役性能衰退预警技术、数字孪生与智能决策技术,研发健康管理与智能运维系统、能效调控系统和船舶排放监测与控制装备,提高船载装备的可靠性和绿色化水平。船舶智能航

行控制系统,面临着航行环境复杂、人机交互不强、运动控制困难等挑战,建立船岸协同驾控系统和智能航行控制系统,实现内河、沿海和远洋船舶智能航行的技术引领。航行状态智能管控系统解决态势理解能力低、对象协同水平系统弱、系统联动响应差等难题,研制高精度海事信息服务装备和广域协同交通智能管控系统,实现新一代航运系统的水事管控模式的变革。水路交通安全应急救助系统应对“看不清、靠不近、救不下”的难题,研发广域事故救助指挥系统、人员撤离与货物转运系统和吨位沉船打捞装备等,进一步提高新一代航运系统安全事故人命-财产-环境救助效能。

### 3.6 气象导航与安全航行

气象导航是船舶安全、经济航行的重要保障。随着国家海洋战略的实施,我国初步形成了具有自主知识产权的气象导航业务系统,目前服务涵盖全球四大主要远洋航线,日均服务船舶300余艘。然而,现有气象导航业务水平与我国世界第一大货物贸易国和航运大国的地位和发展极不匹配,突出表现为我国气象导航市场几乎被国外大型气象导航公司垄断,对商业、技术机密甚至国家安全造成潜在威胁。

在核心技术方面,我国远洋气象导航业务基础支撑能力严重不足。一是远洋气象观测能力不足。远洋航线及全球海洋观测站点稀少、要素单一,远洋气象导航缺乏观测数据的有效支撑,要素种类和时空获取能力难以满足应用需求,并且尚未形成覆盖全球重点航线的卫星遥感海洋自主气象观测监测能力。二是灾害性天气数值预报模式无法实现自主可

控。我国自主研发的全球气象数值预报模式与国际先进水平存在较大差距,现有热带和温带气旋、强对流、大雾、极端低温等灾害性天气监测预报产品主要使用国外数值模式,恶劣海况条件下船舶失速、航线规划、航行风险等保障远洋船舶运输安全的核心产品有待进一步完善。未来需要构建国产气象导航船端应用系统和岸基服务平台,形成自主可控的“国船国导”业务技术体系,提升我国远洋气象导航能力,保障国家战略安全。

## 4 结束语

随着世界范围内对综合交通体系和水路交通系统的重视,水路交通系统整体韧性需进一步提高,船舶、港口、航道等组成部分的智能化、绿色化要求也不断地增强,水路交通系统将有更大的应用场景并面临新的历史使命和发展机遇。国家政策和战略不仅指明了水路交通系统的绿色、智能、安全、和谐的发展方向,而且为水路交通的发展提供了更广阔的空间和更多的机遇。

围绕着水路交通系统绿色化、智能化与韧性化等需求与技术特征,应该积极探究未来水路交通系统发展六个重要方向,包括水路交通运输规划与组织优化、绿色船舶动力系统及供给体系、人机共融的船舶岸基驾控系统、海域立体综合运输系统、水路交通系统控制体系、气象导航与安全航行。实现各要素融会贯通、自洽共享的“岸基驾控为主、船端值守为辅”的新型水路运输系统,实现船、港、航和客、货等各方信息互联共享,实现乘客和货物的舒适搭载与个性化、高效精准位移,是未来水路交通领域发展和努力的目标。

## 参 考 文 献

- [1] NIEDZIELSKI P, DURAJCZYK P, DROP N. Utilizing the RIS system to improve the efficiency of inland waterway transport companies[J]. *Procedia Computer Science*, 2021, 192: 4853-4864.
- [2] 严新平,李晨,刘佳仑,等. 新一代航运系统体系架构与关键技术研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(5): 22-29.  
YAN X P, LI C, LIU J L, et al. Architecture and key technologies for new generation of waterborne transportation system [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(5): 22-29. (in Chinese)
- [3] HOYHTYA M, MARTIO J. Integrated satellite terrestrial connectivity for autonomous ships; survey and future research directions[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2507.
- [4] HENTSCHEL M, KETTER W, COLLINS J. Renewable energy cooperatives: facilitating the energy transition at the Port of Rotterdam [J]. *Energy policy*, 2018, 121: 61-69.
- [5] TADROS M, VENTURA M, SOARES C G. Review of current regulations, available technologies, and future trends in the green shipping industry [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280: 114670.
- [6] YAN X P, HE Y, FAN A. Carbon footprint prediction considering the evolution of alternative fuels and cargo: a case study of Yangtze River ships [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 173: 113068.
- [7] AIENAZI A, BICER Y, OKONKWO C, et al. Evaluating the utilisation of clean fuels in maritime applications: a techno-economic supply chain optimization [J]. *Fuel*, 2022, 322: 124195.
- [8] ATILHAN S, PARK S, EL-HALWAGI M M, et al. Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry [J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2021, 31: 100668.
- [9] WANG Y, CAO Q, LIU L, et al. A review of low and zero carbon fuel technologies: achieving ship carbon reduction targets [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 54: 102762.
- [10] ZHONG X Z, PENG Y W, YONG L L, et al. A novel route-plan-guided artificial potential field method for ship collision avoidance: modeling, integration and test [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 288(P2): 0029-8018.
- [11] 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, WANG 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: 1795-1806. (in Chinese)
- [12] ICHIMURA Y, DALAKLIS D, KITADA M, et al. Shipping in the era of digitalization: mapping the future strategic plans of major maritime commercial actors [J]. *Digital Business*, 2022, 2(1): 100022.
- [13] 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(14): 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(14): 51-56. (in Chinese)
- [14] ZHANG J, JIN M, WAN C, et al. A Bayesian network-based model for risk modeling and scenario deduction of collision accidents of inland intelligent ships [J].

- Reliability Engineering & System Safety, 2024, 243: 109816.
- [15] LAZAROWSKA A. A discrete planning approach in collision avoidance for smart ships [J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 176: 380-389.
- [16] GHADERI H. Autonomous technologies in short sea shipping: trends, feasibility and implications [J]. *Transport Reviews*, 2019, 39(1): 152-173.
- [17] LIU C, CHU X, WU W, et al. Human-machine cooperation research for navigation of maritime autonomous surface ships: a review and consideration [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 246: 110555.
- [18] 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. (in Chinese)
- [19] 姜俊颖. 基于5G通信技术的船舶网络系统设计[J]. *舰船科学技术*, 2022,44(23):169-172.  
JIANG J Y. Ship network system design based on 5G communication technology [J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(23): 169-172. (in Chinese)
- [20] 严新平. 内河新一代航运系统构建的思考[J]. *中国水运*, 2021,5:6-8.  
YAN X P. Thoughts of the construction of the new generation of waterborne transportation system [J]. *China Water Transport*, 2021, 5: 6-8. (in Chinese)
- [21] 王炳. 基于AIS数据的水上应急救援基地选址研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.  
WANG B. Research on location selection of aquatic emergency and rescue bases based on AIS Data [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [22] 张杨,颜开,刘胜利,等. 一种面向水上应急救援定位设备的北斗信号捕获方法[J]. *中国航海*, 2022,45(2):134-140.  
ZHANG Y, YAN K, LIU S L, et al. A Beidou signal acquisition technology for sea rescue positioning devices [J]. *Navigation of China*, 2022, 45(2): 134-140. (in Chinese)
- [23] LIU J, HEKKENBERG R, ROTTEVEEL E, et al. Literature review on evaluation and prediction methods of inland vessel maneuverability [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 106: 458-471.
- [24] WU B, TANG Y, YAN X P, et al. Bayesian network modelling for safety management of electric vehicles transported in RoPax ships [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 209: 107466.
- [25] YUAN Y, WANG J, YAN X, et al. A review of multi-energy hybrid power system for ships [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 132: 1364-0321.
- [26] 陈弓,朱宇,韩冰. 绿色航运能源技术现状及发展趋势分析[J]. *交通信息与安全*, 2023,41(2):168-178.  
CHEN G, ZHU Y, HAN B. Study on the status quo and trend of green energy technology for shipping industry [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2023, 41(2): 168-178. (in Chinese)
- [27] ZHEN L, WU Y, WANG S, et al. Green technology adoption for fleet deployment in a shipping network [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 139: 388-410.
- [28] AREGALL M G, BERGQVIST R, MONIOS J. A global review of the hinterland dimension of green port strategies [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 59: 23-34.
- [29] 中国船级社. 智能船舶规范(2020) [S]. 北京:中国船级社, 2019.  
China Classification Society. Code for Intelligent Ships (2020) [S]. Beijing: China Classification Society, 2020. (in Chinese)
- [30] 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 transport systems: case studies and prospects [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2023, 41 ( 3 ): 175-181. (in Chinese)
- [31] 严新平. 自主水路交通系统的研究与展望[J]. *中国水运*, 2020,7:6-7.  
YAN X P. Research and prospects of autonomous waterborne transport systems [J]. *China Water Transport*, 2020, 7: 6-7. (in Chinese)
- [32] RAMOS M A, THIEME C A, UTNE I B, et al. Human system concurrent task analysis for maritime autonomous surface ship operation and safety [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 195: 106697.
- [33] WU C. Intelligent unmanned systems: important achievements and applications of new generation artificial intelligence [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2020, 21(5): 649-651.
- [34] RAZA Z, WOXENIUS J, VURAL C A, et al. Digital transformation of maritime logistics: exploring trends in the liner shipping segment [J]. *Computers in Industry*, 2023, 145: 103811.