

文章编号:1671-1637(2022)04-0001-09

水路交通技术发展趋势

严新平^{1,2,3,4}, 贺亚鹏^{2,3}, 贺宜^{1,3}, 范爱龙^{2,3}, 刘佳仑^{1,3,4}, 张笛^{2,3}

(1. 武汉理工大学智能交通系统研究中心, 湖北武汉 430063; 2. 武汉理工大学交通与物流工程学院, 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. 湖北东湖实验室, 湖北武汉 430063)

摘要:对水路交通技术趋势相关文献开展文献计量分析,从主要研究国家、作者与关键词等方面梳理了研究脉络;综合国内外水路交通发展指导政策、前瞻报告与典型案例,分析并总结了水路交通技术发展现状,研判了未来水路交通技术发展趋势。研究表明:水路交通技术将朝着以下5个方向发展。在水路运载工具方面,运输船舶逐步少人化,内河、近海、深远海船舶发展趋于谱系化;在航运基础设施方面,航道设施、能源供给、信息网络发展趋于一体化,并且船岸协同能力增强,船舶远程操控可实现,岸基船舶控制中心建设成为水运基础设施重要组成部分;在船舶动力方面,日趋严格的减排目标推动船用清洁能源发展,船舶动力系统将呈现多能源化和电动化;在船舶航行方面,多船协同运输可提高运输效率,内河、近海船舶编队航行成为运输新模式;在海事监管与安全方面,智能系统的应用使船舶人因事故逐步降低,智能无人系统救援成为现实。研究成果可以有效指导水路交通系统的未来规划、设计、建设与应用,为培育和发展水运新业态,逐步实现未来新一代航运系统提供有力支撑。

关键词:水路交通技术;文献计量分析;智能船舶;新能源动力;智能航行;海事安全

中图分类号:U664 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2022.04.001

Development trends of waterway transportation technology

YAN Xin-ping^{1,2,3,4}, HE Ya-peng^{2,3}, HE Yi^{1,3}, FAN Ai-long^{2,3}, LIU Jia-lun^{1,3,4}, ZHANG Di^{2,3}

(1. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 2. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 3. National Water Transportation Safety Engineering Technology Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 4. East Lake Laboratory, Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: A bibliometric analysis of literatures related to waterway transportation technology trends was carried out to sort out the research lineage in terms of major research countries, authors and keywords. The current development of waterway transportation technology was analyzed and summarized by comprehensively studying guiding policies, forward-looking reports and typical cases of waterway transportation development both in China and abroad, and the future development trend of waterway transportation technology was judged. Research results show that waterway transportation technology will develop in the following five directions. In terms of waterway carriers, transport vessels will gradually require less manpower, and inland

收稿日期:2022-04-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51920105014);工信部绿色智能内河船舶创新专项(MC-202002-C01)

作者简介:严新平(1959-),男,江西莲花人,中国工程院院士,武汉理工大学教授,工学博士,从事交通系统安全性、智能化和绿色技术研究。

引用格式:严新平,贺亚鹏,贺宜,等.水路交通技术发展趋势[J].交通运输工程学报,2022,22(4):1-9.

Citation:YAN Xin-ping, HE Ya-peng, HE Yi, et al. Development trends of waterway transportation technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(4): 1-9.

river, offshore and deep-sea vessels will form a spectrum. In terms of shipping infrastructure, the waterway facilities, energy supply, and information networks will be integrated. The ship-shore collaboration ability will be strengthened, the ship remote control can be realized, and the construction of shore-based ship control centre will become an important part of waterway transport infrastructure. In terms of ship power, increasingly stringent emission reduction targets will promote the development of ship clean energy, and the ship power system will be driven by multi-diversified energy and electricity. In terms of ship navigation, multi-ship cooperative transportation can improve transportation efficiency, and the inland river and offshore ship formation navigation becomes a new mode of transportation. In terms of maritime supervision and safety, the application of intelligent system makes ship human-caused accidents gradually reduce, and intelligent unmanned system rescue becomes a reality. The research results can effectively guide the future planning, design, construction and application of waterway transportation system, and provide strong support for cultivating and developing new waterway transportation industry and gradually realizing the future new generation shipping system. 6 figs, 30 refs.

Key words: waterway transportation technology; bibliometric analysis of literatures; smart ship; new energy power; intelligent navigation; maritime safety

Author resume: YAN Xin-ping(1959-), male, academician of Chinese Academy of Engineering, professor, PhD, xpyan@whut.edu.cn.

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51920105014); Green and Intelligent Inland River Ship Innovation Project of MIIT (MC-202002-C01)

0 引 言

在综合交通运输体系中,水路运输在整体运量、运输占地与成本、环境友好度等方面具备优势。中国 90% 以上的外贸货物通过水路输送,其中 95% 的原油运输和 99% 的铁矿石运输都是通过水路运输来完成的^[1]。2019 年,水路运输总计货运量为 747 225 万吨,货运周转量为 103 963.04 亿吨公里,其货运量和周转量在综合运输体系中的比例分别达到了 15.9% 和 52.2%。长江航运每年对沿江经济发展的直接贡献达 1 200 亿元以上,间接贡献达 2 万亿元以上^[2]。水路运输对推动国民经济发展有着重要的战略意义^[3]。

近年来,世界发达国家与相关海事船检机构对水路交通技术的未来趋势开展了预测,并发布了相关战略研究报告,启动了有关科研项目。2017 年 6 月,欧盟启动 NOVIMAR 项目,对航运新模式开展了研究。2017 年 12 月,挪威船级社(Det Norske Veritas, DNV)发布了《面向 2050 年的海事展望》(Maritime Forecast to 2050)战略报告,分析了海事行业的转型趋势,预测了 2050 年全球航运业的发展方向,探讨了能源生产与需求、工业生产和地区制造

等方面对不同航运领域的影响。2019 年 1 月,英国交通部发布《海事 2050 战略》(Maritime 2050: Navigating the Future)战略研究报告,从设施、技术、人员、规则 4 个方面对 2050 年航运技术进行了展望,并制定短期、中期、长期发展目标。同年,世界海事大学发布《交通运输 2040: 自动化、技术与就业——未来工作》(Transport 2040: Automation, Technology, Employment—the Future of Work)报告,分析并预测了 2040 年公路、铁路、海运和航空等运输行业在自动化技术的影响下的主要技术发展趋势,同时指出到 2040 年远程监控下的自主船舶占比将达到 15%^[4]。以上报告与项目体现出发达国家对未来航运发展的研判,从不同角度给出了技术预测结论,对水路交通领域的技术发展有借鉴意义。

中国日益重视水路交通领域,相继出台了一系列政策指导文件支持水路交通技术发展。2016 年 9 月,国务院印发了《长江经济带发展规划纲要》,要求加强长江流域合作,发挥内河航运作用,打造全流域黄金水道。2019~2020 年,交通运输部联合相关部门发布了《智能航运发展指导意见》(2019 年 5 月)、《关于建设世界一流港口的指导意见》(2019 年 11 月)、《关于大力推进海运业高质量发展的指导

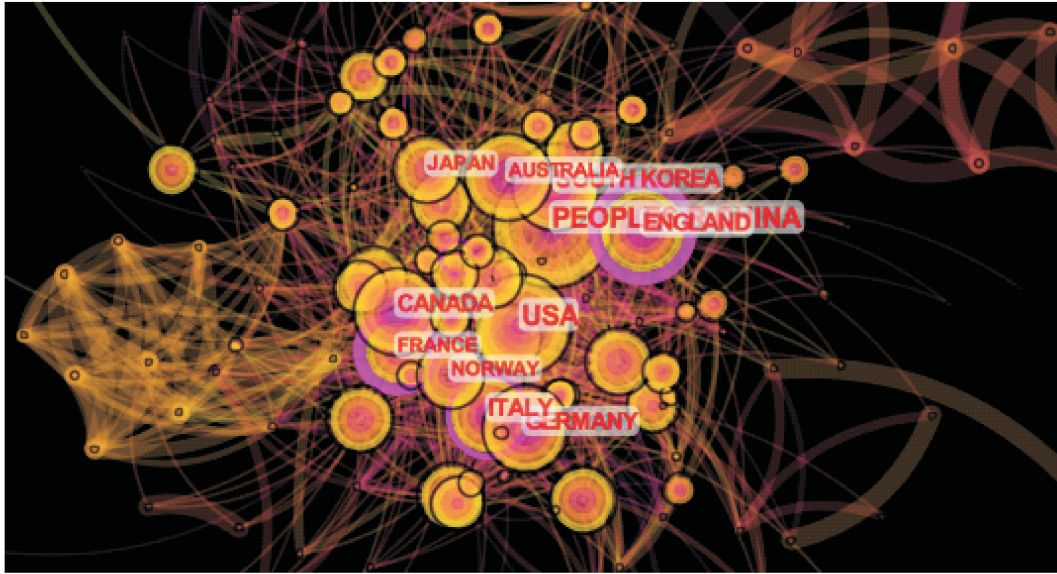


图 2 水路交通技术主要研究国家共现图谱

Fig. 2 Co-occurrence map of major research countries on waterway transportation technology

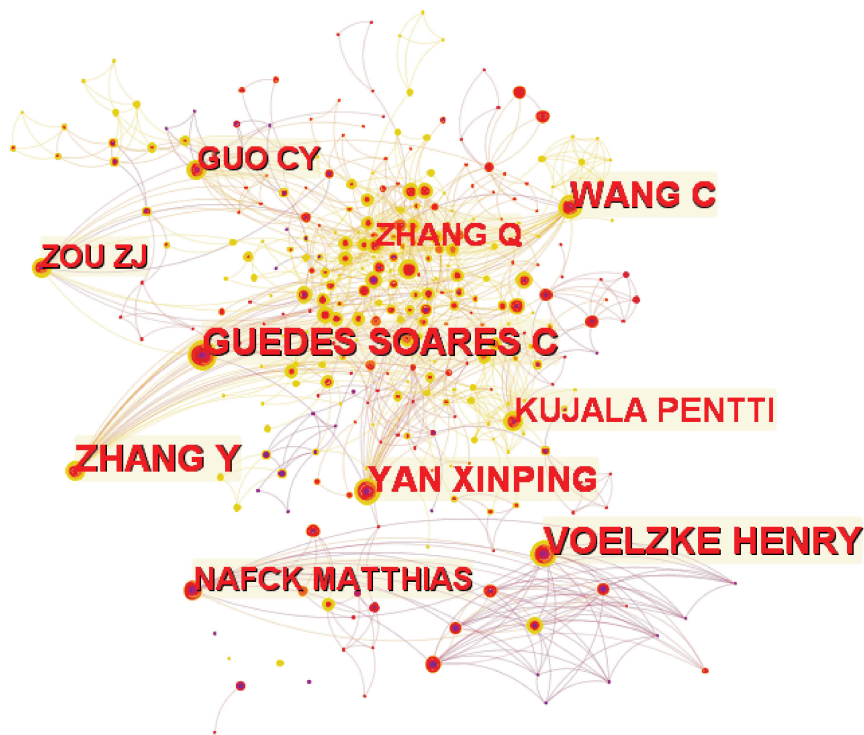


图 3 水路交通技术前 10 位作者共现图谱

Fig. 3 Co-occurrence map of top 10 authors on waterway transportation technology

正在发展,将遵循从增强辅助驾驶发展为远程辅助驾驶,再到自主航行的渐进式发展路线^[6]。

2018年5月,挪威 Norled 公司 Folgefonn 号在其松娜峡湾航线上 3 个港口成功实现自主靠泊,所搭载的瓦锡兰自动靠泊系统可实现自动减速、对排和靠泊操作^[7]。2018年12月,Rolls-Royce 公司在芬兰成功展示了全世界第一艘全自动汽车渡船 Falco 号。该船能在全自动控制模式下完成规划航

段的航行,包括航行过程中的障碍物探测和躲避,并在人工遥控下顺利返回,还具有自动靠泊的功能。2019年1月,芬兰的 Suomenlinna II 号冰级客渡轮,在芬兰首都赫尔辛基港口附近实现了远程无人驾驶的海上测试。2020年2月,挪威 Kongsberg 海事公司在挪威实现了日常运营期间的渡轮自适应通航,目标船舶 Bastø Fosen VI 渡轮在满载乘客和车辆的情况下,可实现自动靠离泊和横渡等功能。

国内智能船舶技术也在蓬勃发展。2017 年 12 月,中国自主研发建造智能散货船大智号成功交付,实现了智能航行、智能运维等关键系统的自主研制和集成应用,并获得了中国船级社(China Classification Society, CCS)授予的智能船舶符号^[8]。2018 年 6 月,由武汉理工大学智能交通系统研究中心基于“航行脑”系统研制的智能安全驾驶辅助系统搭载在南京板新 2 号汽渡船上(图 4),在南京板桥汽渡实现首航,可以对渡区内航行船只和渡区水域实现全程监控与远程监控,提升渡区的安全监管水平和管理能效,保障汽渡航行安全^[9]。2018 年 11 月,上海

外高桥公司制造的智能超大型矿砂船明远号正式交付,获得了 CCS i-ship 智能航行符号、智能机舱符号、智能能效符号以及智能集成平台符号,同时还获得了 DNV SmartShip OE、PE 与 CME 符号,是全球首艘获得 DNV 认证的智能船舶。随着船舶智能化技术研究的深入推进和逐步应用,可以降低人员工作负荷。船舶少人化是大势所趋,船舶谱系化、标准化、专业化也已成为未来重要的发展方向。内河、近海、深远海船舶正在加快谱系化演进进程,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。

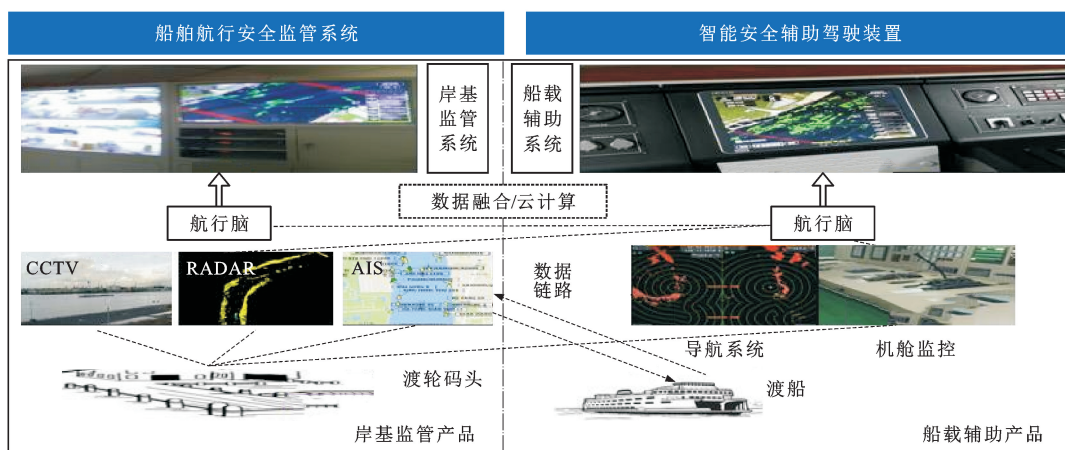


图 4 智能辅助驾驶系统

Fig. 4 Intelligent assisted driving system

2 航道设施、能源供给与信息网络一体化

随着信息网络与航运智能化技术研究的不断推进,运用信息化与智能控制的手段,可有效提高航道管理和综合利用的效率,对提升内河航运生产力和保障航道信息服务能力具有重要意义。国外的内河航道开发较早,在管理模式上较为完善。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^[10]。欧洲的莱茵河—多瑙河航道运输能够实现 10 余个国家、超 3 亿沿河人口的高效通航服务。

中国也一直致力于推进长江、珠江等内河水系航道数字化进程,并于 2019 年 7 月完成了长江干线数字航道全线联通及试运行。随着内河航道信息化水平不断提升,以 AIS 船舶识别系统、GPS 定位系统、水文监测系统等构建的内河航道信息化工程,可对船舶、港口、通航设施、水文与气象信息等要素和船舶航行、能耗等相关数据进行采集、管理,实现航道内通航设施和船舶状态的监测监控、运营维护和航道内港口等各部门间的交互,保证航道运营通畅。

对于海上航行的船舶,在船舶大型化趋势下,气象信息的数据分析与管理对提升海洋信息服务能力有着深远的意义。海上恶劣天气导致的参数横摇现象对大型船舶影响极大,跨太平洋航线上的万箱船已经连续出现了掉箱事故。通过气象信息大数据分析,提前预警,提升防护与保障措施,避免掉箱事故的发生,保障安全、高质量的海运发展。

随着环保法规、碳排放要求日益严格,船舶低碳化和能源多样化会成为未来重要技术方向,LNG、蓄电池、燃料电池、岸电等新能源在船舶领域有广阔的应用前景^[11],LNG 加注站、岸基充电站等基础设施也将成为航道重要组成单元。运用互联网和能源技术,以 LNG 等清洁能源为优先,以大量分布式能源和分布式储能为基础,构建的多种能源协同、供给与消费协同、集中式与分布式协同、大众广泛参与的新型生态化能源系统,通过一体化信息网络体系,将航道、船舶等水路交通要素以及能源供给基础设施等能源要素网联化,对提升船舶能源供给安全性、航行效率以及能源最优化利用具有重要意义。

3 岸基船舶控制中心成为水运基础设施重要组成部分

船舶机械工程师数量短缺、海员综合素质偏低一定程度上制约了航运业的高质量发展。同时,船用技术的更新换代及船舶复杂化发展趋势,使得现代船舶对复合型高级海员的需求更加迫切。随着数字化技术发展,船岸协作能力进一步增强,实现对船舶的远程遥控,将船舶机舱集控室(Engine Control Room, ECR)转移到岸基船舶控制中心(Ship Control Centre, SCC)是一种有效的解决方案,见图 5。通过岸基控制中心控制船舶航行,既能减少对工程师与高素质海员的需求,也能够提升船舶运营安全性和效率。

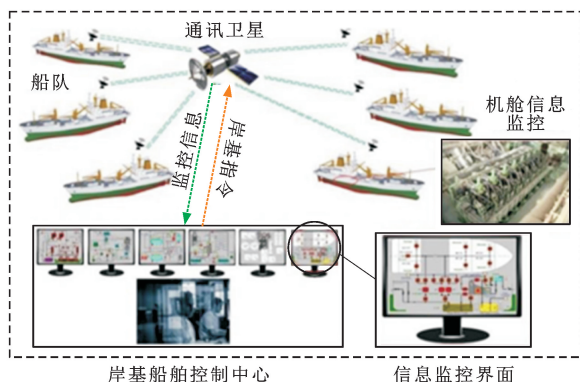


图 5 岸基船舶控制中心概念

Fig. 5 Concept of shore-based ship control centre

国外已经开展了岸基船舶控制中心的研究与部署,英国在《海事 2050 战略》(Maritime 2050: Navigating the Future)战略研究报告中指出,搭建为智能船服务的岸基船舶控制中心是其未来发展的政策重点^[12]。2017 年 6 月,英国 Rolls-Royce 公司展示了遥控拖船 Svitzer Hermod 号,岸基船舶控制中心可接收船载多传感器系统所采集的船舶设备与周边环境数据,为船长提供准确的数据参考^[13]。2018 年 4 月,日本 JRCS 公司计划开发一套应用于全球航运的 HoloLens 系统,船长可在远程控制端的共享桌面上,利用全息投影技术,查看船舶信息及相关的航行环境信息,预计在 2030 年后开始开展虚拟控制中心服务。DNV 与 Høglund 航运方案解决公司、Fjord 1 运输公司以及挪威海事局合作,于 2017 年共同开展 ROMAS(Remote Operation of Machinery and Automation Systems)项目,研究船舶机械和自动化系统的远程操作,并已于 2019 年完成系统基本功能的验证。可见,岸基船舶控制中心的建设在船舶智

能化的进程中具有关键性的节点意义,将成为未来水运基础设施的重要组成部分。

4 船舶动力系统的多能源化和电动化

废气污染和噪声污染是传统柴油机动力不可避免的两大难题,对航行区域周围的生态环境造成重大影响。国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)颁布的 MARPOL 公约对防止船舶油污水污染、生活污水污染、垃圾污染和大气污染等船舶结构、设备、控制指标等都有明确的规定,同时还在不断提高部分排放指标的限值要求以及扩充排放指标的控制范围。开展清洁能源的船用研究,减少船舶污染与排放,已经成为了世界航运业的共识。2018 年 4 月,IMO 海上环境保护委员会(Marine Environment Protection Committee, MEPC)第 72 届会议,通过了《IMO 船舶温室气体减排初步战略》(Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships),将研究和开发新型船舶推进、替代低碳和零碳燃料以及创新技术的行动作为全球减排战略之一。DNV 在《面向 2050 年的海事展望》(Maritime Forecast to 2050)战略报告中指出:按照 IMO 提出的减排策略,2030 年左右将降低大约 50% 的碳排放,2050 年降低到 70%,在 21 世纪末达到零碳排放的目标^[14]。中国也在积极履行承担的减排任务,调整优化产业结构、能源结构,以及大力发展新能源。2020 年 12 月,在北京进行的中央经济会议中提出,在 2030 年前中国 CO₂ 排放力争达到峰值,2060 年前力争实现碳中和。

近年来,新能源的船舶应用研究在积极开展,LNG 动力系统已在船舶中开展应用。在中国,CCS 已经允许磷酸铁锂电池作为船舶与海洋工程设施的动力用蓄电池。但是,受限于功率密度,目前锂电池动力系统大多应用于中小型船舶上^[15]。燃料电池、甲醇/乙醇、生物质能源、碳中和能源等替代燃料也在探索应用中。在实船应用方面,挪威在 Ampere 号汽渡轮上率先应用了基于锂电池的全电力推进系统。STX 法国船厂建造的 Ar Vag Tredan 号电动渡船,采用超级电容器进行供电。日本滚装船 Auriga Leader 将太阳能作为船舶辅助动力源,可提供 0.05% 的船舶动力和 1% 的船上日常用电。德国的 Alsterwasser 号采用燃料电池作为唯一动力源。荷兰 Savannah 号配备有 1 MWh 三元锂电池。2019 年,全球首个液氢驱动的绿色豪华游艇 AQUA 概念登陆摩洛哥游艇展,设计装备 2 个氢燃料箱,每个储罐质

量为 28 t,能以 17 kn 的速度行驶 6 035 km。

在国内方面,2014 年,武汉理工大学在中远海运集团下属的海特公司的中远腾飞号上研制装备了总容量为 143.1 kW 的光伏发电系统,配备的锂离子蓄电池储能系统为 700 kWh,实现了离并网一体化技术,既可以为全船货舱提供照明,又可以与船舶发电机组并联运行,具有较好的适应性。2015 年,武汉理工大学又在上海安盛集团的安吉 204 内河汽车运输船上应用太阳能光伏系统,使其成为中国内河航线上首艘获得 CCS“绿色船舶-I”和“太阳能辅助动力能源”附加标志的营运船舶。2017 年,上海瑞华集团自主研发的纯电动船舶驱动系统,获得了 CCS 型式认可。2018 年,电池混合动力游船寰岛云帆号在太湖顺利通过试航。2019 年,采用锂电池推进的全电动客船君旅号在武汉正式交付。

清洁能源可以有效地实现节能减排目标。由于受到船舶结构特点和运行方式的影响,采用单一能源供能并非最优的选择^[16]。针对船舶的实际需求,开展船舶动力系统多种能源利用的研究和应用,可考虑把各种可再生能源(氢燃料电池、太阳能、蓄电池和超级电容等)和不可再生能源(化石能源)通过机电和电气控制系统结合在一起,构成适合不同船舶需求的多能源混合动力系统^[17]。船舶多能源混合动力系统不仅可以满足经济和环保的要求,还能克服单独使用其中任何一种能源的固有局限性,是未来船舶动力系统的发展趋势。

5 内河、近海船舶编队航行将成为运输新模式

船舶编队是指 2 艘及以上的船舶完成航行任务或运输任务的船舶集群。编队中的船舶功能特点各有不同,并能够合理分工,有序组织,协作完成某一确定的任务^[18]。随着船舶智能化程度的提升,开展基于智能船舶的多船协同自主运输、构成智能货运船队系统,实现船舶的自主集散编队,能够显著提高运行效率,见图 6^[19]。当前,国内外已针对无人水面艇开展了编队研究,主要研究内容为:编队建立、编队维系、编队队形变化、编队避碰和编队自主控制,其中编队控制是研究关键。2005 年,美国麻省理工学院 Curcio 等^[20]实现了多无人艇对港口的协同探测,测试验证了通过无人艇编队对港口实施监控的可能性。2006 年,葡萄牙高级技术系统与机器人研究所开展了无人海洋船在动态环境下的自主避碰,以及多船开展协同任务时整体运动控制的研究^[21]。

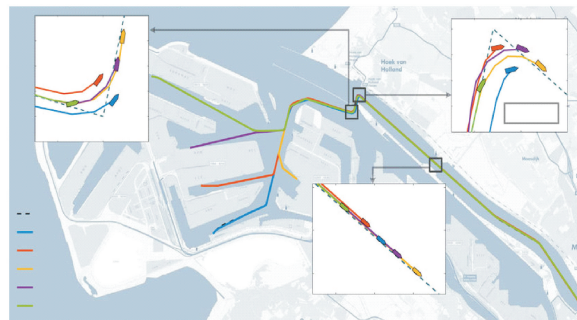


图 6 多船自主协同编队航行仿真

Fig. 6 Simulation of multi-ship autonomous collaborative formation navigation

2016 年,美国在切皮克湾进行了 CARCaS 技术演示验证,模拟“未知”舰船进入受保护港口区域时,无人艇自主靠近、识别、友艇互联以及分工巡逻功能^[22]。2020 年,美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)战术技术办公室正式发布“海上列车(Sea Train)”项目公告,以进一步开发无人艇的远距离作业与作战能力。

中国珠海云洲智能科技有限公司基于“蜂群无人艇系统”,通过编队内小艇智能协调控制,能够安全完成分队避障、整队转弯等高难度编队动作。2018 年春晚珠海会场,“1+80”无人艇编队(1 艘 7.5 m 级无人艇、80 艘 1.6 m 小艇)穿过港珠澳大桥,展现中国在无人艇编队控制方面的技术实力。

在内河、近海上应用智能船舶编队方式进行运输,可通过遥控以及船舶之间相互合作减少船员人数,通过智能驾驶来降低劳动力成本。智能船舶编队系统内的船只通过数字相互连接,编队内船舶可在邻近海滨或内陆目的地的地方接驳及离开编队。通过发展编队航行的创新概念,将内河和近海航道一体化,旨在对水上交通进行调整,使现有的内河、近海航道得到高效利用,降低航运运营成本。

6 智能系统将使人因事故逐步降低,智能无人系统救援成为现实

欧洲海事安全局发布的海上伤亡事故统计数据 displays,2011~2017 年间,欧盟成员国领海及内水共记录发生 20 616 起事故,造成 6 812 人受伤^[23],分析表明 58% 的海上事故最终归咎为人因失误导致的。人因事故多发也是推动船舶开展智能航行研究的原因之一,航运业的未来需要更安全高效的航行技术^[24]。当前辅助驾驶系统在船舶上应用的实例并不多,但是在道路驾驶系统中已经有一定应用时

间的积累。根据特斯拉发布的 2020 年第三季度安全报告显示,有自动辅助系统参与的驾驶过程相较于没有自动辅助驾驶参与但有主动安全功能的驾驶过程,平均每 349 万公里减少一起交通事故。尽管船舶航行的环境较于车辆而言更为复杂,同时目前船舶航行智能化仍处于增强驾驶到辅助驾驶的过渡阶段,但随着人机共融的进一步发展,智能航行系统为驾驶者提供的辅助决策更加合理,由人为因素引起的航行事故也将逐步减少。

在船舶航行过程中,海上险情难免时有发生。当面临恶劣的气候环境、水域环境,会给抢险救援工作增加困难。人在水下的能力是受限制的,救援效率得不到保障,应急时人员作业难度和可靠性也是一个难题。使用智能无人系统参与救援任务,一旦目标位置得以确认,各项具体工作也就变得相当容易^[25]。水下机器人是智能无人系统的一种形式,其主要分为两类:一类是有缆水下机器人(Remote Operated Vehicle, ROV),另一类是无缆水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)。ROV 可在复杂海域完成地震勘探节点投放等艰难任务,并保证投放精度与投放效率^[26]。与 ROV 相比,AUV 具有活动范围大、占用甲板小、无脐带缆限制、运行和维修方便等优点。在搜寻马航 MH370 的过程中,美国蓝鳍水下机器人公司的 bluefin-21 型 AUV 承担了核心区域 95% 的搜索任务^[27]。中国自制潜龙一号已经具备 6 000 m 深海探测能力^[28],潜龙二号能够调查复杂海底地形地貌,已应用于勘探西南印度洋海底资源。中船 710 研究所开展了中等潜深的水下机器人和多功能远程自主运载机器人研究,并取得了一定的工程化成就^[29]。

随着智能系统的不断成熟,其将改变未来海洋服务、提高海洋设施建设的自动化水平。智能无人系统的发展与应用将是必然的发展趋势,特别是在如深海采矿和救灾等恶劣的工作环境下^[30]。当高海况下水上事故发生时,智能无人系统救援将会成为事故处理的重要手段。

7 结 语

(1)绿色、智能和安全是水路交通技术的重要发展目标。未来水路交通将会朝着少人化、一体化、绿色化、智能化的方向演进。船舶智能化、少人化、谱系化、高效化,船舶能源动力多元化、电动化,基础设施、能源供给和信息网络一体化,将会是水路交通技术发展的重要趋势。把握水路运输发展趋势,在重

点技术前沿提前规划布局,为实现安全、便捷、高效、绿色、经济的现代水运体系奠定基础。

(2)加快推进人工智能、移动通信、大数据、新材料、新能源等高新技术在水路交通领域的创新应用,攻克相关的关键技术,将显著提升水路交通绿色化、智能化水平,从而培育和发展水运新业态,逐步实现未来新一代航运系统,充分发挥航运优势,提升中国水路运输的国际影响力和核心竞争力。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 严新平.智能船舶的研究现状与发展趋势[J].交通与港航,2016(1):25-28.
YAN Xin-ping. Research status and development trends of intelligent ships[J]. Communication and Shipping, 2016(1): 25-28. (in Chinese)
- [2] 杨邦杰,严以新,安雪晖.长江流域“黄金水道”问题分析及对策建议[J].中国发展,2015,15(1):1-7.
YANG Bang-jie, YAN Yi-xin, AN Xue-hui. Analyses and Policy Recommendations on the Yangtze Golden Waterway[J]. China Development, 2015, 15(1): 1-7. (in Chinese)
- [3] FAN Ai-long, WANG Jun-teng, HE Ya-peng, et al. Decarbonising inland ship power system: alternative solution and assessment method[J]. Energy, 2021, 226: 120266.
- [4] JENS U S H, DONG W S, FONSECA T, et al. Transport 2040: automation, technology, employment—the future of work[R]. Malmö: World Maritime University, 2019.
- [5] 交通运输部,中央网信办,国家发展改革委,等.智能航运发展指导意见[R].北京:交通运输部,2019.
Ministry of Transport of the People's Republic of China, Cyberspace Administration of China, National Development and Reform Commission, et al. Instruction on the development of smart shipping [R]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2019. (in Chinese)
- [6] 周翔宇,吴兆麟,王凤武,等.自主船舶的定义及其自主水平的界定[J].交通运输工程学报,2019,19(6):149-162.
ZHOU Xiang-yu, WU Zhao-lin, WANG Feng-wu, et al. Definition of autonomous ship and its autonomy level[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(6): 149-162. (in Chinese)
- [7] 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.
LI Wen-hua, ZHANG Jun-yan, LIN Shan-ying, et al. The development path of maritime autonomous surface ships technology[J]. Ship Engineering, 2019, 41(7): 64-73. (in Chinese)
- [8] 曾晓光.智能船舶发展新态势[J].中国船检,2018(1):43-45.
ZENG Xiao-guang. New trends in the development of smart ships[J]. China Ship Survey, 2018(1): 43-45. (in Chinese)
- [9] 严新平,刘佳仑,范爱龙,等.智能船舶技术与趋势简述[J].船舶工程,2020,42(3):15-20.

- YAN Xin-ping, LIU Jia-lun, FAN Ai-long, et al. Brief introduction of the development and trend of smart ship technology[J]. *Ship Engineering*, 2020, 42(3): 15-20. (in Chinese)
- [10] 沈新琴. 分析数字航道技术在内河航道管理中的应用[J]. *中国水运*, 2014, 14(7): 92-93.
- SHEN Xin-qin. Application analysis of digital waterway technology in inland waterway management[J]. *China Water Transport*, 2014, 14(7): 92-93. (in Chinese)
- [11] 范爱龙, 贺亚鹏, 严新平, 等. 智能新能源船舶的概念及关键技术[J]. *船舶工程*, 2020, 42(3): 9-14.
- FAN Ai-long, HE Ya-peng, YAN Xin-ping, et al. Concept and key technologies of intelligent new energy ship[J]. *Ship Engineering*, 2020, 42(3): 9-14. (in Chinese)
- [12] Department for Transport(UK). *Maritime 2050: navigating the future*[R]. London: Department for Transport(UK), 2019.
- [13] VOJKOVIĆ G, MILENKOVIĆ M. Autonomous ships and legal authorities of the ship master[J]. *Case Studies on Transport Policy*, 2020, 8(2): 333-340.
- [14] DNV • GL. *Maritime forecast to 2050*[R]. Norway: DNV • GL, 2019.
- [15] RAFIEI M, BOUDJADAR J, KHOOBAN M H. Energy management of a zero-emission ferry boat with a fuel cell-based hybrid energy system: feasibility assessment[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(2): 1739-1748.
- [16] YUAN Yu-peng, WANG Ji-xiang, YAN Xin-ping, et al. A review of multi-energy hybrid power system for ships[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 132: 110081.
- [17] 蒋仲廉, 初秀民, 严新平. 智能水运的发展现状与展望——第十届中国智能交通年会《水路交通智能化论坛》综述[J]. *交通信息与安全*, 2015, 33(6): 1-8.
- JIANG Zhong-lian, CHU Xiu-min, YAN Xin-ping. Developments and prospects of intelligent water transport: a review of the symposium on intelligent water transport, in conjunction with the 10th annual meeting of China ITS[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2015, 33(6): 1-8. (in Chinese)
- [18] CHEN Lin-ying, HUANG Ya-min, ZHENG Hua-rong, et al. Cooperative multi-vessel systems in urban waterway networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(8): 3294-3307.
- [19] CHEN L Y, HOPMAN H, NEGENBORN R R. Distributed model predictive control for vessel train formations of cooperative multi-vessel systems[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 92: 101-118.
- [20] CURCIO J, LEONARD J, PATRIKALAKIS A. SCOUT—a low cost autonomous surface platform for research in cooperative autonomy [C] // IEEE. 2005 Proceedings of MTS/IEEE OCEANS. New York: IEEE, 2005: 725-729.
- [21] 马天宇, 杨松林, 王涛涛, 等. 多 USV 协同系统研究现状与发展概述[J]. *舰船科学技术*, 2014, 36(6): 7-13.
- MA Tian-yu, YANG Song-lin, WANG Tao-tao, et al. An outline of current status and development of the multiple USV cooperation system[J]. *Ship Science and Technology*, 2014, 36(6): 7-13. (in Chinese)
- [22] 顾颖闽. 水面无人艇艇群技术发展概述[J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(23): 35-38.
- GU Ying-min. Overview of technology development of the USV group[J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(23): 35-38. (in Chinese)
- [23] European Maritime Safety Agency. *Annual overview of marine casualties and incidents 2018*[R]. Lisbon: European Maritime Safety Agency, 2018.
- [24] 范诗琪, 严新平, 张金奋, 等. 水上交通事故中人为因素研究综述[J]. *交通信息与安全*, 2017, 35(2): 1-8.
- FAN Shi-qi, YAN Xin-ping, ZHANG Jin-fen, et al. A review on human factors in maritime accidents [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2017, 35(2): 1-8. (in Chinese)
- [25] ROBINSON B H. The coevolution of undersea vehicles and deep-sea research[J]. *Marine Technology Society Journal*, 1999, 33(4): 65-73.
- [26] 沈克, 严允, 晏红文. 我国深海作业级 ROV 技术现状及发展展望[J]. *控制与信息技术*, 2020(3): 1-7.
- SHEN Ke, YAN Yun, YAN Hong-wen. Research status and development trend of deep-sea work class ROV in China[J]. *Control and Information Technology*, 2020(3): 1-7. (in Chinese)
- [27] 余明刚, 张旭, 陈宗恒. 自治水下机器人技术综述[J]. *机电工程技术*, 2017, 46(8): 155-157.
- YU Ming-gang, ZHANG Xu, CHEN Zong-heng. Summary of autonomous underwater vehicle (AUV) technology[J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2017, 46(8): 155-157. (in Chinese)
- [28] 曹俊, 胡震, 刘涛, 等. 深海潜水器装备体系现状及发展分析[J]. *中国造船*, 2020, 61(1): 204-218.
- CAO Jun, HU Zhen, LIU Tao, et al. Current Situation and development of deep-sea submersible equipment[J]. *Shipbuilding of China*, 2020, 61(1): 204-218. (in Chinese)
- [29] 庞硕, 纠海峰. 智能水下机器人研究进展[J]. *科技导报*, 2015, 33(23): 66-71.
- PANG Shuo, JIU Hai-feng. Current status of autonomous underwater vehicles research and development[J]. *Science and Technology Review*, 2015, 33(23): 66-71. (in Chinese)
- [30] TEAGUE J, ALLEN M J, SCOTT T B. The potential of low-cost ROV for use in deep-sea mineral, ore prospecting and monitoring[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 147: 333-339.