DOI: 10.11992/tis.201806028
网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20190104.1612.006.html

自主水面货船研究现状与展望

吴青[1]，王乐[1]，刘佳仑[2,3]
（1. 武汉理工大学 物流工程学院，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. 国家水运安全工程技术研究中心，湖北 武汉 430063）

摘　要：船舶智能化、自主化是水路载运工具的重要发展趋势，与此同时，船舶设计、制造、运营、维护等相关领域也迎来了新一轮的挑战。基于国际海事组织 (international maritime organization, IMO) 提出的海事自主水面船舶 (maritime autonomous surface ships, MASS) 概念，对其中自主水面货船进行阐述。首先对水路载运工具进行详细分类，分析了当前自主水面货船的特点及当前的研究现状。之后提出自主水面货运船舶系统组成，思考自主水面货船在实船试验、推进方式与能源、智能航行、通信系统、航行规则等方面中面临的挑战，并直面挑战对海事自主航行水面货船未来发展及应用的多样性做出展望。

关键词：海事自主水面船舶；自主水面货船；测试场；系统组成；智能船舶等级划分；水路载运工具发展
中图分类号：U675.79；TP18　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673−4785(2019)01−0057−14

中文引用格式：吴青，王乐，刘佳仑. 自主水面货船研究现状与展望 [J]. 智能系统学报, 2019, 14(1): 57–70.
英文引用格式：WU Qing, WANG Le, LIU Jialun. Research status and prospects of autonomous surface cargo ships[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2019, 14(1): 57–70.

Research status and prospects of autonomous surface cargo ships

WU Qing[1], WANG Le[1], LIU Jialun[2,3]
(1. School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Intelligent Transport System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China)

Abstract: Intellectualization and autonomy of ships are important development trends of waterway vehicles. Ship design, manufacture, operation, maintenance, and other related fields have ushered in a new round of challenges. On the basis of the concept of Maritime Autonomous Surface Ships proposed by the International Maritime Organization, this article elaborates on maritime autonomous surface cargo ships. First, waterway vehicles are classified in detail, and the characteristics and current research status of autonomous surface cargo ships are analyzed. The system composition of autonomous surface cargo ships is proposed, and the challenges faced by autonomous surface cargo ships are considered in aspects of ship trials, propulsion mode and energy, intelligent navigation, communication system, and navigation rules. Confronting these challenges, the future development of autonomous surface cargo ships and the diversity of its applications are predicted.

Keywords: maritime autonomous surface ships; autonomous surface cargo ships; test area; system composition; classification of smart ship; development of waterborne vehicles

2015 年 9 月，英国劳氏船级社 (LR)、奎纳蒂克集团和南安普顿大学合作推出了《全球海洋技术趋势 2030》(GMTT 2030) 报告，把智能船舶列为未来 8 个海洋关键技术之一。2017 年 6 月，国际海事组织海上安全委员会第 98 届会议于伦敦 IMO 总部召开。会议在“无人船、智能船、智慧船、自动船”等业内多种命名的基础上提出了海

收稿日期：2018−06−14.　**网络出版日期：**2019−01−07.
基金项目：国家自然科学基金项目 (5170090515).
通信作者：刘佳仑. E-mail: jialunliu@whut.edu.cn.

事自主水面船的概念：海事自主水面船被定义为能在不同程度上可以独立于与人类交互作用独立运行的船舶[1]。同时，会议将“关于使用海事自主水面船舶的监管范围界定工作”列入议程。建议航运界、相关科研院所尽早投入海上自主船的相关研究，研发不同级别智能化或自动化的船舶。首先在港区作业、短程干货运输、小型特种作业船舶实现半自动化甚至全自动化操作，再考虑远程货物运输的自动化[2]。本文将基于海事自主水面船舶，聚焦其中运输用途的自主水面货船进行概述。

与自主水面货船研究相关的是小型无人水面船。无人水面船是智能船舶的高级形式。根据海军无人水面船总体规划[3]，“无人”被定义为“能够无人操作，也可以载人或测试及评估，具有不同程度的自主性”。“水面船舶”强调船舶与水面有接近且连续的接触。小型无人水面船又称为无人艇。根据中国船级社无人水面艇检验指南[4]，无人艇是无人水面艇的简称，系指一种直接通过自主航行或远程遥控以实现正常航行、操纵及作业的水面小艇。无人艇可通过搭载各种任务载荷执行指定任务。无人艇系统包括平台、任务载荷、通信系统和操作系统。

当前无人水面船以无人水面艇的研究为主，用于安防、调查、科考等领域。自主水面货船为未来无人航运发展的重要载体，主要负责装载货物，在海洋上航行，到达目的地港口后卸载货物，再装上新的货物，并前往下一个港口。“货物”是指船舶运输的所有物品，包括船舶燃料、固体或液体压载物、船上使用的消耗品、船舶的永久性装备及备用装备。

大量研究表明，人为因素是船舶安全事故发生的主要原因，由此导致的事故占总事故的 86%~96%[5]。船舶一旦发生安全事故，将会造成人员伤亡、危险品泄露、交通中断等严重后果，产生不良的经济和社会影响，如“东方之星”及“岁月号”沉船事件。其次，为控制二氧化碳等温室气体的排放，国际海事组织建立的全球碳排放交易机制和船舶能效设计指数 (energy efficiency design index, EEDI) 正在有序推进，航运业减少温室气体排放成为必然的趋势。

随着船舶智能化水平的不断提升，机舱值班无人化、辅助驾驶技术、故障自诊断技术的发展使船舶配员逐渐较少，不仅能够解决海上专业人才越来越短缺的困局，同时无需设置船员生活区，节省了空间、成本，降低了环境污染。全球最大船舶设备供应商之一的英国 Rolls-Royce 公司在其无人自主驾驶货船项目研究中指出，如果采用自主驾驶技术，一艘货船的运行效率将有望提高，同时碳排放减少。因此，基于以上提高船舶安全性、节能减排、劳动力成本下降的需求，发展自主水面货船对于航运业及国家的发展有重要意义。

1　水路运载工具的发展及分类

水路运载工具目前正在从传统机械向半自动化再到全自动化无人驾驶发展。海事自主水面船舶 (maritime autonomous surface ships, MASS) 将分阶段实现，在实现“无人操作”之前，具有远程控制或具有部分自主功能的载人船将被长期广泛使用。综合水路载运工具的发展过程，提出如图 1 所示的水路运载工具发展及分类。

1.1　常规船舶

当前绝大多数船舶都属于常规船只，无自动化，无决策过程，由驾驶人全权操作船舶，系统可提供驾驶所需的基本信息。

1.2　智能船舶

通过使用智能传感器监测和控制船舶部件，例如推进和操纵系统，能够实现整船信息感知和整合，使其具有基于机器学习技术的决策能力。可以逐步替代人类角色 (减少船员)，如系统检测和结构疲劳监测。在智能船舶阶段中逐步进行以下发展。

1) 增强驾驶

通过使用传感器等设备，辅助船员提高感知和认知能力。给船员提供航行状态及环境等信息，但并不负责做出决策，仍采用常规人工驾驶，不减员。系统根据环境信息增强感知能力。人与系统工作负荷比约为 9∶1。

2) 辅助驾驶

采用常规人工驾驶，可以少量减员。系统执行部分如自动加减速驾驶等，可提供简单决策方案。人与系统工作负荷比约为 7∶3。

3) 船端人船协同

采用系统驾驶，可适当减员。系统可提供决策或控制的引导信息。人与系统工作负荷比约为 5∶5。

4) 岸端人船协同

采用系统驾驶，大量减员。系统完成所有驾驶操作及环境监控，提供航行、避障场景自主决策。根据系统请求，船长需提供适当干预。人与系统工作负荷比约为 3∶7。

5) 自主船舶

能够完全自主航行并避免碰撞，由仅需岸基操作员到逐步实现无人操作。在自主船舶阶段中逐步进行以下发展。

① 自主航行船舶

系统驾驶，全部减员。根据系统请求，船长可不做出响应。人与系统工作负荷比约为 1∶9。能够完全自主航行并避免碰撞，且在船岸通讯连接丢失时仍有能力航行。仅需操作员参与港口机动、靠泊和离港工作，能在复杂的航道中航行。即只需要岸基操作员，不需要船员。

② 无人驾驶船舶

有能力自主航行、自主装卸及靠离泊。整个水上运输过程不需要人力，属于真正的无人自主阶段。

水路运载工具的发展过程中，尤其是发展到智能船舶，研究又分为了水上船艇及水下船艇(潜艇)。水上船艇又可分为：1) 小型水面艇；2) 大型水面船。随着无人驾驶船舶的发展，船舶的复杂性和自主性水平提高，所需的船员人数逐渐减少至无人。

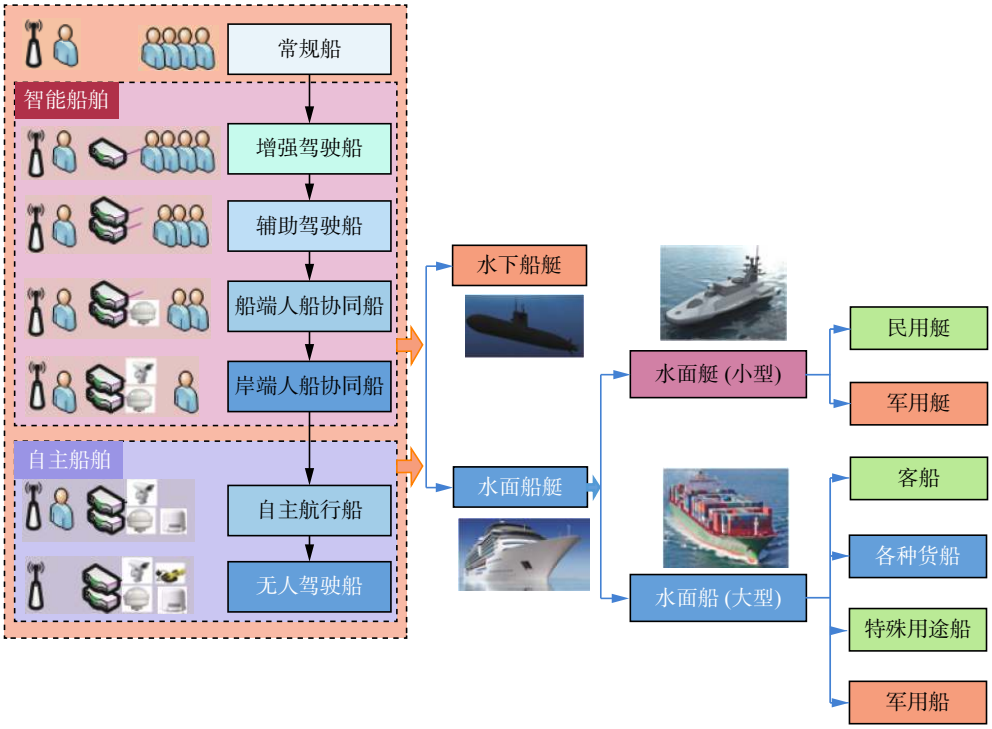


图 1　水路运载工具的发展及分类

Fig. 1　Development and classification of waterborne vehicles

2　自主水面货船的研究现状及特点

2.1　无人水面艇研究特点

近年来，随着人类对海洋探索与依赖程度的加深，作为能够代替人进行一系列海上活动的 USV 受到世界各国的青睐，各种类型及用途的 USV 得到大范围的研制。根据尺度无人水面艇可分为：小型 (< 1 t)、中型 (< 100 t)、大型 (< 1 000 t)、超大型 (> 1 000 t)。目前小型或者中型无人船，长度 2 ~ 15 m，重量 1.5 ~ 10 t，静水航速最大可达 35 kn[6]。根据 USV 的船型特点、用途及推进方式，又可分类如下。

1) 按照船型分类

USV 的艇型具有多样化特征，包括滑行艇、水翼艇、单体船、多体船等型式，为了改进隐身性能和平台稳定性，甚至可以设计为半潜式。就当前研究可知，USV 的研制大都集中在单体和双体，仅有少部分为三体船[7-13]。早期研制多为单体船，随着技术的发展，双体 USV 的研制增多，三体船也有所涉及，原因是它们具有更高的系统稳定性，能够降低 USV 航行时的风险。在单双体船的基础上，根据所实现的功能不同，各国研制的 USV 船体在材质上又有所不同，以硬壳充气艇型居多，主要是因为它们的耐用性和有效载荷能力更强。

2) 按照用途分类

USV 在民用、军事领域具有极其广泛的应用前景，如：环境监测、气象预报、海洋生物研究、深水样采集、水文观测、海图绘制、水上水下通信中继、海洋资源勘探与开采、领海监视等。其中 USV 在民用领域的应用越来越广泛，为海洋勘探及船舶航行安全提供保障，同时也为科学研究提

供数据支撑。

3) 按照推进方式分类

USV 的推进方式很多，可用传统的螺旋桨+舵装置、喷水推进器，也有全电力推进，甚至有太阳能、风帆和海洋能等新型环保的推进方式。总体来说 USV 的推进方式普遍都为清洁能源推进，少数采用混合推进，说明当前 USV 的发展符合人类社会发展的正确方向，具有较强的发展潜力。

2.2　自主水面货船及测试场的研究现状

1) 自主水面货船的研究现状及特点

目前对于自主水面货船的开发处于逐渐增长的阶段，英国、芬兰、挪威、澳大利亚、法国、德国、日本、中国等都对自主水面货船相关项目进行研究。2012 年，由 Fraunhofer CML 公司、MARINTEK 公司、Chalmers 大学等 8 家研究机构共同合作的基于智能航行网络的海上无人驾驶 (maritime unmanned navigation through intelligence in networks, MUNIN) 项目[14]，旨在提出无人货船的概念并验证其可行性，强调开发的无人货船概念应像 MUNIN(希腊语：乌鸦) 一样，具有能够独立和安全地将货物运往预定目的地的象征意义。

2015 年，英国 Rolls-Royce 公司与芬兰 Aalto 大学合作启动了高级自主驾驶船舶应用开发计划 (advanced autonomous waterborne applications, AAWA) 项目，计划用 5~8 年时间设计建造一条无人驾驶的远洋运输船 (见图 2(a))，该项目旨在实现“远程驾驶”与“自主驾驶”船舶的愿景[15]。此外，Rolls-Royce 公司开发了无人船舶的蓝本，提出了无人集装箱船舶概念 (见图 2(b))，并将在 2020 年前开始进行海试，远期目标是在 2035 年实现跨洋航行。2017 年 6 月 20 日，Rolls-Royce 公司和全球拖轮运营商 Svitzer 公司在 AAWA 项目的基础上，在丹麦哥本哈根港成功展示了世界上第一艘远程操作的商用船，名为“Svitzer Hermod”号[16]。日本企业在政府的支持下合作推进无人船的研发进程，目标是到 2025 年实现自主控制的商业海上运输[17]。

基于研究零排放集装箱的目标，DNV GL 集团在 2016 年为短距离航运开发电池供电的无人船舶 ReVolt(见图 2(c))。通过减少船上高维护部件的数量来降低运营成本，该船的所述范围将是 100 n mile，然后才需要对电池充电。由于没有船员，与一艘同样大小的传统柴油船相比，ReVolt 在约 30 年的生命周期里，可以节约 3 400 万美元[18]。2017 年春季，挪威公司 Kongsberg 和 Yara International 宣布开发一种 100~150 TEU、电力驱动、电池储能的的自主集装箱船 (见图 2(d))。该船将从 Yara 的 Porsgrunn 生产工厂向挪威的 Brevik 和 Larvik 运输产品，计划于 2018 年下半年开始运营并成为世界上第一台全电动零排放集装箱[15]。



(a) AAWA项目　(b) 无人集装箱船

(c) ReVolt　(d) Yara birkeland

(e) “Hrönn”号　(f) 24TEU内河电动船舶

(g) 240 TEU大型内河驳船　(h) “大智”号

(i) “筋斗云”号　(j) “白羊座”号

图 2　各国自主水面货船研究概念图

Fig. 2　Conceptual diagrams of autonomous surface cargo ships in various countries

全球最大的矿业集团——澳大利亚必和必拓 (BHP Billiton) 计划在 10 年内研发超大型自动航行“无人”散货船，用于运输铁矿石和煤炭等各类矿产[17]。2017 年，海工船巨头法国 Bourbon、英国 Automated Ships 和挪威 Kongsberg Maritime 联手合作打造全球首艘无人驾驶海工支援船“Hrönn”号 (见图 2(e))，主要服务海上能源、科考、水文和海上水产养殖行业。这艘 OSV 还可以作为 ROV 和 AUV 支持船以及守备船，能够与载人船舶合作为海上平台提供消防支援[19]。

内河自主货船研究方面，2018 年夏季开始，荷兰正在设计 24 TEU 内河电动船舶 (见图 2(f))，采用岸基充电、可升降式驾驶台设计，用于阿姆

斯特丹、鹿特丹、安特卫普航线, 计划于 2019 年投入使用。未来拟建 240 TEU 大型内河驳船 (见图 2(g)), 以替代目前的内河集装箱船[20]。

2018 年 5 月 16 ~ 25 日, MSC 第 99 届会议在伦敦 IMO 总部召开。本届会议开始研究如何在 IMO 框架下进行 MASS 的安全、可靠和环境友好的运营问题。会议围绕 MASS 法规梳理的目标、定义、范围、方法、工作计划进行了深入讨论并通过了一系列法规决议[21]。我国目前也在进行自主水面货船的研究。考虑到未来船舶智能化的发展方向和发展趋势, 中国船级社 (CCS) 编制的《智能船舶规范》(简称《规范》) 于 2015 年 12 月 1 日在中国国际海事会展期间正式对外发布, 并于 2016 年 3 月 1 日生效。CCS 智能船舶规范体系由智能航行、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六大部分组成[22]。2017 年 6 月 28 日, 由海航科技集团发起的无人货物运输船开发联盟成立大会暨第一次理事会在上海隆重召开[23]。来自中国船级社 (CCS)、美国船级社 (ABS)、中国舰船研究设计中心、沪东中华造船集团有限公司、中国船舶及海洋工程设计院 (708 所)、Rolls-Royce 船舶、上海船用柴油机研究所 (711 所)、瓦锡兰中国有限公司和海航科技集团计划联手建造世界第一艘远洋无人货船。12 月 5 日, 中国自主研发的全球首艘智能船舶 iDolphin 38 800 t 智能散货船“大智”轮在中国国际海事会展上正式发布 (见图 2(h))。该船具有 110 余个智能数据分析模型, 能够实现每 6 h 更新航线, 日均油耗降低 4%, 是全球首艘通过船级社认证的智能船舶[24]。12 月 6 日, 中国船级社、珠海市政府、武汉理工大学及云洲智能科技有限公司四方启动首艘小型近海无人货运船“筋斗云”号 (见图 2(i)) 的设计、建造及运营, 采用电力推进, 具备一定条件下的自主靠离泊能力[25]。这艘 500 t 级无人驾驶船舶有望于 2019 年在全球率先实现商业运营。2018 年 2 月 27 日, 中远海运重工旗下南通中远海运川崎建造的中远海运首艘两万标箱级集装箱船“中远海运白羊座”号 (见图 2(j)) 顺利首航比利时安特卫普港。该船是中国建造的首制具有完全自主知识产权的 2 万标箱级集装箱船, 标志着我国船舶工业技术在这一领域又实现新突破[26]。此船是全球迄今为止第一艘收到劳氏船级社 LR 网络准入船舶 (Cyber-enabled ship, CES)AL3 级 (LR 将 AL3 定义为“用于自主/远程监视和控制的网络访问 (需要机载许可, 并且可以进行机载覆盖)”) 描述性说明的集装箱船[27]。

2) 自主水面货船测试场的研究现状

各国展开自主水面船舶研究的同时, 也在进行测试场的建设, 为将来船舶试验研究创造条件。

2016 年初, DIMECC 芬兰合作公司与 Rolls-Royce、ABB、Wärtsilä、Cargotec、Ericsson、Meyer Turku、Tekes 和 Tieto 公司共同开发无人驾驶船舶, 项目命名为“一个海洋—自治海洋生态系统”。经过多年的发展, 该公司已可以面向业务使用提供系统性解决方案。同时, DIMECC 公司为无人船舶测试在芬兰劳马海岸建设测试场, 命名为“Jaakonmeri 测试区”(见图 3(a))[28]。



(a) Jaakonmeri测试区　(b) 特隆赫姆峡湾挪威测试场

(c) 挪威山摩尔测试场　(d) 挪威奥斯陆峡湾测试场

(e) 格陵兰岛地区测试场　(f) 珠海万山无人货船测试场

图 3　各国海上智能船舶测试场

Fig. 3　Test area for smart ships in different countries

2016 年挪威政府机构和行业机构建立了挪威自治船舶论坛 (norwegian forum for autonomous ships, NFAS) 推广无人航运的概念[29]。此外, 挪威政府已将特隆赫姆峡湾变成了一个自主船舶试验的试验场[30], 宽 3.2~24.1 km(见图 3(b))。2017 年 10 月 30 日, 在 NFAS 的基础上, 国际自主船舶组织 (international network for autonomous ships, INAS) 在奥斯陆成立, 该组织是关于无人驾驶船舶、自主船舶或智能船舶的国家或地区利益组织的非正式小组[31]。同年, 挪威陆续在山摩尔 (见图 3(c))[32] 和奥斯陆峡湾 (见图 3(d))[33] 内增设两个无人船测试场。

2017 年 5 月, 格陵兰岛地区 (见图 3(e)) 设立试验区。这个区域的船舶流量比特隆赫姆要多,

特别适用于在交通繁忙的环境中测试更多概念性的开发项目。该地区还具有 VTS 等监管设备，这将进一步增加作为测试区域的实用性[34]。

2018 年 2 月，中国船级社、珠海市政府、武汉理工大学、云洲智能科技有限公司四方启动“珠海万山无人船测试场”(见图 3(f)) 的建设，作为亚洲首个海上无人船测试场，不同于芬兰和挪威建设的以“水域”为核心的测试场，“珠海万山无人船测试场”以多手段的评测体系为核心，其中包含了实船测试场、模型船测试场、软件仿真环境、半实物仿真环境、评价方法体系、法规验证体系等。

综上，当前大型自主水面货船处在研究阶段，同时大型测试场也在建设中。

2.3　无人艇与自主水面货船研究的异同

USV 具有小型、快速、灵活等特点。目前，载荷能力及运输功能较强的 USV 主要应用于军事领域及科研领域，并未涉足运输业。

自主水面货船操纵性特点：质量大，惯性大，余速消失慢；旋回性能较差；小舵角响应极其微弱；受外界因素影响明显；岸壁效应明显。船舶在靠离泊作业时，船两舷与水及岸壁作用产生向岸靠拢的压力差，产生岸推力矩与岸吸力，使船体向岸壁靠拢。一般船岸间距达 1.7 倍[35] 船宽时便可显出岸壁影响，并且随着航道宽度变窄、水深变浅、船与岸的距离变近、航速变高、船型肥大而程度加大。

虽然 USV 与自主货船各有特点，但 USV 的设备选取及智能控制方法均对自主货船有参考意义，可作为海事自主水面货船的雏形，为相关研究与发展提供基础。

3　自主水面货船系统组成

大型自主水面货船的系统结构是以有动力的船体为平台，搭载通讯设备、控制设备和特殊功能设备，进行货物运输，主要是通过地面的基站或母船的控制中心完成自主水面货船的远程控制。自主水面货船系统主要分为船端、岸端、通信系统 3 部分，如图 4 所示。

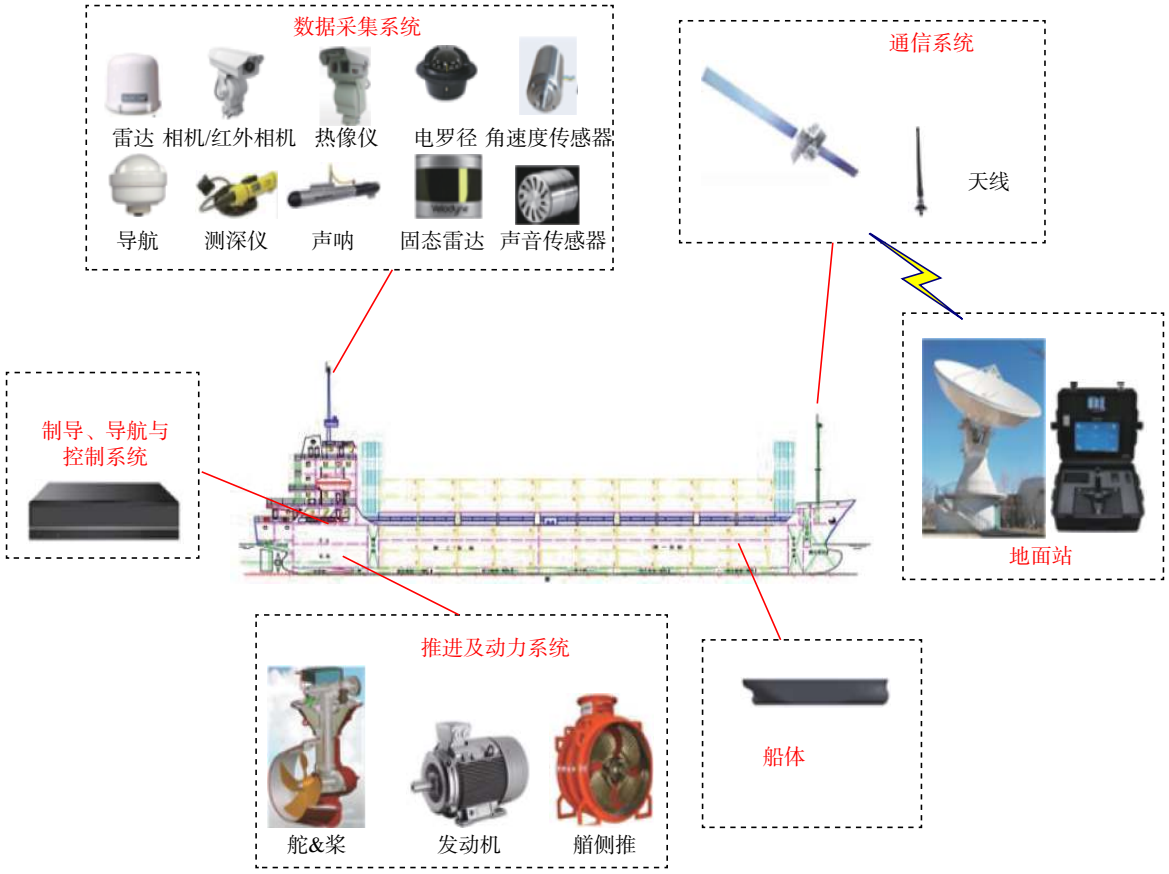


图 4　自主水面货船的系统构成

Fig. 4　System composition of autonomous surface cargo ships

3.1　船端

船端主要包括船体结构、推进与动力系统、数据采集系统及制导导航控制系统 (guidance navigation and control, GNC)。船端通过感知自主水面货船周围环境信息和自身航行姿态信息，通过 GNC 系统调用对应的任务功能程序模块，实现自

主操控功能。船端控制平台包括多种传感设备、通信设备、执行机构等。

1) 船体结构

不同船体结构的自主水面货船负载能力不同, 负载能力强的自主货船能够安装多功能任务包, 从而使得单个自主货船可以同时完成更多的作业任务。

2) 推进与动力系统

舵、螺旋桨、发动机等是自主水面货船推进系统中不可缺少的重要设备, 其性能直接影响着船舶航行的经济性和安全性。

舵布置包括单舵、双舵、四舵, 种类有 Square head、Round head、NACA 系列、IFS 系列、Wedge 系列、鱼尾舵及襟翼舵等[36]。目前舵的研究领域比较先进的是自动舵, 其发展共经历机械舵、PID 舵、自适应舵、智能舵 4 个主要阶段, 自动控制操舵方式比人工操舵方式更加灵敏和准确。

螺旋桨布置包括单桨、双桨及多桨, 不同的桨舵配合使得船舶产生不同的操纵效果, 直接影响船舶的运动性能。除船尾安装螺旋桨外, 为实现自动靠离泊需要安装侧推装置如艏侧推。艏侧推, 即艏侧推进器, 是一种装在船舶首部的特种推进器, 采用可变或固定螺距桨叶。艏侧推装置除了可变螺距桨外, 还包括电机或油马达、变距泵组、重力油泵等。作用是用来提高船舶的操纵性, 精确保持船位, 便于停靠码头, 不需要拖船协助。

当前推进方式主流有螺旋桨推进、喷水推进, 新型推进方式有吊舱推进、无轴轮缘推进等。由于无轴轮缘推进与传统桨舵相比具有全回转、适量推进、精确控制等特点, 与吊舱推进器相比具有推进效率高、减振降噪、防缠绕、正反转改向快、空间利用率高等优点, 可以作为海事自主货船的优先选择。

目前, 船舶动力 95% 为柴油机动力, 当前新型动力源主要有 LNG、锂电池、燃料电池、可再生能源 (太阳能、风能)、核能等。自主水面货船以采用清洁动力源为目标, 在保证船舶航行动力的同时应遵循环保理念。

3) 数据采集系统

船端安装有数据采集设备, 如 GPS 和 DGPS、S 波段和 X 波段雷达 (可以在恶劣天气条件下使用)、KA 和 W 波段雷达 (可以检测近距离目标)、声呐、罗盘、测深仪、LIDAR(可以识别近距离目标并精确测量距离)、摄像机和红外摄像机 (用于白天和夜晚监测)、热像仪及角速度传感器、声音捕获和检测传感器等多种传感器, 以检测船舶周围环境和自身航行姿态信息。智能终端采集各设备数据最终汇总发送至 GNC系统, 实现信息处理。

4) GNC 系统

制导、导航与控制分系统, 承担全部运动控制任务。对于自主水面货船来说, GNC 系统是自主水面货船运动控制的核心系统, 支配自主水面货船的行动。主要功能是连接各类船载传感器、执行机构驱动器以及特定任务设备, 实现数据预处理以及协议转换功能。控制系统是自主水面货船航行中重要的子系统。在自主操纵下, 货船必须具备根据外界环境对运动控制进行调整的能力, 从而降低自主水面货船的航行风险。GNC 系统的具体设计要求: 具备多种数据接口模式; 数据输出方式统一; 具备足够的数据处理能力, 能够融合多源异构传感器信息, 进行深度数据分析。

3.2　岸端

岸基设备用于提供人机界面, 实时监控船舶自身和周围环境信息, 了解船舶航行动态, 并可向船端控制平台发送操作指令, 实现遥控操纵, 同时实时存储数据信息, 用于后期数据分析。常用岸基设备主要有 PC 机、岸基雷达、摄像头、射频识别等。为适应自主水面货船多能源换装或补充需求, 岸基应具备接触网式、成组更换式、靠岸快充式、无线供电式等能源供给系统。

3.3　通信系统

通信系统包含船舶本身数据间通信及船岸信息通信。实现船岸之间各数据的稳定传输, 是确保自主水面货船系统正常稳定工作的基础。利用岸端设备、通信技术以及船载终端等通信设施监控航行在港湾和进出港口的船舶, 即为船舶交通服务 (vessel traffic service, VTS)。

根据任务要求, 自主水面货船应具有 4 种通信方式: 水下、水上、陆地、太空。水下通信能够与潜艇通信, 水上通信能够进行自身与船船间通信, 陆地指本船与岸站进行通信、空中指本船与无人机通信。

综上, 自主水面货船系统组成 3 部分不可或缺, 一艘基本自主水面货船应采用智能舵, 安装艏侧推并具有自动靠离泊能力, 选择高效的推进方式 (如无轴轮缘推进) 与节能环保的动力源, 采用先进的 GNC 技术, 稳定的通信设备, 再配合 AIS、闭路监控电视、船舶远程识别与跟踪、船舶

交通服务等系统，通过大数据、船联网和云计算等手段，实现对航运船舶的远程、实时、全程监管与服务，构成智慧海事监管系统[37]。

4　自主水面货船研究关键技术及挑战

4.1　自主水面货船设计及实船测试

船舶在静水、波浪、涌浪条件下做各种运动时船舶动力学性能存在较大差异，如何优化设计船型并基于实际动力需求，精确控制动力输出是当前面临的挑战之一。为精确控制动力输出，应采用矢量推进器。无轴轮缘推进器作为新型矢量推进器的代表，其推广与应用具有先发性优势。如何将清洁能源与推进系统相结合并降低新式技术的成本，提升经济效益，促进技术推广，是自主水面货船面临的另一挑战。

中小型无人水面艇由于其成本较低、尺度较小、研究普适性较强，容易通过实船测试获取相关参数与结果。大型自主水面货船的成本远高于小型无人艇且系统组成复杂，相关船舶参数难以通过仿真或模型试验准确获得。目前绝大多数的理论分析和仿真环境下的运动控制算法验证仅依据已有标准船型的公开数据，几乎没有相关实船验证，缺少自主水面货船真实应用效果验证范例。

4.2　自主水面货船智能感知技术

自主水面货船数据采集系统主要负责对环境、设备、系统、货物等复杂信息进行感知收集。

1) 对环境状态的感知：主要包括感知气象信息、水文信息、通航环境信息等。

2) 对船舶状态的感知：主要包括对船舶航行位置、航速、航向等。

3) 对设备、系统、货物进行感知：主要包括监测设备当前各设备系统的运行状态和货物的存储状态。

如何增强感知的智能性是研究的重点之一。雷达、AIS 等常规船用感知设备是船舶的重要感知工具。由于自身工作特性，雷达在近距离存在 30 m 左右的探测盲区[38]。AIS 报文中时常会出现错误。为了保证航行安全，自主船舶还应备激光雷达、毫米波雷达等设备用于近距离感知。但激光雷达角分辨率有限，远距离成像不清晰。毫米波雷达也存在扫描范围不足的问题。

由于各种传感器存在不同的缺陷，研究人员在设计自主船舶感知系统时采取了多传感器组合感知方式[39-41]。船舶设备供应商，也在尝试具备 AIS 和雷达目标融合功能的雷达和电子海图。然而，雷达和 AIS 信号本身并不完善。雷达目标在密集航道内的虚假率高，一般达 40%~50%。AIS 目标则存在最长达 180 s 的延时[42]。因此，上述“融合功能”只能在理想的环境下 (如开阔海域、目标船舶极端孤立) 的情况下发挥作用。综上，对于自主货运船舶，目前的难点在于多传感器的融合情况不佳，缺乏对感知信息的深度挖掘，无法形成对航行态势、自身运动特征的准确“感知”。

4.3　自主水面货船智能认知技术

自主水面货船航行系统应具有高度的智能性，包括感知、认知和决策 3 部分。智能认知系统主要包括视觉系统、听觉系统、感觉系统。环境的认知、知识的学习、决策的制定等主要依赖于人工智能技术的应用。采用人工智能技术实现自主水面货船图像识别、自然语言识别处理等任务。

1) 自主水面货船图像识别

船舶领域对于图像有极大的需求，由视觉传感器、毫米波雷达、前视声呐、侧扫声呐、激光雷达获得的信息，其信息类型大多为图像，采用人工智能技术 (如神经网络等学习类算法) 对这些数据的认知处理[43-45]，可以获取船舶航行态势，辨识碰撞风险，以支持航行决策。

2) 自主水面货船语言识别

船舶领域对船舶的呼号识别有重要意义。同时，无人船舶同有人船舶将在很长的一段时间内混合存在，解决语义沟通与理解是连接无人船舶与有人船舶的重要基础。当前对语音语义的研究较为广泛。国内外涉及人工智能技术的语音语义识别方法主要基于深度学习或神经网络[46-49]，但针对船舶语音特点的系统识别研究较少。

4.4　自主水面货船智能航行技术

智能航行包括航向航速优化、航线规划、智能避碰、路径跟随、自动靠离泊等。

航速控制主要是控制螺旋桨的转速，航向控制主要包含航向的稳定性和机动性两方面内容。根据水文气象情况、船舶运动特性、当前环境是否有障碍物等进行动态航线规划，采用智能算法进行避碰，运用合适的航向航速实现路径跟随，实现安全经济的目标。当船舶停止航行时，应采取自动靠离泊控制。自动靠离泊属于镇定问题，对于大型自主水面货船的安全尤为重要。当前大型有人货船主要依靠拖轮完成靠离泊[50-53]。如何采用人工智能技术设计实现自主水面货船自动靠

离泊是未来发展的重点及难点之一。

当前船舶模型以水平面三自由度居多，且假设为全对称，与事实有差异，从而使设计的运动控制器技术参考性和控制精确性大大降低。如何增加自主水面货船运动控制模型自由度，构建多桨多舵、吊舱、无轴轮缘推进等推进模型成为自主水面货船运动控制是否精确的重要因素之一。此外，由于自主水面货船尺度较大，外界环境对于船舶的影响较无人水面艇更为明显，如何建立更加精确的波浪、涌流干扰模型，是自主水面货船研究过程中的重点之一。此外当前运动控制研究仅针对单一运动类型，对整个船舶从启航到靠泊没有完整的解决方案，需要一套完整的可变自主控制策略。

综上，自主水面货船智能化的核心是使船舶拥有如同人一样的观察、思考和处理问题的能力，构造一个类似于“人脑”的人工智能集中决策系统，完成船舶航行的“感知、认知、决策与控制”，即航行脑系统[54]，如图 5 所示。自主水面货船航行脑系统需要在非确定性信息、非确定性对象的条件下，具备船舶操控、不完备信息处理、航行规则理解与船间沟通等能力。

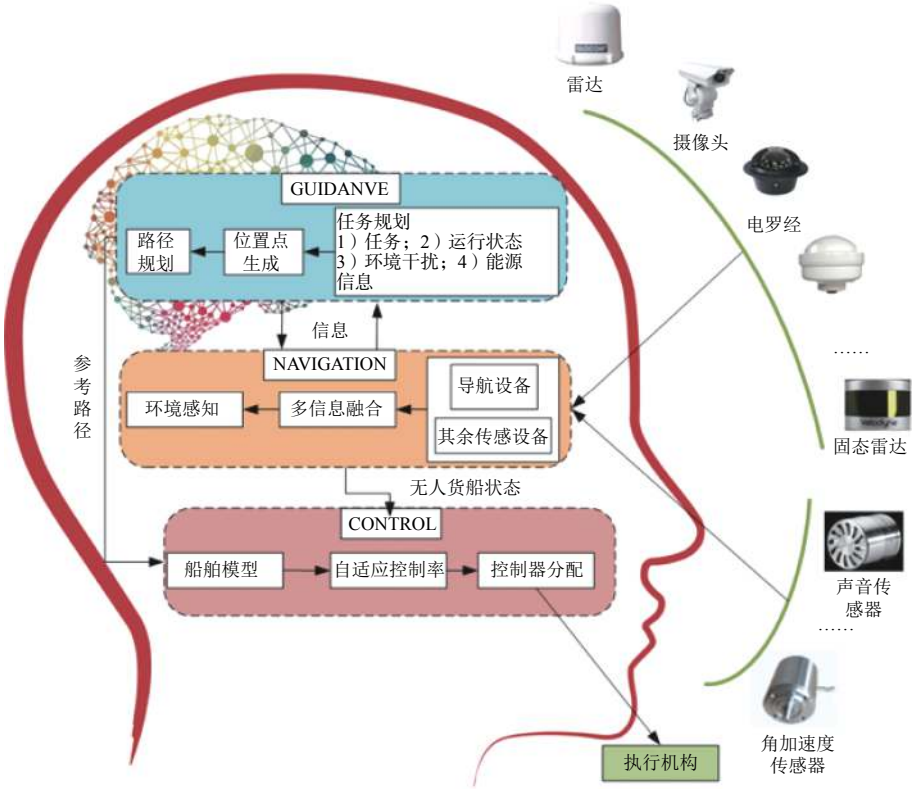


图 5　自主水面货船航行脑系统构成

Fig. 5　Autonomous surface cargo ships navigating brain system composition

4.5　自主水面货船网络及通信技术

船舶网络信息安全与船舶通信技术的提升对于自主水面货船的安全航行具有关键作用。目前常用的通信方式有微波通信、卫星通信及基于 GPRS、4G/5G、Zigbee、Bluetooth、Wifi 等技术的通信设备[55-58]。通信系统可根据应用需要选择对应的通信方式。在近海区域可选用点对点通信方式的图传电台，能同时传输视频和数据。在公海的地区，使用卫星连接，保障远距离可靠通信。

自主水面货船航行时，需要保证自身设备之间通信顺畅，以及与岸基设备通信顺畅，多船之间还要保证相互通信能够避免各种电磁干扰[59]，保障通信可靠。此外，通信带宽、速率以及费用等问题也需要进一步解决。

4.6　自主水面货船能效技术

自主水面货船应能够智能计算能耗分布，并进行优化及性能评估。通过对船舶航行状态、耗能状况的在线监测与数据的自动采集，对船舶能效状况、航行及装载状态等进行评估，并通过大数据分析、数值分析及优化技术，为船舶提供数据评估和辅助决策，实现船舶能效实时监控、智能评估及优化，不断提高船舶能效管理水平。航线规划和航速优化是两种重要的航行决策形式，直接影响到船舶燃油消耗和企业整体营运利润。对单船来说，降低航速能够有效的降低船舶的能

耗与排放水平。船舶航速优化是一项非常复杂的科学决策过程，其实质是不同约束条件下选择最佳航行速度，达到最大程度地降低燃油成本[60-62]。

4.7 自主水面货船智能维护技术

为保障自主水面货船航行安全，各类设备应具备智能维护功能。船舶故障诊断包括主机故障诊断及电力系统故障诊断等。主机系统等是复杂的耦合系统，运行状态复杂、故障类型多，因而智能故障诊断技术应具有全局搜索能力强、优化速度快、准确性强的特点。如在没有任何人为干预的情况下如何运行及维护柴油发动机是自主水面货船智能维护技术难点之一。

4.8 自主水面货船货物管理技术

船舶货物的智能管理是利用传感器等感知设备对货物、货舱和货物保护系统的参数进行自动采集，并基于计算机技术、自动控制技术和大数据处理、分析，以实现货舱、货物和货物保护系统状态的监测、报警、辅助决策和控制。同时还可以基于监测和获得的数据，进行货物优化配载和自动装卸。如实现矿物状态监测及管理，液货状态监测及管理功能。

4.9 自主水面货船数据管理技术

自主水面货船系统由于无人操作，所需设备较多，导致数据存储及处理量大。因此数据轻量化是解决数据存储及处理、船岸之间通信的重要手段。此外，应加强赛博安全放空保障通信与数据安全。

4.10 自主水面货船航行标准规范

普通船舶目前已有成熟的规范体系，由世界海事组织和各国船级社制定，涵盖海上管辖、安全、技术、船员等方面，并在不断完善过程，如关于管辖权的《联合国海洋公约》；技术类法规《国际海上避碰规则》、《海员培训、发证和值班标准国际公约》；海员类《国际劳工公约》、《国际海上人命安全公约》。关于无人船等智能船舶，相关规范有《无人水面艇检验指南》[4]、《智能船舶规范》、《智能功能认证与分级》、《无人船安全评估方法》。基于此，自主水面货船的航行也需要有针对性的形成系列标准至国际规则，主要包括技术规则、操作规则 (安全速度、瞭望和操纵)、豁免、安全配员等，解析船舶系统标准，明确责任归属。

5 自主水面货船研究展望

2013 年 12 月美国国防部发布的《无人系统线路图》对无人水面船未来 5 年 (近期)、未来 10 年 (中期)、未来 25 年 (远期) 的技术重点做了详细规划。未来 5 年无人船的技术研发主要集中在传感器和通信系统方面，提高在受控区域执行任务的自主性和联网能力；未来 10 年的技术研发主要集中在增加作业任务、扩展作业范围；未来 25 年的技术研发主要集中在自动避碰避障等自主系统，提高无人船作业的自主性。从控制系统体系结构、自主决策、模式识别、信息融合、控制方法等方面着手研究，以提高海事自主水面船舶的智能化、自适应水平，使船舶能在复杂海洋环境中长期、可靠、安全、自主地航行并完成各种使命任务。

因此，基于自主水面货船面临的挑战以及当前的研究任务，进行如下展望。

1) 加快测试场的建设及自主水面货船的研制，在未来的研究中广泛开展实船实验，弥补仿真实验的不足，使自主水面货船的功能更加符合实际需求，将来更好地投入运营。

2) 发挥无轴轮缘推进等先进推进装置的优势。中小尺度自主航行船舶 (10 万 t 级以下) 需要增配侧推器并进行精确控制，以实现自主靠离泊等功能。

3) 推广新型能源的使用。由于不同新能源形式和利用方式之间存在显著差异，需要根据船舶结构和动力系统的构成特点，通过综合分析和优化设计以实现可靠集成和高效运行。

4) 智能感知、认知及控制方面。

① 根据自主水面货船的工作特点、运动特性、使用环境和操控系统的要求，确定航行路径，设计综合导航系统方案，为航行提供可靠的导航定位。利用多传感器信息综合技术，开发一种可以处理 “不确定性”、“延时”的信息融合、决策方法，为航行提供可靠的姿态运动信息。此外，图像识别的实时性及应用的广泛性需要进一步加强，应用基于人工智能的语音语义识别技术，加强其时效性及准确性。

② 自主水面货船运动控制研究可采用无人艇与有人货船的控制方法作为参考，结合自主水面货船自身的特点进行设计，分别对其航速航向控制、自主避碰与自动靠离泊等方面进行研究。运动模型建立方面，增加多桨多舵及多自由度船舶模型的建立，从各方面提高运动控制的精确程度。深入研究自动靠离泊技术并转化为实际应用。加强基础控制算法研究，提高控制稳定性、

鲁棒性、收敛性、响应性等。

5) 通信技术。重点构建可行性高、容错性强的通信系统。发展无线数据通信技术, 采用无线数据传输定期或实时获取数据, 同时可通过基站向自主水面货船发布指令信息, 构建可靠的多船通讯网络拓扑结构。提高数据压缩传输效率, 统一编码规则。

6) 国际船舶研究的大趋势集中在数字化、机器人化、物联网等方面。将这些最新研究成果结合应用于自主水面货船将大幅度提升自主水面货船的智能化水平。此外, 机器人、航天器等欠驱动机械系统的研究成果远比控制系统丰富, 由于非线性本质相同, 可将这些领域中成熟的控制方法移植应用到自主水面货船的应用中。最终, 将自主水面货船与其他无人载具组合, 实现数据的接收与传送、不同格式数据的转换以及双方的实时通讯等操作, 完成更复杂的协同任务。

7) 航行规则。建立适当的国际监管制度, 在现有规则基础上改进或将自主货船加入为适应对象, 制定一套用于海事自主水面货船航行的新规章, 以此为准则进行海事自主水面货船航行的相关研究。

参考文献:

[1] International Maritime Organization. Maritime safety committee (MSC), 98th session, 7-16 June 2017[EB/OL]. [2017-06-16]. http://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/MSC/Pages/MSC-98th-session.aspx.

[2] 中国船级社. IMO 海上安全委员会第 98 届会议 (MSC98) 要点快报 [J]. 船舶标准化工程师, 2017, 50(4): 10.
China Classification Society. Flash report of the 98th session of the IMO maritime safety committee (MSC98)[J]. Ship standardization engineer, 2017, 50(4): 10.

[3] US Department of the Navy. The navy unmanned surface vehicle (USV) master plan[S]. Washington, DC: US Department of the Navy, 2007.

[4] 中国船级社. GD24-2017, 无人水面艇检验指南 [S]. 北京: 中国船级社, 2018.

[5] 胡甚平, 方泉根, 乔归民, 等. 大型船舶航行的风险分析与风险控制 [J]. 中国航海, 2006(3): 34–38.
HU Shenping, FANG Quangen, QIAO Guimin, et al. Risk assessment and risk control options of ship navigation[J]. Navigation of China, 2006(3): 34–38.

[6] 郑恒, 白雪. 解秘“无人船”的前世今生 [J]. 上海信息化, 2015(4): 24–27.
ZHENG Heng, BAI Xue. The past life of the unmanned surface vessels[J]. Shanghai informatization, 2015(4): 24–27.

[7] MOTWANI A. A survey of uninhabited surface vehicles[R]. MIDAS. SMSE. 2012. TR. 001. United Kingdom: MIDAS, 2012.

[8] 海天. 未来海战的杀手锏新概念武器之无人水面艇 [J]. 舰载武器, 2006(3): 77–83.
HAI Tian. New concept weapons in the future warfare[J]. Shipborne weapons, 2006(3): 77–83.

[9] 何萍, 阳明, 马悦. 全球海战机器人 [M]. 北京: 解放军出版社, 2012.

[10] STATHEROS T, HOWELLS G, MAIER M D. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques[J]. The journal of navigation, 2008, 61(1): 129–142.

[11] BERTRAM V. Unmanned surface vehicles-a survey[R]. Copenhagen, Denmark: Skibsteknisk Selskab, 2008: 1–4.

[12] YANG Wenrong, CHEN C Y, HSU C M, et al. Multifunctional inshore survey platform with unmanned surface vehicles[J]. International journal of automation and smart technology, 2011, 1(2): 19–25.

[13] 朱炜, 张磊. 现代水面无人艇技术 [J]. 造船技术, 2017(2): 1–6.
ZHU Wei, ZHANG Lei. Development of unmanned surface vehicle[J]. Marine technology, 2017(2): 1–6.

[14] 云州智能科技. 南极, 我们来啦!——云洲无人艇挺进南极 [EB/OL]. [2017-12-01]. http://www.yunzhou-tech.com/News/detail/id/276.html.

[15] PORATHE T. Maritime unmanned navigation through intelligence in networks: the MUNIN project[R]. 2013: 177–183.

[16] JOKIOINEN E. Remote and autonomous ships the next steps[R]. London: AAWA, 2016.

[17] Rolls Royce. Rolls-royce demonstrates world’s first remotely operated commercial vessel[EB/OL]. [2017-06-20]. https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/press-releases/2017/20-06-2017-rr-demonstrates-worlds-first-remotely-operated-commercial-vessel.aspx.

[18] 国际船舶网. 澳洲矿业集团研发超大型自动航行无人散货船 [EB/OL]. [2017-06-13]. http://www.hellosea.net/usv/focus/2017-06-13/41685.html.
Eworldship. Com. Australian mining group develops super large automatic navigation unmanned bulk carriers

[EB/OL]. [2017-06-13]. http://www.hellosea.net/usv/focus/2017-06-13/41685.html.

[19] TOMMI ARO, LAURI HEISKARI. Challenges of unmanned vessels[D]. University of Applied Sciences, 2017.

[20] 国际船舶网. 全球首艘无人海工船即将开建 [EB/OL]. [2016-11-02]. http://www.eworldship.com/html/2016/NewShipUnderConstrunction_1102/121485.html.

[21] JOHNSON J. Battery-powered, autonomous barges coming to European ports[EB/OL]. [2018-01-25]. https://www.imarest.org/themarineprofessional/item/3988-battery-powered-autonomous-barges-coming-to-european-ports.

[22] IMO. IMO takes first steps to address autonomous ships [EB/OL]. [2018-05-25]. http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/08-MSC-99-MASS-scoping.aspx.

[23] CCS 中国船级社. CCS 发布《智能船舶规范》[EB/OL]. [2015-12-02]. http://www.ccs.org.cn/ccswz/font/fontAction!article.do?articleId=ff808081511f069e01515b18eba4029c.

[24] 美通社. 无人货运船开发联盟在沪成立海航科技引领航运业变革 [EB/OL]. [2017-06-28]. https://www.prnasia.com/story/181504-1.shtml.

[25] 倪梦璟. 全球首艘智能船中國造智慧船舶時代到來 [EB/OL]. [2017-12-05]. http://news.wenweipo.com/2017/12/05/IN1712050048.htm.

[26] 佚名. 全球首艘无人货船“筋斗云”明年在中国下水 [J]. 珠江水运, 2017(23): 42–43.
ANONYM. The world’s first unmanned cargo ship “JINDOU Cloud” will be launched in China next year[J]. Pearl river water transport, 2017(23): 42–43.

[27] 中国船舶网. 中远海运首艘两万标箱集装箱船“中远海运白羊座”号首航比利时 [EB/OL]. [2018-03-02].

[28] Lloyd’s Register. First ever container ship to receive cyber enabled ship descriptive[EB/OL]. [2018-01-16]. https://www.lr.org/en/latest-news/first-ever-container-ship-to-receive-cyber-enabled-ship/.

[29] DIMECC. One sea ecosystem[EB/OL]. [2016-09-30]. https://www.dimecc.com/dimecc-services/one-sea-ecosystem/.

[30] Norwegian Forum for Autonomous Ships. Norwegian forum for autonomous ships (NFAS)[EB/OL]. [2016-10-04]. http://nfas.autonomous-ship.org/index-en.html.

[31] Norwegian Maritime Authority. World’s first test area for autonomous ships opened[EB/OL]. [2016-10-03]. https://www.sdir.no/en/news/news-from-the-nma/worlds-first-test-area-for-autonomous-ships-opened/.

[32] INAS. International network for autonomous ships[EB/OL]. [2017-10-30]. http://www.autonomous-ship.org/index.html.

[33] World Maritime News. Norway sets up second test area for unmanned ships[EB/OL]. [2017-10-02].

[34] World Maritime News. Norway opens new test area for autonomous ships[EB/OL]. [2017-12-07].

[35] NFAS. Test area Grenland[EB/OL]. [2017-12-22]. http://nfas.autonomous-ship.org/projects-en.html.

[36] 刘铁忠. 大型船舶在浅窄水域航行的风险控制 [J]. 中国远洋航务, 2016(3): 82–83.
LIU Tiezhong. Risk control of large ships sailing in shallow waters[J]. Marine China, 2016(3): 82–83.

[37] LIU Jialun, HEKKENBERG R. Sixty years of research on ship rudders: effects of design choices on rudder performance[J]. Ships and offshore structures, 2017, 12(4): 495–512.

[38] 严新平, 柳晨光. 智能航运系统的发展现状与趋势 [J]. 智能系统学报, 2016, 11(6): 807–817.
YAN Xinping, LIU Chenguang. Review and prospect for intelligent waterway transportation system[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2016, 11(6): 807–817.

[39] 马枫. 内河 AIS 船台设备的开发与应用研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
MA Feng. The research on the development and application of AIS equipment in in-land rivers[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.

[40] WOLF M T, ASSAD C, KUWATA Y, et al. 360-degree visual detection and target tracking on an autonomous surface vehicle[J]. Journal of field robotics, 2010, 27(6): 819–833.

[41] THAKUR A, SVEC P, GUPTA S K. GPU based generation of state transition models using simulations for unmanned surface vehicle trajectory planning[J]. Robotics and autonomous systems, 2012, 60(12): 1457–1471.

[42] ELKINS L, SELLERS D, MONACH W R. The Autonomous Maritime Navigation (AMN) project: field tests, autonomous and cooperative behaviors, data fusion,

sensors, and vehicles[J]. Journal of field robotics, 2010, 27(6): 790–818.

[43] MA Feng, WU Qing, YAN Xinping, et al. Classification of automatic radar plotting aid targets based on improved fuzzy c-means[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2015, 51: 180–195.

[44] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[C]//Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems. Lake Tahoe, USA, 2012: 1097–1105.

[45] 曾青山, 陈景锋, 黄加亮. 基于图像识别的智能船舶安检辅助系统构想 [J]. 中国海事, 2017(10): 35–37.
ZENG Qingshan, CHEN Jingfeng, HUANG Jialiang. The image of intelligent ship safety inspection assist system on the base of image spot[J]. China maritime safety, 2017(10): 35–37.

[46] 刘睿强. 深度学习算法在船舶电子海图识别中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39(4): 79–81.
LIU Ruiqiang. Application of depth learning algorithm in ship electronic chart recognition[J]. Ship science and technology, 2017, 39(4): 79–81.

[47] WAIBEL A. Modular construction of time-delay neural networks for speech recognition[M]. Cambridge, USA: MIT Press, 1989.

[48] PALAZ D, DOSS M M, COLLOBERT R. Analysis of CNN-based speech recognition system using raw speech as input[C]//Proceedings of the Interspeech 201516th Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2015: 11–15.

[49] RAVANELLI M. Deep learning for distant speech recognition[J]. arXiv: 1712.06086, 2017.

[50] 刘佩林, 张钰玲. 基于卷积神经网络的语音识别分析 [J]. 电脑迷, 2017(1): 120.
LIU Peilin, ZHANG Yuling. Speech recognition analysis based on convolutional neural network[J]. PC fan, 2017(1): 120.

[51] BUI V P, KIM Y B, CHOI Y W, et al. A study on automatic ship berthing system design[C]//Proceedings of 2009 International Conference on Networking, Sensing and Control. Okayama, Japan, 2009: 181–184.

[52] VAN BUI P, KIM Y B. Development of constrained control allocation for ship berthing by using autonomous tugboats[J]. International journal of control, automation and systems, 2011, 9(6): 1203–1208.

[53] BUI V P, JI S W, JANG J S, et al. Ship trajectory tracking in harbour area by using autonomous tugboats[J]. IFAC proceedings volumes, 2012, 45(13): 740–745.

[54] BUI V P, JI S W, CHOI K H, et al. Nonlinear observer and sliding mode control design for dynamic positioning of a surface vessel[C]//Proceedings of the 201212th International Conference on Control, Automation and Systems. JeJu Island, South Korea, 2012: 1900–1904.

[55] 严新平, 吴超, 马枫. 面向智能航行的货船“航行脑”概念设计 [J]. 中国航海, 2017, 40(4): 95–98, 136.
YAN Xinping, WU Chao, MA Feng. Conceptual design of navigation brain system for intelligent cargo ship[J]. Navigation of China, 2017, 40(4): 95–98, 136.

[56] 李瑞. 基于 DSP 和 GPRS 的无人船运动控制系统设计 [D]. 保定: 河北大学, 2016.
LI Rui. Design of unmanned ship motion control system based on DSP and GPRS[D]. Baoding: Hebei University, 2016.

[57] 李峰. 无人驾驶水样采集船关键技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
LI Feng. The key technology research of unmanned surface vehicle[D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[58] 沈航, 韦燕华, 陈超, 等. 无人船中控系统及远程监控系统的研究和设计 [J]. 机电工程技术, 2016(S2): 325–328.
SHEN Hang, WEI Yanhua, CHEN Chao, et al. Research and design of unmanned ship central control system and remote monitoring system[J]. Mechanical and electrical engineering technology, 2016(S2): 325–328.

[59] 江丽君, 邱铖铖, 郑卫刚. 基于互联网+的无人环保船舶系统设计与研究 [J]. 变频器世界, 2017(1): 96–97.
JIANG Lijun, QIU Chengcheng, ZHENG Weigang. A research and design of unmanned ship based on internet+ environmental protection system[J]. The world of inverters, 2017(1): 96–97.

[60] 崔亚妮, 任佳, 杜文才, 等. 多无人船通信网络拓扑优化控制算法 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33(12): 1639–1649.
CUI Yani, REN Jia, DUI Wencai, et al. Network topology optimization control algorithm for multiple unmanned surface vehicle[J]. Control theory and applications, 2016, 33(12): 1639–1649.

[61] FAN Ailong, YIN Qizhi, YAN Xinping, et al. Study of energy efficient navigation method for inland ship: a cruise ship case[C]//Proceedings of 2015 International Conference on Transportation Information and Safety.

Wuhan, China, 2015.

[62] United States Department of Defense. Unmanned systems integrated roadmap. FY2013-2038[R]. Washington, USA: Office of the Secretary of Defense, 2013.

作者简介：



吴青，女，1962 年生，教授，博士生导师，主要研究方向为水路交通安全与信息化。主持及参与国家、省部级重点基金项目 30 余项。曾获中国人民解放军科技进步三等奖、湖北省科技进步二等奖、湖北省教学成果一等奖、国家级教学成果二等奖。发表学术论文 50 余篇。



王乐，女，1990 年生，博士研究生，主要研究方向为智能船舶控制。



刘佳仑,男,1987 年生,副研究员,博士,主要研究方向为船舶操纵性预测与船舶自主运动控制。

2019 年第四届控制与机器人工程国际会议（ICCRE 2019）
2019 The 4th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE 2019)

Welcome to the official website of the 4th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE 2019). The conference will be held in Nanjing, China during April 20—23, 2019. The aim as well as objective of ICCRE 2019 is to present the latest research and results of scientists related to Control and Robotics Engineering topics. ICCRE2019 is Sponsored by Hohai University, China and Jiangsu Key Laboratory of Power Transmission and Distribution Equipment Technology.

An engineering discipline that is on the rise, robotics engineering is a breeding ground for creativity and innovation from people with a background in mechanical, electrical, or software engineering. Robotics engineers may work in the agricultural, military, medical, and manufacturing industries, among others, conceiving of new uses for robots, designing improved robots for existing systems, or repairing and maintaining industrial robots, says the Princeton Review. Because robots are already widely used (on production lines, for example), hands-on technical jobs can easily be found in the robotics engineering field, but there are also plenty of opportunities to take on more inventive roles in experimental arenas.

会议网站：www.iccre.org

会议日期：2019 年 4 月 20—23 日

会议地点：中国南京