

引用格式: 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.

智能船舶远程驾驶控制技术 研究现状与趋势



扫码阅读全文

王远渊^{1,2}, 刘佳仑^{*1,3}, 马枫^{1,3}, 王兴平², 严新平^{1,3}

1 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063

2 珠海云航智能技术有限公司 研发部, 广东 珠海 519080

3 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063

摘要: 阐述智能船舶及其远程驾驶的发展背景。基于目前大多数无人船艇远程控制存在的问题, 在分析智能船舶远程驾驶需求和场景的基础上, 提出基于人机共融理念的智能船舶远程驾驶框架。针对不同的远程驾驶模式, 提出技术等级和相关的关键技术。通过借鉴交叉领域网络控制系统的发展成果, 指出网络时延补偿、网络丢包补偿、安全应急、运动模型应用、运动控制、自主决策等关键技术对于实现智能船舶远程驾驶控制的重要性, 阐述相关关键技术的发展现状。结合航运的运维特点, 针对目前已逐步投入行业应用的船舶感知技术提出有助于实现货船远程驾驶的思考。

关键词: 智能船舶; 远程驾驶; 人机共融; 船舶网络控制系统

中图分类号: U662.9

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01939

Review and prospect of remote control intelligent ships

WANG Yuanyuan^{1,2}, LIU Jialun^{*1,3}, MA Feng^{1,3}, WANG Xingping², YAN Xinping^{1,3}

1 Intelligent Transport System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2 Research and Development Department, iCloudNav, Zhuhai 519080, China

3 National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China

Abstract: This paper introduces the development background of intelligent ships and their remote control. Based on introducing current applications of the remote control unmanned ship and analyzing the demands and scenarios of remote control cargo ships, this paper proposes a remote control framework for cargo ships based on man-machine integration. The corresponding technical levels and related key technologies of different remote control patterns are expounded upon. A review of the importance and development status of key technologies for the remote control of cargo ships is then conducted with reference to major ship network control system achievements. Moreover, regarding the operation and maintenance characteristics of shipping, three considerations are proposed for utilizing perception technologies in ways that can be beneficial for realizing the remote control of cargo ships.

Key words: intelligent ships; remote control; man-machine integration; ship network control system

收稿日期: 2020-04-29

修回日期: 2020-08-31

网络首发时间: 2021-01-20 09:48

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1601503, 2018YFB1601505); 工信部高技术船舶科研项目(2018473); 国家自然科学基金资助项目(51709217)

作者简介: 王远渊, 男, 1988年生, 博士。

刘佳仑, 男, 1987年生, 博士, 副研究员。

马枫, 男, 1985年生, 博士, 副研究员, 硕士生导师。

王兴平, 男, 1980年生, 硕士。

严新平, 男, 1959年生, 博士, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。

*通信作者: 刘佳仑

0 引言

随着人工智能技术的发展,融合了计算机科学、自动化技术和通信技术的智能运载工具成为高新技术领域的研究重点,无人机、无人车、无人船等新型运载工具应运而生。其中,无人船作为水面智能运载工具拓展了船舶航行的场景,为操作者和管理者提供了更便捷、高效和自由的操作选择,在测绘、环保、安防、军事等领域的应用发展迅猛。

近年来,无人水面船舶的概念正在与船舶货运相结合,航运业希望通过构建面向行业需求的智能船舶,达成智能化和无人化的目标,进而实现:

1) 减少配员。国际航运咨询机构 Moore Stephen 最新发布的航运调查报告显示,标准配员的货船每天需支付的人员成本达 5 000 美元,占总运营成本的 44%^[1],且人员成本以每年 3% 的幅度上涨。随着船舶自动化技术的发展、电子海图显示与信息系统(electronic chart display and information system, ECDIS)和无人机舱的普及,为实现船舶减员、提升运营收益提供了可能性,远洋货轮船员的现场事务正在逐步减少,仅需完成日常清点、安全管理和避碰干预等工作。

2) 提高安全性。虽然船舶配备了雷达、自动识别系统(automatic identification system, AIS)和电子海图(electronic navigation chart, ENC)等感知设备,但远洋航行的值守工作枯燥,极易造成驾驶员的视觉疲劳。数据显示,80% 的船舶安全事故是人为因素造成的。而船舶的智能化意味着人员疲劳和疏忽将不复存在^[1]。船舶的智能化将为安全问题的解决提供可靠的保障。

3) 提高载运效力。运输船舶上与船员生活相关的舱位占据了很大的比例。减少配员,逐步实现无人驾驶,将缩减甚至取消船舶桥楼、生活区和救生设备,增加货运舱容,从而增加载运效力。全球知名船舶设备供应商罗尔斯·罗伊斯公司的研究指出,采用无人驾驶技术的货船运行效力将有望提高 20%。

4) 降低排放。全球碳排放机制、船舶能效设计指数(EEDI)和船舶营运能效指数(EEOI)的应用正在有序推进^[2]。我国 2013 年印发的《大气污染防治行动计划》明确提出了强化移动源污染防治,越来越严格的排放要求迫使船舶做出改进,以降低单位运载量的能耗。智能船舶“无人化”带来的载运效力提升将极大地促进能效政策的

实施。

由于船舶的运力大、成本低,船舶运输承担了 95% 的原油运输和 99% 的铁矿石运输,因而其在货物运输及民生贸易中起到了关键的作用。智能船舶作为智能航运发展范畴中的重要部分,将革新传统船舶的驾驶和运载方式,使传统船舶的载运变得更为灵活,进而借助技术升级使船舶在运载过程中减少船员配备、增加运载效力、降低污染排放,最终巩固航运在运输领域的地位,满足航运业安全、节能、增效等方面的需求。

本文将针对货运船舶远程驾驶的需求和场景,提出参考人机共融理念的远程驾驶控制框架和关键技术,结合网络控制系统的研究成果,阐述关键技术的发展状况,并提出有助于实现货船远程驾驶的几点思考。

1 发展背景

随着智能船舶需求的不断明确和技术的持续发展,国际组织、国家和地区性质的海事监管机构、港航企业、高校,以及新型信息产业团队以不同的角色参与到了智能船舶的研发中,实现了跨领域的优势整合。广泛的协作在法规制定、技术研发、应用示范等方面取得了显著的成效。

1.1 智能船舶及其远程驾驶

2012 年,欧盟联合启动了“基于网络智能的无人航海”(maritime unmanned navigation through intelligence in networks, MUNIN)项目,旨在实现自主船舶和无人船舶技术,验证自主船舶概念。该项目全面梳理了智能船舶的整体结构和安全性^[3-5]、感知技术^[6-7]、远程驾驶技术^[8]、环境因素风险^[9-10]。2015 年,芬兰国家技术创新局联合挪威船级社、芬兰阿尔托大学、罗尔斯·罗伊斯公司等多家单位联合启动了“高级自主海上应用”(advanced autonomous waterborne applications, AAWA)项目,计划用 5~8 年的时间设计建造出可以应用于远洋运输的无人船,使之具备远程驾驶、自动驾驶的能力,最终实现船舶的全自主航行^[11]。

国际海事组织第 99 次安全会议签署了针对智能自主船舶(maritime autonomous surface ship, MASS)的法规框架,用以提升其应对安全、安保和环境问题的能力,并对 MASS 的自主等级进行了初步的定义。

考虑到智能船舶技术的不断发展和迭代,中国船级社于 2019 年 12 月 4 日发布了《智能船舶规范(2020)》^[12]。该规范在《智能船舶规范(2015)》

的基础上纳入了国内外智能船舶技术发展和应用的新成果,按照局部应用到全船整体应用、辅助决策到完全自主的发展方向,细化了远程控制操作和自主操作功能要求,对不同的场景和船员在船情况进行了详细的规范,形成了完整的智能船舶规范框架及相应的功能和技术要求。

针对不同等级的自主化水平,船舶受控的程度也有所区别。如图1所示,随着船舶自主等级的提升,船舶操作人员和管理人员对船舶控制的参与和相关的控制力逐渐递减。灰色部分表明了该阶段船舶的控制必须具备以操作和管理人员为核心的安全保障。在全自主航行阶段,人员将失去对船舶驾驶的参与和控制力。

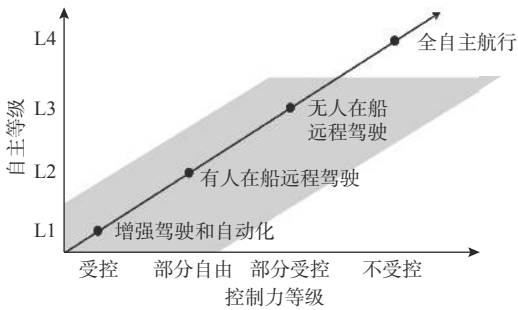


图1 船舶自主化等级带来的控制力变化^[9]

Fig. 1 The change of control force brought by the ship's autonomous level

船舶的综合船桥、自动化机舱、自动化操纵设备等系统为智能航行提供了基础,但是船舶全自主航行的决策方案和系统并不成熟,很难应对航道狭窄弯曲、感潮河段、船舶交通拥挤、过桥频繁等通航问题。因此,考虑到现有的自主航行系统无法保障智能船舶在所有复杂环境下安全航行,远程驾驶是实现船舶无人化的必要技术支持和手段。

1.2 远程驾驶实践

国际上,各大船舶智能航行团队均将远程驾驶作为智能船舶发展的重要部分,并进行了初步的研发和工程实践。最新成果包括:2017年9月,瓦锡兰公司率先实现了船舶的远程驾驶,通过使用常规卫星通信,在美国加州圣地亚哥控制位于8 000 km外欧洲北海海域的Highland Chief-tain轮进行了4 h的远程遥控船舶操作测试,完成了电脑数字输入和手动操纵杆操作,实现了动力定位^[13](如图2(a)所示)。2018年12月,ABB公司与芬兰赫尔辛基运输厅合作,在Suomenlinna II轮渡上实现了远程遥控试验。随后,罗尔斯·罗伊斯公司和Finferries公司合作,实现了拖轮和渡轮的远程控制。2019年9月,挪威船级社与自动化系

统供应商Høglund等合作,在Fannefjord号渡轮上实现了自动系统和轮机设备的远程控制。该系统的总体目标是提供操作优化和提升效率,同时确保安全水平优于或等同于当前的人工操作水平^[14](如图2(b)所示)。2019年12月,韩国三星重工在大田控制中心对位于250 km外的一艘缩比模型船进行了远程驾驶,演示验证了基于海上避碰规则的自主航行技术和智能航线优化技术。



(a) 瓦锡兰公司开展的远程驾驶^[13]



(b) 罗尔斯·罗伊斯公司开展的远程驾驶^[14]

图2 国外团队的远程驾驶实践

Fig. 2 Remote control practice of foreign teams

我国智能船舶研发团队在远程驾驶实践方面也取得了一些进展。2019年5月,智慧航海(青岛)科技有限公司在位于青岛蓝谷的智能航运技术创新与综合实验基地,演示了“智腾”号的远程驾驶功能。2019年10月,武汉理工大学国家水运安全工程技术研究中心自主水路交通系统团队赴瓦赫宁根,在荷兰海事研究所等单位代表的见证下,现场展示了基于“航行脑系统”的远程驾驶系统,成功从荷兰瓦赫宁根远程控制了位于中国武汉市汤逊湖的7 m长自航模型船^[15],两地相距约8 500 km。2019年11月,珠海云航智能技术有限公司在13 m长的“筋斗云0号”上测试了远程驾驶系统,在船长的指挥下于岸基控制中心完成了船舶的远程离泊和桥区航行。

2 基于人机共融的船舶远程驾驶

2.1 无人船艇远程控制现状

目前,已投入应用的无人艇在智能航行领域

多采用远程遥控和自主航行两种模式。远程遥控用于无人艇进出码头、航行于通航密集区域时, 自主航行模式则用于通航环境简单条件下的循迹航行和紧急避障。公开资料显示, 无人艇的远程遥控多通过自建的 LTE 网络, 采取远程操作人员实时操作的方式, 如图 3 所示。

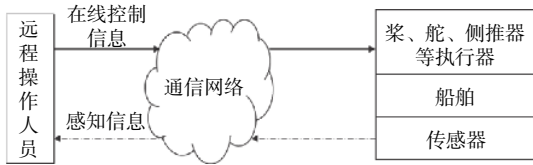


图 3 无人艇远程遥控的直接结构

Fig. 3 Direct structure of the unmanned surface vessel's remote control

然而, 对于货船, 其航行范围较大, 不可能使用专网进行点对点通信, 使用公网通信势必带来通信不可控的风险。此外, 由于货船的远程控制多应用于航行在港区、通航密集的航道、分道通航等特殊区域, 船舶在操纵过程中需要频繁进行转向、保向、保速、加减速操作, 例如采用远程遥控的直接结构, 船舶在通信时延等问题的影响下航行稳定性将极度不可控。

2.2 基于人机共融的船舶远程驾驶框架

人机共融就是人与机器人从单一的人类控制机器人, 转变为人类与机器人在同一空间共存, 既能紧密协调工作、自主实现自身技能又能保证安全而不至于担心机器人失控, 这是一种更加自然的作业状态。人机共融的理念和技术促使人与机器人在协作领域内进行交互和协同工作。当前, 相关应用已经从基础的机械加工和协助, 发展成通过相互协作完成不同环境下的复杂任务。人机共融关键技术包括结构设计与动力学设计、共融机器人的环境主动感知与自然交互、智能控制和决策方法、体系构建和操作系统完善等方面^[16]。在船舶领域, 船体和设备的设计已经较为成熟, 船舶的感知系统已广泛应用且日趋成熟。本文将重点对实现船舶远程驾驶的系统网络问题和控制决策关键技术问题进行分析 and 综述。

参考人机共融的概念, 为了实现智能远程驾驶, 需要介入控制器, 构建船舶网络控制系统 (ship networked control system, SNCS)。由于传统的船舶操纵和控制多以船舶自身为核心, 所有的操纵和控制行为都发生在本地, 系统内部通信的时延和操纵设备的反应时延很短; 内部网络和物理连接简单, 几乎不会产生感知、控制信息的丢失。关于船舶控制时延的研究多针对船舶惯性带来的运动响应时延, 而非系统控制过程的

时延^[17]。此外, 瓦锡兰、罗尔斯·罗伊斯等公司的团队对实现船舶远程驾驶的细节采取了技术保密。为数不多的基于网络控制的船舶控制文献^[18-19]是将网络时延影响作为未知的非线性函数处理, 采用改进的鲁棒自适应控制器, 借助神经网络进行逼近, 但缺乏对网络前馈和反馈链路上时延的分析和量化, 在神经网络进行逼近的过程中无法快速应对不确定性数量级跃迁带来的逼近精度抖动。因此, 并无太多针对船舶远程操纵和控制的相关研究。

相较于船舶领域, 网络控制系统 (networked control system, NCS) 的研究可以追溯到 20 世纪 80 年代, Halevi 等^[20]首次将控制系统和通信网络结合在一起研究, 探讨了具有随机时延系统的建模问题。这方面的研究在医疗机器人、服务机器人、水下机器人和无人机等相关领域更为广泛^[21]。其具备实现远程控制的能力, 可实现设备的资源共享, 操作和维护简便, 已成为了控制界的研究热点^[22]。

SNCS 分为闭环结构和开环结构。其中:

1) 闭环 SNCS 系统一般由控制端、通信网络和被控对象组成。其工作原理为: 传感器通过采样卡 (data acquisition, DAQ) 将被控对象的状态和姿态输出离散化作为感知信息, 然后通过通信网络传输至控制端, 控制端所计算的控制信号通过通信网络传输至被控对象, 最后通过零阶保持函数产生连续的时序控制信号, 通过执行器控制被控对象。其控制逻辑如图 4 所示。



图 4 船舶网络控制系统控制逻辑 (闭环结构)

Fig. 4 Control framework of SNCS (closed-loop structure)

2) 开环 SNCS 结构是将控制器放在船舶现场, 现场控制器直接对被控对象进行完全控制, 远程控制端仅作为监督方, 在必要的时候进行决策干预, 如图 5 所示。这种模式的特点是下放更多的自主权到船舶自身。但是采用这种方式时, 整个控制过程中的通信仅有前馈信息, 系统响应较慢, 远程控制端在一定程度上容易被隔离在闭环控制外, 在紧急情况下容易失去船舶的控制权, 使船舶处于不可控状态。因而, 在研究过程中需要综合对比两种结构的优劣, 根据应用场景的区别, 通过改变控制器的部署地点, 寻求最佳的远程驾驶控制效果。

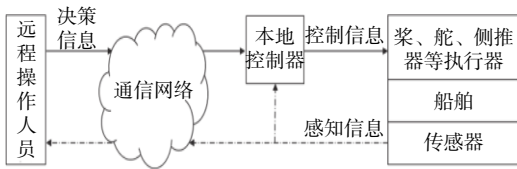


图5 船舶网络控制系统控制逻辑（开环结构）

Fig. 5 Control framework of SNCS (open-loop structure)

2.3 基于人机共融的船舶远程驾驶等级及关键技术

智能船舶远程驾驶作为应急操作手段,在智能系统出现异常或通航环境和航行任务复杂度超越系统智能度的情况下进行人工介入;由于货船的航行受通航规则和进港指南的约束,在特定的区域需要引航员的辅助,通过远程驾驶可以为引航提供条件;还可以为海上救援等精细化操作提供基础;也可以作为船舶航行时航次计划变更的发布端口,以及船舶自主航行出现背离法律法规和危害安全等风险时的最终决策端口。

船舶远程驾驶的实现不可避免地将通过通信网络进行数据交换。虽然高速以太网技术、现场总线技术、信息压缩技术的发展为NCS的可靠性和开放性提供了保障,但是受限于通信网络的带宽、通信网络设备软硬件的稳定性、随机变化的通信网络负载和传输机制,SNCS在船岸协同的通信过程中将不可避免地遇到以下3个问题:

1) 时延问题。感知和控制信息在通信网络中传输时的路由机制使信息的传输路径不确定,而网络复杂情况和该路通信的数据包通路大小也受通信协议影响不尽相同,这些影响的时变性使网络时延产生具有不确定性。该不确定性同时将随着通信距离的加大进一步复杂和难以控制^[23-24]。

2) 丢包问题。因为网络信号不绝对稳定、网络节点的缓冲区容量和路由器处理能力有限,加之网络负载状况是不确定的,所以通信网络工作时会引起缓冲区溢出和路由器拥塞等问题,这些问题会导致信息传输出现数据包随机和突发的丢失^[25-26]。

3) 通信网络断路。船-岸之间的通信链路在遭遇由通信设备软硬件问题或赛博(cyber)安全问题导致的通信网络断路时,势必会引起船舶运动控制信号的缺失,使船舶的运动处于完全不可控的状态^[4]。

以上船舶远程驾驶通信网络问题会给远程驾驶相关的人员、船舶、货物和环境安全带来极大的风险和挑战,因此需要应用某些关键技术和补充适当的安全机制予以应对。

在实现船舶远程驾驶的过程中,运动控制、运动建模和自主决策同样重要;对于航行在限制水域或靠离泊的船舶,更是如此。

1) 运动控制。船舶运动具有很强的惯性、时滞性和非线性,操纵结构体现为欠驱动性,设备的响应时间长,且受风浪流等环境影响后的运动更为复杂,因此控制船舶克服自身的操纵性不足,应对不确定的环境干扰,使船舶稳定地执行航次计划的难度很大^[27-28]。

2) 运动建模。船舶的运动模型既是船舶远程驾驶网络丢包补偿的基础,又是很多智能控制器构建的基础。船舶的水动力有很强的非线性特征,船体、桨、舵之间响应又有很强的耦合,风、浪、流等环境干扰的影响使船舶运动模型的构建更为复杂。

3) 自主决策。船舶远程驾驶给船舶的驾驶模式带来了无人化的风险和挑战,处于远程驾驶模式的船舶应具备适当的自主决策能力,以应对复杂的通航环境,并解决各种不确定因素给船舶带来的风险。

智能感知技术是船舶远程驾驶技术实现的基础。目前,船舶的感知技术已趋于成熟,融合雷达、AIS、电子海图、测深仪等设备的综合船桥系统可以为智能船舶提供航行必要的感知信息,相关的算法也已在实船使用过程中证明了可靠性。考虑到新型船舶感知设备和技术的发展状况,后文将针对几项有应用空间的感知设备和技术,讨论其应用于船舶远程驾驶的可能性。

参考MUNIN项目^[29]对远程控制的界定,远程驾驶需要在有效通信的基础上反馈感知信息,作为远程控制中心人员的决策依据,在考虑人机共融的理念上,远程驾驶技术可分为以下级别:

1) 远程实时驾驶(RL1)——船员在岸端通过通信网络发布操纵信号,实现对船舶桨、舵等设备的控制,实现船舶的远程操纵;

2) 远程自动驾驶(RL2)——船员在岸端发布操纵目标,借助控制器生成船舶桨、舵等设备的控制信号,实现船舶的远程自动驾驶操纵;

3) 远程自动驾驶(RL3)——船员在岸端发布航次计划或变更航次计划至船端,借助控制器和智能决策生成船舶桨、舵等设备的控制信号,实现船舶的远程自动驾驶操纵。

基于以上分析,船舶远程驾驶的实现和各关键技术间的关系如图6所示。

由图6可知:

1) 远程驾驶可以通过通信链路直接发布船舶桨、舵等设备的控制信号实现RL1级远程驾驶。

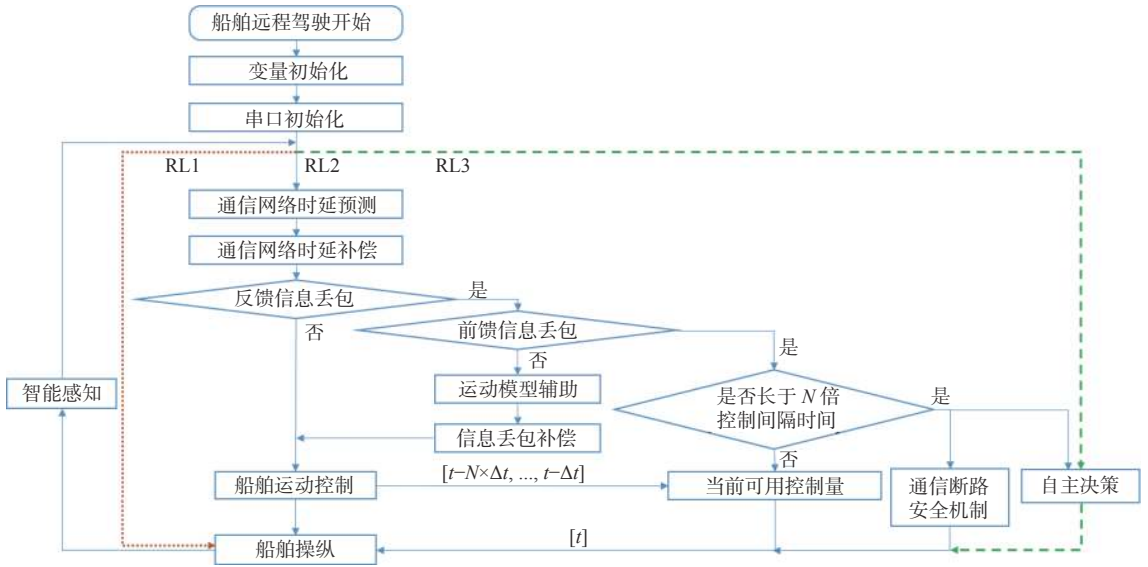


图 6 船舶远程驾驶技术等级和实现流程

Fig. 6 Technical level and operational process of the ship's remote control

2) 为了消除通信网络带来的随机时延, 通过引入时延预测器和补偿器消除船舶控制中的不稳定性, 保证安全控制船舶完成进出港、靠离泊或密集水域的频繁转向、保向、保速和加减速等复杂操纵; 当系统的反馈感知信息传输通道发生信息丢包时, 激活丢包补偿机制, 利用辅助模型使用上一刻的状态变量进行状态估计、替代状态反馈变量, 使控制器可以正常提供当前的控制量, 实现 RL2 级远程自动驾驶。

3) 在通信网络前馈和反馈通路均无法保证安全的状况下, 在 N 倍控制间隔时间内保持使用上一刻可用控制信号, 超过安全阈值后切换至船舶安全机制或自主决策模式, 以保障船舶、货物和环境的安全; 同时, 船端的自主决策功能可以实现基于岸端的航次计划发布或变更, 完成船舶规定阶段内或紧急状态下的自主决策, 最终实现 RL3 级远程自动驾驶。

3 关键技术研究现状

近年来, 研究人员在 NCS 领域取得了一系列进展。Tipsuwan 等^[30]和 Hesperha 等^[31]对网络控制时延、信息丢包等方面的研究成果进行了综述。芮万智等^[32]从控制与调度协同、错误识别与系统容错方面对 NCS 的研究进行了综述。You 等^[33]从信息理论、网络理论、采样理论等方面进行了分析总结。着眼于控制过程的不确定性和时变随机性, 以及由此带来的安全风险, 学者们开展了大量的研究工作。同时, 与船舶远程驾驶相关的运动建模、运动控制和自主决策技术也有了大量的研究成果。

3.1 网络问题

3.1.1 网络时延预测和补偿

目前, 针对网络时延的补偿控制策略大致分为 3 个方向: 一是优化网络通信协议^[34]和传输机制^[35], 二是增加被控系统的自主性, 三是优化 NCS 的控制方案。从效果看, 优化网络通信协议和传输机制只能在很小程度上降低时延, 但是对改善时延带来的系统响应抖动效果不够明显。通过增加被控系统的自主性可以减少对被控系统控制的频率, 从而降低网络控制系统时延的影响, 但是系统的实时性和透明度都会降低。尤其是船舶驾驶、操作人员在频繁改变船舶航向和航线的操作过程中的参与与灵活性大大降低, 从而带来船舶控制的不确定性。

相比之下, 通过优化控制策略可以在进行控制器设计及系统分析过程中获取实时的前馈和反馈信息, 及时有效地完成 NCS 的闭环控制, 因而对时延补偿和控制镇定具有很好的工程实践意义。控制算法中时延的不确定性建模对时延补偿和后续的控制镇定尤为重要。Zhang 等^[36]、Shi 等^[37]、邱丽等^[38]和李歆^[39]采用马尔可夫方法, 对 NCS 系统的时延转换为跳变系统进行了分析和预测。Zhou 等^[40]和 Yang 等^[41]采用伯努利分布的随机二进制切换序列, 在无需知道 NCS 系统时延概率分布的前提下将其转换为非线性离散系统进行分析。但是, 以上方法的运算结果极度依赖可信度的整定, 且方法较为复杂, 目前还处于理论和仿真阶段。出于工程实践的考虑, 王随平等^[42]和刘艳红等^[43]使用基于最速下降法的可循环最小均方差(LMS)算法预测系统时延, 解决了不确定

时延影响下控制系统不稳定的情况。

在镇定控制器设计方面, Xi等^[44]和刘馨^[45]提出了基于事件的控制方法, 通过将受控系统的状态作为参变量, 将控制量的生成过程变为基于此控制方法的参变量, 将系统的控制变成了“Move and Wait”事件驱动型。但是该方法控制效率低, 实时性差。Xu等^[46]和Zhao等^[47]将NCS系统建模为随机系统, 利用随机系统理论设计控制器, 保障系统控制的稳定性。但是, 此方法的假设前提是时延需满足特殊的分布, 对随机性不符合确定分布网络的控制效果有待提升。

预测控制方法处理NCS系统时延问题的效果较好。其基本思路是: 传感器通过网络反馈给控制器过往一段时间的感知信息, 对被控对象现在和将来一段时间的目标状态基于控制量进行预估, 将相应时间序列下的信号用于被控对象。Hu等^[48]和Zhao等^[49]使用自回归积分滑动平均模型, 提出了网络预测控制方法, 对网络回路的双向时延进行测量和补偿, 但广域网里很难做到时钟同步、进行双向时延测量。Peng等^[50]和He等^[51]通过构建Lyapunov-Krasovskii函数构建补偿器, 完成了对NCS系统时延的有效补偿和镇定控制。Künhe等^[52]和唐祎^[53]通过引入被控机器人的线性和非线性模型完成了对机器人的远程轨迹跟踪控制。但是, 基于模型的预测算法(model predictive control, MPC)存在控制效果严重依赖模型准确度的问题, 在船舶受到不确定的外界环境干扰的情况下控制效果有待提升。此外, 还有基于模糊控制^[54]和通信干扰观测器^[55]的NCS设计, 但这些方法多停留在理论阶段, 没有进行实际的工程实践。基于工程实践简便可靠的原则, Chen等^[56]和Lai等^[57]结合自适应Smith-神经网络补偿控制算法对控制进行补偿, 解决了受不确定时延影响的控制系统不稳定问题。

3.1.2 网络丢包预测和补偿

针对NCS系统中反馈信息丢包的补偿问题, Ling等^[58]将丢包系统的输出转化成概率函数, 通过最小能量谱指标给出了丢包的补偿方案。Li等^[59]和Xue等^[60]参考历史状态信息和控制信息, 借助预测机制完成了对丢包的预测补偿。

另一种方法是随机最优控制方法。Xiong等^[61]和Wu等^[62]提出NCS反馈链路的丢包现象满足马尔科夫链模式, 并给出了系统随机稳定的充分条件, 提出了用于补偿信息丢包问题的控制器设计方案。Lu等^[63]和Li等^[64]将丢包问题建模为伯努利分布的随机过程, 针对不确定性期望提出了基于观测器的反馈控制方法。

目前, 在应用方面较为有效的方法是辅助模

型补偿控制法。这是一种结合了开环控制和闭环控制的switch控制方法^[65-66]。其基本思路是当感知信息可以在通信网络中正常传输时直接将其作为控制器的输入信号, 这种模式为传统的闭环控制; 当感知信息在通信网络中的传输诱导了信息的丢包和丢帧, 则基于被控对象的数学模型和前一时刻的感知信息预测此刻被控对象的状态, 并将其作为控制器的输入^[67]。Mastellone等^[68]参考被控制对象的模型, 针对具有马尔科夫随机非离散特征的丢包给出了系统均方稳定的判据。在海事领域, 该技术已应用在了自主式水下机器人(AUV)、水下遥控机器人(ROV)和水下滑翔机等设备的定位和控制方面^[69-70]。

3.1.3 船舶远程驾驶安全

船舶的远程驾驶安全是保证人员安全、船舶安全、货物安全和环境安全的前提。Burmeister等^[4]指出船舶远程驾驶的发展会由于驾驶模式变化带来新的风险和挑战, 并阐述了船舶遇到远程驾驶异常时需要实现故障自趋安全(Fail-to-safe)程序, 以应对威胁船舶航行安全的状况。Rødseth等^[5]提出, 智能船舶会由于无人化带来新的问题, 尤其是船舶航行过程中容易受到不良通信的影响, 船舶应当具备适当的自主能力, 以应对外界不确定性或恶意干扰带来的危害。

此外, 智能船舶的远程驾驶应该满足cyber安全的规范和要求。挪威船级社提出远程驾驶的船舶需要在通信链路中考虑网络攻击防护措施, 确保远程控制中心对船舶的控制^[71]。劳氏船级社从系统和人为两个角度出发, 提出在航船舶的网络和计算机系统所包含的通信导航设备应当有足够的措施确保信息安全^[72]。世界航运协会等组织细化了cyber安全方面的行为规范, 从识别、预防、发现风险, 风险反应和风险后的恢复等角度提出了明确的标准和流程^[73]。

3.2 船舶运动控制及自主航行决策

3.2.1 船舶运动建模

船舶运动建模对研究船舶的远程驾驶至关重要, 不仅可以在远程驾驶中为网络信息丢包补偿提供基础, 而且也是某些智能运动控制器构建的基础, 同时可以作为仿真平台在安全和经济的基础上对船舶运动进行全方位仿真测试。

船舶运动模型分为线性整体响应模型和非线性分离模型。线性整体响应模型简单、易于辨识, 但无法明确船体、舵和螺旋桨之间的关系, 无法有效累加外界环境因素, 对船舶低速运动的反应误差较大^[74]。非线性分离模型即MMG模型,

将其船体、舵和桨视为独立的部分,通过研究各部分单独的水动力特性和相互之间的耦合关系,借助牛顿-欧拉定理,完成船舶运动和动力建模。Mccue^[75]和 Fossen^[76]将外界环境因素累加在船舶六自由度运动中,通过构建非线性运动模型研究了船舶在各种工况和环境因素下的运动响应。

传统的船舶建模使用平面运动机构(planar motion mechanism, PMM)方法或水池拖曳试验,配合机理建模来构建船舶运动数学模型,但如果实验船舶尺度过大,则无可用的实验条件进行该测试。计算流体动力学(CFD)软件可以为船舶建模提供试验数据,其缺点是依赖大量的设备运算,需要大量的时间绘制网格和进行拟合试验。此外,可以根据 ITTC 建议的回转试验和 Z 形操纵试验要求,进行船舶开环试验,将试验结果作为系统识别算法的输入,用于计算船舶相应的水动力参数^[77],从而构建船舶非线性运动模型。

对于系统识别,Nguyen^[78-79]综合使用循环最小二乘法(recursive least square, RLS),提供在线识别的历史追踪信息,实现系统识别分析的自适应化,最终可以构建适用于船舶的运动模型,为智能船舶的自主航行仿真试验和实船试验提供操纵性预报。Pereira 等^[80]使用卡尔曼滤波器对 ROV 的数学模型进行了识别,并对实验数据和仿真运动响应进行了比较,验证了该方法的有效性。Tran 等^[81]使用序列二次规划法(sequential quadratic programming, SQP)和 BFGS 算法(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)对一艘 19 万 t 的油船进行了水动力参数的识别和运动建模。Moreno-Salinas 等^[82]使用支持向量机对实验数据进行处理,构建了二阶船舶运动模型。

3.2.2 船舶运动控制

船舶的动力驱动结构有很强的欠驱动性,各操纵设备有特殊的约束,且易受环境干扰,船舶运动表现为大惯性、长时滞和高非线性,因此船舶运动控制一直是船舶自动化领域的研究热点。上世纪 80 年代,随着微型计算机技术的发展,传统 PID 控制器在船舶运动控制中得到了广泛应用。针对该类控制器的参数为确定值,其控制效果无法适用更多范围的问题,增益调参法(gain scheduling approach)^[83]被应用到了自动舵系统中,然而该类控制方法也无法满足船舶所遇到的复杂环境带来的多种不确定性干扰^[84-85]。

为了解决传统控制方法无法很好处理不确定性的问题,自整定 PID 方法^[86-87]、模型预测自适应算法^[88-89]、线性二次高斯算法^[90]、Batch 自适应算法^[91]等控制方法均被应用于船舶控制中,以补偿环境

干扰和减少操纵难度。随着现代控制理论的发展,滑模控制^[92]、模糊控制^[93-94]、遗传算法^[95-96]、反步算法^[84, 97-99]、神经网络^[27, 28]等智能算法在船舶运动控制中得到了很好的应用。

3.2.3 船舶自主决策

智能船舶,尤其是智能货运船舶会航行在广阔的水域,其航行和避碰决策应当受到《国际海上避碰规则》(COLREG)的约束。Lee 等^[100]结合模糊推理方法,采用 Astar 搜索算法实现了避碰动作的规划。Benjamin 等^[101]使用基于行为的多目标优化方法,将规则转化为行为,已初步应用在了相关领域。针对 COLREG 及速度障碍约束,Matthies 等^[102]提出了基于速度障碍的方法,水面船舶试验结果表明,该方法有很好的计算效率。Hu 等^[103]基于风险意识的判别使用多目标优化方法为船舶提供全局和局部路径规划,实现了船舶航路点之间的安全航行,既避免了碰撞又满足 COLREG 规范要求。Lee 等^[104]对人工势场进行改进,采用模糊推理的方法实现了路径的生成和跟踪,以及典型会遇情况下满足规则的避碰。Cheon 等^[105]使用 8 m 长的无人船,采用可变动空间搜索和模糊推理法生成最优路线,进行了 5 艘船舶在复杂航行环境下的避碰试验,试验结果表明船舶采取和执行了正确的避碰决策,实现了基于 COLREG 的避碰。

4 智能感知技术应用于船舶远程驾驶的思考

近年来,船舶的感知技术逐渐成熟,激光雷达、机器视觉等技术的应用极大提高了船舶的态势感知能力;以“电子航海”(e-Navigation)为代表的海事信息系统也为船舶感知航路信息、气象信息等带来了便利;数字孪生技术在海事领域的应用为突破地理限制带来了可能性。融合和应用最新的感知技术将在很大程度上为船舶实现远程驾驶提供保障。

4.1 航行态势的智能感知

船舶的信息感知是指船舶可以借助信息网络、传感器和信息处理器获取船舶自身的姿态、状态及航行环境信息。船舶的航行环境包括对船舶航行安全存在危害的它船和碍航物信息。在传统有人值守驾驶的船舶上,船员主要依靠雷达、AIS 和电子海图的信息,对于近距离的它船和碍航物借助船员的瞭望,最终依靠良好船艺对船舶的安全航行进行决策。船舶的远程驾驶会将船员

位置从船舶移至岸端,但是雷达在近距离范围内存在探测盲区,AIS设备被动接收的信息更新速度慢,且考虑到很多小型船舶没有安装AIS,这些问题导致传统船舶对航行态势的感知存在盲区。为保证船舶的航行安全,可以借助多源传感器融合技术对船舶的航行态势探测完成全覆盖:近距离上,将激光雷达信息作为观测值,视觉设备信息作为预测值,借助卡尔曼滤波器等预测技术,

配合AIS接收到的它船位置信息进行标定,实现近距离物标的感知^[106],如图7所示;中远距离上,将AIS数据作为观测值,雷达信息作为预测值,实现通航态势的感知。最终通过将不同采样时间的感知信息融合,去除信息间的冗余和偏差,实现“雷达-AIS-视觉传感器-激光雷达”覆盖远、中、近距离的信息融合,将感知的通航态势传输至岸端控制中心,为船舶远程驾驶提供感知判据。



图7 日本三井和古野公司合作开发的视觉和AIS信息感知增强系统^[106]

Fig. 7 Sensing awareness enhanced system proposed by MOL and Furuno using camera and AIS

4.2 海事信息的智能应用

传统船舶大多借助国际航行警告电传系统 (NAVTEX) 和气象传真机获取海事信息,配合电子海图、潮汐表和进港指南对可航水域的安全和海况进行综合判断。然而,NAVTEX 和气象传真机的信息接收间隔久,当前时刻实际水深的判断繁琐,需要有经验的船员进行综合分析和决策。这一过程显然无法满足远程驾驶船舶的需要。为了更完整、更直观地反映船舶航行相关的海事信息,可以通过接收船舶搭载的电子设备所提供的气象和水文信息,并借助 e-Navigation 系统获取实时的大范围气象和水文信息,综合评估船舶当前和未来的航行环境,进行航路规划和优化。同时,该实时环境信息可以反映在船舶数学模型中,以便更为准确地进行操纵性预报,更好服务于船舶远程驾驶。此外,岸基操纵人员还可以结合动态的潮汐和航行警告信息,为船舶赶潮、避让应急物标等动作做出更为合理的决策。

4.3 数字孪生的综合应用

虽然目前有多样化的通信方式供船舶在港区、限制水域和开阔水域航行时使用,但受制于通信信道的带宽,当船舶航行至距岸较远的位置

时,船端的多源传感器所感知的通航态势很难实时、完整地传递至岸端供岸基操纵人员决策,尤其无法完成实时、高帧速的图传。为了在全航段为操纵人员提供沉浸式的临场判断依据,可以使用数字孪生技术,互补使用增强现实/虚拟现实技术,将智能感知的航行态势数据化,通过数传模式发送至远程控制端,映射在预置的三维空间中,进而还原出船舶的自身姿态和通航态势^[107-108]。考虑到货运船舶航行在广阔的水域,覆盖的面积大,需要结合遥感等技术建立更贴合现实的三维场景。

5 结 语

船舶远程驾驶在智能船舶的研究和应用过程中尤为重要,其发展的目的是保障船舶的安全性和可靠性,推进船舶的全自主化发展进程,使未来的航运更加环保和经济。本文着眼于货运船舶远程驾驶的需求和场景,通过分析当前无人船艇远程控制的现状,提出了基于人机共融理念的船舶远程驾驶框架,并分析了该框架下船舶远程控制的关键技术;借鉴交叉领域的发展经验和成果,阐述了网络时延补偿、网络丢包补偿、安全机制、船舶运动模型应用、船舶自主决策、船舶运

动控制等方面的关键技术发展现状;结合航运业和货运船舶的特点,针对目前一些正在投入工程应用的感知技术提出了有助于实现货船远程驾驶的思考。

我国是世界航运大国,但是和挪威、芬兰、瑞典、英国、荷兰等传统的航运强国相比,在远洋货船信息化技术、相关标准话语权上有明显差距,尤其在减摇鳍、动力定位等高精控制系统的发展和工程应用方面差距明显,我国的船舶工业很难在短时间内实现赶超。但是,船舶智能化发展现状表明,这一轮新的变革核心并非船体、动力装置、导航系统本身的变革,而在于利用信息化手段,借助人工智能技术提高船舶的智能化水平。我国是全球电子信息设备的制造中心,拥有良好的人工智能技术和人才储备,在船舶智能化浪潮中拥有先天优势,有机会实现以增强驾驶、辅助驾驶、远程驾驶、自动驾驶等为代表的阶段性功能,最终呈现智能航运新业态。因此,发展和实践船舶远程驾驶和自主航行技术,既是我国船舶工业在国际竞争中实现赶超的最佳时机,更是我国船舶产业和航运业的发展需求。

参考文献:

- [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, 3(1): 25-28.
YAN X P. Research status and development trend of intelligent ships[J]. *Public Utilities*, 2016, 3(1): 25-28 (in Chinese).
- [2] 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.
WU Q, WANG L, LIU J L. Research status and prospects of autonomous surface cargo ships[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2019, 14(1): 57-70 (in Chinese).
- [3] RØDSETH Ø J, TJORA Å. A system architecture for an unmanned ship[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT). Redworth: [s.n.], 2014.
- [4] BURMEISTER H C, BRUHN W C, RØDSETH Ø J, et al. Can unmanned ships improve navigational safety?[C]//Proceedings of the Transport Research Arena. Paris: [s.n.], 2014.
- [5] RØDSETH Ø J, BURMEISTER H C. Developments toward the unmanned ship[C]//Proceedings of International Symposium Information on Ships. Hamburg: [s.n.], 2012.
- [6] BRUHN W C, BURMEISTER H C, LONG M T, et al. Conducting look-out on an unmanned vessel: introduction to the advanced sensor module for MUNIN's autonomous dry bulk carrier[C]//Proceedings of the 10th International Symposium Information on Ships. Hamburg: [s.n.], 2014.
- [7] PORATHE T, PRISON J, MAN Y. Situation awareness in remote control centres for unmanned ships[C]//Proceedings of Human Factors in Ship Design & Operation. London, UK: The Royal Institution of Naval Architects, 2014.
- [8] RØDSETH H, BRAGE M. Maintenance management for unmanned shipping[C]//Proceedings of the 13th Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. Redworth: [s.n.], 2014.
- [9] WALTHER L, BURMEISTER H C, BRUHN W. Safe and efficient autonomous navigation with regards to weather[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. Redworth: [s.n.], 2014.
- [10] BURMEISTER H, RØDSETH Ø. Beyond the e-Navigation implementation plan: development towards the unmanned merchant vessel?[C]//Presentation Held at e-Navigation Underway 2014 Waypoints Beyond the Strategy Implementation Plan. Oslo, Copenhagen: [s.n.], 2014.
- [11] JOKIOINEN E, POIKONEN J, HYVÖNEN M, et al. Remote and autonomous ships-the next steps[R]. AAWA Position Paper. London: Rolls Royce Plc, 2016.
- [12] 中国船级社. 智能船舶规范 (2020)[S]. 北京: 中国船级社, 2020.
China Classification Society(CCS) . Code for intelligent ships (2020)[S]. Beijing: CCS, 2020 (in Chinese).
- [13] PARK J I S, GONRING S J. Devices for inputting command signals to marine vessel control systems: USA, 8925414[P]. 2015-01-06.
- [14] Rolls-Royce. Rolls-Royce and Finferries demonstrate world's first fully autonomous ferry[EB/OL]. (2018-03-11) [2020-04-01]. <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/03-12-2018-rr-and-finferries-demonstrate-worlds-first-fully-autonomous-ferry.aspx>.
- [15] YOU X, MA F, LU S L, et al. An integrated platform for the development of autonomous and remote-control ships[C]//Proceedings of the 19th Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT 2020). Pontignano, Italy: [s.n.], 2020: 316-327.
- [16] 邸需. 人机共融关键技术 [J]. *高科技与产业化*, 2018 (12): 80.
DI X. Key technologies of the man-machine communion[J]. *High Technology and Industrialization*, 2018(12): 80 (in Chinese).
- [17] LEI Z L, GUO C. Disturbance rejection control solution for ship steering system with uncertain time delay[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 95: 78-83.
- [18] 徐国平. 基于网络控制的船舶航向保持控制研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016.

- XU G P. Research on networked control of course-keeping for ships[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016 (in Chinese).
- [19] 徐国平, 张显库. 基于网络控制的船舶航向简捷鲁棒控制[J]. *大连海事大学学报*, 2014, 40(1): 5–8.
XU G P, ZHANG X K. Network control-based concise robust control of ship course-keeping[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2014, 40(1): 5–8 (in Chinese).
- [20] HALEVI Y, RAY A. Integrated communication and control systems: part I—analysis[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1988, 110(4): 367–373.
- [21] 宋燕. 网络控制系统时延、丢包与错序问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
SONG Y. Research on the time delay, packet dropout and packet disordering in networked control systems[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012 (in Chinese).
- [22] ANTSAKLIS P, BAILLIEUL J. Special issue on technology of networked control systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 5–8.
- [23] ZHANG Y C, LIU G Y, TAN L M. Theoretical research on the time delay and corresponding issues for the novel category of internet of things control system[J]. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 2016, 9(10): 1–16.
- [24] 任长清, 王晓峰, 吴平东, 等. 基于 TCP/IP 网络的远程控制系统的研究 [M]//中国电工技术学会第七届学术年会论文集. 北京: 中国电工技术学会, 2001: 193-197.
REN C Q, WANG X F, WU P D, et al. Research of telecontrol system based on TCP/IP[C]//Proceeding on the 7th Annual of the Electrotechnical Society of China. Beijing: Electrotechnical Society of China, 2001: 193-197 (in Chinese).
- [25] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84–99.
- [26] 刘明, 张庆灵, 邱占芝. 有时延和数据包丢失的网络控制系统反馈控制[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(2): 262–268.
LIU M, ZHANG Q L, QIU Z Z. Feedback control of NCS with time-delay and data packet dropout[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(2): 262–268 (in Chinese).
- [27] WANG Y Y, CHAI S H, NGUYEN H D. Experimental and numerical study of autopilot using extended Kalman filter trained neural networks for surface vessels[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2020, 12: 314–324.
- [28] WANG Y Y, CHAI S H, NGUYEN H D. Unscented Kalman filter trained neural network control design for ship autopilot with experimental and numerical approaches[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 85: 162–172.
- [29] BURMEISTER H C, BRUHN W, RØDSETH Ø J, et al. Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-Navigation implementation: the MUNIN perspective[J]. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 2014, 1: 1–13.
- [30] TIPSUWAN Y, CHOW M Y. Control methodologies in networked control systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(10): 1099–1111.
- [31] HESPANHA J P, NAGHSHTABRIZI P, XU Y G. A survey of recent results in networked control systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 138–162.
- [32] 芮万智, 江汉红, 侯重远. 网络控制系统研究综述与展望[J]. *信息与控制*, 2012, 41(1): 83–88.
RUI W Z, JIANG H H, HOU C Y. Survey and prospect of networked control system[J]. *Information and Control*, 2012, 41(1): 83–88 (in Chinese).
- [33] YOU K Y, XIE L H. Survey of recent progress in networked control systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(2): 101–117.
- [34] 陈克斌. 基于因特网远程控制系统的研究与设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
CHEN K B. Research and design of remote control system based on Internet[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006 (in Chinese).
- [35] 邱实. 服务机器人远程控制关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
QIU S. The research of key technique of service robot remote control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese).
- [36] ZHANG L Q, SHI Y, CHEN T W, et al. A new method for stabilization of networked control systems with random delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(8): 1177–1181.
- [37] SHI Y, YU B. Output feedback stabilization of networked control systems with random delays modeled by Markov chains[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(7): 1668–1674.
- [38] 邱丽, 胥布工, 黎善斌. 具有模态依赖时延的网络控制系统的 H_∞ 控制[J]. *控制与决策*, 2011, 26(4): 571–576, 605.
QIU L, XU B G, LI S B. H_∞ control for networked control systems with mode-dependent time-delays[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(4): 571–576, 605 (in Chinese).
- [39] 李歆. 移动机械手网络控制系统的时延研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2009.
LI X. The study of the delay network control system for the mobile manipulator[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2009 (in Chinese).
- [40] ZHOU S S, FENG G. H_∞ filtering for discrete-time systems with randomly varying sensor delays[J]. *Automatica*, 2008, 44(7): 1918–1922.

- [41] YANG F W, WANG Z D, HUNG Y S. H_∞ control for networked systems with random communication delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(3): 511–518.
- [42] 王随平, 李闪阁, 张海宇. 基于网络时延预估补偿的远程控制系统研究 [J]. 可编程控制器与工厂自动化, 2009(8): 28–30.
WANG S P, LI S G, ZHANG H N. Research on remote control system based on network delay estimation and compensation[J]. *Programmable Controller & Factory Automation*, 2009(8): 28–30 (in Chinese).
- [43] 刘艳红, 罗永平. 基于混合控制的网络系统随机时延补偿 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(6): 1262–1266.
LIU Y H, LUO Y P. Delay compensation of network control systems based on hybrid control algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(6): 1262–1266 (in Chinese).
- [44] XI N, TARN T J. Planning and control of internet-based teleoperation[C]//*Proceedings of the Telemanipulator and Telepresence Technologies V*. Boston, United States: SPIE, 1998: 3524.
- [45] 刘馨. 基于网络的远程控制系统研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
LIU X. Study of the remote video monitoring and control system based on internet[D]. Xi'an: Xidian University, 2011 (in Chinese).
- [46] XU H, JAGANNATHAN S, LEWIS F L. Stochastic optimal control of unknown linear networked control system in the presence of random delays and packet losses[J]. *Automatica*, 2012, 48(6): 1017–1030.
- [47] ZHAO Y B, KIM J, LIU G P, et al. Compensation and stochastic modeling of discrete-time networked control systems with data packet disorder[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2012, 10(5): 1055–1063.
- [48] HU W S, LIU G P, REES D. Networked predictive control over the Internet using round-trip delay measurement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(10): 2231–2241.
- [49] ZHAO Y B, LIU G P, REES D. Improved predictive control approach to networked control systems[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2008, 2(8): 675–681.
- [50] PENG C, YUE D. State feedback controller design of networked control systems with parameter uncertainty and state-delay[J]. *Asian Journal of Control*, 2006, 8(4): 385–392.
- [51] HE C, LI J M, ZHANG L. Decentralized adaptive control of nonlinear large-scale pure-feedback interconnected systems with time-varying delays[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2015, 29(1): 24–40.
- [52] KÜNHE F, GOMES J, FETTER W. Mobile robot trajectory tracking using model predictive control[C/OL]//*Proceedings of the 2th IEEE Latin-American Robotics Symposium*. [2020-04-01]. http://www.ece.ufrgs.br/~fetter/sbai05_10022.pdf.
- [53] 唐祎. 基于智能手机的移动机器人远程控制系统 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
TANG Y. Smartphone-based mobile robot remote control system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).
- [54] PAN I, DAS S, GUPTA A. Tuning of an optimal fuzzy PID controller with stochastic algorithms for networked control systems with random time delay[J]. *ISA Transactions*, 2011, 50(1): 28–36.
- [55] NATORI K, TSUJI T, OHNISHI K, et al. Time-delay compensation by communication disturbance observer for bilateral teleoperation under time-varying delay[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(3): 1050–1062.
- [56] CHEN C H, LIN C L, HWANG T S. Stability of networked control systems with time-varying delays[J]. *IEEE Communications Letters*, 2007, 11(3): 270–272.
- [57] LAI C L, HSU P L. Design the remote control system with the time-delay estimator and the adaptive smith predictor[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2010, 6(1): 73–80.
- [58] LING Q, LEMMON M D. Power spectral analysis of networked control systems with data dropouts[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(6): 955–959.
- [59] LI H B, SUN Z Q, LIU H P, et al. Predictive observer-based control for networked control systems with network-induced delay and packet dropout[J]. *Asian Journal of Control*, 2008, 10(6): 638–650.
- [60] XUE B Q, LI S Y, ZHU Q M. Moving horizon state estimation for networked control systems with multiple packet dropouts[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(9): 2360–2366.
- [61] XIONG J L, LAM J. Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss[J]. *Automatica*, 2007, 43(1): 80–87.
- [62] WU J, CHEN T W. Design of networked control systems with packet dropouts[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(7): 1314–1319.
- [63] LU Q G, ZHANG L X, BASIN M, et al. Analysis and synthesis for networked control systems with uncertain rate of packet losses[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2012, 349(7): 2500–2514.
- [64] LI J G, YUAN J Q, LU J G. Observer-based H_∞ control for networked nonlinear systems with random packet losses[J]. *ISA Transactions*, 2010, 49(1): 39–46.
- [65] GARCIA E, ANTSAKLIS P J, MONTESTRUQUE L A. Model-based control of networked systems[M]. Cham: Springer, 2014.
- [66] MONTESTRUQUE L A, ANTSAKLIS P J. On the

- model-based control of networked systems[J]. *Automatica*, 2003, 39(10): 1837–1843.
- [67] MONTESTRUQUE L A, ANTSAKLIS P. Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1562–1572.
- [68] MASTELLONE S, ABDALLAH C T, DORATO P. Model-based networked control for nonlinear systems with stochastic packet dropout[C]//Proceedings of the 2005, American Control Conference. Portland, USA: IEEE, 2005.
- [69] KINSEY J C, YANG Q J, HOWLAND J C. Nonlinear dynamic model-based state estimators for underwater navigation of remotely operated vehicles[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(5): 1845–1854.
- [70] SCHJØLBERG I, UTNE I B. Towards autonomy in ROV operations[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, 48(2): 183–188.
- [71] DNV GL. Autonomous and remotely operated ships: DNVGL-CG-0264[R]. Oslo: DNV GL, 2018.
- [72] Lloyd's Register of Shipping. Cyber-enabled ships[R/OL]. [2020-04-01]. <https://www.lr.org/en-au/cyber-safe-for-marine/>.
- [73] BIMCO. The guidelines on cyber security onboard ships[R/OL]. [2020-04-01]. <https://www.bimco.org/about-us-and-our-members/publications/the-guidelines-on-cyber-security-onboard-ships>.
- [74] FOSSEN T I. Guidance and control of ocean vehicles[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1994.
- [75] MCCUE L. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[J]. *IEEE Control Systems*, 2016, 36(1): 78–79.
- [76] FOSSEN T I. Hydrostatics[M]//Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. New York: Wiley, 2011.
- [77] 马建文, 张安西, 周兆欣, 等. 小水线面双体船五自由度运动建模与仿真[J]. *中国舰船研究*, 2017, 12(2): 133–136, 150.
MA J W, ZHANG A X, ZHOU Z X, et al. Modeling and simulation of five DOF motions for SWATH ships[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2017, 12(2): 133–136, 150 (in Chinese).
- [78] NGUYEN H D. Multitask automatic manoeuvring systems using recursive optimal control algorithms[C]//2008 Second International Conference on Communications and Electronics. Hoi an, Vietnam: IEEE, 2008.
- [79] NGUYEN H D. Self-tuning pole assignment and optimal control systems for ships[D]. Tokyo: Tokyo University of Marine Science and Technology, 2000.
- [80] PEREIRA J, DUNCAN A. System identification of underwater vehicles[C]//Proceedings of the 2000 International Symposium on Underwater Technology. Tokyo, Japan: IEEE, 2000.
- [81] TRAN K, OUAHSINE A, NACEUR H, et al. Coefficient identification for ship manoeuvring simulation model based on optimization techniques[C]//The 4th International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering. Kos, Greece: [s.n.], 2011: 1261–1271.
- [82] MORENO-SALINAS D, CHAOS D, DE LA CRUZ J M, et al. Identification of a surface marine vessel using LS-SVM[J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2013, 2013: 803548.
- [83] TANNURI E A, AGOSTINHO A C, MORISHITA H M, et al. Dynamic positioning systems: an experimental analysis of sliding mode control[J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(10): 1121–1132.
- [84] DU J L, GUO C, YU S H, et al. Adaptive autopilot design of time-varying uncertain ships with completely unknown control coefficient[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2007, 32(2): 346–352.
- [85] MOREIRA L, FOSSEN T I, SOARES C G. Path following control system for a tanker ship model[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(14/15): 2074–2085.
- [86] KÄLLSTRÖM C G, ÅSTRÖM K J, THORELL N E, et al. Adaptive autopilots for tankers[J]. *Automatica*, 1979, 15(3): 241–254.
- [87] BRINK A W, BAAS G E, TIANO A, et al. Adaptive automatic course-keeping control of a supertanker and a container-ship[J]. *International Shipbuilding Progress*, 1979, 26(301): 189–214.
- [88] ZIRILLI A, ROBERTS G N, TIANO A, et al. Adaptive steering of a containership based on neural networks[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2000, 14(8): 849–873.
- [89] VAN AMERONGEN J. Adaptive steering of ships—a model reference approach[J]. *Automatica*, 1984, 20(1): 3–14.
- [90] KATEBI M R, BYRNE J C. LQG adaptive ship autopilot[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 1988, 10(4): 187–197.
- [91] PARK J S, OHTSU K, KITAGAWA G. Batch - adaptive ship's autopilots[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2000, 14(4): 427–439.
- [92] ASHRAFIUON H, MUSKE K R, MCNINCH L C, et al. Sliding-mode tracking control of surface vessels[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(11): 4004–4012.
- [93] POLKINGHORNE M N, ROBERTS G N, BURNS R S, et al. The implementation of fixed rulebase fuzzy logic to the control of small surface ships[J]. *Control Engineering Practice*, 1995, 3(3): 321–328.
- [94] GIERUSZ W, VINH N C, RAK A. Maneuvering control and trajectory tracking of very large crude carrier[J].

- Ocean Engineering*, 2007, 34(7): 932–945.
- [95] MCGOOKIN E W, MURRAY-SMITH D J, LI Y, et al. Ship steering control system optimisation using genetic algorithms[J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(4): 429–443.
- [96] BRUZZONE A, SIGNORILE R. Simulation and genetic algorithms for ship planning and shipyard layout[J]. *Simulation*, 1998, 71(2): 74–83.
- [97] LI Z, SUN J, OH S. Design, analysis and experimental validation of a robust nonlinear path following controller for marine surface vessels[J]. *Automatica*, 2009, 45(7): 1649–1658.
- [98] PETERSEN K Y, NIJMEIJER H. Underactuated ship tracking control: theory and experiments[J]. *International Journal of Control*, 2001, 74(14): 1435–1446.
- [99] SKJETNER, FOSSEN T I, KOKOTOVIĆ P V. Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory[J]. *Automatica*, 2005, 41(2): 289–298.
- [100] LEE H J, RHEE K P. Development of collision avoidance system by using expert system and search algorithm[J]. *International Shipbuilding Progress*, 2001, 48(3): 197–212.
- [101] BENJAMIN M R, CURCIO J A, LEONARD J J, et al. Navigation of unmanned marine vehicles in accordance with the rules of the road[C]//Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Orlando, FL, USA: IEEE, 2006.
- [102] MATTHIES L, BROCKERS R, KUWATA Y, et al. Stereo vision-based obstacle avoidance for micro air vehicles using disparity space[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, China: IEEE, 2014.
- [103] HU L, NAEEM W, RAJABALLY E, et al. COLREGS-compliant path planning for autonomous surface vehicles: a multiobjective optimization approach[J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2017, 50(1): 13662–13667.
- [104] LEE S M, KWON K Y, JOH J. A fuzzy logic for autonomous navigation of marine vehicles satisfying COLREG guidelines[J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2004, 2(2): 171–181.
- [105] CHEON Y H, LEE S G, KIM M, et al. The association of disease activity, pro-inflammatory cytokines, and neurotrophic factors with depression in patients with rheumatoid arthritis[J]. *Brain, Behavior, and Immunity*, 2018, 73: 274–281.
- [106] FURUNO. Envision-AR navigation system[EB/OL]. (2019-10-18)[2020-04-01]. <https://www.furuno.com/special/en/envision/>.
- [107] WORLD F. Augmented reality in marine simulation-a reality in dollar savings[EB/OL]. (2017-12-3)[2020-04-01]. <https://fathom.world/augmented-reality-marine-simulation-reality-dollar-savings/>.
- [108] 浦沫瀚, 康健. “水上天眼”为安全航行保驾护航 国内首条智能汽渡在南京板桥汽渡首航 [EB/OL]. (2018-07-18) [2020-04-01]. <http://news.jstv.com/a/20180718/5b4eda08b8318923afd453b8.shtml>.
- PU M H, KANG J. "Waterborne Skyeye" is convoying the safety navigation: the first domestic intelligent ferry started her maiden voyage from Nanjing Banqiao Quay[EB/OL]. (2018-07-18)[2020-04-01] <http://news.jstv.com/a/20180718/5b4eda08b8318923afd453b8.shtml> (in Chinese).



(上接第 17 页)

- [62] LA H M, SHENG W H. Distributed sensor fusion for scalar field mapping using mobile sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2013, 43(2): 766–778.
- [63] 王飞跃, 刘德荣, 熊刚, 等. 复杂系统的平行控制理论及应用 [J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2012, 9(3): 1–12.
WANG F Y, LIU D R, XIONG G, et al. Parallel control theory of complex systems and applications[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2012, 9(3): 1–12 (in Chinese).
- [64] LI L, WANG X, WANG K F, et al. Parallel testing of vehicle intelligence via virtual-real interaction[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(28): eaaw4106.
- [65] 朱冰, 张培兴, 赵健, 等. 基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试研究进展 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(6): 1–19.
- ZHU B, ZHANG P X, ZHAO J, et al. Advances in virtual testing of self-driving cars based on scenarios[J]. *China Journal of Highway Science*, 2019, 32(6): 1–19 (in Chinese).
- [66] KANG Y, YIN H, BERGER C. Test your self-driving algorithm: an overview of publicly available driving datasets and virtual testing environments[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2019, 4(2): 171–185.
- [67] 范云生, 苏辉, 王国峰. 无人水面艇自主航行能力测试技术与应用 [J]. *大连海事大学学报*, 2020, 46(3): 38–49.
FAN Y S, SU H, WANG G F. Testing technology and its application of autonomous navigation ability for unmanned surface vehicle[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2020, 46(3): 38–49 (in Chinese).