

文章编号:1671-1637(2026)04-0184-16

# 面向新一代航运系统的软件定义智能船舶航行控制进展

马勇<sup>1,2,3</sup>, 王雯琦<sup>1,2,3</sup>, 韩梦茹<sup>1,2,3</sup>, 赵玉蛟<sup>4</sup>, 严新平<sup>\*1,5,6</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 航运学院, 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; 4. 济南大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250022; 5. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063; 6. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063)

**摘要:**为应对新一代航运系统与智能船舶发展需求,综述了软件定义技术以及软件定义理念下船舶智能航行控制发展现状,构建了一种中央集中式的软件定义智能船舶航行控制架构,设计了由用户端、云控端、船舶端、岸基端以及应用层、控制层、设备层组成的“四端三层”体系结构,将智能船舶航行控制承担的决策与控制功能迁移至部署在云控端或本地服务器的软件模块中,实现了控制功能的软件化、模块化与服务化部署。结果表明:该架构具有显著优势,在系统层面,具备高度的结构灵活性、可重构性与可扩展性,大幅减少了系统的维护成本;在功能层面,支持控制算法的快速迭代、在线升级与按需部署;在操作层面,能够支持辅助驾驶、远程遥控与自主航行等多种控制模式的灵活切换;无人船艇智能航行控制系统案例验证了该架构能够有效支持从基础到复杂的航行任务,展现出在高精度控制、可扩展编队协同与网络弹性防御方面的综合实力。软件定义智能船舶航行控制提供了一种开放、智能且可持续演进的航行控制新范式,可为实现“岸基驾控为主、船端值守为辅”的新一代航运系统提供关键支撑。

**关键词:**新一代航运系统;智能船舶;综述;软件定义;智能航行控制;中央集中式架构

**中图分类号:**U664.82 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.209

## Progress in software-defined intelligent ship navigation control for the new generation of waterborne transportation system

MA Yong<sup>1,2,3</sup>, WANG Wen-qi<sup>1,2,3</sup>, HAN Meng-ru<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Yu-jiao<sup>4</sup>, YAN Xin-ping<sup>\*1,5,6</sup>

(1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 2. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, Hubei, China; 4. School of Information Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, Shandong, China; 5. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 6. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)

**出版历程:**2025-10-30 收稿,2025-12-14 修回,2026-01-23 录用

**基金项目:**国家重点研发计划(2023YFB4302300);国家自然科学基金项目(52261160383);湖北省重点研发计划项目(2024BCB099)

**作者简介:**马勇(1983-),男,湖北枣阳人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:myongdl@whut.edu.cn.

**\*通信作者:**严新平(1959-),男,江西莲花人,中国工程院院士,博士生导师,工学博士,E-mail:xpyan@whut.edu.cn.

**引用格式:**马勇,王雯琦,韩梦茹,等.面向新一代航运系统的软件定义智能船舶航行控制进展[J].交通运输工程学报,2026,26(4):184-199.

**Citation:**MA Yong, WANG Wen-qi, HAN Meng-ru, et al. Progress in software-defined intelligent ship navigation control for the new generation of waterborne transportation system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(4): 184-199.

**Abstract:** To meet the development needs of the new generation of waterborne transportation systems and intelligent ships, the current status of software-defined technology and its application in intelligent ship navigation control were reviewed. A centralized software-defined intelligent ship navigation control architecture was constructed, featuring a four-end, three-layer structure, composed of user, cloud-control, ship, and shore-based terminals, as well as application, control, and device layers. This architecture migrates decision-making and control functions to software modules deployed on a cloud-control terminal or a local server, thus enabling software-based, modular, and service-oriented implementation of these functions. The results indicate that this architecture offers significant advantages. At the system level, the architecture achieves high structural flexibility, reconfigurability, and scalability, which substantially reduce system maintenance costs. At the functional level, the architecture supports rapid iteration of control algorithms, online upgrades, and on-demand deployment. At the operational level, the architecture supports flexible switching among multiple control modes, including assisted driving, remote control, and autonomous navigation. A case study of an intelligent navigation control system for an unmanned surface vehicle validated the architecture's ability to effectively support navigation tasks ranging from basic to complex, demonstrating comprehensive capabilities in high-precision control, scalable formation collaboration, and network-resilience defense. The proposed software-defined intelligent ship navigation control framework provides an open, intelligent, and sustainably evolving paradigm, offering critical support for a new-generation shipping system to realize an operating model where shore-based control serves as the primary mode, supplemented by onboard watchkeeping.

**Keywords:** new generation of waterborne transportation system; intelligent ship; review; software definition; intelligent navigation control; centralized architecture

**Publication history:** Received 2025-10-30; Received in revised form 2025-12-14; Accepted 2026-01-23

**Funding:** National Key R&D Program of China (2023YFB4302300); National Natural Science Foundation of China (52261160383); Key R&D Program of Hubei Province (2024BCB099)

\* **Corresponding author:** YAN Xin-ping, academician of Chinese Academy of Engineering, PhD, E-mail: xpyan@whut.edu.cn.

## 0 引言

在全球工业信息化、智能化浪潮的推动下,船舶工业逐步从传统机电控制向数字化、智能化、自主化转型<sup>[1-3]</sup>。软件定义船舶作为新一代智能船舶的核心发展方向,逐渐成为航运业变革的关键路径,其以软硬件解耦为基础,依托开放式架构与统一数据平台,实现船舶系统功能的灵活定义、动态配置与持续升级,为船舶智能化水平的持续提升奠定了技术基础。

国内外开展了智能船舶相关研究。挪威 Kongsberg 公司的综合平台管理系统通过冗余的大通信宽带网络系统集成船舶导航、动态定位、推进控制和机舱自动化等独立子系统,采取分布式控制策略和通用的通信协议,实现了各子系统间的数据

信息交互。德国 SAM 公司基于开放式体系研发了综合平台管理系统,在船舶网络框架下,各设备依据不同功能被分类集成为相应的系统。同时,该系统遵循统一的操作和设计方式,使用通用的硬件平台,降低了设备安装维护难度、备件数量和人员培训成本,从而实现降本增效。日本启动“智能船舶应用平台”项目并搭建了服务于各应用系统的统一数据交互平台,实现了智能航行、智能机舱、智能能效和远程维护管理等功能<sup>[4]</sup>。日本未来科技公司推出船舶物联网平台,利用物联网技术在亚马逊网络服务上实时积累数据,如航行路线、燃料消耗、天气和海洋信息等。该平台以船舶数据为起点,提供安全、低油耗的航行路线和故障预兆检测等,能够实现船岸一体化的数据协作运营和船舶相关周边服务的优化。韩国现代重工与埃森哲公司合作推出 OceanLink

智能船舶平台,可通过传感器和数据分析软件,实时跟踪船舶的状态,获得船舶的位置、设备、货舱状态等信息,为用户提供船舶运营优化服务。

中国 2015 年发布的《智能船舶规范》首次从顶层设计出发,将智能船舶划分为智能航行、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功能模块,为软件定义船舶理念提供了系统框架。2016 年启动的“智能船舶 1.0”专项,进一步提出“1+N”技术架构并推动实船验证。2019 年,工业和信息化部、交通运输部、国防科工局联合印发《智能船舶发展行动计划(2019—2021 年)》<sup>[5]</sup>,明确提出推动船用设备智能化升级围绕智能船舶辅助决策、自主控制等功能需求,系统梳理感知与控制基础元器件技术要求,着重补齐短板,强化综合集成,推动船舶航行、作业、动力等相关设备的智能化升级,研制信息和控制高度集成的新型船用设备,全面提升船舶智能化水平,强调扩大典型智能船舶“1 个平台+N 个智能应用”的示范推广。2021 年提出的“岸基驾控为主、船端值守为辅”的新一代航运系统构架,革新了传统的船员操控航行模式,使环境感知、规划决策与运动控制等核心功能逐步从船端转移至岸基智能设备与系统<sup>[6-8]</sup>。

在新一代航运系统背景下,船舶不断向智能化、自主化、网联化发展,伴随着船舶设备与系统的智能化升级,船舶主机、推进器、导航设备等基础硬件设备逐渐实现标准化和模块化<sup>[9]</sup>,上层软件系统的通用性与可移植性不断增强,为软件定义船舶的实现提供了关键基础。然而,智能船舶航行自主等级的提升,对底层电子电气架构提出了严峻挑战。传统船舶多采用分布式电子电气架构<sup>[10]</sup>,在设备数量有限、电气化程度较低的阶段,该架构在降低开发与周期方面具有一定优势。但随着智能化需求的急剧增长,大量电子电气设备的协同工作导致信息在多条通信线路中重复传输,显著加重了船舶网络的通信负荷,并使得系统功能的扩展变得复杂且成本高昂<sup>[11]</sup>。为保障“岸基驾控为主、船端值守为辅”模式下船舶的安全高效航行与稳定作业控制,李晨等<sup>[12]</sup>提出了船舶远程驾驶控制系统,其中央处理控制单元通过以太网接口与底层可编程控制器(Programmable Logic Controller, PLC)进行通信和执行。李海涛等<sup>[13]</sup>提出一种基于软件定义的海上异构网络传输架构,采用软件定义的方式实现了网络的灵活重构和敏捷管理。Chen 等<sup>[14]</sup>提出了一种基于域集中式控制器的内河远程控制船舶电子电

气架构,将船舶的功能域进行划分,设计了实时网络通信系统和中央网关控制器,并通过面向服务的通信架构实现了域控制器之间的高效信息交互。徐亮等<sup>[15]</sup>提出了由八大功能模块构成的自主控制系统的功能架构以及面向服务架构(Service-oriented Architecture, SOA)的设计思路。柴天佑等<sup>[16]</sup>提出了软件定义控制系统的智能化发展方向。2025 年,江童科技研发的内河自动驾驶试验船“惊蛰号”在浙江湖州成功下水,通过新一代中央域控制器完成数据的高效连通和资源的统一调度,实现了面向应用及服务的全新船舶架构设计,实现了软件定义船舶的应用示范。

本文主要针对软件定义技术及其在船舶工业的发展现状进行综述,设计了基于中央集中式的软件定义智能船舶航行控制架构,阐述了软件定义智能航行控制架构的特征,通过对船舶物理设备的资源虚拟化与统一编程,实现感知、决策和控制模块交互内核和接口的统一,加快航运智能应用的开发进程。本文进一步验证了该架构可行性与优势,并深入探讨了软件定义航行控制面临的技术挑战与未来机遇。未来,智能船舶也将演进为集环境感知、规划决策、运动控制与持续自我进化能力于一体的水上智能移动平台。通过软件定义技术对船舶物理设备进行资源虚拟化与统一编程,船舶航行控制将实现更高水平的智能化,进而实现船舶航行的安全性、经济性与高效性,为新一代航运系统的高质量发展提供核心支撑<sup>[17]</sup>。

## 1 软件定义发展现状

软件定义是指在硬件资源数字化、标准化的基础上,通过应用编程接口(Application Programming Interface, API)实现计算、存储、网络等基础资源的管理和调用,从而根据需求动态改变资源,实现灵活配置。软件定义理念最早由互联网工程任务组于 1985 年提出,并成功应用于无线电领域<sup>[18]</sup>。软件定义无线电的成功实践,引发了各行业对软件定义架构的探索和研究。软件定义理念逐步拓展并形成了软件定义网络<sup>[19]</sup>、软件定义卫星、软件定义装备、软件定义汽车以及软件定义城市<sup>[20-21]</sup>等(图 1)。

软件定义通过与不同行业的固有特点深度融合,实现了系统灵活性、可扩展性与智能化的飞跃。各应用领域均展现出其独特的场景与特征,见表 1。2010 年,斯坦福大学 McKeown 教授提出软件定义网络(Software-defined Network, SDN)的概念,将

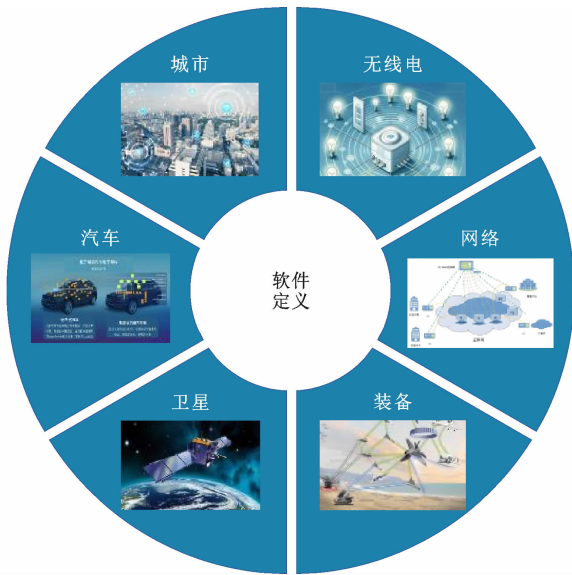


图 1 软件定义应用领域

Fig. 1 Software definition application field

网络控制与数据转发分离,根据上层应用需求,通过控制层对物理网络资源进行灵活配置<sup>[22]</sup>。SDN 体系结构分为数据层、控制层和应用层<sup>[23]</sup>,如图 2 所示,控制层在实现集中控制管理数据层的同时,为应用层提供 API<sup>[24]</sup>。SDN 已成功应用于各个领域,如传感器网络、智能船舶网络<sup>[25-26]</sup>、无人机组网<sup>[27-28]</sup>等。

在装备领域,软件定义成为倍增装备效用的有效途径,助力装备呈现出可重构、多功能、自适应、分布式等特征。2009 年,美国国防研究与工程局提出开放式雷达体系结构,采用开放式架构实现了雷达系统软硬件隔离,解决了雷达装备发展面临的维护升级困难、研制周期长等难题<sup>[29-30]</sup>。随后,美国国防部启动了软件定义无人装备集群等研制工作,并于 2017 年提出“马赛克战”概念,利用软件等基础使能技术构建可灵活组织编排的作战体系。在汽车行业,百度公司提出软件定义汽车的概念。华为公司推出的“计算+通信”组件应用架构,采用“以太网+区域控制器”构建了车内通信架构,推动汽车智能化转型。在卫星领域,2018 年龙江二号微卫星成功发射,该卫星搭载了甚高频(Very High Frequency, VHF)/特高频软件定义无线电<sup>[31]</sup>。2019 年,中国发射首颗软件定义卫星“天智一号”。2021 年,欧洲 Eutelsat 公司的 Quantum 卫星成功入轨,该卫星借助灵活的基带软件实现在轨通信功能重构与升级,能够在生命周期内动态响应需求变化。此外,软件定义理念也在重塑城市功能与服务模式。东软集团持续推动人工智能、大数据等技术与城市管理的深度融合,已参与中国 200 多个中心城市的智慧应用

表 1 软件定义应用领域、场景及特征

Table 1 Application fields, scenarios and features of software definition

应用领域	场景	特征
软件定义网络	数据中心网络、5G/边缘计算	控制与转发分离,开放可编程
软件定义卫星	载荷卫星、高通量卫星	开放系统架构
软件定义装备	雷达、无人装备、舰载通信系统	功能软件化,系统可重构
软件定义汽车	智能座舱、自动驾驶、车联网	硬件与软件解耦,算力与通信集中化,服务可订阅/升级
软件定义城市	智慧交通管理、智能电网	城市资源虚拟化与池化,管理集中化与决策数据化

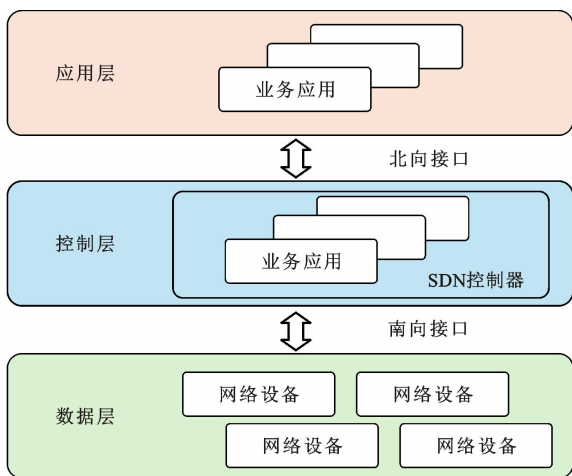


图 2 SDN 体系结构

Fig. 2 SDN architecture

建设。未来,城市有望依托智能基础设施实现自我管理、自运行、自优化,并基于超级城市大脑形成自组织、自升级的治理新形态<sup>[32]</sup>。

## 2 软件定义理念下船舶航行控制发展现状

### 2.1 既有智能船舶航行控制系统局限

2018 年,国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)开始研究自主船舶的自主等级<sup>[33]</sup>。如表 2 所示,IMO 根据船舶智能航行水平,将船舶划分为 L1~L4 四个等级,并明确指出船舶在单次航程中可在不同等级间动态切换,揭示了未来船舶航行控制必须具备高度的灵活性、可重构性和智能演进能力。

表2 船舶智能航行等级划分

Table 2 Classification of intelligent navigation levels for ships

自主等级	定义	控制	监视	失效应对
L1	具有自动化工程与决策支持的船舶	人与系统	人	人
L2	有船员值守,远程驾控	系统	人	人
L3	无船员值守,远程驾控	系统	系统	人
L4	完全自主船舶(船舶操作系统能够自主决策与执行)	系统	系统	系统

当前,船舶智能航行的发展仍主要集中在 L2~L3 阶段。智能船舶作为新一代航运系统的核心载体,其智能航行功能的实现高度依赖于底层硬件设施。具体而言,船舶所搭载的传感器与执行器的类型与数量,直接决定了航行控制系统的能力边界。在硬件基础之上,软件系统成为影响船舶智能航行功能与性能水平的核心要素,负责实施环境感知、路径规划<sup>[34-35]</sup>、路径跟踪、自主避碰决策与运动控制等关键任务。然而,当前船舶的设计与制造模式存在显著制约。船舶制造通常由船厂集成来自多个供应商的各类设备与部件,包括雷达、主机等,这种组装式生产模式使得既有智能船舶航行控制系统智能化升级面临以下系列问题。

(1)底层的控制器数量之多,且全部由供应商各自管理自己的软件和硬件,导致系统整体难以统一维护与升级,形成“信息孤岛”。

(2)控制器间的连接是由具有公共协议接口的网关实现的,任何调整都会影响到所有其他控制器,显著增加系统集成与迭代的复杂度。

(3)控制器很难单独连接到互联网,都需要逐个单独连接进行更新,导致软件维护效率低下,难以实现远程、快速的功能迭代与安全补丁部署。

(4)一个功能涉及到多个控制器的协同调整,各种供应商会相互制约,严重阻碍系统整体功能的优化与新功能的引入。

这些问题导致了既有智能船舶航行控制系统难以根据多变的航行任务、实时船舶状态或更新的海事法规进行快速优化,无法高效地进行功能实现和功能迭代,也限制了船舶智能航行控制系统向更高自动化等级的平滑演进。新一代航运系统的建设离不开船舶智能设备的发展,亟需构建标准化、模块化、谱系化的船舶智能设备与系统技术体系,因此发展软件定义智能船舶航行控制势在必行。

## 2.2 船舶电子电气架构演进

电气与电子架构(Electronic & Electrical Architecture, EEA)最初由汽车行业提出,其核心是采用模块化系统设计,通常划分为环境感知、信息

评估、规划与决策、车辆控制以及人机交互等关键功能模块<sup>[36]</sup>。随着软件定义理念的发展,EEA 被引入船舶工业领域,并引领船舶 EEA 的重构与升级。船舶 EEA 作为智能船舶的神经系统,负责将全船的传感器、电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU)、线束拓扑和能源分配系统整合为统一整体,实现运算、动力与能量的协同分配,是支撑船舶智能功能实现的基础。随着智能船舶的发展,船舶 EEA 逐步从分布式、域集中式控制架构,向中央集中式的架构演进,如图 3 所示。

(1)分布式 EEA:此阶段船舶主要实现基础的辅助驾驶功能。智能化控制主要依赖于堆砌独立的 ECU 来实现,呈现出软硬件紧密耦合、缺乏统一中间件层的特征<sup>[37]</sup>。虽然这种架构开发门槛低、周期短,能满足早期自动化需求,但其弊端日益凸显:各 ECU 之间算力无法协同形成“数据孤岛”,导致资源极大浪费;异构的软件框架使得外部开发者难以进行统一维护和在线升级(Over-the-air, OTA);此外,点对点的复杂通信需求导致线束成本高昂且装配困难<sup>[38]</sup>。

(2)域集中式 EEA(面向功能的架构阶段):域集中式 EEA 将船舶划分为智能航行、智能能效、智能机舱等智能系统,各域智能系统作为区域性的计算与决策中心,负责域内传感器数据的融合与闭环控制;而智能集成平台则扮演全船信息枢纽的角色,负责跨域的信息集成与数据交换。域集中式架构有效缓解了传统分布式架构中算力分散与通信带宽不足的问题,既能满足特定功能的高实时性需求,又避免了全船级架构重构的高昂成本,是智能船舶由 L2 向 L3 过渡阶段的主流技术路线。

(3)中央集中式 EEA(面向服务的架构阶段):中央集中式 EEA 打破传统的“系统”边界,转而采用区域控制器,并将全船的核心算力汇聚至中央计算平台,呈现出算力集中化、软硬件解耦及平台标准化的核心特征<sup>[39]</sup>。中央集中式 EEA 通过高速以太网骨干和 SOA,能够实现跨域数据的深度融合与全局资源调度,使船舶具备“类脑”思考能力,从而满足

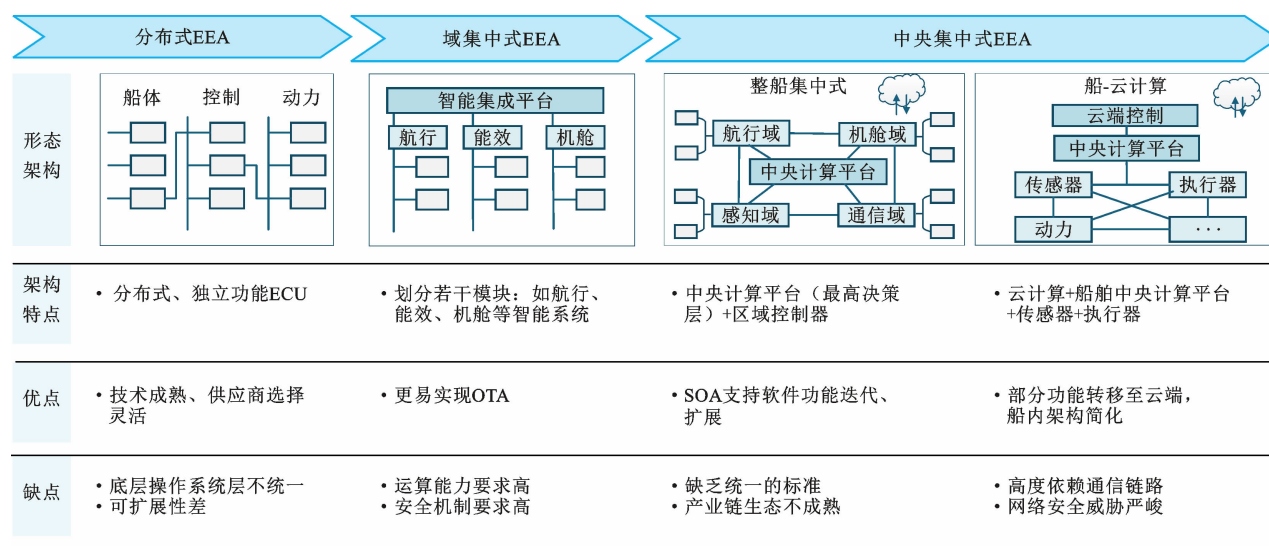


图 3 智能船舶 EEA 演进路线

Fig. 3 Evolutionary road for EEA of intelligent ships

高阶自主航行对强实时感知、多维决策融合及软件持续迭代拓展的需求。这种架构是支撑船舶迈向 L3 及 L4 等级的关键基石。

综上所述,域集中式架构主要解决了分布式阶段系统“离散与无序”的问题,通过系统模块化显著提升了集成度,而中央集中式架构则进一步解决物理层面的“冗余与繁重”及计算层面的“迟滞”问题,通过精简线束拓扑与聚合高性能算力,为实现船舶更高自主等级的智能航行奠定了物理基础。在此演进过程中,SOA 是中央集中式 EEA 实现软硬件解耦与功能重用的关键技术手段。尽管 SOA 在信息技术(Information Technology, IT)领域已应用成熟,但受限于船舶行业在标准框架、底层硬件及通信协议等方面产业链尚不成熟。未来,在智能船舶云计算阶段,船舶部分功能转移至云端,智能船舶的各种传感器和执行器可被软件定义和控制,船舶的零部件逐步实现标准化,最终达成软件定义船舶。

### 3 基于中央集中式 EEA 的软件定义智能船舶航行控制架构设计

随着软件定义理念在航运、船舶工业领域的深入应用,其在智能船舶航行控制系统中应用成为可能。通过将硬件设备资源抽象为可编程、可配置的软件模块,不仅能够不同航行任务需求下实现资源的动态分配与优化利用,而且能够大幅降低对物理硬件的依赖,适应动态且不确定的航行任务的需求,显著提升系统的灵活性与适应性。利用软硬件解耦、算力集中与数据深度融合的优势,本文提出了

一种基于中央集中式 EEA 的软件定义智能船舶航行控制架构。

#### 3.1 架构设计思路

本架构设计基于软件定义理念,通过软件编程对传感器、执行器等物理设备进行虚拟化实现资源的灵活、智能与集中化管理,将船舶感知/状态估计<sup>[40-41]</sup>、规划/决策、控制等智能航行功能模块化、服务化,并通过标准的 API 进行调用,进而达到“硬件资源池化、控制功能软件化、系统服务应用化”目标,为实现新一代航运系统背景下船舶航行控制系统智能化升级提供一个开放、智能且可持续演进的航行控制范式。架构设计遵循以下基本原则。

(1)分层解耦:用软件定义的思维方式,通过端到端的软件平台,连接输入(传感器)和输出(执行器)的物理硬件,形成了以软件为规划和优化的核心,以硬件为末端和执行的外壳,并要求终端节点设备具有虚拟化、无状态和可编配的特性<sup>[42]</sup>。

(2)船-岸-云协同:形成“云控端规划、船舶端执行、岸基端监管”的动态联动<sup>[43-44]</sup>。其中,云控端提供强大的算力与数据智能,船舶端负责复杂、动态环境下的实时反应与执行,岸基端进行实时远程监视。三者协同增效,实现在开阔水域船舶自主航行,在复杂水域使用遥控驾驶或辅助驾驶模式,必要时恢复到人工驾驶模式,通过多种模式互相切换,大幅减少船舶配员,降低事故发生风险。

(3)纵深防御与主动安全:软件定义智能船舶航行控制系统是具有高度开放性和网络化的软件架构,针对软件定义架构高度开放与网络化带来的潜

在威胁,构建“通信传输-身份访问-系统韧性”的纵深防御体系<sup>[45]</sup>。通信安全方面采用软件定义广域网技术与传输层安全协议,提供对网络进行软件编程,保障船岸异构网络下的链路机密性。访问控制方面构建零信任访问架构。结合基于角色的访问控制模型与多因素认证技术,对云端算法与岸基人员的权限进行动态最小化授权,严防内部越权操作。在系统韧性方面,采用弹性事件触发控制机制,通过优化通信负载来抵御拒绝服务攻击、虚假数据注入攻击等混合网络攻击,确保在高负载或攻击环境下的系统可用性<sup>[46]</sup>。

本文架构自上而下贯穿用户端、云控端、船舶端、岸基端以及应用层、控制层、设备层等四端三层,如图4所示。其中,通信网络有控制器局域网(Controller Area Network, CAN)、局域互连网络(Local Interconnect Network, LIN)等。通过端间

的协同与层间的解耦,实现从用户任务意图到船舶物理执行的端到端闭环,进而达成资源全局优化、功能弹性部署与系统持续演进的核心目标,最终支撑船舶多任务场景下的动态功能组合与按需服务。各部分具体功能介绍如下。

#### (1) 用户端

用户端是系统与用户(船东/船企)的直接交互界面,是航行任务的指令输入枢纽与全局态势的可视化窗口。其核心职能在于将用户的业务意图转化为系统可识别、可执行的航行任务指令,向云控端提交定制化的航行任务(如“点对点节能航行”或“特定时间窗口抵港”),实时接收并展示来自云控端的任务执行状态(如进度、预计抵达时间)、船舶实时态势(如船位、航速、设备状态),从而确保用户能够实时追踪船队的位置,在任务全周期内掌握船舶航行动态,为运营决策提供数据支持。



图4 基于中央集中式 EEA 的软件定义智能船舶航行控制架构

Fig. 4 Software-defined intelligent ship navigation control architecture based on centralized EEA

#### (2) 云控端

云控端是驱动整个航行控制架构的“智慧大脑”,承担全局资源解析、智能计算、任务规划、资源编排等核心职能。它接收用户端的任务指令,解析来自船舶端(船舶状态、设备健康度)与岸基端(气象、航道、港口调度)的多源资源信息。云控端主要在全球范围内执行数据处理、云服务管理、资源监控与编排及任务管理等任务,作为系统的数据中心、管

理中心和决策中心,从而确保船-岸-云协同计算架构的高效运行。在此过程中,超算中心依托其大数据中心提供全域数据基底,借助算法模型库实现模型驱动的决策优化,生成最优的航行策略与资源分配方案。最终,规划好的航行策略被下发至船舶端执行,船舶状态以及岸基调度信息同步至岸基端,以支持全局航行监管与交通组织优化。

作为云控端的知识基底,大数据中心汇聚了多

源历史与实时数据,包括全球海图、水文气象、港口信息、船舶性能数据、航行案例库等。算法模型库则存储和迭代优化各类智能算法,如深度强化学习路径规划模型、高精度船舶运动模型、设备预测性维护模型等。

### (3) 船舶端

船舶端是航行任务的直接执行者,负责承载具体的航行操作,在复杂海洋环境中安全、智能航行。它向云控端上传本船的基础资源信息,并接收来自云控端的航行指令。

船舶端内部采用应用层-控制层-设备层 3 层结构,实现控制逻辑与物理硬件的彻底解耦。其中,应用层接收来自云控端的航行指令,提供满足船舶智能航行控制需求的服务应用(如路径规划、路径跟踪),向控制层发送各种计算任务请求。控制层调度云计算、边缘计算和本地计算等资源来执行任务,并确保应用服务的及时交付。控制层由船舶中央网关控制器及其下属的功能域控制器(感知域、航行控制域、通信域)构成,可以通过软件编程实现,将设备层的物理设备(舵、推进器等)抽象为统一的逻辑信号,并生成具体的控制指令(如舵角、转速设定值)。控制层通过接口与设备层和应用层相连接,并通过网络控制岸基端和船舶端的计算环境,以实现船-岸-云协同计算控制。设备层作为物理实体,包括传感器、执行机构及船载计算硬件等,通过以太网、CAN 总线等网络架构连接,收集并传输资源、网络和设备的状态信息至控制层,同时接收来自控制层的控制指令或策略以处理和执行数据,负责接收并执行控制层的标准化指令,完成船舶最终的物理动作。

### (4) 岸基端

岸基端是一种部署在航道沿岸或港口区域的计算与服务实体。作为软件定义船舶智能航行控制的支持与协作中心,岸基端为船舶航行提供岸基保障和增值服务,向云控端输入岸基设施信息,并根据云控端的航行指令,进行全局航行监管与交通组织优化,有助于优化岸上资源调度,以实现跨区域协作。同时,岸基端负责结合场景需求,必要时实现不同航行模式的安全切换。

岸基端内部结构同样采用分层设计以实现功能解耦与服务化封装,包括岸基应用、岸基控制以及岸基设施。其中,应用层包括岸基监控大屏展示、船队运营优化调度等,为监管人员提供可视化决策支持。控制层负责保障船-岸-云之间的高效数据交互与指

令流转。它管理着岸基的计算资源与通信链路,确保远程接管指令能够低延迟、高可靠地传达至目标船舶。岸基设施涵盖通信接入设施、远程交互终端、计算基础设施、感知增强设施。其中,通信接入设施集成 5G/长期演进(Long Term Evolution, LTE)基站、卫星地面接收站及 VHF 数据交换系统(VHF Data Exchange System, VDES)基站,构建覆盖近岸至远海的异构通信网络接入环境;远程交互终端部署具备力反馈功能的远程驾控台及多维态势显示系统,作为人在回路接管操作的物理接口;计算基础设施配置高性能边缘服务器集群与安全网关,承载实时视频编解码及控制指令的本地化安全校验任务;感知增强设施利用岸基雷达等为船舶提供超视距的环境感知补盲支持。

## 3.2 功能阐述

为支撑上述船舶端应用层-控制层-设备层 3 层结构落地,本文架构在物理实现上采用了基于功能域的集中式电子电气架构。如图 5 所示,本文架构在整船层面设置中央网关控制器作为核心枢纽,并依据功能特性将底层硬件划分为三大核心功能域控制器,具体划分与定义如下。

(1)感知域:主要负责船舶周边环境信息的实时捕获与重构。通过集成摄像机、激光雷达、毫米波雷达及航海雷达等,实现多源异构数据的采集,为船舶提供全方位、多维度的环境态势数据支持。

(2)航行控制域:专注于船舶的运动执行与动力管理。通过航行控制域控制器,直接连接并管控发动机、电机等动力源,以及螺旋桨、推进器等操舵执行机构,依据上层决策指令精确调节航速与航向,保障船舶的动力输出与运动姿态控制<sup>[47]</sup>。

(3)通信域:负责保障“船-岸-云”之间的高效互联与数据交互。管理 4G/5G、海事卫星、北斗、VDES 及时长期演进(Time Division LTE, TD-LTE)等多模态链路,负责带宽调度与链路优选,确保宽带数据的实时性、稳定性以及广度覆盖。

## 3.3 通信网络机制

基于中央集中式 EEA 的软件定义智能船舶航行控制架构的通信网络设计分为域内骨干网络与外部协同网络 2 个层面。

船舶内部网络采用“中央网关-域控制器-ECU”的层级拓扑。传统的传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)/互联网协议无法满足高同步性和高实时性的控制要求,基于中央集中式 EEA 的器来完成整个网络内的时间同步,以满足低延迟和更

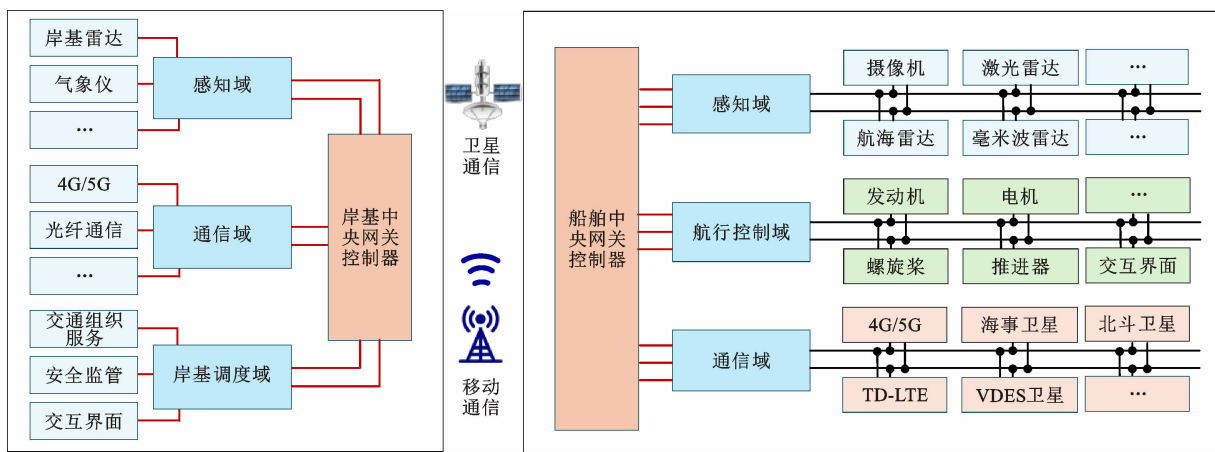


图 5 基于中央集中式 EEA 的软件定义智能船舶航行控制功能域划分

Fig. 5 Software-defined intelligent ship navigation control functional domain division based on centralized EEA

高鲁棒性的要求。在骨干网层面,中央网关与各领域控制器之间采用高带宽以太网作为主干链路。域内网络依据数据吞吐量与可靠性需求进行差异化配置。针对视觉感知与雷达点云数据,采用以太网或低压差分信号(Low Voltage Differential Signaling, LVDS)通信。LVDS 凭借其低功耗、强抗干扰及高速率特性,专门用于传感器原始视频流的无损传输。针对推进器、舵机等关键执行机构,沿用成熟的 CAN 总线,利用其高抗噪性确保控制指令的可靠传输。针对交换机状态监测及非关键传感器,采用 LIN 总线以降低线束与节点成本。域内的设备连接到 2 条通信总线,数据通过总线传输到中央网关控制器进行统一清理和处理。成本实现可行性方面,本文架构能够实现性能与成本的最佳平衡,既利用了以太网的高带宽解决了智能化带来的数据传输瓶颈,又最大限度地沿用成熟且低成本的 CAN/LIN 总线方案。

外部通信网络旨在构建“船-岸-云”协同体系,如图 6 所示。通过集成 4G/LTE/5G/WiFi/VHF 以及甚小口径终端网络(Very Small Aperture Terminal, VSAT)卫星通讯系统等多种通信手段,依据覆盖范围、带宽需求与通信成本执行多模态链路的智能切换策略。如表 3 所示,近岸/港区/内河场景优先接入 5G/4G 及 WiFi 网络,利用其高带宽、低时延特性,支持高清视频流实时回传、航行大数据转存及远程实时



图 6 船舶航行实时通信网络

Fig. 6 Real-time communication network for ship navigation

驾控。远海航行场景切换到通信卫星链路。在保障核心控制指令与关键状态数据连通性的同时,适应远海覆盖需求。法定安全通信始终保留 VHF/自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)链路,作为避碰与航行安全的法定保底手段。外部通信网络将依据覆盖范围、带宽需求与通信成本进行多模态链路的智能切换。

### 3.4 软件智能定义船舶航行控制流程介绍

如图 7 所示,软件智能定义船舶航行控制通过船-岸-云协同,实现船舶从出港到入港的全程智能航行,并支持用户对任务全周期进行透明化掌握和运营。其中,云端控制负责全局策略,岸端控制聚焦于

表 3 船舶通信特征与应用场景分析

Table 3 Analysis of ship communication characteristics and application scenarios

通信方式	覆盖范围	带宽	延迟	成本	核心用途
WiFi	船内/港口	高	较低	较低	船内局域网组网、靠港大数据转存
VHF	近距离	低	中	低	法定安全通信、AIS 数据、船-船避碰协调
4G/LTE	近岸	高	低	中	近岸航行时的视频回传、船员互联网
通信卫星	远海	低	高	高	远洋航行的唯一数据链路

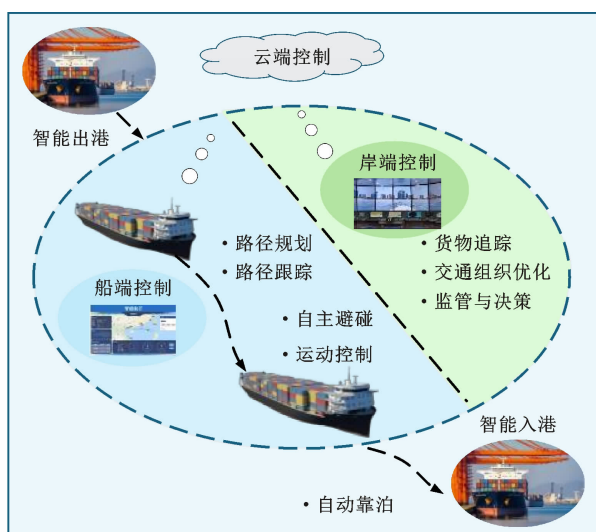


图 7 船舶全行程智能航行示意

Fig. 7 Intelligent navigation schematic for the entire voyage of ships  
货物追踪、交通组织优化与监管决策,船端控制则集成路径规划、自主避碰与运动控制等以保障独立智能航行。依据航行环境的复杂度与任务需求,动态调度差异化的软件服务以适应多变的航行场景。在港口及内河等复杂水域,系统通过云岸协同调用高精度遥控或自动靠泊服务,利用岸基感知增强弥补船端盲区;进入远洋开阔水域后,则自动切换至自主经济巡航模式,侧重于全局能效优化与自主避碰决策。

如图 8 所示,其以用户意图为起点,经云控端的策略制定与资源编排,通过船舶端的精确执行与岸基端的协同保障,整个航行控制流程形成“发布、制定、执行、学习”于一体的自适应智能闭环,具体步骤分解如下。

步骤 1:任务下发。用户通过用户端的交互界面,将宏观业务意图(如低能耗准时抵达)转化为航行任务指令发布给云控端。

步骤 2:策略制定与资源编排。云控端作为计算中枢,接收任务指令后,同步解析来自船舶端与岸基端的多源异构资源信息。基于大数据中心与算法模型库,系统生成全局最优航行策略,并对所需的感知、计算与通信资源进行自动化编排与实例化。依据软件定义理念,云控端根据任务需求动态编排计算与功能资源。

步骤 3:分层执行与协同控制。云控端航行指令下发至船舶端和岸基端,并遵循分层结构执行。船舶端依据分配的本地控制策略,利用船载算力处理实时感知数据,执行舵机与推进器控制,确保航行安全与快速响应。岸基端实时接收船舶端回传的状态数据,在岸基指挥中心构建可视化的“数字孪生”场景,供监

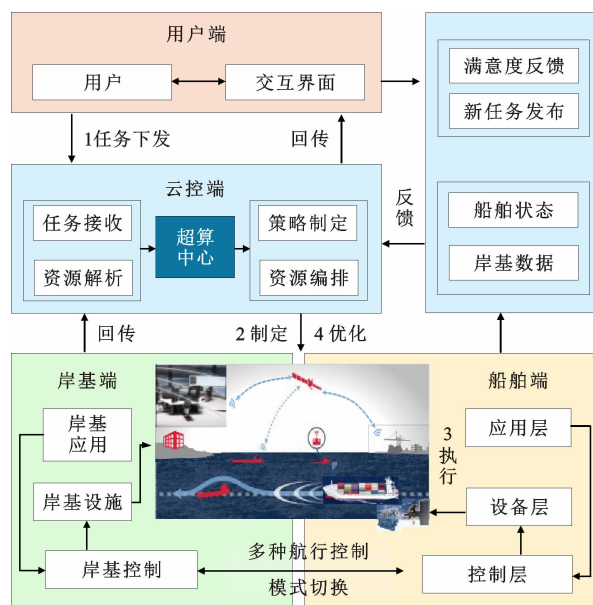


图 8 船舶智能航行控制流程

Fig. 8 Control flow of ship intelligent navigation

管人员实时掌握船舶位置、设备健康度及周边通航环境。同时,结合港口调度计划与气象水文信息,岸基端对多艘船舶进行宏观交通流优化,协调多船进出港次序与编队队形,避免区域性的交通拥堵与碰撞风险。在特殊工况下,通过岸基端发起动态干预(如航行模式切换),增强应对复杂航行场景的鲁棒性。

步骤 4:反馈与优化。云控端基于船舶和岸基端回传的实时数据,对比规划预期与实际表现,利用算法模型进行在线重规划与策略调优。同时,用户的满意度反馈与新任务输入被纳入系统,引导整个系统智能水平的持续演进。

### 3.5 软件定义智能船舶航行控制特征

软件定义理念赋予了智能船舶航行控制系统一套全新的运行范式。如图 9 所示,软件定义智能船舶航行控制将原本由 PLC 承担的计算决策与控制功能,迁移至部署在云端或本地服务器的软件模块中,通过将船舶的控制逻辑与物理硬件解耦,解决了传统系统软硬耦合的难题,使其具备灵活性、可重构性、可扩展性与易维护性的特性。

#### 3.5.1 控制功能与物理执行解耦

通过应用层-控制层-设备层的分层设计,实现了控制功能与物理硬件的彻底解耦<sup>[48]</sup>。在此框架下,高层控制逻辑被抽象为可复用、可组合的软件化服务,独立于底层特定硬件进行开发与迭代;而设备层则专注于接收标准化指令并完成精准的物理执行。这种解耦设计显著提升了系统的灵活性与可靠性:一方面,它支持控制算法的快速在线升级与扩展;另一

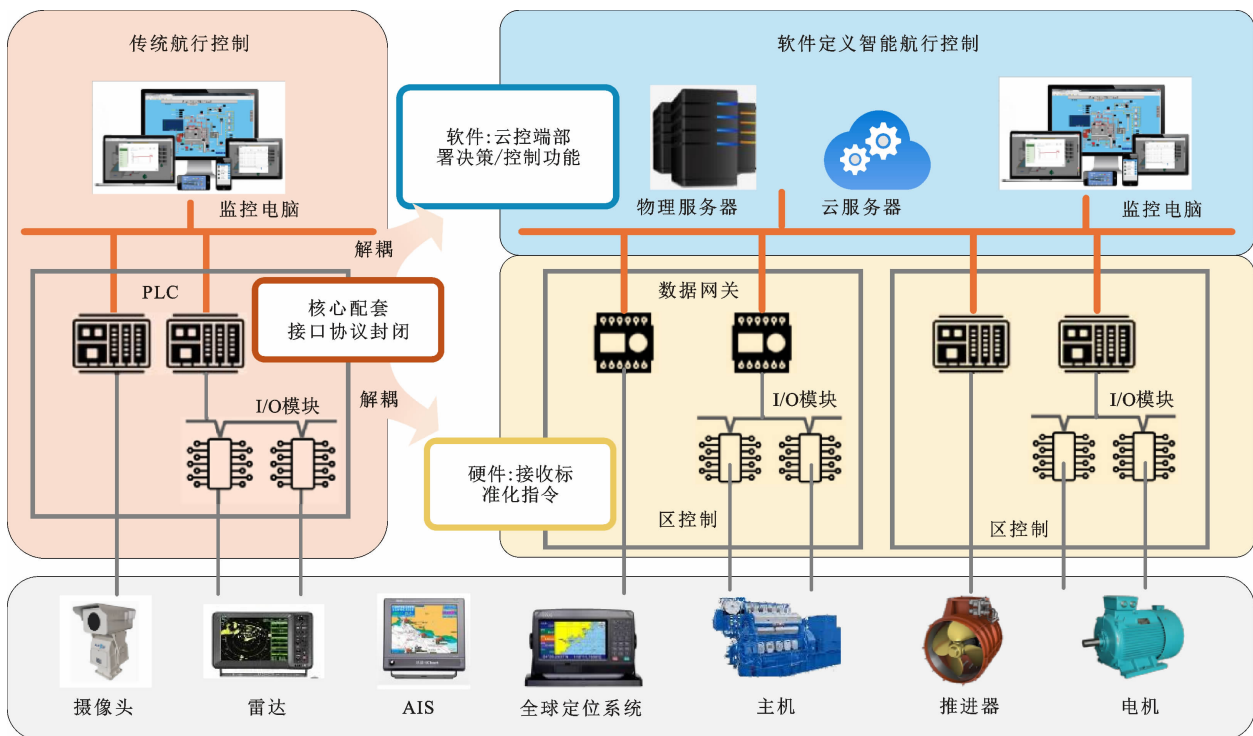


图9 硬件架构:传统航行控制系统与软件定义智能航行控制系统对比

Fig. 9 Hardware architecture: Comparison between traditional navigation control system and software-defined intelligent navigation control system

方面,当特定物理设备发生单点故障时,系统可基于最终有效指令或预设的降级策略维持船舶智能航行能力,同时,岸基端可介入实施协同驾控,从而确保在不确定环境下的任务可靠性与航行安全。

### 3.5.2 开放可扩展的体系架构

软件定义智能船舶航行控制架构本质上是开放可扩展的控制体系。在软件层面,通过标准化的应用编程接口,系统能够无缝集成第三方算法与服务至云控平台,持续丰富其智能模型库,赋能系统智能的持续演进;在硬件层面,推动船舶设备朝通用化、模块化发展,使得新增功能无需改变船载硬件基础,仅需在应用层部署或更新相应服务即可实现。这种开放性与软硬件解耦特性相结合,不仅降低了系统的升级维护成本,更奠定了船舶智能设备与系统智能化升级和发展的长效演进基础。

### 3.5.3 面向任务的按需服务与动态重构

通过将感知/状态估计、规划/决策、运动控制等核心功能模块化与服务化封装,系统在云控端的全局调度下,能够依据特定航行任务从虚拟化的资源池中动态抽取、组合并实例化所需的软件服务,从而快速构建一个与航行任务目标高度匹配的、临时的“虚拟控制系统”。这一过程不仅实现了从通用硬件平台到专用任务能力的按需映射,更确保了在不同

任务阶段或模式间切换时,系统功能与控制回路的平滑过渡与连续性,最终提升了整个系统应对复杂多变场景的适应性、任务执行效能与资源利用率。

## 4 验证与评估

为验证本文提出的基于中央集中的软件定义智能船舶航行控制架构的有效性,构建了一个基于“云控端+船舶端”的仿真验证平台,全面检验控制精度、资源调度、网络弹性防御延迟等性能,为新一代航运系统提供航行控制新范式。如图10所示,云控端部署在服务器,基于Python与roslibpy库开发,船舶端运行ROS1 Noetic并基于Virtual RobotX (VRX)仿真平台构建,通过ROS话题持续发布船舶的实时状态,并接受控制指令实现差速推进控制。

### 4.1 单船路径跟踪性能测试

在无额外网络延迟与丢包的受控环境中开展单艘无人船艇跟踪“∞”字形路径任务。图11展示了单船路径跟踪性能测试结果。图11(b)展示了实际跟踪与预设路径的对比,结合图11(d)跟踪误差数据,无人船艇能够精确地跟踪复杂曲线,具备良好的控制精度。图11(c)统计了网络往返时延(Round Trip Time, RTT)分布。

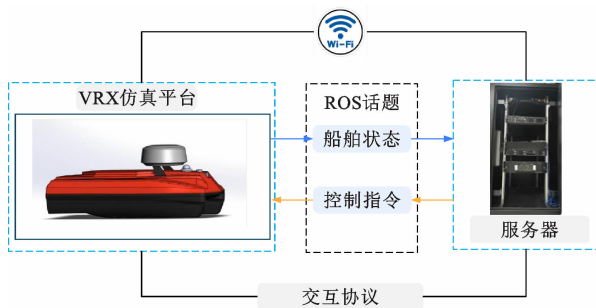


图 10 软件定义智能船舶航行控制试验平台架构

Fig. 10 Architecture of the software-defined intelligent ship navigation control test platform

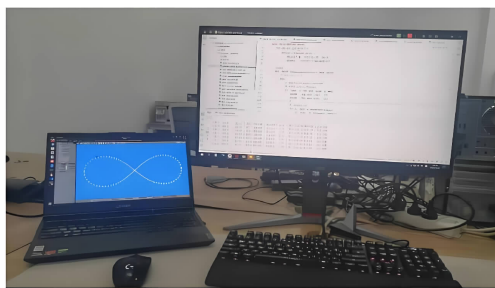
### 4.2 多船协同编队控制测试

开展多船协同编队控制测试,通过逐步增加受控船舶节点的数量,验证云控端在多任务并发下的调度能力。图 12 为多船协同编队测试结果。如图 12(a)和 12(b)所示,分布在不同起始位置的船舶保持编队队形并跟踪“∞”字形路径曲线。图 12(c)为

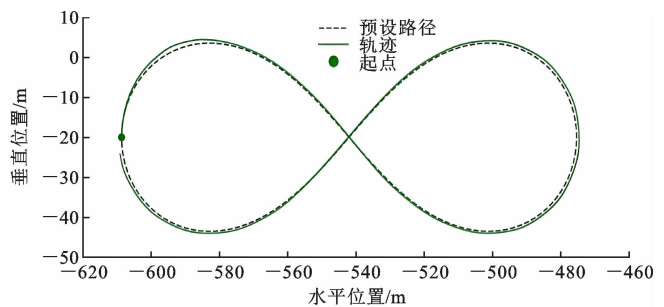
云控端的资源负载情况,展示了系统资源消耗与船舶数量的关系。在正常运行期间,计算负载较低,资源占用处于合理范围。随着受控节点增加,CPU 利用率呈线性增长趋势,内存占用增长平缓。图 12 (d)和 12(e)展示了多船协同编队控制的效果。

### 4.3 网络化控制测试

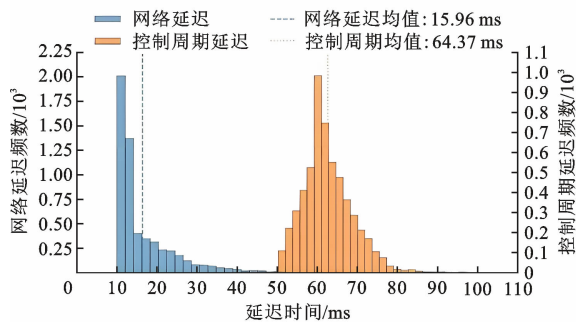
开放和网络化的软件架构使得通信易受到网络攻击,本试验模拟了混合网络攻击场景,图 13(a)展示了系统在遭受攻击时的最大偏差。在攻击初期,由于数据包丢失导致控制偏差瞬时上升,随之呈现下降趋势并回归稳定状态。图 13(b)为控制信号的释放间隔。在网络环境恶化时,事件触发机制降低了非关键数据的发送频率,有效过滤了冗余数据包。图 13(c)反映了 CPU 利用率的动态变化。在遭受混合攻击时,CPU 利用率显著飙升,表明攻击正在消耗系统资源,导致系统性能下降或出现故障。



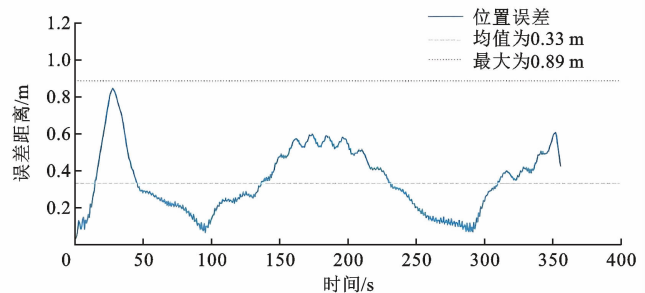
(a) 仿真环境



(b) 路径跟踪效果



(c) 系统资源使用统计



(d) 跟踪误差

图 11 单船性能测试结果

Fig. 11 Test results of a single ship performance

## 5 面临的挑战与展望

随着软件定义技术在智能船舶航行控制中的深入应用,其灵活性、可重构性和可扩展性优势逐渐显现。然而,受限于传统船舶供应链体系的封闭性、系统定义与功能需求的矛盾以及原有软件生态的固化,软件定义智能船舶的产业化落地仍面临严峻挑战。未来研究可重点围绕以下 4 个方向开展。

### (1) API 接口标准化建设

船舶设备来源复杂、协议各异,当前主机厂商与核心配套商(如 ABB、康斯伯格等)通过封闭的接口协议构筑技术壁垒,形成了供应链锁定。不同厂商的硬件接口和通信协议差异显著,导致系统在模块化集成、可重构部署及异构设备适配方面存在明显障碍。缺乏统一标准限制了软件定义灵活性的充分发挥,同时也制约了系统扩展和升级。未来应推动

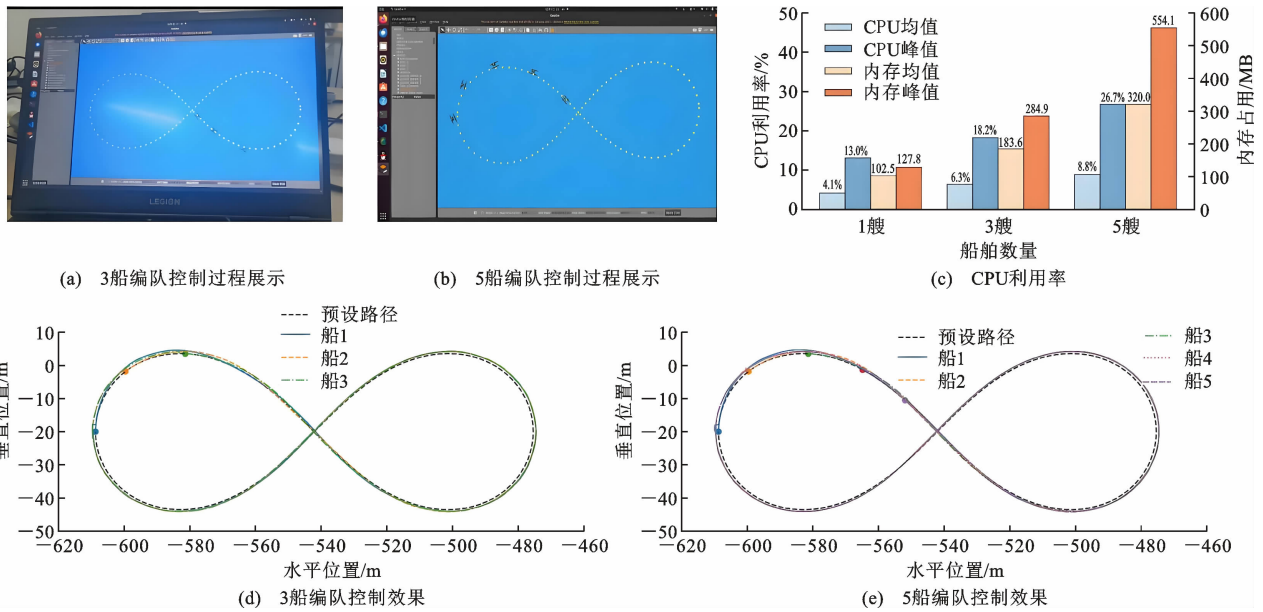


图 12 多船编队控制测试结果

Fig. 12 Test results of multi-ship formation control

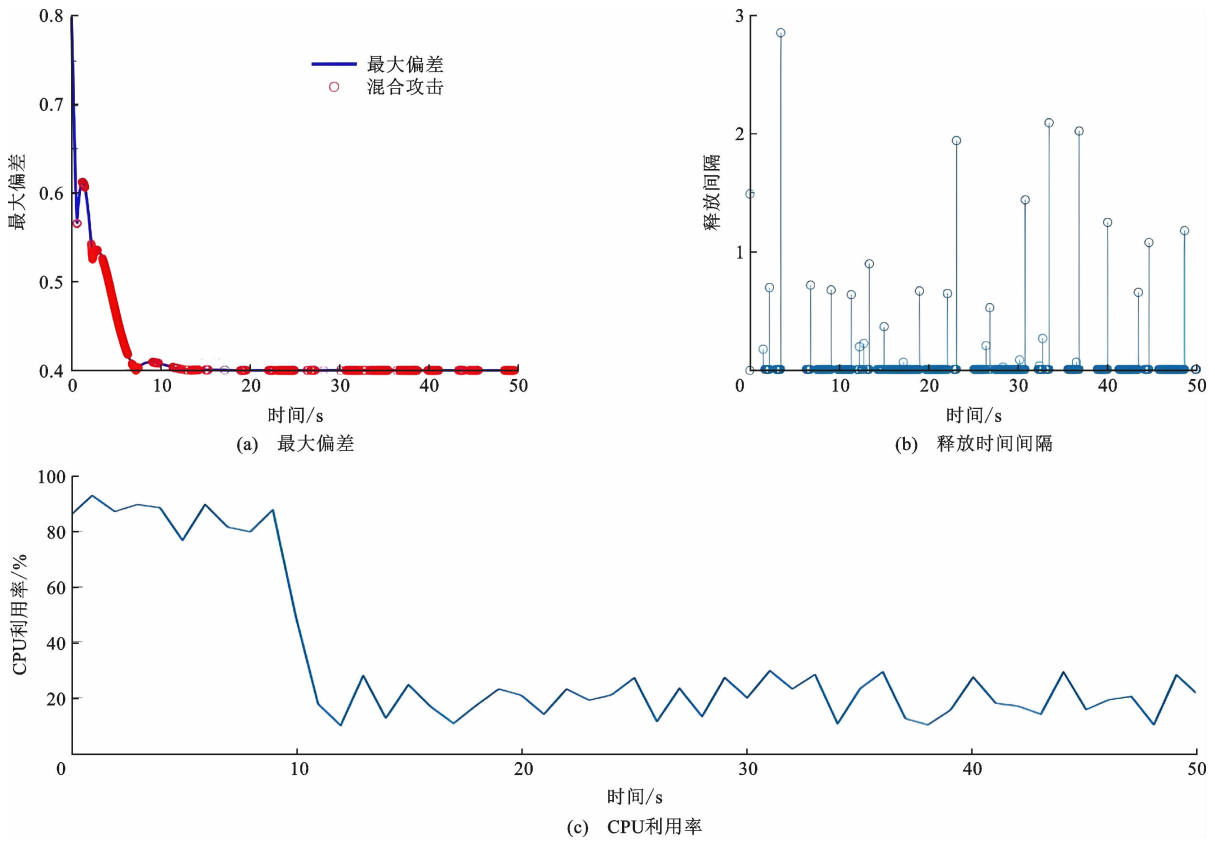


图 13 网络化控制测试结果

Fig. 13 Test results of networked control

软硬件接口和通信协议的标准化建设,建立可移植、可复用的软件功能模块,形成统一的适配框架,以提升跨平台和跨设备的互操作性,为系统灵活扩展和任务重构奠定基础。同时,应推动基于 SOA 的接口标准化建设,由领先的主机厂商或行业联盟牵头,

构建一个“核心标准开源,增值服务盈利”的生态模式,鼓励厂商在标准接口之上,通过提供更优的算法、数据分析等增值服务来获取收益,从而将竞争从硬件绑定转向软件与服务价值,最终实现船舶全生命周期的功能迭代与资产增值。

### (2)网络安全保障

软件定义架构的开放性在引入灵活性的同时,也使高度开放和网络化的软件架构易受到网络攻击、数据窃取和篡改,影响航行安全和船岸协同的可靠性。利用数据加密、可信身份认证和访问控制等手段,提升网络安全水平,保障智能航行,将是软件定义智能船舶航行控制发展亟需解决的重要问题。需将安全理念前置于架构设计阶段,构建零信任安全架构。技术层面,需推动硬件可信模块与SDN的动态微隔离技术深度融合,实现从设备启动到数据传输的信任链传递。产业配套方面,将催生对高安全等级船用交换机、具备安全启动功能的域控制器/中央网关等核心硬件的新需求,构建“软硬结合、动态防御”的纵深安全体系。

### (3)数据管理与分析

船舶、港口、用户及其他各类设备间的互联产生规模庞大、结构各异的异构数据,涵盖货物状态、交通流量、港口作业、船舶航线与气象条件等多个维度,使得数据挖掘、大数据分析可视化成为一项复杂而艰巨的任务<sup>[49]</sup>。传统以逻辑控制为主的PLC架构已无法满足大数据分析边缘AI推理的算力需求,数据价值挖掘面临算力瓶颈与架构限制。因此,亟需构建跨越船端边缘与岸基云端的高效数据处理框架,实现低延迟控制与大尺度分析的平衡。未来研究应致力于打通物联网、大数据与人工智能的技术链路,利用岸基云端进行模型训练与长周期能效分析,利用船端边缘进行实时决策与状态监控,从而通过数据驱动实现最佳航线规划、预测性维护与港口高效作业。

### (4)跨域协同通信

软件定义智能船舶航行控制依赖高速、稳定的通信网络,以保障船舶与岸基、船舶间、船舶内部多层级的实时信息交互。当前5G/6G通信技术为系统提供了更高频谱带宽和更低时延,为异构平台间的无缝协同创造了条件。然而,远洋环境下的通信链路波动大,且软硬件分层解耦后的跨层协议优化尚未成熟。未来研究应推动无线SDN标准与协议建立,结合边缘计算与人工智能技术,支撑智能船舶在远洋环境中的高可靠通信与任务协同。

## 6 结 语

(1)系统分析了软件定义理念下船舶航行控制发展现状,剖析了现有智能航行控制系统局限性,总结了船舶电子电气架构演进方向。

(2)构建了中央集中式的软件定义智能船舶航行控制架构,通过端间的协同与层间的解耦,实现船舶多任务场景下的动态功能组合与按需服务,搭建了轻量化软件定义智能船舶航行控制仿真系统,并进行了性能测试。

(3)阐述了软件定义智能船舶航行控制架构的核心特征,其灵活性、可重构性与可扩展性能够有效支撑船舶在多任务、高灵活性场景下的航行需求。

(4)未来应聚焦于软件定义智能船舶航行控制系统的服务拓展与落地,扩展算法库的通用性和智能化水平。

### 参 考 文 献 :

#### References :

- [1] NEGENBORN R R, GOERLANDT F, JOHANSEN T A, et al. Autonomous ships are on the horizon: Here's what we need to know[J]. *Nature*, 2023, 615: 30-33.
- [2] ZHAO Y J, MA Y, ZHU G B, et al. Stable training via elastic adaptive deep reinforcement learning for autonomous navigation of intelligent vehicles[J]. *Communications Engineering*, 2024, 3: 37.
- [3] ASLAM S, MICHAELIDES M P, HERODOTOU H. Internet of ships: A survey on architectures, emerging applications, and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9714-9727.
- [4] LIM J H, KIM J H, HUH J H. Recent trends and proposed response strategies of international standards related to shipbuilding equipment big data integration platform [J]. *Quality & Quantity*, 2023, 57(1): 863-884.
- [5] 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.
- [6] 王金龙,马宇薪,鲍永杰,等. FMEA/FMECA在船舶工程中的应用综述[J]. *交通运输工程学报*, 2026, 26(1): 158-175.  
WANG Jin-long, MA Yu-xin, BAO Yong-jie, et al. Application review on FMEA/FMECA in marine engineering [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2026, 26(1): 158-175.
- [7] 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, 76.  
YAN Xin-ping, LI Chen, LIU Jia-lun, 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, 76.
- [8] 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.
- 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.
- [9] 马 勇,胡祖硕,王雯琦,等. 船用智能设备与系统的发展现状与展望[J]. 机械工程学报,2024,60(20):181-192.
- MA Yong, HU Zu-shuo, WANG Wen-qi, et al. Development status and prospect of marine intelligent equipment and system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(20): 181-192.
- [10] PARSONS M A, KARA M Y, ROBINSON K M, et al. Early-stage naval ship distributed system design using architecture flow optimization[J]. Journal of Ship Production and Design, 2021, 37(2): 78-96.
- [11] WANG W W, GUO K D, CAO W K, et al. Review of electrical and electronic architectures for autonomous vehicles: Topologies, networking and simulators [J]. Automotive Innovation, 2024, 7(1): 82-101.
- [12] 李 晨,严新平,刘佳仑,等. 船舶远程驾驶控制系统设计与应用[J]. 交通运输工程学报,2024,24(5):333-347.
- LI Chen, YAN Xin-ping, LIU Jia-lun, et al. Design and application of ship remote-driving control system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(5): 333-347.
- [13] 李海涛,黄治华,夏 洋. 基于软件定义的海上异构网络信息传输技术[J]. 舰船科学技术,2023,45(17):139-144.
- LI Hai-tao, HUANG Zhi-hua, XIA Yang. Research on information transmission technology based on SDN for marine heterogeneous networks[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(17): 139-144.
- [14] CHEN H L, WEN Y Q, ZHU M, et al. A function-oriented electronic and electrical architecture of remote control ship on inland river: Design, verification, and evaluation[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 1641-1652.
- [15] 徐 亮,王欣安,刘 希,等. 中大型无人船舶自主控制系统架构设计及实现[J]. 中国舰船研究,2024,19(增1):1-9.
- XU Liang, WANG Xin-an, LIU Xi, et al. Architecture design and implementation of autonomous control system for medium and large unmanned surface ship[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(S1): 1-9.
- [16] 柴天佑,郑 锐,贾 瑶,等. 软件定义智能控制系统未来发展展望[J]. 东北大学学报(自然科学版),2025,46(7):1-10.
- CHAI Tian-you, ZHENG Rui, JIA Yao, et al. Development and prospects for software-defined intelligent control systems [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2025, 46(7): 1-10.
- [17] 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 Yong, WANG Wen-qi, YAN Xin-ping. Research progress of vessel intelligent navigation technology for the new generation of waterborne transportation system [J]. Scientia Sinica Technologica, 2023, 53(11): 1795-1806.
- [18] ZHANG X G, SUN Y L, ZHU B C, et al. Wireless microwave-to-optical conversion via programmable metasurface without DC supply[J]. Nature Communications, 2025, 16: 1-10.
- [19] AHMAD I, NAMAL S, YLIANTTILA M, et al. Security in software defined networks: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2317-2346.
- [20] YANG J C, ZHANG J P, WANG H H. Urban traffic control in software defined internet of things via a multi-agent deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(6): 3742-3754.
- [21] LIU L, GUO X G, LEE C. Promoting smart cities into the 5G era with multi-field Internet of Things (IoT) applications powered with advanced mechanical energy harvesters [J]. Nano Energy, 2021, 88: 106304.
- [22] CHENG C F, SRIVASTAVA G, LIN J C, et al. Fault-tolerance mechanisms for software-defined internet of vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(6): 3859-3868.
- [23] YUREKTEN O, DEMIRCI M. SDN-based cyber defense: A survey[J]. Future Generation Computer Systems, 2021, 115: 126-149.
- [24] TAN S, XIE P L, VASQUEZ J C, et al. Developments, challenges and future opportunities in cybersecure microgrid control[J]. Nature Reviews Electrical Engineering, 2025, 2(8): 522-540.
- [25] SAHAY R, SEPULVEDA D A, MENG W Z, et al. CyberShip: An SDN-based autonomic attack mitigation framework for ship systems[M]. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [26] SAHAY R, MENG W Z, ESTAY D A S, et al. CyberShip-IoT: A dynamic and adaptive SDN-based security policy enforcement framework for ships [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 100: 736-750.
- [27] GUO H Z, WANG Y T, LIU J J, et al. Multi-UAV cooperative task offloading and resource allocation in 5G advanced and beyond[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(1): 347-359.
- [28] ZHAO L, YANG K Q, TAN Z Y, et al. A novel cost optimization strategy for SDN-enabled UAV-assisted vehicular computation offloading[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(6): 3664-3674.
- [29] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. Nature, 2014, 507(7492): 341-345.
- [30] WANG S R, CHEN Z Y, CHEN S N, et al. Simplified radar architecture based on information metasurface[J]. Nature Communications, 2025, 16: 6505.
- [31] WEI M C, HU C R, ESTÉVEZ D, et al. Design and flight results of the VHF/UHF communication system of Longjiang lunar microsattellites[J]. Nature Communications, 2020, 11:

- 3425.
- [32] LI H, LUO Q L, LI R. Optimizing urban car-sharing systems based on geospatial big data and machine learning: A spatio-temporal rebalancing perspective[J]. *Travel Behaviour and Society*, 2025, 38: 100875.
- [33] LIU J, YANG F, LI S, et al. Testing and evaluation for intelligent navigation of ships: Current status, possible solutions, and challenges[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 295: 116969.
- [34] MA Y, HU M Q, YAN X P. Multi-objective path planning for unmanned surface vehicle with currents effects[J]. *ISA Transactions*, 2018, 75: 137-156.
- [35] LIU C L, MA Y, CAO C, et al. Ship route planning in the pirate area via hybrid probabilistic roadmap algorithm within the context of the Maritime Silk Road[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 238: 106585.
- [36] LIN C J, SHI Y, XIE C J, et al. Quantification and mitigation of border-level localization deviation for object detectors[J]. *Expert Systems with Applications*, 2025, 278: 127435.
- [37] BREFORT D, SHIELDS C, HABBEN JANSEN A, et al. An architectural framework for distributed naval ship systems[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 147: 375-385.
- [38] PARSONS M A, ROBINSON K M, KARA M Y, et al. Application of a distributed system architectural framework to naval ship concept and requirements exploration[J]. *Naval Engineers Journal*, 2020, 132(4): 105-124.
- [39] CHEN H L, WEN Y Q, HUANG Y M, et al. From integrated bridge system to marine bridge domain: A computational perspective[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 298: 117171.
- [40] THOMBRE S, ZHAO Z, RAMM-SCHMIDT H, et al. Sensors and AI techniques for situational awareness in autonomous ships: A review[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(1): 64-83.
- [41] WANG W Q, MA Y, ZHU G B, et al. State estimation for AMVs: A GPTVM distribution with adaptive parameter selection-based VBUKF approach[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(22): 41409-41418.
- [42] 王孟阳,张钊华,李超越,等. 软件定义分布式无人飞行器集群实时仿真推演验证系统[J]. *指挥与控制学报*, 2025, 11(4): 482-492.
- WANG Meng-yang, ZHANG Zhao-hua, LI Chao-yue, et al. Software-defined distributed unmanned aerial vehicle swarm real-time simulation and deduction validation systems[J]. *Journal of Command and Control*, 2025, 11(4): 482-492.
- [43] 李梦霞,徐图远,邹天悦,等. 船舶远程驾控人机交互界面优化设计研究[J]. *交通运输工程学报*, 2025, 25(3): 304-316.
- LI Meng-xia, XU Tu-yuan, ZOU Tian-yue, et al. Research on optimal design of human-machine interaction interface of remotel navigation and control ships[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(3): 304-316.
- [44] 李梦霞,徐图远,邹天悦,等. 内河船舶远程驾控技术试验研究[J]. *交通运输工程学报*, 2025, 25(2): 141-155.
- LI Meng-xia, XU Tu-yuan, ZOU Tian-yue, et al. Experimental research on remote navigation and control technology for inland waterway ships[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(2): 141-155.
- [45] LIAO Y Z, LIU J Y, CHEN X Y, et al. Energy minimization of inland waterway USVs for IRS-assisted hybrid UAV-terrestrial MEC network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(3): 4121-4135.
- [46] MA Y, HU Z S, QI X, et al. Dynamic event-triggered fuzzy control of networked unmanned surface vehicles under hybrid cyber attacks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025, 72(6): 6422-6431.
- [47] 陈立家,周欣蔚,杨沛艺,等. 面向环境不确定性的船舶操纵运动建模与预报方法[J]. *交通运输工程学报*, 2024, 24(3): 279-295.
- CHEN Li-jia, ZHOU Xin-wei, YANG Pei-yi, et al. Modeling and prediction method of ship maneuvering motion facing environmental uncertainty[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2024, 24(3): 279-295.
- [48] RAFIQUE W, QI L Y, YAQOOB I, et al. Complementing IoT services through software defined networking and edge computing: A comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(3): 1761-1804.
- [49] 梁才,李文勇,王长海,等. 内河航道数字孪生技术研究进展、关键技术与前景[J]. *交通运输工程学报*, 2026, 26(4): 200-229.
- LIANG Cai, LI Wen-yong, WANG Chang-hai, et al. Research progress, key technologies, and prospects of digital twin technology for inland waterway[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2026, 26(4): 200-229.