

智能无人船艇技术应用与协同研究综述

A Review on the Application and Coordination Technologies of Intelligent Unmanned Surface Vehicles

李 畅¹, 楼建坤², 张明阳^{2*}

LI Chang¹, LOU Jiankun², ZHANG Mingyang^{2*}

1. 哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 哈尔滨 150001

College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

2. 上海交通大学, a. 海底科学与划界全国重点实验室; b. 海洋智能装备与系统教育部重点实验室, 上海 200240

Shanghai Jiao Tong University,

a. State Key Laboratory of Submarine Geoscience;

b. MOE Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment and System, Shanghai 200240, China

基金项目: National Natural Science Foundation of China (NSFC) Under Grant No.52501441 and
National Natural Science Fund for Excellent Young Scientists Fund Program(Overseas) Under Grant No.24FAA02373

摘 要

Abstract

【DOI】1 0.13788/j.cnki.cbgc.2026.03.Z3

[目的] 为系统梳理无人水面艇 (USV) 的技术演进脉络并探索其与智能船舶融合发展的路径, 以突破单艇在续航、算力及通信上的性能瓶颈, [方法] 回顾 USV 从无线电遥控到全自主航行、从单体作业到集群协同的百年发展历程。深入剖析环境感知、决策规划、控制驱动及通信链路四大关键核心技术。在此基础上, 重点探讨 USV 与大型智能船舶的融合趋势, 分析“母船-子艇”跨域协同作业模式及数字孪生驱动的云端管控体系。[结果] 当前 USV 技术正经历从“感知-避障”向“认知-博弈”的智能化跃升, 而“母船-子艇”协同模式通过将大型船舶的平台优势与 USV 的机动优势结合, 可有效解决单艇在深远海复杂环境下作业与大型智能船舶进出港“最后一公里”操纵的难题, 实现优势互补。[结论] 该协同模式是未来海洋作业的主流范式, 但仍应在法律法规适应性、通信网络安全及绿色能源动力等方面持续攻关, 研究成果可为构建空海潜一体化的新型海洋智能装备体系提供理论参考。

[Purpose] To systematically review the technological evolution of unmanned surface vehicles (USVs) and explore the path of their convergence with intelligent ships, aiming to overcome the performance bottlenecks of individual USVs regarding endurance, computing power, and communication. [Method] It reviews the centennial evolution of USVs, tracing the transition from radio remote control to fully autonomous navigation, and from single-agent operation to swarm collaboration. It provides an in-depth analysis of four core technologies: environmental perception, decision planning, motion control, and communication links. On this basis, the study focuses on the convergence trend between USVs and large intelligent ships, analyzing the "mothership-drone" cross-domain collaborative operational mode and the cloud-based management system driven by digital twins. [Result] It indicates that current USV technology is undergoing an intelligent transition from "perception-avoidance" to "cognition-gaming". Furthermore, the "mothership-drone" collaborative mode, by combining the platform advantages of large ships with the high maneuverability of USVs, effectively resolves the challenges of individual USV operations in complex deep-sea environments and the "last mile" maneuvering difficulties for large intelligent ships entering and leaving ports, thereby achieving complementary advantages. [Conclusion] Collaborative mode represents a mainstream paradigm for future maritime operations. However, continuous

breakthroughs are still required in areas such as regulatory adaptability, communication network security, and green energy propulsion. The findings provide theoretical references for constructing a new integrated air-surface-underwater intelligent maritime equipment system.

关键词

Key words

无人水面艇; 智能船舶; 集群协同; 母船 - 子艇

unmanned surface vehicle (USV); intelligent ship; cluster collaboration; mother ship submarine

0

引言

随着海洋强国战略的深入实施与无人系统技术的跨越式发展, 无人水面艇 (Unmanned Surface Vehicle, USV) 作为一种高机动、低成本、零人员伤亡风险的海洋智能装备, 正逐步成为重塑未来海洋作业范式的核心力量^[1]。自 2022 年以来, 黑海海域的案例^[2], 特别是以 Magura V5 为代表的低成本 USV 展现出的高隐蔽性与集群突防能力^[3], 深刻验证无人装备在现代海权博弈中的战略价值^[4]。USV 在民用领域展现出广阔的应用前景, 被广泛应用于海洋环境监测^[5-6]、水下地形测绘^[7]、海洋生物现象探索^[8]、海面信息采样^[9]、油气运维^[10-11]及海上搜救^[12]等场景, 成为推动全球“蓝色经济”数字化转型的关键支撑技术。然而, 尽管 USV 在特定场景下已取得显著成效, 但受限于自身的物理尺度与技术成熟度, 其在深远海复杂环境下的作业能力仍面临严峻挑战。首先, 单体 USV 吨位较小, 抗风浪能力 (耐波性) 与续航力有限, 难以在恶劣海况下长时间独立执行任务; 其次, 现有 USV 的智能化水平多停留在“感知 - 避障”的初级阶段, 在面对动态非结构化环境时的自主决策鲁棒性不足, 且高度依赖岸基远程遥控, 一旦遭遇通信拒止或高延迟环境, 极易丧失作业能力; 最后, 单艇作业感知范围受限, 难以满足大尺度海域的全时空立体观测需求。

针对上述瓶颈, 将 USV 的高机动性与大型

智能船舶 (Intelligent Ship) 的强续航、强算力及平台优势深度融合, 构建“母船 - 子艇”跨域协同作业系统, 已成为当前海洋工程领域的前沿发展趋势^[13-14]。然而, 现有综述多聚焦于单体 USV 的控制算法或特定传感器技术, 缺乏对 USV 技术演进脉络及其与大型智能船舶跨域融合体系的系统性梳理与探讨。

鉴于此, 本文旨在立足于海洋装备智能化转型的时代背景, 系统综述无人艇从无线电遥控向高度自主化、集群化演进的技术脉络, 并重点探讨其与智能船舶融合发展的技术路径。介绍 USV 与智能船舶的国内外研究现状; 回顾 USV 的百年发展历程, 揭示其控制方式与任务形态的演进规律; 再深入剖析决定 USV 自主能力的四大核心技术: 多模态环境感知、数据驱动的决策规划、复杂海况下的鲁棒控制及异构通信链路, 指出当前技术架构面临的挑战与突破方向; 在此基础上, 本文将重点聚焦“无人艇与智能船舶融合”这一核心议题, 详细阐述“母船 - 子艇”协同作业模式及数字孪生驱动的云端管控体系, 分析这种跨域异构协同如何解决单艇在续航、算力与通信上的局限; 从法律法规适应性、通信网络安全及绿色能源动力 3 个维度展望未来的发展挑战, 以期构建新型海洋智能装备体系提供理论参考与技术支持。

1 USV 技术的国内外研究现状

1.1 国外研究现状

目前，伴随着人工智能与低轨卫星技术的成熟，无人艇技术呈现爆发式发展。在该方面美国始终处于领先地位，以色列、法国和乌克兰等国紧随其后。

美军自 2019 年修订水面无人艇规划，再到 2021 年发布的海军无人作战框架，已基本形成了由小型（10 吨级左右）、中型（百吨级）和大型（千吨级）3 种吨位无人艇构成的体系结构^[15]。在小型无人艇发展方面，美国小型无人艇初创公司 Seasats 近日推出了轻鱼（Light Fish）和快鱼（Quick Fish）两型无人艇见图 1。图 1 中轻鱼无人艇采用太阳能动力，能够在 6 级以上海况连续航行数月，自主航行数千公里，并配备雷达、传感器和配有可见光与热成像仪的摄像机，可通过机载星链装置将视频实时传输给操作人员，用于在公海、沿海和内陆水道持续进行监侦收集任务。快鱼无人艇是一款拥有拦截功能的高速无人

艇，最高航速超过 35 kn，具备隐藏式无人机发射舱。在中型百吨级无人艇方面，美军代表型号有海上猎人（Sea Hunter）号和海鹰（Seahawk）号反潜无人艇^[16]。在大型无人艇方面，美军大力推进的幽灵舰队霸主^[17]（Ghost Fleet Overlord）项目下的游侠（Ranger）号、游牧者（Nomad）号、水手（Mariner）号等也陆续交付。

以色列作为全球无人系统技术的先行者，在 USV 领域一直处于世界第一梯队，其无人艇技术路线侧重于智能化、多任务化以及有人/无人协同。由 Elbit Systems 公司推出的海鸥（Seagull）号^[18]无人艇是目前以色列最成熟、国际知名度最高的无人艇平台，该艇装备了高性能的吊放式声呐和拖曳声纳，可以搭载轻型鱼雷并具备极强的自主反潜能力，能够协同无人机进行跨域搜索。



图 1 美国的无人艇代表型号
Fig. 1 Representative Models of USVs in the United States

1.2 国内研究现状

我国的 USV 研究相较于国外起步虽晚，但近年来在高校、科研院所及高科技企业的共同推

动下，部分领域已处于国际领跑地位，部分代表型号船只见图 2。



(a) 天行一号



(b) 精海 15 号



(c) JARI-USV



(d) 珠海云智能无人系统母船

图 2 国内的无人艇代表型号

Fig. 2 Representative Models of USVs in China

由哈尔滨工程大学牵头研制的天行一号及后续研发的天行系列高速 USV，重点解决了 USV 在高海况下高速航行的纵向稳定性与飞溅抑制的难题，其最高航速突破 50 kn，处于国际领先水平^[19]。上海大学研制的精海系列 USV 在极地科考与岛礁浅水域测绘中展现了极强的环境适应性，解决了高纬度海区通信不稳定下的自主作业难题^[20]，最新型号精海 15 号还具备多功能侦察警戒的功能^[21]。由江苏自动化研究所与中国船舶科学研究中心联合研制的多用途无人艇，江苏自动化研究所研制的无人水面载具（Jiangsu Automation Research Institute - Unmanned Surface Vehicle, JARI-USV）被誉为迷你宙斯盾舰，集成

了相控阵雷达、垂发系统等，是目前全球集成度最高的 USV 之一^[22]。2022 年交付的全球首艘智能型无人系统科考母船珠海云号^[23]，可搭载数十艘 USV 及无人机，实现了空海潜跨域无人系统的自动布放、回收与协同指挥^[24]，开辟了 USV 与智能船舶融合的新路径。

综上所述，近年来国内外 USV 研究呈现出不同的侧重点，见表 1。国外依托深厚的工业基础，研究侧重于大平台、长航时、强武器化，致力于将 USV 融入航母打击群；而国内则在集群算法、高速机动、跨域母船方面展现出独特的创新优势。

表 1 国内外部分典型 USV 性能参数与技术特征对比

Tab. 1 Comparison of Performance Parameters and Technical Characteristics of Some Typical USVs at Home and Abroad

型号 / 项目	国家	研发单位	艇长 /m	排水量 /t	核心技术特征	应用场景
Light Fish	美国	Seasats	3.5	0.16	太阳能动力；低空雷达散射截面；轻量化单人部署	海洋测绘；安防巡逻
Quick Fish	美国	Seasats	4.2	0.45	高速喷水推进；混合动力系统；宽体稳定性设计	港口安全拦截；中近海反走私
Sea Hunter	美国	DARPA/Leidos	40.0	145.00	符合 COLREGs 自主避碰；反潜持续追踪；数月长航时	远海反潜；情报侦察
Ranger	美国	Leidos/Gulf Island Fabrication	59.0	670.00	模块化任务甲板；自主避碰；卫星链路远程接管	远程火力打击；船队指挥通信中继
Nomad	美国	SCO/Leidos	53.3	650.00	远洋自主导航；卫星远程指控系统；高可靠性机电冗余	跨洋长途自主调运验证；分布式感知节点
Mariner	美国	Leidos/Gulf Craft	59.1	673.00	虚拟化宙斯盾战斗系统；多船协同指挥中心；自主避碰算法	宙斯盾系统分布式部署测试；远程火力增援
Seagull	以色列	Elbit Systems	12.0	11.50	模块化任务载荷；双引擎推进；卫星 / 视距双模通信	反潜作业；水雷对抗；海域安全巡逻
Protector	以色列	Rafael	9.0	4.00	遥控 / 半自主；模块化任务载荷；实战经验丰富	港口安防；反恐
Magura V5	乌克兰	Spets Techno Export	5.5	1.00	低成本；卫星遥控；集群突防；半潜式隐身设计	自杀式攻击；非对称作业
天行 -1 号	中国	哈尔滨工程大学	12.2	7.50	高速规划；复杂海况下的高耐波性控制	高速巡逻；海事监管
JARI-USV	中国	中国船舶集团有限公司	15.0	20.00	四面有源相控阵雷达；8 单元小型垂直发射系统 (VLS)；模块化任务载荷	近海反潜、防空、对海打击
珠海云	中国	南方海洋实验	88.5	2 000.00	全球首艘智能母船；空海潜跨域协同指挥；国产自主动力	跨域协同科考；装备试验

2 无人艇技术演进历程

USV 作为海洋智能系统的核心组成部分，其发展历程并非简单的线性时间堆砌，而是由单一硬件平台向“端 - 边 - 云”融合智能体演进的系统工程。纵观无人艇百余年的发展史，其技术演

进逻辑可归纳为 2 个核心维度的跃升：控制方式从遥控向全自主的跨越以及任务形态从单体作业向集群协同的变革，国外的无人艇代表型号见图 3，发展时间线归纳见图 4。



(a) 美国斯巴达侦察兵号

(b) 以色列保护者号

(c) 法国检验者号

图 3 国外的无人艇代表型号

Fig. 3 Representative Models of USVs Abroad

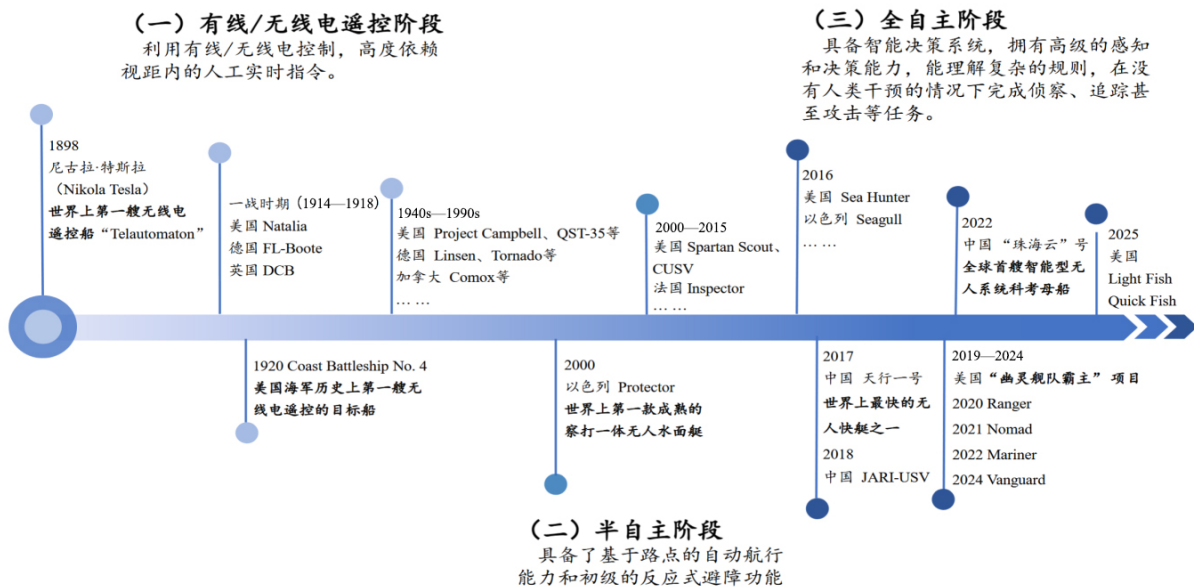


图4 无人艇的发展时间线
Fig. 4 Development Timeline of USVs

2.1 控制维度的演进历程

无人艇的最初起源可以追溯到1898年尼古拉·特斯拉 (Nikola Tesla) 展示了世界上第一艘无线电遥控船 Telautomaton，该船利用无线电波控制方向舵和灯光，这被公认为是无人艇的鼻祖^[25]。由此开启了早期有线和无线电遥控无人艇的时代，从一战德国的 FL-Boote 遥控艇^[26]、美国的由 USS Iowa (BB-4) 号改装为无线电遥控靶舰的 Coast Battleship No. 4，到二战期间及冷战期间的靶船与扫雷艇，如，加拿大的 COMOX^[27] 和 DOLPHIN^[28] 以及美国的由登陆艇改装的遥控无人艇，其本质均为“人在回路”的遥控系统。这一阶段的无人艇缺乏环境感知能力，高度依赖视距内的人工实时指令，仅能作为高危环境下的替身工具，执行科学监测、靶舰模拟和水雷对抗等多样化任务^[29]。

时间进入20世纪90年代，这一阶段是无人艇发展的黄金转型期，随着全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)、计算机处理能力和卫星通信的普及，无人艇开始从“遥控”向“自主”转变。无人艇进入了半自主 (Semi-Autonomous) 的阶段。以美国的“斯巴达侦察

兵” (Spartan Scout) 号^[30-32]、以色列的保护者 (Protector) 号^[33] 和法国的检验者号为代表的装备，如图3所示，具备了基于陆点的自动航行能力和初级的反应式避障功能，可用于执行情报侦察、可疑目标辨别、战术拦截、电子干扰和精确打击等任务。此时的控制逻辑多基于规则，虽然实现了“人在回路外”的监督式控制，但在面对复杂动态海况时仍显僵化。

2016年以来，随着人工智能 (Artificial Intelligence, AI)、深度学习、5G通信与边缘计算的突破，无人艇发展进入了智能化与群智化的爆发期，开始向全自主 (Fully Autonomous) 迈进。代表性成果如美国“海上猎人” (Sea Hunter) 号，具备 Level 4-5 级自主性，其核心突破在于集成了符合《国际海上避碰规则》 (International Regulations for Preventing Collisions at Sea, COLREGs) 的智能决策系统，能够在无人干预下实现数千海里的跨洋航行与潜艇追踪。这一阶段的 USV 具备了环境理解与认知能力，实现了从“按指令航行”到“按任务思考”的质变，达到了真正的自主。

2.2 形态维度的演进历程

在任务形态上，由于单艇具有较大的局限性，无人艇正经历从单平台作业向分布式集群与跨域协同的范式转移。早期的无人艇如由中国气象局大气探测技术中心、中国科学院沈阳自动化研究所研发的天象一号^[34-35]、哈尔滨工程大学研发的天行-1号等主要聚焦于单艇的高速性与耐波性验证。然而，单艇在感知范围与任务载荷上的物理局限，促使技术向集群化发展。

近年来，在分布式作业概念的指导下和以乌克兰“狼群战术”为代表的实战应用表明，通过低轨卫星链路（如 Starlink）将大量低成本、小型化 USV 组网，可形成具备高鲁棒性的分布

式杀伤网^[36]。如上文提到的游侠（Ranger）和游牧者（Nomad）等 4 艘无人艇，充分体现了跨域协同与远程控制的能力。同时，我国在集群控制领域亦取得显著进展，从云洲智能的 56 艇鲨群协同测试，到全球首艘智能科考母船珠海云号的交付，不仅标志着我国无人艇技术进入了智能科考的新纪元，拥有了大型化与母船技术，也标志着无人艇技术已突破同构集群，向“母船-子艇”跨域异构协同（Cross-Domain Heterogeneous Collaboration）的高级形态演进。这种通过将大型船舶的算力和续航优势与无人艇的机动优势相结合的方式，将成为了未来海洋作业的主流架构。

3

关键核心技术研究进展

上述无人艇从早期遥控平台向高度自主智能体的演进历程清晰地表明，提高自主化程度是海洋无人装备发展的核心趋势，而无人艇的高等级自主化本质上是“感知-决策-控制-交互”闭环

系统的智能化跃升。将从多模态环境感知、智能决策规划、鲁棒运动控制及异构通信链路 4 个维度，剖析当前技术架构的演进逻辑与局限性。

3.1 环境感知

环境感知是 USV 自主航行的前提，通过整合多种传感器来收集周围环境的数据，并利用智能算法对当前的航行环境及态势进行分析，从而为无人艇的自主决策和航行提供关键的数据支持^[37]。

早期的无人艇感知主要依赖全球定位系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）获取自身位姿^[38]，并通过数字通信回传基础状态数据。后来随着海事信息化普及，感知重点转向外部环境感知，无人艇开始集成自动识别系统（Automatic Identification System, AIS）获取合作目标信息，同时数字化链路取代模拟链路，计算机视觉（Computer Vision, CV）开始涌现。视觉传感器作为无人艇中使用最广泛的传感设备，可分为红外传感器和可见光传感器^[39]，通过捕获目标的轮廓、颜色和纹理等关键视觉信息，完成各类感知任务。然而，复杂的近岸与远海环境要求无人艇具备对动态障碍物的精细化识别能力以及对海图信息的准确解析能力，虽然计算机视觉技术成本低、信息量大，在近距离目标识别与分

类上具有优势，但其受光照变化和恶劣天气（雨雾）影响严重，且难以获取精确深度信息。于是基于雷达的环境感知技术被引入无人艇系统。雷达拥有较强的抗干扰能力，在雨雾、阴暗的环境下依然可以稳定成像，根据雷达发射信号的种类，可以将雷达分为激光雷达（Laser Radar, LiDAR）、毫米波雷达和航海雷达等^[40]。其中航海雷达是船舶上的 X 波段或 S 波段雷达，用于探测其他船舶和陆地障碍物，为海上避碰和导航提供方位和距离^[41]；毫米波雷达相比于航海雷达拥有更高的穿透性和抗干扰能力，增强了无人艇在雨雾等恶劣天气下的探测能力。毫米波雷达与船舶导航雷达具备全天候作业能力，穿透性强，适合远距离探测，但是雷达点云稀疏，难以识别小微目标（如浮标、渔网），且在近岸高杂波环境下易产生虚警。激光雷达是精度更高的雷达系统^[42]，不同于其他雷达发射电磁波，激光雷达通过激光反射感知周围目标，可为无人艇提供更高精度的目标探测，辅助无人船完成自主航行任

务, 还可用于获取厘米级的 3D 点云, 解决近距离靠泊和障碍物精确建模问题。

此外, 由于海洋环境具有强动态扰动的特性, 海况感知 (Sea State Estimation, SSE) 也是 USV 环境感知的重要分支, 尤其是波浪感知对于提升航行安全性与能效至关重要^[43]。海浪是影响船舶航行与海上作业的最关键环境要素, 传统测浪方式依赖浮标和雷达等设备, 存在成本高、响应慢和维护难等痛点。目前比较常用的技术是基于视觉与雷达的波浪场重构, 即利用 X 波段航海雷达的图像序列进行波浪谱反演^[44], 或利用基于双目视觉与 LiDAR 的方法进行波浪预测^[45]。上海交通大学还设计了船载单目光学波浪感知系统, 仅凭单个相机, 结合惯性导航和边缘计算等单元, 就能实现高精度波浪实时测量。

可在实际任务场景中, 任何单一传感器都难以实现对环境的完全、透彻感知, 表 2 介绍了各种环境感知技术的优势与局限性, 因此目前多源信息融合成为提高环境感知准确性和可靠性的重要手段^[46]。如斯洛文尼亚卢布尔雅那大学

团队基于元数据对象描述模型 (Metadata Object Description Schema, MODS) 数据集, 提出了融合立体视觉与 LiDAR 点云的障碍物检测框架, 显著提升了对水面微小目标 (如浮标、皮划艇) 的分割精度^[47]。PARK 等^[48] 引入光电与红外等多个摄像头的数据进行融合, 以补偿单摄像头的限制。CHENG 等^[49] 通过毫米波雷达点云的新型表示格式对具备红绿蓝 3 色 (Red, Green, Blue, RGB) 图像与雷达数据进行深层多尺度融合, 高效利用雷达数据特性, 有效提高了水面小型物体探测的准确性和鲁棒性。贺治卜等^[50] 提出一种融合激光雷达和惯性导航系统的高精度定位方法, 解决了船舶靠离泊过程中近距离高精度感知的需求。

将不同感知技术的优缺点归纳总结见表 2, 综上所述, 现有技术虽已解决开阔水域的探测难题, 但在复杂场景的识别精度及波浪场的实时感知方面仍显乏力。针对无人艇的特定需求, 应通过多源信息融合技术整合并发挥现有传感器优势, 有效弥补单一手段在复杂工况下的局限性。

表 2 不同感知技术的优缺点对比

Tab. 2 Comparison of the Pros and Cons of Different Sensing Technologies

环境感知技术	优点	缺点	参考文献
GNSS	全球覆盖, 提供绝对坐标, 技术成熟	易受电子干扰, 在遮挡区信号差	[51]
船舶雷达	探测距离远, 全天候工作, 受雨雾影响小	分辨率低, 难以探测小微目标, 存在近距离盲区	[52]
AIS	直接获取对方身份与航行意图, 无探测误差	属于协作式感知, 对方关闭 AIS 或未安装时完全失效	[53-54]
视觉相机	信息丰富 (颜色、形状和语义), 成本相对较低	受光照影响大, 测距精度低, 受海雾干扰严重	[55]
LiDAR	3D 建模精度极高 (厘米级), 主动探测, 不依赖光照	探测距离较短 (通常 < 200 m), 受雨雪、浪花误触发影响大	[56-57]
毫米波雷达	对运动目标敏感, 穿透雨雾能力强	分辨率低于 LiDAR, 对静态目标识别能力较弱	[58]

3.2 决策规划

在无人艇的技术架构中, 路径规划与避障决策被视为无人艇的“大脑”, 负责根据感知系统提供的环境信息, 在满足动力学约束和《国际海上避碰规则》的前提下, 计算出一条从起始点到目标点的安全、经济的航线。根据算法原理, 现有技术主要分为基于搜索采样、基于势场及基于学习三大类。

路径规划的起源要追溯到早期陆地机器人的

研究, 其主要目的是为机器人提供一条从起始位置到目标位置的可行路径, 主要解决静态环境下的路径可达性问题, 是自主导航的理论基石。以 Dijkstra、A^[59] 及其变种 (如 Hybrid A) 为代表的图搜索算法和快速扩展随机树 (Rapidly-Exploring Random Tree, RRT) 等采样算法在静态全局规划中应用广泛, 具有理论上的完备性。然而在动态海况下, 该类算法计算量随环境复杂度呈指数级

增长，且生成的路径往往折角较多，难以直接满足无人艇的运动学约束。后 KHATIB 提出了人工势场法 (Artificial Potential Field, APF)^[60]，通过构建引力场与斥力场实现避障，结构简单、执行效率高。但其固有缺陷在于容易陷入局部极小值，且难以处理无人艇的非完整动力学约束，在狭窄水道或多船会遇场景下易导致震荡。

近年来，随着对无人艇自主决策与规划技术要求的提高，面对高维感知数据和高度不确定的海况，基于人工智能的决策算法已成为主流。其中，深度强化学习 (Deep Reinforcement Learning, DRL) 更是研究热点。与传统算法相比，DRL 能够通过与环境交互试错，自适应地学习避障策略，尤其在多船会遇及需要符合《国际海上避碰规则》的复杂博弈场景下，展现出更强的智能性。然而，DRL 的“黑箱”特性导致其可解释

性差，加之从仿真到实体的“迁移鸿沟”，仍是其工程化应用面临的主要挑战。为顺应无人艇智能避碰的发展，国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO) 正积极推动海上自主水面船舶 (Maritime Autonomous Surface Ship, MASS) 相关规则的立法，欧洲的智能化及网络支持的海上无人导航系统 (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks, MUNIN) 项目已较早建立了基于 COLREGs 的自动避碰框架。相比之下，我国在基于 DRL 的博弈避碰理论与仿真验证方面表现活跃，多所高校在仿真环境下的多船会遇博弈算法已达到国际领先水平，但在实船验证与测试数据积累方面，我国仍落后于一些拥有大量实船测试数据的国外机构与集团，不同决策算法优缺点归纳见表 3。

表 3 不同决策算法的优缺点对比
Tab. 3 Comparison of the Pros and Cons of Different Decision-Making Algorithms

算法类型	代表算法	优点	缺点	参考文献
图搜索类	A* Dijkstra	理论成熟，计算逻辑清晰	在高维空间或动态环境下计算量激增，难以处理动力学约束	[61-62]
势场类	APF	计算简单，实时性极高，路径平滑	容易陷入局部最优解	[63-64]
局部避障类	Visual Odometry (VO), Dynamic Window Approach (DWA)	考虑动态障碍物，反应迅速	缺乏全局视野，难以处理复杂多船局面	[65-66]
智能学习类	DRL, Soft Actor-Critic(SAC)	擅长处理非线性、高维度环境，具备极强的自适应能力	训练成本高，模型具有“黑盒”特性，安全性难以在理论上严格证明	[67-68]

3.3 控制驱动

在无人艇的技术闭环中，控制驱动算法负责将决策系统规划的抽象航迹转化为具体的执行机构指令以操纵无人艇的舵角、螺旋桨等动力设备。由于无人艇具有欠驱动性、强非线性以及高度环境敏感性，其控制算法的研究一直是航海工程的核心难点。

早期的控制主要解决船舶在平稳海况下的航向保持问题，依赖于经典的线性控制理论，其中以 MINORSKY 于 1922 年提出的比例、积分和 PID 控制最为典型^[69]。PID 算法不依赖精确的动力学模型，通过误差反馈进行调节，但该方法难以处理非线性耦合，并且在恶劣海况下精度大幅下降，促使研究者向更高级的控制策略探索。进入 20 世纪 90 年代后，针对无人艇非线性

动力学特性的研究成为主流，SMC^[70] 与反步法 (Backstepping)^[71] 相继被引入。滑模控制凭借其对于系统参数波动和外部干扰的极强鲁棒性，有效提升了无人艇在复杂环境下的生存能力。SKJETNE 等提出的反步法通过递归方式构造李雅普诺夫函数，为欠驱动系统的全局稳定性提供了严谨的理论支撑，解决了复杂非线性系统的分解控制难题，但其计算过程的复杂性也限制了在低算力平台上的实时应用。随着算力水平的提升和对作业精度要求的提高，控制算法开始考虑执行器的物理约束，模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 在 2010 年后逐渐成为中大型智能船舶与无人艇的核心算法。MPC^[72] 通过在每个采样周期内求解有限时域优化问题，能够显式处理

舵角限制、转速约束等物理限制，展现出卓越的前瞻性与多约束处理能力。然而，MPC对精确物理模型的依赖以及高昂的计算成本，使其在面向高度不确定的深海环境时仍存在局限。

当前，无人艇的控制算法正朝着智能自学习与复合控制的方向演进。为补偿难以精确建模的水动力扰动，研究者开始融合神经网络（Neural Network, NN）、强化学习（Reinforcement

Learning, RL）等数据驱动方法，与传统控制理论（如SMC、MPC）相结合，通过与环境交互直接优化控制策略，这类复合方法尤其适用于高度复杂的非线性机动任务。这种“模型驱动”与“数据驱动”相融合的趋势，既能减轻传统方法对精确数学模型的过度依赖，又可弥补纯智能算法在稳定性理论证明上的不足，代表了未来控制技术的发展方向，将各种算法归纳见表4。

表4 各种控制算法的优缺点对比

Tab. 4 Comparison of the Advantages and Disadvantages of Various Control Algorithms

算法类型	代表算法	优点	缺点	参考文献
经典控制	PID	结构简单，不依赖模型，易于工程实现	难以处理非线性耦合，在恶劣海况下精度大幅下降	[73]
鲁棒控制	SMC	对扰动和参数变化极度鲁棒，稳定性强	存在“抖振”现象，易造成执行器磨损	[74]
非线性控制	Backstepping	理论严谨，适合处理欠驱动系统的航迹跟踪	计算过程复杂，存在“计算爆炸”问题	[75]
优化控制	MPC	能处理舵角、转速等物理约束，具备前瞻性	计算量大，对实时硬件要求高，依赖精确的预测模型	[76]
智能控制	NN/RL	能够补偿未知扰动，自适应能力极强	稳定性证明困难，训练过程耗时，存在“黑盒”不可解释性	[77]

3.4 通信链路

通信链路是连接岸基指挥中心与海上无人平台的神经枢纽，受地球曲率遮挡和多径效应影响，单一通信手段难以兼顾带宽与距离。

早期无人艇主要在视距（Line of Sight, LoS）范围内活动，通信手段高度依赖传统的射频技术，如超短波或特高频数传电台。这一时期的通信带宽通常限制在Kbps级别，仅能支持基础的控制指令与传感器状态传输，且受地球曲率影响，作业距离难以突破30 km。尽管模拟微波链路曾被用于尝试视频回传，但海面多径效应导致的信号衰减和画面闪烁，使得早期无人艇在复杂任务中的感知能力受到极大限制。进入21世纪后，随着移动通信与数字化链路技术的进步，无人艇的通信能力得到了显著提升。在近岸作业中，蜂窝网络的集成使得高清视频流的实时回传成为可能，极大地降低了民用测绘与港口巡检的通信成本。而对于远海任务，地球静止轨道（Geostationary Earth Orbit, GEO）卫星的应用打破了视距限制，实现了全球覆盖。然而，GEO卫星高达500 ms以上的延迟以及昂贵的带宽资费，使得其在需要高频交互的实时操控任务中表现欠

佳，多作为应急控制或低频数据上报的备用链路^[78]。2016年以来，以星链（Starlink）为代表的低轨道卫星（Low Earth Orbit Satellite, LEO）的崛起，彻底改变了无人艇超视距通信的格局。低轨道卫星凭借30 ms ~ 50 ms的低延迟和百兆级的带宽，支持了远程沉浸式操控与云端AI计算，为无人艇在远海执行复杂军事打击或科学考察任务提供了坚实的数据支撑^[79]。同时，5G技术在智能港口的应用以及移动自组网技术的发展，解决了无人艇集群在无基站环境下的协同通信难题^[80]。

各种通信链路技术及其优缺点见表5，综上所述，通信链路技术正朝着“高带宽、低延迟、全球覆盖”的方向快速迈进，但不同技术手段之间仍存在明显的权衡。数传电台虽延迟极低且无使用费，但距离受限；蜂窝网络带宽充足但覆盖范围仅限近岸；低轨卫星虽性能卓越但依赖第三方服务商且易受气象干扰。因此，现代无人艇通常采用多模复合通信体系，并重点研究断链后的自主处理机制与链路抗干扰技术，以确保在复杂电磁环境下的任务连续性。

表 5 各种通信链路技术的优缺点对比

Tab. 5 Comparison of Advantages and Disadvantages of Various Communication Link Technologies

技术手段	优点	缺点	适用场景	参考文献
数传电台	延迟极低, 无使用费, 自主性强	距离受地球曲率限制 (< 30km), 带宽低	近岸、视距内控制	[81]
蜂窝网络 (4G/5G)	带宽大, 成本低, 技术成熟	覆盖范围仅限近岸 (10 ~ 20km), 公网安全性需加固	港口巡检、近海测绘	[82]
GEO 卫星 (海事卫星)	全球覆盖, 技术极其稳定可靠	延迟高, 带宽窄, 资费极其昂贵	远洋应急、低频监控	[83]
LEO 卫星 (星链等)	全球覆盖, 高带宽, 低延迟	需专用终端, 受气象影响, 依赖第三方服务商	远海作业、跨洋航行	[84]
自组网	无需基站, 抗毁性强, 适合集群	节点增多时带宽衰减快, 算法复杂	无人艇集群协同	[85]

4 无人艇与智能船舶融合发展趋势

前文系统梳理了 USV 在环境感知、决策规划及运动控制等核心技术领域的突破, 然而随着海洋作业任务向深远海、长周期及复杂化方向拓展, 单体 USV 受限于自身的物理尺度, 在续航能力、抗风浪等级及边缘计算算力等方面面临着难以逾越的物理瓶颈, 单纯依靠 USV 自身的算法优化无法彻底解决上述问题, 须引入具备更强平台能力的载体进行弥补。

近年来随着人工智能、大数据等技术的突破, MASS 已成为全球航运与造船领域的发展焦点^[86], 与 USV 相同, 其实现自主化的核心技术架构一样遵循感知—决策—控制的闭环逻辑^[87], 并且其充沛的能源供给、高通量通信能力及稳定的作业平台, 恰好能与 USV 的高机动性形成互补。尽管目前一些国家已开发出大型 USV, 但从整体来看, 小型 USV 仍占据主导地位^[88]。这类

小型 USV 由于体型与排水量较小, 在深远海作业时往往面临着续航力不足、抗风浪能力差、边缘算力受限的问题, 在远离岸基支持的复杂海况下, 难以独立承担长周期、高强度的战略任务, 极易出现通信中断的情况^[89]。而智能船舶虽然具备充沛的能源与平台优势, 但在执行任务时缺乏对周边环境的精细化抵近感知能力, 执行高危或狭窄水域任务时具有灵活性不足的问题。可见两者在底层技术架构上具有高度的同源性, 在功能实现上具有天然的互补性。因此将 USV 的高机动性与智能船舶的平台优势深度结合, 构建“母船-子艇”协同系统, 不仅能有效延伸大型船舶的感知触角, 更能利用母船作为边缘计算节点与能源补给站, 解决 USV 的续航与算力难题。

4.1 智能船舶技术发展概况

2015 年中国船级社 (China Classification Society, CCS) 发布的《智能船舶规范》^[90] 对智能船舶的定义: 智能船舶系指利用传感器、通信、物联网和互联网等技术手段, 自动感知和获得船舶自身、海洋环境、物流和港口等方面的信息和数据, 并基于计算机技术、自动控制技术和大数据处理分析技术, 在船舶航行、管理、维护保养和货物运输等方面实现智能化运行的船舶, 以使船舶更加安全、更加环保、更加经济和更加可靠。与 USV 侧重于高机动性与非结构化环境适应能力不同,

智能船舶的发展聚焦于航行安全、能效管理及岸海一体化管控, 当前, 智能船舶技术正经历从单一模块辅助决策向全船系统自主化的演进。

欧洲最早开始开展智能船舶的研究, 2006 年欧洲开发了内河航运综合信息系统 (River Information Services, RIS)^[91], 通过将信息技术、通信技术、电子控制技术和计算机处理技术等集成应用于传统的内河航运系统, 为内河航运提供交通管理、物流信息和应急救援 8 大信息服务功能, 实现了高效、安全和环保的内河航运, 并引

起了航运界对于船舶智能化的关注。随后欧盟与挪威等传统海事强国开始致力于构建顶层技术架构与法律适应性框架，欧盟主导的基于网络智能的无人航海（Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks, MUNIN）项目率先建立了“自主船端+远程控制中心”的二元操作架构，验证了无人商船在深远海航行的法律与技术可行性^[92]，这一架构中的“远程控制中心”概念，为后续智能母船指挥无人艇集群提供了理论原型。韩国在智能船舶研究领域也取得了较大的进展，从2009年的智能船舶1.0，2016年的Ocean Link智能船舶平台，再到2020年的现代智能导航辅助系统Hi NAS^[93]，充分结合了信息和数字化产业，体现了韩国的通信和信息技术发达的优势。其中Ocean Link智能船舶系统整合了现代重工开发的基于船舶数据模型的船舶数据平台与埃森哲的互联服务平台，可运用大数据连接船东、航运公司和港口运营商，从而为用户提供全价值链的船舶运营优化服务^[94]。此外，挪威的Yara Birkeland号作为全球首艘零排放自主集装箱船，率先实现了全电推进与自动化装卸的商业化闭环^[95]，验证了大型船舶在港口及受限水域的精细化控制能力。

近年来，我国在智能船舶的工程化落地方面也取得了显著进展，走出了一条以“数据集成平台”为核心的技术路径。2015年，中国船级社提出了“一个平台+N个智能应用”的技术架构^[90]，即以全船数据集成平台为底座，支撑智能航行、智能机舱、智能能效及智能货物管理等功

4.2 “母船-子艇”协同作业模式

随着智能船舶技术的发展，单一平台的作业能力已无法满足日益复杂的海洋任务需求，构建智能船艇协同作业模式成为解决单艇性能瓶颈、提升系统整体效能的关键。当前，协同模式主要呈现为“母船释放子艇”的载运延伸模式和“拖轮辅助母船”的辅助作业模式这2种典型形态。

“母船释放子艇”的载运延伸模式是指以一艘大型智能船舶（母船）为核心，搭载并指挥多艘无人艇（子艇）执行特定任务的系统工程。在这种架构下，智能船舶不再仅仅是运输载体，而是演变为集“指挥控制中心、数据处理中心、能源补给中心”于一体的移动基地。无人艇则作

能模块的数据汇集与决策。基于此架构，2017年12月，我国首艘自主研发建造的智能船舶大智号散货船成功交付，该船是全球首艘通过船级社认证的智能船舶，同时获得了中国船级社和英国劳氏船级社授予的智能船符号^[96]，可实现船舶运行数据的全周期监测与岸基共享^[97]。2018年全球首艘40万t超大型矿砂船（Very-Large Ore Carrier, VLOC）明远号也成功交付，标志着中国智能船舶全面迈入1.0新时代^[98]。该船具有辅助自动驾驶、能效管理、设备运维、船岸一体通信和矿物液化检测5大智能板块，可利用统一的网络平台和数据平台完成全船数据信息的采集、处理和分析，能够为船舶航行、运营、维修提供决策支持，为船舶设计建造持续改进提供信息反馈船，进一步验证了基于大数据的航路优化与能效管理算法。这种强大的船载数据集成能力，使智能船舶具备了成为“海上边缘计算中心”的潜力。

随着无人系统协同作业需求的提升，智能船舶开始向具备无人装备搭载能力的“母船”形态演进。2022年交付的珠海云号智能科考母船，标志着智能船舶技术从单体智能向跨域协同的质变。该船不仅具备CCS认证的i-ship（R, N, M, I）智能符号，更在甲板设计上集成了无人艇自动布放回收系统与协同指挥接口。这些大型智能平台所具备的充沛能源供给能力、高通量卫星通信链路以及船载边缘计算中心，为USV集群提供了理想的“海上移动基地”与“算力枢纽”，从而促成了“母船-子艇”协同作业模式的诞生。

为母船感知的延伸和执行的末端，通过分布式部署实现任务目标。传统智能船舶受限于自身传感器高度与探测半径，存在显著的感知盲区。通过“母船-子艇”模式，作为母船的智能船舶可释放多艘搭载不同载荷（如多波束声呐、红外相机、激光雷达）的无人艇，构建起覆盖水上、水下及超视距范围的立体感知网。这种分布式感知模式能够实现对目标海域的“全时空、无死角”监控，在科学考察中，可同时采集不同站位的水文数据，能够构建起动态的防潜/防雷警戒圈，极大地提升母船的生存能力与作业效率。以中国首艘智能型科考母船珠海云号为例，该船是全球

首艘具备远程遥控和自主航行功能的科考母船，该船通过集成自主航行系统与无人艇布放回收系统，实现了“空、海、潜”一体化的协同观测，这一案例充分证明了大型智能船舶作为无人系统集群“母体”的巨大潜力。其次，“母船-子艇”模式还可以很好地抵抗风险，在执行高危任务时，母船可停留在安全海域，派遣低成本、高机动性的无人艇进入危险区域，使操作人员和母船与高风险环境隔离。这种模式下即使子艇受损，也不会对整体任务造成毁灭性打击，实现了作业效率与人员安全性的双重提升。也可将多艘子艇构成“蜂群”系统，系统内单体故障不影响整体的协同，可体现极强的作业韧性。这种模式实现了“集中决策”与“分布式执行”的有机统一，是海洋无人系统从单体作业向集群协同演进的重要标志。

除了深远海的载运协同，解决大型智能船舶进出港“最后一公里”的操纵难题，也是当前协同控制技术的另一大核心应用场景。大型船舶在港口受限水域低速航行时，舵效变差，极易受风流影响，单纯依靠自身动力难以实现高精度的靠离泊操作^[99]，为此，学术界与工业界提出了以智能船舶为中心、多艘自主拖轮（Autonomous Tugs）协同辅助的作业模式^[100]。如图5所示，该模式通常采用一艘大型智能船+N艘自主拖轮（典型配置为4艘）的编队架构，在此架构下，拖轮不再是独立的操作单元，而是作为智能船舶

的“外置动力模块”，通过施加推力或拉力来弥补大船在低速下的操纵性不足。这种模式能够有效缩短靠泊操纵时间，提高作业效率和安全性，助力实现安全、绿色和高效的智能航运。

综上所述，以上2种模式其本质都是通过协同作业，突破单一智能平台的物理与功能边界，这是未来海洋智能装备体系化发展的必然趋势。但尽管优势显著，但智能船艇协同作业模式的实施仍面临严峻的技术挑战。首先在复杂海况下，如何确保子艇安全、精准地回到母船甲板，是目前作业效率的瓶颈；其次母船须在动态变化的海洋环境中实时规划多艘子艇的路径并分配任务，这对通信带宽的稳定性与算法的实时性提出了极高要求；此外，子艇在远离母船时的自主避障与能源管理，也是确保协同任务成功的关键因素。



图5 拖轮辅助母船靠泊系统

Fig. 5 Tugboat-Assisted Mothership Berthing System

4.3 数字孪生与云端管理平台的统一

在无人艇与智能船舶的融合体系中，数字孪生（Digital Twin, DT）与云端管理平台也起着重要的作用，不仅是数据展示的工具，更是连接物理实体与虚拟决策的核心纽带。数字孪生技术是指通过集成多物理量、多尺度和多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成对物理实体全生命周期的映射。对于无人艇与智能船舶而言，数字孪生系统不仅包含高精度的三维几何模型，更集成了实时传感器数据。通过构建“物理感知-数据传输-虚拟映射-决策反馈”的闭环，数字孪生系统能够实现对无人艇航行状态的实时监控。这种虚实映射逻辑使得操作员能够在陆基或母船指挥中心，通过数字化界面直观感知远海作业现场的复杂环境，为远程干预提供高保真的决策依据。

此外，数字孪生系统的另一个核心优势在于其强大的仿真预测能力。在执行复杂任务前，云端平台可以利用数字孪生模型进行多次“超实时”仿真，评估不同决策方案的风险与效率。这种“先仿真、后执行”的模式极大地降低了实船试验的成本与风险。在实际航行中，当物理实体遇到未知干扰时，数字孪生模型可同步进行参数辨识与路径重规划，并将优化后的指令通过云端平台下发至执行机构。这种虚实结合的决策机制，赋予了无人艇系统应对深海复杂环境的“预见性”。

而云端管理平台作为数字孪生系统的底层基础设施，承担着海量异构数据的存储、计算与分发任务。在“母船-子艇”协同架构中，云端平台实现了不同尺度、不同任务属性平台的数据统

一。通过统一的数据标准，平台能够将无人艇的实时轨迹、能耗数据与母船的调度指令进行深度集成。并且随着无人艇作业规模从单体向集群演进，云端管理平台成为了集群协同的“大脑”。通过云端平台，指挥官可实现对跨域分布的多艘无人艇进行统一调度，利用高性能计算资源，处

理集群间的防撞逻辑与任务分配算法，确保在通信延迟或带宽受限的情况下，集群仍能保持高度的组织性。这种统一的云端管理模式，是实现海洋无人系统“分布式感知、集中式指挥”的关键技术支撑。

4.4 融合发展的挑战与未来展望

尽管目前将无人艇与智能船舶技术融合发展有广阔的应用前景，但仍然面临许多挑战，结合前文对核心技术的剖析，未来研究应重点关注以下方向。

针对前文提到的极端海况下感知失效及单一传感器具有局限性的问题，未来的感知技术可不再局限于单平台的多传感器融合，而是向母船-子艇协同的分布式认知发展。利用深度学习去除雨雾、海浪干扰，提升传感器在恶劣环境下的鲁棒性，并构建基于语义的共享感知网络，使子艇能够将前端感知的原始数据（在边缘端进行语义压缩，实时共享给母船，构建子艇抵近侦察、母船全局统筹的超视距高保真态势图，消除感知盲区。在决策层面，充分发挥大模型的优势，将研究重心转向大模型驱动的通用智能决策，利用海量航海数据训练大模型，使其具备理解复杂海事规则与人类意图的能力。也可以在母船-子艇的架构下发展分层博弈决策机制，母船负责全局任务分配与能效优化，子艇负责局部高动态避障，以解决大规模集群协同中的算力爆炸与通信延迟

问题。面对海洋环境的时变性与模型参数的不确定性下的控制问题，不再单纯依赖某一控制方法，而是结合数字孪生技术，利用实船运行数据实时修正动力学模型，实现对 USV 系统内部变化的自适应补偿。并结合绿色能源趋势，基于能效最优的前提，在保证任务完成度的前提下实现系统整体能耗的最小化。针对远海通信带宽受限及强电磁对抗环境下的链路脆弱性，未来通信架构可向空海一体化弹性网络演进。通过融合 LEO、5G/6G 及微波自组网技术，构建多路并行的异构通信体系。

最后，技术突破必须与法律框架同步演进。现行《国际海上避碰规则》主要基于载人环境设计，如何界定责任主体及如何与传统载人船只协调避让，仍应国际海事界达成新的共识。还要明确母船-子艇系统在遭遇传统船舶时的责任主体与避让逻辑，制定智能船舶的分级测试标准与伦理规范，确保无人系统在执行高风险决策时始终处于人类监管之下，实现技术与航运安全的动态平衡。

5

结论

本文立足于海洋装备智能化与体系化发展的时代背景，系统梳理了 USV 从无线电遥控靶船向智能平台演进的百年历程，并对其关键核心技术及与智能船舶的融合趋势进行了深入探讨。目前，USV 技术已向全自主认知智能跨越，任务形态从单体作业转向基于异构通信链路的分布式集群协同演进，实战化与工程化应用程度显著提高。四大核心技术仍是突破当前性能瓶颈的关键。环境感知技术正从单一传感器向多源异构融合过渡；决策规划算法经历了从规则驱动向数据

驱动的转型，提升了动态场景下的智能性；控制技术通过“模型-数据”混合驱动增强了系统的鲁棒性；通信网络的构建则为超视距管控提供了韧性保障。将 USV 与智能船舶技术相融合构建“母船释放子艇”的载运延伸和“拖轮辅助母船”的辅助靠泊 2 种协同模式，可分别解决深远海立体感知执行与进出港“最后一公里”靠泊操纵的难题，实现作业效能与安全性的双重提升。数字孪生与云端管理平台作为连接物理实体与虚拟决策的核心纽带，可通过虚实映射与超实时仿

真赋予系统预见性，并依托海量数据集成与高性能计算实现统一调度与集中指挥，是 USV 与智能船舶协同作业的关键技术支撑。

未来，USV 的大规模应用仍应在底层技术上持续攻关。随着《国际海上避碰规则》的适应性

修订及绿色能源动力系统的突破，构建空海潜一体化的作业体系，实现装备的绿色化、法治化与全自主化，将是船舶与海洋工程领域持续攻关的战略高地。

参考文献：

- [1] 谢少荣. 海洋智能无人艇 [J]. 世界科学, 2021 (11): 33-35.
XIE S R. Ocean Intelligent Unmanned Surface Vessel [J]. World Science, 2021 (11): 33-35.
- [2] RAVEENDRAN J. Sea Denial: the Ukrainian Case Study and the Future of Naval Warfare[J]. Journal of Strategic Security, 2025, 7: 4-18.
- [3] POPA A, SORIN L. Russia's Strategic Naval Collapse in the Context of the War in Ukraine (2022-2025)[C]//Maritime Security Forum. 2025.
- [4] 胡智焕, 谢威, 刘若楠, 等. 俄乌冲突中无人艇海上作战模式的新突破 [J]. 海洋工程装备与技术, 2024, 11(1): 18-22.
HU Z H, XIE W, LIU R N, et al. New Breakthrough in USV Warfare Mode in the Russo-Ukrainian Conflict[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2024, 11(1): 18-22.
- [5] BIBULI M, CACCIA M, LAPIERRE L, et al. Guidance of Unmanned Surface Vehicles: Experiments in Vehicle Following[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012, 19(3): 92-102.
- [6] MADEO D, POZZEBON A, MOCENNI C, et al. A Low-Cost Unmanned Surface Vehicle for Pervasive Water Quality Monitoring[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(4): 1433-1444.
- [7] MANLEY, JUSTIN E. Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development[C]//OCEANS IEEE. 2008.
- [8] GOUDEY C A, CONSI T, MANLEY J, et al. A Robotic Boat for Autonomous Fish Tracking[J]. Marine Technology Society, 1998, 32(1): 47.
- [9] CACCIA M, BONO R, BRUZZONE G, et al. Sampling Sea Surfaces with SESAMO: an Autonomous Craft for the Study Of Sea-Air Interactions[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2005, 12(3): 95-105.
- [10] BERTRAM, VOLKER. Unmanned Surface Vehicles-A Survey[C]//Skibsteknisk Selskab, Copenhagen. 2008.
- [11] CAMPOS, DANIEL F, CAMPOS H J, et al. Nautilus: an Autonomous Surface Vehicle with a Multilayer Software Architecture for Offshore Inspection[J]. Field Robotics, 2024, 41(4): 966-990.
- [12] MURPHY R R, STEIMLE E, GRIFFIN C, et al. Cooperative Use of Unmanned Sea Surface and Micro Aerial Vehicles at Hurricane Wilma[J]. Field Robotics, 2008, 25(3): 164-180.
- [13] 潘州, 周河宇, 李杰, 等. 人工智能技术在无人艇智能控制方面的应用展望 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(5): 561-570.
PAN Z, ZHOU H Y, LI J, et al. Development and Application of Artificial Intelligence Technology in Intelligent Control for Unmanned Surface Vehicles[J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2024, 7(5): 561-570.
- [14] 工业和信息化部, 交通运输部, 国防科工局. 智能船舶发展行动计划 (2019—2021 年)[R]. 2018.
Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Transport, State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense. Action Plan for the Development of Intelligent Ships (2019—2021)[R]. 2018.
- [15] O'ROURKE R. Navy Large Unmanned Surface and Undersea Vehicles: Background and Issues for Congress[R]. 2021.
- [16] 张韩西子, 倪海参, 石正坤, 等. 水面无人艇发展趋势及关键技术展望 [J]. 舰船科学技术, 2024, 46(8): 108-111.
ZHANG H X Z, NI H S, SHI Z K, et al. Expectation of the Development Trend and Key Technologies of Unmanned Surface Vehicle[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(8): 108-111.

- [17] GROME E D. Spectres of the Sea: The United States Navy's Autonomous Ghost Fleet, its Capabilities and Impacts, and the Legal Ethical Issues that Surround[J]. *Journal of Maritime Law and Commerce*, 2018, 49: 31.
- [18] MARTIN G. Unmanned Naval Vessels Advancing[J]. *Asia-Pacific Defence Reporter*(2002), 2019, 45(8): 64-69.
- [19] 廖静. 水上机器人惊艳面世全球最快无人艇“天行一号”[J]. *海洋与渔业*, 2018(8): 46-47.
LIAO J. Amazing Debut of Aquatic Robot: "Tianxing-1", the World's Fastest Unmanned Surface Vessel[J]. *Ocean and Fishery*, 2018(8): 46-47.
- [20] 钟雨轩, 刘睿轩, 孔祥申, 等. 无人艇在南极科考中的应用[J]. *自然杂志*, 2024, 46(5): 347-353.
ZHONG Y X, LIU R X, KONG X S, et al. The Application of Unmanned Surface Vehicles in Antarctic Scientific Expeditions[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2024, 46(5): 347-353.
- [21] 原张杰. 考虑实时避障的水面无人艇自主航行控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
YUAN Z J. Research on Autonomous Navigation Control of Unmanned Surface Vehicles Considering Real-Time Obstacle Avoidance [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2023.
- [22] DONG X, GAO H, SHANG L. Analysis of Key Technologies for Unmanned Surface Vessels (USV)[C]//2023 2nd International Symposium on Control Engineering and Robotics (ISCER). 2023.
- [23] 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海). “珠海云”: 全球首艘智能型无人系统科考母船[J]. *中山大学学报(自然科学版)(中英文)*, 2023, 62(6): 187.
Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai). "Zhuhai Cloud": The World's First Intelligent Unmanned System Research Mother Ship [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2023, 62(6): 187.
- [24] 许青青. 全球首艘智能型无人系统科考母船“珠海云”交付使用[J]. *珠江水运*, 2023(3): 22.
XU Q Q. Delivery and Commissioning of the World's First Intelligent Unmanned System Research Mother Ship "Zhuhai Cloud"[J]. *Pearl River Water Transport*, 2023(3): 22.
- [25] BAI X G, LI B H, XU X F, et al. A Review of Current Research and Advances in Unmanned Surface Vehicles[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2022, 21(2): 47-58.
- [26] 巴尧骥, 唐峰华, 张胜茂, 等. 无人船技术发展现状及其在渔业中的应用[J]. *大连海洋大学学报*, 2024, 39(5): 888-904.
BA Y J, TANG F H, ZHANG S M, et al. Current Status of Development and Application of Unmanned Vesseltechnology in Fisheries: A Review[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2024, 39(5): 888-904.
- [27] WILLIAMS, KATHLEEN BROOME. Network-Centric Warfare: How Navies Learned to Fight Smarter through Three World Wars[J]. *The Journal of Military History* 2009, 73(4): 1386-1388.
- [28] HAMILTON W J. DOLPHIN: A High Speed Semi-Submersible with Mine Countermeasure and Surveying Capabilities[R]. 1989.
- [29] LIU Z X, ZHANG Y M, YU X, et al. Unmanned Surface Vehicles: an Overview of Developments and Challenges[J]. *Annual Reviews in Control*, 2016, 41: 71-93.
- [30] 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 T. The Killer of Future Naval Warfare: New Concept Weapons in the Future Warfare[J]. *Shipborne Weapons*, 2006(3): 77-83.
- [31] YAN R, PANG S, SUN H, et al. Development and Missions of Unmanned Surface Vehicle[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2010, 9(4): 451-457.
- [32] 王耀南, 安果维, 王传成, 等. 智能无人系统技术应用与发展趋势[J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(5): 9-26.
WANG Y N, AN G W, WANG C C, et al. Technology Application and Development Trend of Intelligent Unmanned System[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(5): 9-26.
- [33] EGOZI A. The Israeli Unmanned Killer Boat-Fire Power on the High Seas[J]. *Asia-Pacific Defence Reporter*(2002), 2017, 43(8): 92-93.

- [34] 林平. 无人驾驶船舶规模应用指日可待 [J]. 交通与运输, 2015, 31(3): 50-53.
LIN P. Large-Scale Application of Unmanned Ships Is Imminent[J]. Traffic and Transportation, 2015, 31(3): 50-53.
- [35] 张树凯, 刘正江, 张显库, 等. 无人船艇的发展及展望 [J]. 世界海运, 2015, 38(9): 29-36.
ZHANG S K, LIU Z J, ZHANG X K, et al. Development and Prospects of Unmanned Surface Vehicles[J]. World Shipping, 2015, 38(9): 29-36.
- [36] 谢昭. 俄乌在黑海进入无人艇对攻时代 [N]. 环球时报, 2023-11-29(008).
XIE Z. Russia and Ukraine Enter the Era of Mutual Unmanned Surface Vehicle Attacks in the Black Sea[N]. Global Times, 2023-11-29(008).
- [37] 鲍凌志, 杜家辉, 胡辛明, 等. 无人艇集群控制技术研究综述 [J]. 自然杂志, 2023, 45(3): 207-216.
BAO L Z, DU J H, HU X M, et al. A Review of Formation Control for Unmanned Surface Vehicles[J]. Chinese Journal of Nature, 2023, 45(3): 207-216.
- [38] 朱健楠, 虞梦苓, 杨益新. 无人水面艇感知技术发展综述 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(10): 1486-1492.
HU J N, YU M L, YANG Y X. Overview of Development of Unmanned-Surface-Vehicle Sensing Technology[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(10): 1486-1492.
- [39] 孔凡涛. 基于激光雷达与相机信息融合的无人艇环境感知 [D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2023.
KONG F T. Environmental Perception of Unmanned Surface Vehicles Based on LiDAR and Camera Information Fusion [D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2023.
- [40] 余杭. 基于激光雷达的 3D 目标检测研究综述 [J]. 汽车文摘, 2024(2): 18-27.
YU H. A Review on LiDAR-Based 3D Target Detection Research[J]. Automotive Digest, 2024(2): 18-27.
- [41] 李丹, 于邵祯, 杨华东. 国外水面无人艇环境感知技术前沿进展 [J]. 兵工学报, 2024, 45(增刊 2): 97-104.
LI D, YU S Z, YANG H D. Progress on Environmental Perception Technology of Foreign Unmanned Surface Vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(Suppl. 2): 97-104.
- [42] STATECZNY A, BŁASZCZAK-BĄK W, SOBIERAJ-ŻŁOBIŃSKA A, et al. Methodology for Processing of 3D Multibeam Sonar Big Data for Comparative Navigation[J]. Remote Sensing, 2019, 11(19): 2245.
- [43] ZHANG D, CHU X, LIU C, et al. A Review on Motion Prediction for Intelligent Ship Navigation[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(1): 107.
- [44] HUANG W, LIU X, GILL E W. Ocean Wind and Wave Measurements Using X-Band Marine Radar: a Comprehensive Review[J]. Remote Sensing, 2017, 9(12): 1261.
- [45] 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司. 基于双目视觉与激光雷达的海上波浪测量方法: 202510715267.7[P]. 2025-07-15.
CCCC Dredging Technology and Equipment National Engineering Research Center Co., Ltd. Marine Wave Measurement Method Based on Binocular Vision and LiDAR: 202510715267.7 [P]. 2025-07-15.
- [46] 楼建坤, 徐蒙源, 岳林, 等. 无人舰艇智能航行技术进展与前沿 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(1): 3-14.
LOU J K, XU M Y, YUE L, et al. Advances and Frontiers of Key Technologies in Intelligent Navigation for Unmanned Surface Vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(1): 3-14.
- [47] BOVCON B, MUHOVIČ J, VRANAC D, et al. MODS-A USV-Oriented Object Detection and Obstacle Segmentation Benchmark[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(8): 13403-13418.
- [48] PARK J H, ROH M I, LEE H W, et al. Multi-Vessel Target Tracking with Camera Fusion for Unmanned Surface Vehicles[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2024, 16: 100608.
- [49] CHENG Y, XU H, LIU Y. Robust Small Object Detection on the Water Surface Through Fusion of Camera and Millimeter Wave Radar[C]//IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2021.
- [50] 贺治卜, 闫文洲, 柳晨光, 等. 融合激光雷达和惯性导航的船舶靠离泊高精度定位方法 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(5): 280-288.
HE Z B, YAN W Z, LIU C G, et al. High-Precision Berthing and Unberthing Ship Positioning method by Fusing LiDAR

- and Inertial Navigation System[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(5): 280-288.
- [51] SHEN N, CHEN L, LIU J, et al. A Review of Global Navigation Satellite System (GNSS)-Based Dynamic Monitoring Technologies for Structural Health Monitoring[J]. Remote Sensing, 2019, 11(9): 1001.
- [52] ZAINUDDIN S, PASYA I, ZAIAAMI N, et al. Maritime Radar: a Review on Techniques for Small Vessels Detection[J]. Journal of Electrical and Electronic Systems Research (JEESR), 2019, 14: 30-45.
- [53] RIBEIRO C V, PAES A, DE OLIVEIRA D. AIS-Based Maritime Anomaly Traffic Detection: A Review[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 231: 120561.
- [54] ZHANG L, MENG Q, XIAO Z, et al. A Novel Ship Trajectory Reconstruction Approach Using AIS Data[J]. Ocean Engineering, 2018, 159: 165-174.
- [55] GEIGER A, LENZ P, STILLER C, et al. Vision Meets Robotics: the Kitti Dataset[J]. The International Journal of Robotics Research, 2013, 32(11): 1231-1237.
- [56] LI Y, IBANEZ-GUZMAN J. Lidar for Autonomous Driving: the Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems[J]. IEEE Signal Processing, 2020, 37(4): 50-61.
- [57] BENEDEK C, MAJDIK A, NAGY B, et al. Positioning and Perception in LIDAR Point Clouds[J]. Digital Signal Processing, 2021, 119: 103193.
- [58] HASCH J, TOPAK E, SCHNABEL R, et al. Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(3): 845-860.
- [59] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107.
- [60] KHATIB O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
- [61] PIVTORAIKO M, KNEPPER R A, KELLY A. Differentially Constrained Mobile Robot Motion Planning in State Lattices[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(3): 308-333.
- [62] DECHTER R, PEARL J. Generalized Best-First Search Strategies and the Optimality of A[J]. Journal of the ACM (JACM), 1985, 32(3): 505-536.
- [63] 姚艳杰, 李一卓, 衣正尧, 等. 基于改进人工势场法的水下机器人路径规划 [J]. 船舶工程, 2025, 47(4): 1-10.
YAO Y J, LI Y Z, YI Z Y, et al. Path Planning of Underwater Vehicle Based on Improved Artificial Potential Field Method[J]. Ship Engineering, 2025, 47(4): 1-10.
- [64] KOREN Y, BORENSTEIN J. Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation[C]// ICRA. 1991.
- [65] FOX D, BURGARD W, THRUN S. The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance[J]. IEEE Robotics & Automation, 2002, 4(1): 23-33.
- [66] FIORINI P, SHILLER Z. Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles[J]. The International Journal of Robotics Research, 1998, 17(7): 760-772.
- [67] MNIH V, KAVUKCUOGLU K, SILVER D, et al. Human-Level Control Through Deep Reinforcement Learning[J]. Nature, 2015, 518(7540): 529-533.
- [68] HAARNOJA T, ZHOU A, ABBEEL P, et al. Soft Actor-Critic: Off-Policy Maximum Entropy Deep Reinforcement Learning with a Stochastic Actor[C]//International Conference on Machine Learning. 2018.
- [69] FOSSEN T I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- [70] UTKIN V I. Sliding Modes in Control and Optimization[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [71] CHEN X, LIU Z, HU H, et al. Backstepping Adaptive Sliding Mode Control for the USV Course Tracking System[C]// 9th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT). 2017.
- [72] YAN Z, GONG P, ZHANG W, et al. Model Predictive Control of Autonomous Underwater Vehicles for Trajectory

- Tracking with External Disturbances[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107884.
- [73] QIN S J, BADGWELL T A. A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(7): 733-764.
- [74] UTKIN V. Variable Structure Systems with Sliding Modes[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 22(2): 212-222.
- [75] KRSTIC M, KOKOTOVIC P V, KANELLAKOPOULOS I. *Nonlinear and Adaptive Control Design*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [76] MAYNE D Q, RAWLINGS J B, RAO C V, et al. Constrained Model Predictive Control: Stability and Optimality[J]. *Automatica*, 2000, 36(6): 789-814.
- [77] KUMPATI S N, KANNAN P. Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1990, 1(1): 4-27.
- [78] ALQURASHI F S, TRICHILI A, SAEED N, et al. Maritime Communications: a Survey on Enabling Technologies, Opportunities, and Challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 10(4): 3525-3547.
- [79] BOJOR L, PETRACHE T, CRISTESCU C. Emerging Technologies in Conflict: The Impact of Starlink in the Russia-Ukraine War[J]. *Land Forces Academy Review*, 2024, 29(2): 185-194.
- [80] RAFIQ G, BOSE P, ORTEN P. 5G Cellular Communication for Maritime Applications C//IEEE Access. 2025.
- [81] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges[J]. *IEEE Communications*, 2016, 54(5): 36-42.
- [82] AZADE F, HAORAN Q, MING D, et al. Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(4): 3417-3442.
- [83] LIU Y, BUCKNALL R. The Angle Guidance Path Planning Algorithms for Unmanned Surface Vehicle Formations by Using the Fast Marching Method[J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 59: 327-344.
- [84] MARAL G, BOUSQUET M, SUN Z. *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.
- [85] 张珉,董超,杨朋,等. 无人机自组网路由协议研究综述 [J]. *数据采集与处理*, 2022, 37(5): 952-970.
ZHANG M, DONG C, YANG P, et al. Overview on Routing Protocols for Flying Ad-Hoc Networks[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2022, 37(5): 952-970.
- [86] 陈军,杨金辉. 智能船舶关键技术体系与发展路径研究 [J]. *船舶物资与市场*, 2025, 33(11): 107-109.
CHEN J, YANG J H. Research on Key Technology System and Development Path of Intelligent Ships[J]. *Marine Equipment and Marketing*, 2025, 33(11): 107-109.
- [87] 顾一清. 智能船舶研发现状、问题及思考 [J]. *船舶设计通讯*, 2024(1): 14-18.
GU Y Q. Intelligent Ship Research and Development Status, Problems and Thoughts[J]. *Ship Design Communication*, 2024(1): 14-18.
- [88] 彭周华,吴文涛,王丹,等. 多无人艇集群协同控制研究进展与未来趋势 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 51-64.
PENG Z H, WU W T, WANG D, et al. Coordinated Control of Multiple Unmanned Surface Vehicles: Recent Advances and Future Trends[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1): 51-64.
- [89] 张卫东,刘笑成,韩鹏. 水上无人系统研究进展及其面临的挑战 [J]. *自动化学报*, 2020, 46(5): 847-857.
ZHANG W D, LIU X C, HAN P. Progress and Challenges of Overwater Unmanned Systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(5): 847-857.
- [90] 中国船级社. 发布《智能船舶规范》[J]. *航海技术*, 2016(1): 40.
China Classification Society. Release of "Rules for Intelligent Ships"[J]. *Navigation Technology*, 2016(1): 40.
- [91] 罗本成,解玉玲. 欧洲内河航运综合信息服务系统 (RIS) 发展现状与趋势 [J]. *交通建设与管理*, 2006(6): 43-47.
LUO B C, XIE Y L. Development Status and Trends of River Information Services (RIS) in European Inland Waterway Shipping[J]. *Transport Construction and Management*, 2006(6): 43-47.

- [92] 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.
- [93] 魏梅, 潘放, 张大蕾. 日韩欧智能船舶的研究现状及对我国的启示 [J]. 船舶, 2022, 33(2): 13.
WEI M, PAN F, ZHANG D L. State-of-the-Art of Intelligent Ship Research in Japan, Korea, Europe and its Inspiration to China [J]. Ship & Boat, 2022, 33(2): 13.
- [94] 刘微, 尚家发. 智能船舶发展现状及我国发展策略研究. 舰船科学技术, 2017, 39(11): 189-193.
LIU W, SHANG J F. The Study of the Development of Intelligent Ships and China's Development Strategy[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(11): 189-193.
- [95] EVENSEN M H. Safety and Security of Autonomous Vessels. Based on the Yara Birkeland Project[D]. Bergen: The University of Bergen, 2020.
- [96] 陈琳, 杨龙霞. 世界主要造船国家智能船舶发展现状 [J]. 船舶标准化工程师, 2019, 52(4): 10-14.
CHEN L, YANG L X. The Status of Intelligent Ship Development in Main Shipbuilding Countries in the World[J]. Ship Standardization Engineer, 2019, 52(4): 10-14.
- [97] 秦尧. 智行天下, 船承未来——智能船舶整体解决方案 [J]. 船舶设计通讯, 2019(2): 2.
QIN Y. Smart Navigation Across the World, Ships Embracing the Future: Integrated Solution for Intelligent Ships[J]. Ship Design Communication, 2019(2): 2.
- [98] 秦时. 全球首艘智能 VLOC 在上海交付中国智能船舶全面迈入 1.0 新时代 [J]. 船舶设计通讯, 2018(2): 107.
QIN S. The World's First Intelligent VLOC Delivered in Shanghai: Chinese Intelligent Ships Fully Enter the 1.0 New Era [J]. Ship Design Communication, 2018(2): 107.
- [99] 李国帅, 张显库, 张安超. 智能船舶靠泊技术研究热点与趋势 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1): 3-14.
LI G S, ZHANG X K, ZHANG A C. Research Hotspots and Tendency of Intelligent Ship Berthing Technology [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 3-14.
- [100] 庞明瀚. 浅析拖轮协助大型船舶靠离泊 [J]. 珠江水运, 2018(3): 83-84.
PANG M H. Analysis of Tugboat-Assisted Berthing and Unberthing for Large Vessels[J]. Pearl River Water Transport, 2018(3): 83-84.

