

无人船艇自主航行决策控制技术 综述与展望

A Review and Prospect of Autonomous Navigation Decision and Control Technology for Unmanned Surface Vehicles

吕世兴¹, 杨浩成¹, 耿林¹, 吴诗迪¹, 韩森^{1*}, 周利²

LYU Shixing¹, YANG Haocheng¹, GENG Lin¹, WU Shidi¹, HAN Sen^{1*}, ZHOU Li²

1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏镇江 212100

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, Jiangsu, China

2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

基金项目: 国家自然科学基金 (52401381)

摘要
Abstract

【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2026.03.Z1

[目的] 为梳理水面智能无人船艇自主航行决策控制技术的研究现状, 厘清不同复杂度场景下的技术瓶颈与发展趋势, [方法] 系统调研了国内外无人船艇关键技术发展历程。围绕中低复杂度与高复杂度 2 类应用场景的技术需求差异, 分别对路径规划、视线 (LOS) 制导、自主避碰、自动靠离泊、多智能体协同控制和自主回收等方向展开综述, 评述现有技术不足并给出发展建议。[结果] 分析表明, 面向开放水域的自主航行技术已日趋成熟并逐步实现工程化应用, 但面向复杂水域和复杂任务的核心技术仍存在发展瓶颈。[结论] 进一步展望未来, 提出应构建面向真实场景的标准化仿真和实船测试评价体系, 推动关键技术快速迭代与落地, 为我国无人船艇自主航行决策控制技术的发展提供支撑。

[Purpose] To review the current state of research on autonomous navigation decision-making and control technologies for intelligent unmanned surface vehicles, and to clarify the technical bottlenecks and development trends under scenarios of varying complexity, [Method] a systematic investigation is conducted into the development history of key technologies for unmanned surface vehicles both domestically and internationally. It review addresses the differing technical requirements between low-to-medium complexity and high-complexity application scenarios, covering path planning, line-of-sight guidance, autonomous collision avoidance, automatic docking and undocking, multi-agent cooperative control, and autonomous recovery. It evaluates existing technological shortcomings and provides recommendations for future development. [Result] Analysis indicates that autonomous navigation technology for open waters has matured and is gradually being implemented in engineering applications. However, core technologies for complex waters and complex missions still face developmental bottlenecks. [Conclusion] Looking further ahead, we propose establishing a standardized simulation and real-vessel testing evaluation system tailored to real-world scenarios. It will accelerate the rapid iteration and implementation of key technologies, thereby supporting the advancement of autonomous navigation decision-making and control technologies for unmanned surface vehicles in China.

关键词
Key words

无人船艇；自主航行；决策控制；路径规划；自主避碰

unmanned surface vehicle; autonomous navigation; decision and control; path planning; autonomous collision avoidance

0 引言

随着海洋强国战略的深入推进和物联网、大数据和人工智能等新一代信息技术的快速发展，水面智能无人船艇作为水上智能装备体系的核心组成部分，依托其高效灵活、自主稳定和安全可靠等突出优势，现已成为内河航运智能化、海洋资源开发利用、水上交通安全保障和海防装备现代化建设等领域的关键力量。自主航行能力作为无人船艇的核心技术指标，是指能在无人工干预的前提下完成环境感知、路径规划、任务执行与避碰决策等任务，是推动船舶智能化转型的强劲动力，具有重要的研究价值和实践意义。而其决策控制技术的发展直接决定了无人船艇智能化的高度与工程应用的广度，是当前船舶工程领域的研究热点与发展趋势。

从技术发展历程及国内外研究现状分析，无人船艇技术的研发始于20世纪90年代的欧美国，美国和英国等通过早期的技术攻关，初步形成了无人船艇自主航行能力的雏形。我国无人船艇研究虽起步较晚，但依托海洋强国战略的支持与科研人才的创新，实现了跨越式发展：21世纪初，上海大学精海系列、珠海云洲瞭望者系列等无人船艇相继落地，完成南海测量、应急救援等实际任务^[1]；JARI-USV多用途无人船艇、百吨级无人船艇先后完成百公里至千公里级的自主航行试验^[2-3]，推动我国智能无人船艇自主航行关键技术迈入工程化验证阶段，不断完善从基础理论研究到实际工程应用的完整技术体系。

从应用场景分析，根据水域复杂度（地形特征、水域条件和交通密度等）与任务复杂度（任务类型、目标数量和集群协同等），可将无人船艇的应用场景划分为中低复杂度与高复杂度2类，这2类场景在技术需求与落地程度均存在明显差异。中低复杂度场景多为开阔水域、常规

港口航道及内河静水等，任务多以单一化、重复性作业为主，典型应用包括常规航道路径规划和开阔水域自主避碰等，此类场景的特点是环境干扰弱、任务逻辑清晰，技术需求较低。高复杂度场景多为狭窄水域、高流量内河港口及多船交会等，任务覆盖多目标对抗博弈、多船集群协同、自动靠离泊及复杂水域动态避碰等方面，依托其环境干扰强、任务逻辑复杂，技术需求严苛等特点，对无人船艇的决策控制能力提出极高要求。

从技术成熟度分析，中低复杂度场景下的无人船艇自主航行技术已逐步实现工程应用，其中路径规划、视线制导（Line of Sight, LOS）和开阔水域的自主避碰等决策控制技术，通过长期研究优化形成了稳定可靠的技术体系，能满足单一任务、低干扰环境下的自主作业执行的需求。而高复杂度场景下，自动靠离泊、狭窄水域自主避碰、多智能体协同控制和自主回收等难度较大的决策控制技术，仍面临多目标约束优化难度大、环境建模精度不足和动态博弈响应滞后等技术瓶颈，目前尚未形成完备的技术体系，无人船艇向核心复杂场景发展陷入瓶颈。我国无人船艇自主航行决策控制技术在低复杂度场景已实现较成熟的工程应用，但高复杂度场景的核心技术仍处于探索发展阶段，相关研究亟须持续深化。

决策控制技术作为水面智能无人船艇自主航行的大脑，贯穿路径规划、避碰决策和任务分配等应用的全流程，其发展水平直接影响无人船艇的场景适配能力、航行安全性和任务执行效率，是判断无人船艇智能化水平的核心指标。当前船舶工程领域中无人船艇决策控制技术的研究已取得一定进展，但针对中低复杂度与高复杂度场景的技术需求差异，仍缺乏系统化梳理总结与问题挑战剖析，亟须通过综述研究明确发展情况与突

破方向。为此,本文以水面智能无人船艇自主航行决策控制技术为核心,综述中低复杂度与高复杂度场景下的关键技术发展,分析不同场景下决策控制技术的研究要点与技术瓶颈,展望无人船

艇决策控制技术的发展趋势,为我国无人船艇技术的研究突破与工程应用提供理论参考与技术支撑。

1

面向中低复杂度场景的决策控制技术

面向中低复杂度场景,水面无人船艇自主航行决策控制技术已日趋成熟且逐步实现工程应用。该复杂程度多以开阔水域、常规港口航道及内河静水区域为主要应用场景,以其环境干扰弱、任务逻辑清晰,技术需求较低的特点,主要围绕路径规划、LOS 制导和开阔水域的自主避碰等关键技术展开。其中,路径规划技术可依托先验的场景信息完成全局路径规划,LOS 制导技术可实现高精度路径跟随,联合开阔水域的自主避

碰算法,能高效完成简单作业任务的自主航行。三者协同在轻干扰和少博弈的场景下,结合传统控制策略形成了较为成熟的技术体系,为水面智能无人船艇的自主航行打下了坚实基础,也为高复杂度场景的决策控制技术突破提供了算法支撑与应用参考。本文将分别对路径规划、LOS 制导、开阔水域的自主避碰 3 个关键技术的技术特点和研究成果进行全面分析。

1.1 路径规划技术

无人船艇路径规划技术是基于电子海图、气象信息和任务发布等先验的全局静态场景信息,满足无人船艇运动学、操纵特性等约束条件,通过特定的算法在起点和终点之间生成一条最优或

次优路径的过程。该技术适用于任务航线已知,环境扰动影响小的场景。作为自主航行技术的关键,路径规划技术的核心算法主要分为基于图形搜索、随机采样和生物启发智能优化等。

1.1.1 基于图形搜索的算法

基于图形搜索的算法主要包括 Dijkstra 算法、 A^* 算法、Theta * 算法及其变种。Dijkstra 算法原理是通过遍历最近临界节点寻找一条从起点到终点的距离最优路径,理论简单、完备且鲁棒性高,但其存在占用内存大、搜索效率低和路径多曲折的问题^[4]。吕成等^[5]聚焦 Dijkstra 算法的综合目标优化,通过最小堆结构和多代价函数,加快了搜索速度,但其研究场景是理想的平静水域,未考虑实际水域的流场影响。SINGH 等^[6]在受限水域中考虑流的约束,保障了路径的安全性。

A^* 算法在 Dijkstra 算法基础上引入启发式因子,有效避免了对所有节点的盲目遍历,从而提升搜索效率,但 A^* 的搜索方向被限制在 45° 的倍数,导致生成的路径通常呈锯齿状,比最短路径长。SONG 等^[7]在删除冗余节点后运用 3 次样

条插值对路径进行拟合,使航线转向曲率满足船舶最小转弯半径约束,但该改进技术在复杂水域(如多障碍物、窄航道)下的算法搜索效率低。吕琳等^[8]进一步优化,在 A^* 算法中加入双向并行搜索与精英节点扩展策略,融合路径剪枝与 3 次 B 样条曲线优化,解决了路径平滑性与受限水域的适配性问题,实现了搜索效率与路径质量的双重优化。

Theta * 是一种任意角度的路径规划算法,可在不限制特定角度的情况下扩展任意方向的单元节点。Theta * 和 A^* 的最大区别在于,Theta * 算法中当前节点的父节点可以是任意节点,而 A^* 的父节点必须是其邻节点^[9]。在此基础上,CHOI 等^[10]把 Theta * 算法推广到非均匀网格图,在搜索路径时考虑了网格图的可通行性,这种方法能够确保

得到最优的路径，并且从根本上解决了全局路径过于靠近障碍物的问题。杜家辉等^[11]提出融合广义沃罗诺伊图启发路径与改良 Theta* 算法的方法，通过构建风险评估函数、设计非均匀代价计算模型，兼顾路径生成的效率 and 安全性。同一场景下 A*、A*PS、Theta* 和非均匀 Theta* 的运行结果见图 1。

基于图形搜索的路径规划算法已形成较为成熟的技术体系，可有效满足无人船艇在常规水域的全局路径规划需求，但在复杂受限水域的路径适应性方面存在一定不足，需要结合船舶的动力学模型进一步优化航行轨迹。

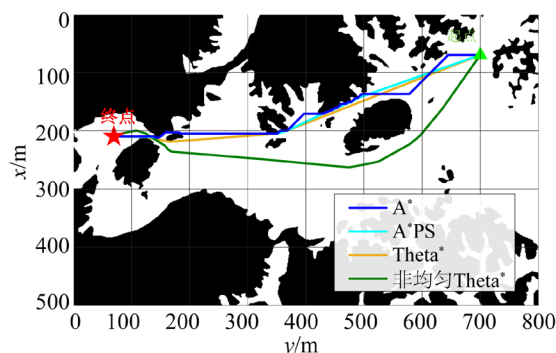


图 1 同一场景下 A*、A*PS、Theta*、非均匀 Theta* 的运行结果图

Fig. 1 Operational Results Diagram of A*, A*PS, Theta* and Non-Uniform Theta* Algorithms Under the Same Scenario

1.1.2 基于随机采样的快速扩展随机树 (Rapidly-exploring Random Trees, RRT) 算法

快速扩展随机树 (Rapidly-Exploring Random Trees, RRT) 算法依托在环境地图中随机采样、扩展连线 and 舍去穿障样点的流程抵达终点，该算法参数少、结构简单且搜索能力强，但冗余节点多、路径曲折且随机性大，不具备可重复性。陈小龙等^[12]提出多策略改进 RRT 算法，融合贝叶斯优化采样、动态步长与双向贪心策略，解决了传统 RRT 规划耗时高、路径冗余及平滑性不足的问题。为解决传统 RRT 算法无法收敛至最优解的缺陷，KARAMAN 等^[13]设计了 RRT* 算法并证明其渐进最优性，显著提升了高维空间下最优路径的规划能力。王兴民等^[14]改进双向 RRT* 算法，通过自适应步长调节、关键节点筛选 and 贝塞尔曲线平滑处理，使其在无人船路径规划中节点生成效率更高、性能更优、路径更平滑。基于随机采样的 RRT 类路径规划算法经多轮改进，生成路径的平滑性与搜索效率上已取得显著提升，RRT* 算法生成的路径见图 2。但在高动态、强约束的受限水域中，其生成的路径质量稳定性仍存在一定优化空间。

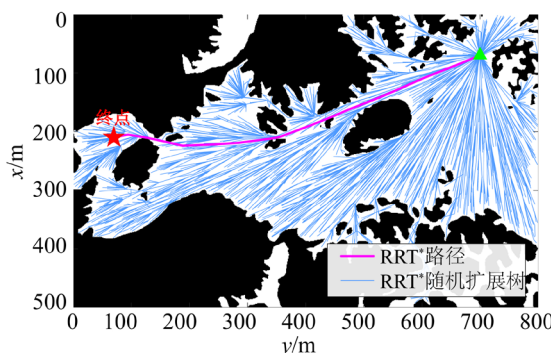


图 2 RRT* 算法的运行结果图

Fig. 2 Operational Results Diagram of RRT* Algorithm

表 1 不同算法生成路径的关键指标对比

Tab. 1 Comparison of Key Indicators of Paths Generated by Different Algorithms

算法	路径长度	计算时间/s	转向次数	距离障碍物最小距离/m	是否具有随机性
A*	691.30	1.93	42	0	否
A*PS	660.06	1.93	21	0	否
Theta*	656.88	2.18	6	0	否
非均匀 Theta*	727.02	20.64	13	2.99	否
RRT*	660.32	0.79	15	0	是

总的来讲，基于图形搜索的算法与基于随机采样的快速扩展随机树算法已发展成熟并得到学者的广泛应用，不同算法在路径长度、计算时间等关键指标的对比见表 1。

1.1.3 生物启发智能优化算法

生物启发智能优化算法主要包括遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等。遗传算法模拟生物进化，通过选择、交叉和变异迭代获得最优解，鲁棒性强且全局搜索能力突出，但局部搜索能力弱和收敛速度慢，参数设定依赖经验。辛峻峰等^[15]提出了一种基于数据驱动的动态交叉变异策略，解决了传统遗传算法易陷入局部最优和收敛速度慢的问题，提升了无人艇路径规划的精度与稳定。张泽宇等^[16]提出了中点过渡初始化、改进锦标赛选择与模拟退火、自适应交叉变异及多点交叉策略，解决了传统遗传算法偏转多、收敛慢、易局部最优问题，提升了收敛速度。

蚁群算法模拟蚂蚁觅食的正反馈机制，算法简单、参数少且鲁棒性强，但收敛速度慢。车健波等^[17]提出动态融合蚁群算法与遗传算法的路径规划方法，通过蚁群算法生成初始种群并动态切换主导角色，结合自适应信息素与交叉变异机制，解决了传统融合算法路径不平滑、收敛慢的问题。孙启光等^[18]引入平滑度因子优化方向选

择，并结合 Bresenham 算法生成路径，解决了传统蚁群算法路径急转弯多、转折点多的问题，使水面无人艇全局路径规划更智能高效。

粒子群算法模拟鸟群觅食行为，参数少、易实现且规划速度快，但易早熟、局部搜索能力差。白响恩等^[19]构建了海流环境下无人艇的多预设路径规划模型，采用自适应惯性权重平衡全局与局部搜索能力，引入精英反向学习策略提升跳出局部最优的能力，解决了海流环境下无人艇的路径规划问题，优化了算法寻优能力与鲁棒性。

生物启发类智能优化算法在全局寻优方面表现突出，尤其适用于多目标优化问题，在考虑气象导航的长距离航线航速综合优化方面展现出独特优势，但其在障碍密集、约束严苛的动态场景中，仍存在实时性不足、结果随机性较强等局限。此外，该类算法通常依赖参数调优，且对问题建模方式较为敏感，在实际工程应用中应进一步结合问题特点进行适应性改进。

1.2 LOS 制导技术

路径跟随是实现无人船艇自主导航和运动控制的核心环节，该能力的发展水平决定了船舶能否正确跟随预设航线和规避航行危险，而制导算法是实现高精度路径跟随的关键技术支撑。常见的制导方法主要包括视线法、向量场制导法和虚拟船舶制导法等^[20]，其中 LOS 制导算法凭借其理论完备、计算效率高、实时性强的特点，成为路径跟随任务中应用最广泛的算法。LOS 制导算法的特点在于采用几何关系把载体和预设路径直接关联起来，把复杂的路径跟随问题拆解为简单的航向控制任务，将高层导航策略和低层控制执行高效配合^[21]，这一优势已在大量试验和工程应用中得到了验证。

传统的 LOS 制导算法普遍存在抗干扰能力不足、复杂环境适应性差和参数自适应优化等问题，为此研究者持续推进算法优化改进研究。在抗环境扰动能力不足方面，研究者进行了多层次的改进。针对随机海流场景，LIU 等^[22]提出基于扩展状态观测器的视线制导（Extended State Observer Based Line of Sight, ELOS）算法，采用降阶扩展状态观测器来识别由恒定海洋干扰或时

变海洋干扰引起的船舶侧滑角，将估计误差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 范围内，保障了路径跟随的稳定性，相比传统算法路径跟随的均方根误差下降 45%。为解决海流干扰造成的路径偏移问题，FOSEN 等^[23]提出自适应积分 LOS 算法，设计扰动观测器来估计并抵消海流的影响，经稳定性分析验证，该算法能让横向偏差和参数估计误差实现全局收敛。LOS 制导算法经过改进已能有效抵御恒定与时变海流等常规扰动，显著提升了路径跟随稳定性与精度，但在极端海况、强非线性流场等复杂扰动场景下，扰动估计的实时性与精度仍有优化空间，抗扰鲁棒性有待进一步增强。

在复杂环境适应性差方面，研究者通过拓展算法的路径适配能力，进一步完善了 LOS 制导算法体系。在曲线路径跟随场景，程宇翔等^[20]提出混合 LOS 制导律，通过模糊系统自适应切换积分视线制导（Integral Line of Sight, ILOS）与混合视线制导（Hybrid Line of Sight, HLOS）算法，小漂移角时保障直线和缓弯道的跟踪稳定性，大漂移角时提升急弯道的跟踪机动性，该方法对直线、曲线和复杂路径均具有良好的跟踪效果。针对风

速变化的干扰，孙家豪等^[21]提出基于时变侧滑角补偿的自适应视线制导（Time Varying Sideslip Compensation Adaptive Line of Sight, TSC-ALOS）算法，引入时变侧滑角补偿机制，充分考虑风、浪、洋流等外部扰动影响，通过实时估计与动态补偿侧滑角误差，解决了复杂海洋环境中传统算法适配性差、跟踪精度易受干扰的问题，增强了无人船艇在复杂环境下路径跟随的鲁棒性。这些策略拓展了算法在曲线路径、风浪干扰方面的适配能力，实现了复杂路径的稳定跟踪，但面对高曲率急弯、多扰动耦合的复杂场景，路径适配的灵活性和复杂环境适应的泛化性仍需优化。

在参数自适应优化方面，研究者结合自适应控制、对比试验等方式，对 LOS 制导算法进行了深度优化。MU 等^[24]结合自适应积分 LOS 与快速波反演技术，实时估计海浪扰动的频率并动态调整积分增益，在有效波高 3 m 的海况下，跟踪

精度较传统的 ILOS 算法提高 50%。ZHAO 等^[25]把回退控制和自适应滑模控制相结合，设计了鲁棒控制律，能抑制载体负载 $\pm 20\%$ 变化带来的参数波动，控制跟踪精度的衰减幅度小于 10%。通过与自适应控制、滑模控制等技术的融合改进，大幅提升了 LOS 算法的参数自适应能力，但在多约束耦合、动态参数时变的场景中，参数自适应调整的实时性仍存在瓶颈，须进一步优化以适配需求更高的应用。

目前，LOS 制导算法已构建起从经典几何制导到自适应扰动补偿、从直线路径跟随到复杂路径适配的多层次技术体系，在无人船艇自主航行领域的应用愈发成熟。未来研究可以融合机器学习、非线性控制等前沿理论，进一步解决算法在极端工况下的性能问题，推动其向更高精度、更强鲁棒性的方向发展。

1.3 开阔水域的自主避碰技术

自主避碰技术是在无人船艇航行过程中，基于传感器的感知信息，在保障无人船艇的安全性前提下实时规划出能够避让动静障碍的局部路径的过程。开阔水域场景的通航条件特点是环境空间大、障碍物稀疏、任务执行单一。

该技术与依靠先验的场景信息进行全局航线统筹的路径规划技术存在本质区别。上文已对路径规划技术中常用的算法进行了详细展开，然而这些算法因局部路径规划对实时性、动态环境适应性及《国际海上避碰规则》（*Internation*

Regulations for Preventing Collisions at Sea, COLREGs）合规性的要求更高，直接应用于局部自主避碰的情况较少，但部分算法经针对性改进后形成的变种算法已有效适配局部规划的需求，同速度障碍法（Velocity Obstacle, VO）、动态窗口法（Dynamic Window Approach, DWA）、人工势场法（Artificial Potential Field, APF）及强化学习等算法共同构成了无人船艇自主避碰的较成熟算法体系。

1.3.1 速度障碍法

速度障碍法是自主避碰技术中的核心算法，其通过将动态障碍物的运动状态映射到本船速度状态，构建可能发生碰撞的速度障碍区域，选择障碍区域外的速度作为避碰决策依据。其核心优势是动态环境适应性强、计算效率高，能快速响应动态障碍物的运动变化^[26]。但传统 VO 算法的速度选择易导致船舶运动状态不连续、未充分考虑船舶动力学约束及不满足 COLREGs 规则等问题，针对这些问题的改进均有明确研究。吴博等^[27]结合操纵性建模小组（Maneuvering Modeling Group, MMG）模型与速度障碍法，采用 GoodWin 船舶领域模型，改变无人船艇运动方向避让动态障碍物，适用于开阔水域动态避障

场景。HUANG 等^[28-29]对比多种 VO 算法，证实传统 VO 算法在目标船非线性轨迹可预测时，适用于开阔水域船舶避碰；后续又将广义速度障碍法（Generalized Velocity Obstacle, GVO）算法应用于海上避碰，设计 GVO-CAS 防撞系统，融入 COLREGs 与船舶动力学约束，经多场景验证效果显著。LIU 等^[30]提出数据驱动的船舶会遇碰撞风险演化评估模型，融合概率速度障碍法与数据驱动方法，量化开阔水域碰撞风险动态演化，增强了避碰决策的实时性与准确性。开阔水域的 VO 算法经多类改进后动态避碰能力已趋成熟，但在运动状态连续性方面仍存在优化空间。

1.3.2 动态窗口法

动态窗口法的核心逻辑是考虑无人船艇的动力学约束和环境信息，在船舶可达速度的动态窗口内，离散地生成多个候选速度组合，通过代价函数综合评估各速度组合对应所预测的轨迹在安全性、平滑性、效率及 COLREGs 合规性等各方面的效果，最终选择最优速度组合实现实时避碰。该算法能够实现毫秒级响应，且因考虑船舶动力学约束，生成的路径贴合无人船艇操纵特性。但传统 DWA 算法存在易陷入局部最优、复杂环境下路径搜索能力弱及适用范围有限等问题^[26]，为此研究者开展了多维度改进。张金泽等^[31]提出模糊推理改进的双窗口 DWA 算法，在常规速度窗口基础上增设传感器感知窗口，动态调整评

价函数权值，在未知密集障碍物场景下，路径光滑性提升，迭代次数与运行时间缩短 20% 以上。HAN 等^[32-33]先后提出拓展动态窗口法、基于势场的拓展动态窗口法，设计线性模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 控制器，实现轨迹实时规划与精准跟踪，且满足 COLREGs 要求。刘钊等^[34]结合风、浪、流影响构建无人船艇运动学模型，引入动力学模型约束速度，通过自适应权重调整评价函数，解决了开阔水域复杂海洋环境干扰、算法运行效率低及路径平滑性不足的问题。开阔水域下的 DWA 算法改进后路径平滑性与搜索效率显著提升，但其局部最优与全局寻优能力的平衡仍须进一步研究。

1.3.3 人工势场法

人工势场法是通过目标点吸引力与障碍物排斥力的合力引导生成避碰方向，其模型简单、计算速度快且路径平滑，但易陷入局部最优。顾潮宏等^[35]提出优化人工势场法，结合视线法与改进引力斥力函数，解决无人艇转向角过大、轨迹不可控及局部最小值问题，显著降低了轨迹偏差与艏向角变化，提升路径保持与航行安全性。任建等^[36]提出改进人工势场法，采用障碍物移动法、

自膨胀系数与模拟退火算法摆脱局部最优，优化引力势场函数解决目标不可达问题，通过仿真验证了算法的可行性。人工势场算法凭借模型简洁、实时性强等优势，在开阔水域自主避碰方面表现优异，各类改进方法也有效优化了局部最优与轨迹可控性问题，但在多障碍、强干扰的复杂受限水域，其局部最优陷阱仍难以彻底规避。

1.3.4 强化学习算法

强化学习算法作为近年来兴起的智能技术，凭借动态环境自适应学习能力，已成为开阔水域局部避碰路径规划的重要补充。刘芳等^[37]提出基于深度学习的无人船动态路径规划方法，结合栅格法离散水域并构建深度学习模型，解决水环境下路径平滑性差、避障能力弱的问题，提升无人船动态路径规划的安全性。强化学习算法的优势在于无需依赖精确环境模型，能通过与环境交互自主学习最优避碰策略，尤其适配开阔水域中动

态的不确定场景。

开阔水域自主避碰算法体系以 VO、DWA、APF 和强化学习算法为主，各类算法均以 COLREGs 规则为约束，围绕实时性、安全性、动力学适配性等需求持续优化。这些算法均有明确的研究基础和改进案例，已形成较成熟的技术体系，能有效应对开阔水域等相对稳定的航行环境，为船舶自主避碰提供可靠技术支撑。

2

面向高复杂度场景的决策控制技术

面向高复杂度场景的决策控制技术，存在高密度的非结构化通航环境、高动态的非线性环境干扰与多目标约束的任务场景等问题，制约无人船艇向核心复杂场景发展。虽然面向开阔水域等中

低复杂度场景的无人船艇自主航行技术已日趋成熟并已逐步实现工程化应用，但面向狭窄水域、内河港口及多船交汇等复杂场景的自主航行技术仍存在诸多技术瓶颈，其中自动靠离泊、狭窄水

域自主避碰、多智能体协同控制和自主回收等关键技术，尚未形成完善的技术体系，面临决策优化难度大、环境建模精度不足、动态博弈响应滞

后等问题，成为当前无人船艇领域亟待攻克的研究热点与关键方向。本文将围绕这些关键技术的发展现状与现存挑战展开具体分析与研究论述。

2.1 自动靠离泊技术

近几年，国家多部门出台相关政策，鼓励对自动靠离泊智能系统的研发，见图3。自动靠离泊是水面无人船艇自主航行的关键核心技术，要求船舶能够在无人或大部分时段无人干预下，自动做出航迹、航向与航速等规划决策，完成船舶

的掉头、转向、横移、停船等操作控制。作为自主航行的最后1公里，自动靠离泊技术是衔接开阔水域航行与港口作业的关键，对提高航运的效率与安全、推动智能船舶的发展和智慧港口的建设具有重要的应用价值。

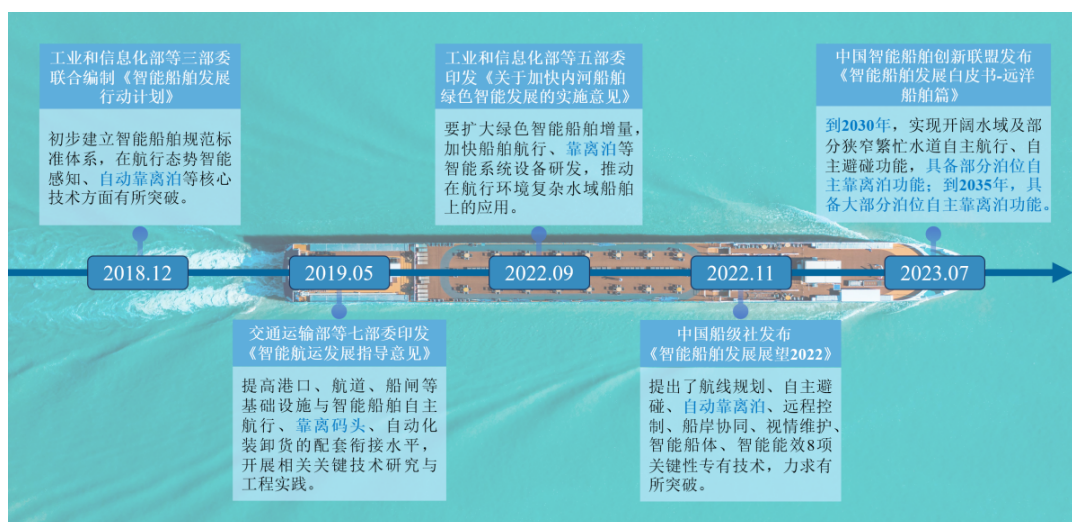


图3 鼓励自动靠离泊技术发展的政策文件概述

Fig. 3 Overview of Policy Documents Encouraging the Development of Automatic Docking and Undocking Technology

路径跟随和轨迹跟踪是实现自动靠泊最常用的控制方式。在操控船舶之前，首先需要通过路径规划或轨迹规划算法搜索可行的路径/轨迹作为控制器的跟踪对象。路径和轨迹的区别在于，路径是自由空间中与空间相关的状态序列（即几何路径点），而轨迹是时空状态序列（即时变路径点）。

轨迹规划将船舶视为刚体，并充分考虑其受力和惯性等动力学约束。对于一个欠驱动系统，轨迹规划的重要任务就是找到能够被船舶自身精准跟踪的轨迹^[38]。要实现这一目标，就需要对船舶的动态特性展开深入研究，在规划时考虑船舶的数学模型。基于随机采样的方法^[39]、晶格搜索方法^[40]、基于最优控制理论的方法等是解决轨迹规划问题常用的方法。但基于随机采样的方法和晶格搜索方法都不适用于自动靠泊的轨迹规划。

因为靠泊轨迹要求末端轨迹点的速度为0，且艏向满足期望的靠泊艏向。为解决船舶在低速时操纵性能差的问题，需要在靠泊轨迹规划中增加与船速相关的舵角约束，这也为靠泊轨迹的设计提出了更高的要求。

靠泊轨迹的规划问题可通过基于最优控制理论的轨迹优化方法来解决，其本质是将连续的最优控制问题离散并转化为有限维非线性优化问题。MARTINSEN等^[41]提出一种基于轨迹优化的靠泊轨迹规划方法，该方法将轨迹规划归结为一个非线性最优控制问题，求解无碰撞轨迹。MAKI等^[42]提出了一种基于协方差矩阵的自适应进化策略，该策略将最优控制问题建模为最小时间成本问题进行求解，得到了近乎全局最优的轨迹，但求解耗时久，难以满足实时需求。在上述文献的基础上，RACHMAN等^[43]利用协方差矩

阵自适应进化策略 (Covariance Matrix Adaptation-Evolution Strategy, CMA-ES) 获取的离线解决方案作为半在线轨迹优化的暖启动, 并考虑了多边形的码头, 使用多边形中点法生成必要的空间约束, 确保轨迹在非凸区域内不会发生碰撞。HAN 等^[44] 通过港口地形网格化处理, 提出一种全局路径引导的轨迹预测法, 既兼顾地形所有特征, 又能满足船舶动力学约束, 高效搜索复杂环境下的可行轨迹。由于计算效率问题, 这些轨迹规划算法很难在船舶偏离固定轨迹后快速地重新建立船舶当前位置到期望泊位的全局轨迹, 后续靠泊作业中断。

在靠离泊轨迹跟踪控制方面, SAWADA 等^[45] 根据贝塞尔曲线设计了靠泊路径, 并使用纯追踪算法实现了欠驱动船舶路径跟随控制。LIAO 等^[46] 将靠泊分为轨迹规划与跟踪 2 阶段, 设计改进的自适应模糊比例-积分-微分 (Proportional Integral Derivative, PID) 控制器, 通过仿真与场地试验验证了靠泊轨迹的精确跟踪。LI 等^[47] 提出一种非线性模型预测控制方法, 通过控制螺旋桨转速和舵角完成自动靠泊任务, 采用字典式多目标优化策略调整权重系数, 实现了精准的靠泊控制。模型预测控制能够通过船舶运动模型预测

未来的系统行为, 作出预测步长内的最优控制决策, 非常适用于智能船的低速靠离泊控制。但这种方法通常需要建立准确的运动模型, 考虑到船舶低速运动的复杂性, 精准船舶运动模型的建立存在较大困难。

国内外关于无人船艇在开阔水域自主航行的技术已日趋成熟并在工程上得到初步应用, 但作为无人船艇要实现完全自主航行“最后 1 公里”的自动靠离泊技术尚未成熟, 这也是国际上公认的科学难题^[48-49]。首先, 靠泊轨迹规划与跟踪算法的稳定性和实时性不足, 船舶偏离初始轨迹后, 现有算法难以实时地重建全局靠泊轨迹, 易导致作业中断, 且多数研究忽略港口完整地形与进出港避碰过程, 开阔水域避碰算法无法直接适配复杂狭窄水域。其次, 许多控制算法依赖精准的船舶模型, 但靠泊阶段船舶舵效减弱、操纵性变差, 叠加岸壁效应与风-浪-流联合干扰, 动力学行为复杂, 现有的模型难以精准表征。此外, 研究多聚焦自动靠泊, 对复杂狭窄水域无拖轮辅助下的自动离泊关注不足, 相关轨迹规划方法仍有待完善。最后, 现有技术多停留在仿真或小规模试验阶段, 缺乏大规模验证, 算法实时性、鲁棒性与实际复杂场景需求仍有差距。

2.2 狭窄水域的自主避碰技术

随着无人船自主航行技术向近岸、内河等复杂场景拓展, 狭窄水域的自主避碰问题日益凸显。相较于开阔水域, 狭窄水域的环境约束与航

行风险显著增加, 两者通航条件有本质区别, 见表 2。

表 2 开阔水域与狭窄水域通航条件对比

Tab. 2 Comparison of Navigation Conditions Between Open Water Areas and Confined Water Areas

对比维度	开阔水域	狭窄水域
实际场景	近远海等无明显空间限制的开阔海面	狭水道、内河狭窄航道、港口受限水域等
可航空间	可航空间充足、开阔	可航空间极度受限
障碍分布	障碍物稀疏、分布分散	动静态障碍物 (岛礁、浅滩、浮标、同航道船舶) 密集分布
环境干扰	环境干扰相对单一, 无明显浅水或岸壁效应, 存在风浪流干扰	浅水与岸壁效应显著, 风流干扰耦合叠加
通航特征	环境空间大、任务执行单一, 对船舶操纵的空间限制较少, 避碰可满足 COLREGs	船舶操纵范围受严格限制, 转向角度、变速幅度均受狭窄航道边界约束

狭窄水域的自主避碰技术尚未成熟，与开阔水域已形成以 VO、DWA、APF 和强化学习算法为主的较成熟技术体系并实现部分实船落地应用存在明显差距。狭窄水域自主避碰技术的挑战主要包括多约束条件下的避碰路径规划、多目标冲突下的协同避碰决策和应对动态环境的鲁棒性设计等方面。

多约束条件下的避碰路径规划是实现狭窄水域自主避碰的基础，直接决定了船舶能否在复杂度环境约束下，规划出一条安全可靠的航行路径。区别于开阔水域可以忽略空间约束条件搜索最优避碰路径，狭窄水域需要在受限空间内保障船舶的安全性、操纵可行性和规则合规性。CHIANG 等^[50]将 RRT 算法与 COLREGs 结合，提出 COLREGs-RRT 算法，通过联合仿真、虚拟障碍物约束、状态-时间空间建模及静态障碍规避策略，解决了狭窄水域空间受限、避碰反应滞后等问题。GAN 等^[51]针对内河狭窄水域，基于椭圆船舶领域改进人工势场法，引入速度斥力势场，优化曲线轨迹的生成方式，并考虑静态障碍的边界势场约束，解决传统算法局部最优、路径振荡等问题，实现了对动静障碍的精准避碰。

多目标冲突下的协同避碰决策是自主避碰的关键，要求无人船在复杂场景下，对多个目标做出实时、正确的决策。狭窄水域普遍存在多船交会频繁、避让一个目标却与另一个目标形成新碰撞危险的情况。张可^[52]提出融合改进灰云模型与碰撞危险判断模型，集成船舶操纵性、目标船位置和环境干扰 7 类关键参数，通过信息熵理论确定各指标权重，实现多目标碰撞危险的精准量化分级，为避让优先级排序提供参考。NI 等^[53]融合时间维度、船舶运动操纵模型及船舶领域模型，提出三维广义速度障碍算法，通过碰撞风险指数和 COLREGs 约束进行速度筛选，生成符合

狭窄水域航行的无碰速度集，解决了多船会遇场景的避碰问题。

应对动态环境的鲁棒性设计是保障避碰决策安全运行的底线，因狭窄水域普遍存在目标船位置、速度、航向不确定（如渔船随意转向）、环境干扰随意（风流突变、浅水效应动态变化）等情况，算法的需求相较于开阔水域更高。QU 等^[54]针对传统算法动态环境适应性差的问题，提出一种基于安全强化学习的动态窗口法—强化学习（Dynamic Window Approach-Reinforcement Learning, DWA-RL）算法，增设安全层约束、设计自适应奖励函数与动态状态空间，解决传统算法碰撞率高、对障碍物数量动态变化适配性不足的问题，实现动态浪涌与洋流干扰下狭窄水域的局部路径规划。

目前，通过构建适配狭窄水域的船舶操纵模型、精准环境建模方法、改进经典路径规划算法、优化多目标的决策逻辑和强化算法鲁棒性设计等方式，在理论层面解决了部分关键问题，实现了从开阔水域到狭窄水域的算法迁移。然而，现有方法多依赖于局部避碰算法与有限传感器信息，通常仅能生成局部避让方向或短时轨迹，未能充分融合多源感知数据对全局避碰路径进行系统性重构。在障碍物密集、动态性强或交通流复杂的航行场景下，这类局部优化策略往往面临适应性与鲁棒性不足的挑战。

随着高性能计算平台的普及与算法效率的提升，将全局路径规划算法（如基于采样的规划、优化搜索方法等）直接应用于实时避碰决策，正逐步展现出潜力。该类方法能够统筹全局环境信息，实现从局部分段避让到全局轨迹重规划的跨越，目前已开始在实船测试中得到初步验证与应用，标志着自主避碰技术从响应式局部避让向全局协同规划的重要演进。

2.3 多智能体协同控制技术

多智能体协同控制技术是指由多艘水面智能无人船艇组成的集群系统，通过个体间的信息交流和协调配合，自主完成复杂任务的技术^[55]。该技术的核心是让若干单一的无人船艇形成整体，在执行任务时实现“1+1 > 2”的效果。该技术广泛应用于海洋资源勘探、环境监测、海上搜救、协同反潜反水雷等场景^[56]，特别适用于单一无人

船艇难以覆盖的高复杂度场景。多智能体协同控制技术既能扩大作业范围、提高执行效率，又能增强系统自主航行的鲁棒性，在智慧海洋建设和海上任务执行中发挥着关键作用。

多智能体协同控制技术可分为非编队协同与编队协同两大类，具体涵盖任务分配、路径规划、编队控制和集群避障等部分^[55-56]，各环节既

相互独立又紧密关联，构建起无人船艇集群协同的自主航行决策控制技术体系。

任务分配是协同控制的前提，须将复杂或多个任务合理分配给若干无人船艇，该技术的本质是多约束条件下的离散空间组合优化问题^[55]。该技术面临的主要问题包括任务与无人船艇的适配性、动态环境下的实时调整、集群协同的计算压力以及多目标优化（时间、能耗、任务完成率等）等。吴迪^[57]提出了一种改进遗传算法和扩展一致性包算法，通过 K-means 聚类算法对数据进行预处理和引入改进遗传算子提升了算法的寻优能力和资源分配的均衡性，解决了传统算法收敛慢、易陷入局部最优的问题，在单一类型和多类型任务环境中，任务完成量和稳定性均显著提升。SUN 等^[58]基于 USV 的初始位置，利用时变区域规划（Time-Dependent Area Planning, TDAP）算法完成区域划分与任务分配，通过梯度下降法和连通性矩阵优化分配结果，保障了任务分配的公平性与子区域的连通性。

路径规划是无人船艇集群安全航行的基础，须为复杂环境中每艘船规划出最优无碰路径。该技术的主要困难是环境信息的随机性（如风、浪、流的干扰、难以探测的障碍物）、多船航行路径的协同避碰、复杂场景下的路径规划效率和路径平滑性的优化等。WU 等^[59]设计一种基于障碍物多边形凸点的可视图模型构建方法，采用 Dijkstra 算法在移动规划窗口内求解最优路径，保障了路径规划的质量和搜索效率。ZONG 等^[60]将高斯分布采样与局部偏置采样结合，提出了一种区域采样 RRT 算法，显著提升了高维空间的搜索效率。徐晓苏等^[61]在 Q-learning 算法中引入引力势场概念，在状态集中增加方向因素，加快了算法收敛速度，优化了路径平滑性。

编队控制是编队协同的核心，是保持无人船艇集群按照预定队形协同运动、适应环境变化、完成任务的过程。该技术面临队形保持的稳定

性、队形变换的平滑性、环境扰动的影响和异构船艇间的协同匹配等问题。罗浩等^[62]构建了感知信息辅助的分布式系统模型，利用无人船艇动力学模型整合相邻船的姿态信息，采用局部坐标计算控制方向，优化控制增益矩阵，实现了无需船间通信的编队协同与导航，降低了通信成本。曾江峰等^[63]引入虚拟领导者和神经网络自适应控制，减少了对真实领航船的依赖，提升了编队在执行器故障和系统不确定性下的鲁棒性。

集群避障是保障无人船艇集群安全航行的关键，需要在编队保持或非编队协同过程中，实时规避静态障碍物及船艇间的碰撞^[62]。该技术的主要困难是多船避障的协同性、避障过程中的队形保持或任务协调以及复杂海洋环境下避碰的准确性。TAN 等^[64]结合零空间行为法与 COLREGs 动态避碰，解决了规避静态障碍物、队形维持和防撞问题，降低了行为的紊乱风险。YUAN 等^[65]将领导者-跟随者控制与人工势场法结合，利用势场力引导船艇规避障碍物，同时维持编队队形，实现了避障与编队保持的协同。闫炳成等^[66]结合虚拟领航者与改进胡克定律，设计集群避障策略，实现无人船艇集群对水面障碍物的规避，通过调整船艇间弹性作用，实现避障过程中队形的快速恢复。

当前多智能体协同控制技术虽已取得初步突破，但仍有多个方向亟待深入研究。集群安全方面，现有研究针对实际水域环境与无人船艇操纵特性的结合不充分，为保障复杂环境下编队队形保持与变换的安全性，艇间防碰撞机制仍应完善。容错调整方面，面对无人船艇失能、失联等故障的应对策略不全面，缺乏适配不同故障类型的灵活解决方案，影响集群任务的连续性^[63]。此外，多船协同执行同一任务的冲突规避、海洋环境中干扰与障碍物的合理应对、任务执行过程中多目标约束决策等，也需要进一步探索优化。

2.4 自主回收技术

自主回收技术是水面智能无人船艇完成任务后，通过环境感知、路径规划和决策控制等方法，自主地从任务结束位置航行到回收装置（吊放式、滑道式、坞舱式等）^[67]，完成精准对接和固定连接等连续操作过程的技术，见图 4。

自主回收通常包括远距离航行避障和精密入坞或对接 2 个阶段^[68]。该技术支持无人船艇在完成情报收集、监视侦察等任务后快速返回母船，实现海上作业的快速部署；可实现无人船艇完成在深远海环境监测、海上救援等作业后的安全召回，

显著降低人力成本^[67]。自主回收技术在无人船艇自主航行领域具有重大意义，但是因航行水域的

环境复杂、多目标协同等特殊技术本身的精准要求，使无人船艇自主回收面临诸多挑战。

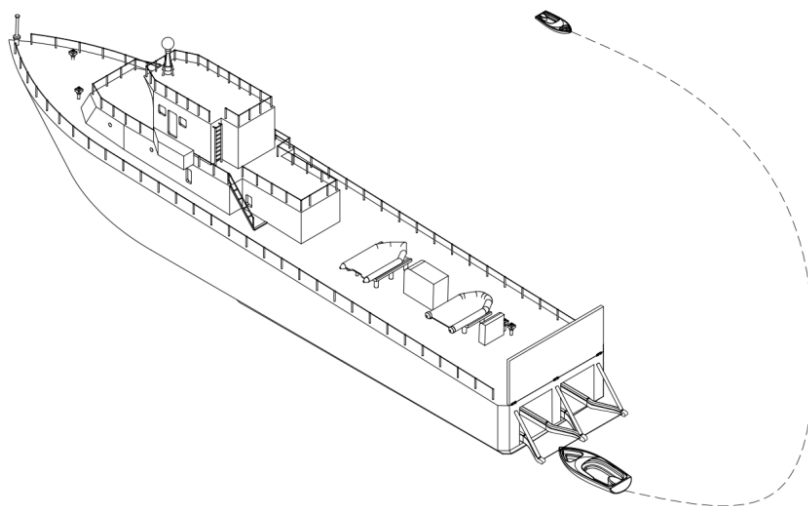


图4 无人艇自主回收概念图

Fig. 4 Conceptual Diagram of Unmanned Surface Vehicles Autonomous Recovery

回收路径规划复杂性的挑战体现在无人船艇须自主规划出无碰撞路径，并且在靠近回收装置时还须规划出符合运动学约束的精密入坞路径，确保回收路径的安全。刘祥^[69]针对艏滑道式回收的狭窄空间，提出了一种三维稀疏A*路径规划算法，将时间维度引入规划空间，设计稀疏均匀采样实现A*节点剪枝，融合无人船艇运动学约束构造节点可行域，提高动态避障能力与路径平滑性，保障无人船艇无碰撞驶入回收装置。游少杰^[70]提出了一种基于艏滑道的无人船艇自主引导回收控制系统，采用实时动态定位（Real Time Kinematic, RTK）与视觉数据融合的分区回收方法，结合基于变可视半径的LOS无人船艇自主引导算法，实现了无人船艇与艏滑道的精准对接。

多目标协同与集群回收方面的难题主要表现在多无人船艇同时回收时需解决目标分配、回收顺序、艇间避碰等问题，确保回收过程高效有序，避免因调度混乱导致回收失败和设备损坏。程志强等^[71]构建多无人船艇回收虚实联合仿真方法及系统，采用集中式控制策略，由母船统一接管各无人船艇运动控制，根据虚拟泊位的远近顺序依次发送回收指令，实现多艇回收的路径规

划，确保集群回收路径有序。郭文轩^[67]将集群回收任务拆解为目标分配、集群控制和回收调度3个部分，利用匈牙利算法为各艇分配虚拟泊位，基于虚拟结构控制策略设计径向基函数神经网络集群控制器，采用遗传算法优化回收调度时刻表，用最少的集群回收时间实现最大的资源利用率，显著提升集群回收效率。

尽管自主回收技术已在中低复杂度场景中展现出初步应用成效，但仍存在诸多未解决的问题。在应用对象方面，现有研究多集中于单艇回收，对于大规模无人集群回收的协同调度、资源分配、冲突避碰等问题研究不足，难以满足实际应用中大规模集群作业的回收需求^[67]。在路径规划方面，现有算法在复杂动态环境下的实时性与鲁棒性不足，面对多动态障碍物和突发状况时难以快速规划出最优的无碰路径。决策控制方面，现有控制器对复杂非线性动力学特性与动态环境干扰的适应能力较差，遇参数波动、环境干扰时，难以保障跟踪的高精度和轨迹的平滑性。总的来说，无人艇大规模自主回收技术尚未完全成熟，需要研究人员进一步深入研究探索，促进该技术实用化与规模化。

当前无人船艇自主航行决策控制算法体系日趋丰富,在路径规划、航迹跟踪、开阔水域自主避碰等中低复杂度场景中已逐步实现工程化应用。然而,在自动靠离泊、狭窄水域避碰、多船协同控制和自主回收等高复杂度作业场景下,决策控制系统须同时应对复杂动力学约束、多目标冲突、高密度交通流、不确定环境扰动及高安全风险等多重挑战,现有算法体系在鲁棒性、泛化能力和工程适应性方面仍存在明显不足。与此同

时,测试场景不统一、环境建模不系统和评价指标缺乏标准化等问题,使不同算法之间难以进行客观对比与系统评估,制约了技术迭代优化及工程化推广。因此,亟须构建面向高复杂度航行场景的系统性技术发展路径,从算法体系构建、测试场景标准化和虚实融合验证等多个层面协同推进,系统提升无人船艇在复杂环境下的自主决策能力、安全性与可靠性。

3.1 面向高复杂度场景的自主航行基准算法体系构建

围绕无人船艇自主航行控制系统开发需求,针对路径规划、自主避碰、航向控制和航迹跟踪等基础任务,应系统开展算法机理分析、性能评估与适用性对比研究,构建覆盖经典方法与新型智能算法的基准算法体系,形成统一的算法集成与测试平台。通过对不同算法在典型场景下的性能指标进行系统对比分析,明确各类算法在计算效率、控制精度、鲁棒性与适应性等方面的优势与局限,为算法选型、参数优化及工程应用提供理论依据。

针对自动靠离泊、无人艇布放与回收、多无人船协同航行及编队控制等高复杂度场景,应重点发展专用决策与控制算法,突破复杂约束条件

下的实时优化与安全决策难题。结合港口结构、泊位几何特性、回收装置交互机制及多船协同通信等动态环境约束,构建面向复杂工况的分层决策控制框架,引入模型预测控制、强化学习、博弈论优化及多目标规划等先进方法,系统提升决策系统在高风险场景下的安全性、协同性与环境适应能力。同时,应建立覆盖开阔水域、狭窄航道、港区靠离泊及复杂交通流环境的标准化仿真测试场景库,统一风、浪、流等环境扰动建模方法,提高仿真测试的可重复性与泛化能力。通过虚拟仿真对算法进行系统验证与参数标定,并将成熟算法逐步集成至基准算法体系中,为后续实船试验及系统集成提供多样化算法支撑。

3.2 自主航行测试场景标准化构建技术

实船试验是验证无人船艇自主航行系统工程可行性与安全可靠性的关键环节。然而,当前实船测试缺乏覆盖多类型真实航行环境、具备可重复性和可对比性的标准化测试场景,导致不同系统与算法之间难以开展系统化评估与横向对比。为此,亟须开展面向复杂航行环境的自主航行测试场景标准化构建技术研究。

围绕开阔水域、近岸航道、港口水域及内河等典型航行环境,通过系统规划与实地勘测,构建可在真实水域长期部署、可快速复现的标准化物理测试场景,设计涵盖不同复杂度与风险等级的实船测试航路。利用目标船、智能浮标和移动

障碍物等构建典型会遇、交叉、追越及靠离泊等高风险作业场景,形成逼真的物理测试环境。同时,应研究面向实船试验的场景快速布设与高精度测量技术,提出涵盖障碍物布局、动态目标轨迹和环境扰动参数等关键要素的统一建模与标定方法,建立标准化测试流程与操作规范。在此基础上,构建涵盖航迹精度、避碰成功率、控制稳定性、作业效率及系统安全裕度等关键性能指标的综合评价体系,实现无人船自主航行功能在真实复杂环境下的客观量化评估,为系统优化与工程认证提供可靠依据。

3.3 面向复杂工况的虚实融合试验验证方法

现有无人船艇决策控制系统验证主要依赖虚拟仿真测试,虽具备成本低、效率高和风险可控等优势,但难以全面反映真实环境中复杂水动力扰动、感知不确定性及执行器非理想特性对系统性能的综合影响,亟须构建虚拟测试与实船试验深度融合的系统化验证方法。

针对典型作业场景和测试需求,系统开展航线优化、自主避碰、自动靠离泊、无人艇布放与回收及多船协同等核心功能的综合决策单元验证。在测试用例设计阶段,充分利用虚拟仿真平台对典型航行工况进行大规模测试,筛选代表性

强和风险等级高的典型场景,并将其映射至实船试验环境中,实现测试场景的虚实一致性构建。

在实船验证过程中,重点采集航迹偏差、避碰安全裕度、协同效率、能耗指标及控制稳定性等关键数据,通过与虚拟仿真结果进行系统对比分析,评估算法在真实复杂环境中的适应性、鲁棒性与可靠性。基于试验反馈,对决策模型、控制参数及测试流程进行迭代优化,为无人船艇自主航行控制系统的工程应用与标准认证提供系统化技术支撑。

4

结论

本文围绕无人艇自主航行决策控制技术,系统化梳理了中低复杂度与高复杂度场景下的研究进展,覆盖路径规划、LOS 制导、开阔水域自主避碰、自动靠离泊、狭窄水域自主避碰、多智能体协同控制及自主回收七大技术方向。中低复杂度场景下,路径规划、LOS 制导与开阔水域自主避碰技术已形成较成熟的技术体系,并逐步实现工程化应用,为水面智能无人艇自主航行打下了坚实基础。高复杂度场景下,自动靠离泊、狭窄水域自主避碰、多智能体协同控制及自主回收等技术仍处于探索发展阶段,面临多目标约束优化难度大、环境建模精度不足、动态博弈响应滞后等瓶颈,尚未形成完整的技术体系,是当前无人船艇领域亟待突破的研究热点与关键方向。

随着海洋强国战略推进与物联网、大数据和人工智能等新一代信息技术的深度融合,水面智能无人船艇的应用场景正从单一任务、低干扰的开阔水域向多目标、强干扰的复杂水域发展,对

决策控制技术的实时性、鲁棒性与协同性提出了更高要求。未来研究应着力突破以下 3 项技术瓶颈: 1) 突破面向高复杂度场景的自主航行基准算法体系构建,形成覆盖经典方法与新型智能算法的基准算法体系,为复杂场景下的算法选型与优化提供理论依据; 2) 突破自主航行测试场景标准化构建技术,搭建覆盖多类型真实航行环境、具备可重复性和可对比性的标准化测试场景,实现不同算法在真实场景下的客观对比与系统评估; 3) 突破面向复杂工况的虚实融合试验验证方法,构建虚拟测试与实船试验深度融合的系统化验证方法,全面提升算法在真实复杂环境中的适应性、鲁棒性与可靠性。以此为基础,不断完善无人船艇自主航行决策控制技术体系,推动核心技术从理论研究向工程规模化转型,为我国无人艇技术的跨越式发展与海洋装备智能化升级提供坚实的理论支撑与技术保障。

参考文献:

- [1] 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. Development Trend and Key Technology Prospect of Unmanned Surface Vehicles[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(8): 108-111.
- [2] 王鸿东,易宏,向金林,等.基于海事规则的中型无人艇避碰路径规划算法研究及应用[J].中国舰船研究,2022,17(5):184-195.

- WANG H D, YI H, XIANG J L, et al. Research and Application of Collision Avoidance Path Planning Algorithm for Medium-Sized Unmanned Surface Vehicles Based on Maritime Rules[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 184-195.
- [3] 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. Progress and Frontier of Intelligent Navigation Technology for Unmanned Ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(1): 3-14.
- [4] 何林甫, 周志红. 自主航行船舶全局路径规划方法研究综述 [J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2024, 23(2): 84-87.
HE L F, ZHOU Z H. A Review of Global Path Planning Methods for Autonomous Navigation Ships[J]. Journal of Wuhan Institute of Shipbuilding Technology, 2024, 23(2): 84-87.
- [5] 吕成, 崔濛, 吴刚. 基于 Dijkstra 算法的极区船舶航线规划方法 [J]. 船舶工程, 2022, 44(6): 10-19.
LYU C, CUI M, WU G. Polar Ship Route Planning Method Based on Dijkstra Algorithm[J]. Ship Engineering, 2022, 44(6): 10-19.
- [6] SINGH Y, SHARMA S, SUTTON R, et al. Feasibility Study of a Constrained Dijkstra Approach for Optimal Path Planning of an Unmanned Surface Vehicle in a Dynamic Maritime Environment[C]//2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions. 2018.
- [7] SONG R, LIU Y, BUCKNALL R. Smoothed A* Algorithm for Practical Unmanned Surface Vehicle Path Planning[J]. Applied Ocean Research, 2019, 83: 9-20.
- [8] 吕琳, 路楠, 黄昊. 基于改进 A* 算法的无人艇全局路径规划 [J]. 上海大学学报 (自然科学版), 2025, 31(2): 288-298.
LYU L, LU N, HUANG H. Global Path Planning of Unmanned Surface Vehicles Based on Improved A* Algorithm[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2025, 31(2): 288-298.
- [9] NASH A, KOENIG S. Any-Angle Path Planning[J]. AI Magazine, 2013, 34(4): 85-107.
- [10] CHOI S, YU W. Any-Angle Path Planning on Non-Uniform Costmaps[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011.
- [11] 杜家辉, 李恒宇, 瞿栋, 等. 基于 Theta* 算法和启发路径的无人艇全局路径规划 [J]. 中国测试, 2025, 51(5): 101-109.
DU J H, LI H Y, QU D, et al. Global Path Planning of Unmanned Surface Vehicle Based on Theta* Algorithm and Heuristic Path[J]. China Measurement & Test, 2025, 51(5): 101-109.
- [12] 陈小龙, 李明智, 张橙橙, 等. 基于多策略改进 RRT 算法的无人船路径规划 [J/OL]. [2025-09-05]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1885.U.20250905.1302.002>.
CHEN X L, LI M Z, ZHANG C C, et al. Unmanned Ship Path Planning Based on Multi-Strategy Improved RRT Algorithm[J/OL]. [2025-09-05]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1885.U.20250905.1302.002>.
- [13] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Sampling-Based Algorithms for Optimal Motion Planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(7): 846-894.
- [14] 王兴民, 刘瑞雪, 李倩, 等. 基于改进双向 RRT 的无人船路径规划 [J]. 山东科学, 2025, 38(3): 132-138.
WANG X M, LIU R X, LI Q, et al. Path Planning of Unmanned Ship Based on Improved Bidirectional RRT[J]. Shandong Science, 2025, 38(3): 132-138.
- [15] 辛峻峰, 张永波, 伯佳更, 等. 基于数据驱动的遗传算法的无人艇路径规划研究 [J]. 智能科学与技术学报, 2019(2): 171-180.
XIN J F, ZHANG Y B, BO J G, et al. Research on Path Planning of Unmanned Surface Vehicle Based on Data-Driven Genetic Algorithm[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019(2): 171-180.
- [16] 张泽宇, 王雷, 蔡劲草, 等. 改进 Q-Learning-遗传算法在路径规划中的应用研究 [J]. 智能系统学报, 2025, 20(6): 1493-1504.
ZHANG Z Y, WANG L, CAI J C, et al. Research on Application of Improved Q-Learning-Genetic Algorithm in Path Planning[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2025, 20(6): 1493-1504.
- [17] 车健波, 唐东林, 何媛媛, 等. 动态融合蚁群算法与遗传算法的路径规划方法研究 [J]. 工程设计学报, 2025, 32(6): 789-802.

- CHE J B, TANG D L, HE Y Y, et al. Research on Path Planning Method of Dynamic Fusion Ant Colony Algorithm and Genetic Algorithm[J]. *Journal of Engineering Design*, 2025, 32(6): 789-802.
- [18] 孙启光, 孙昱浩, 陆璐. 基于改进蚁群算法的水面无人艇全局路径规划 [J]. *青岛远洋船员职业学院学报*, 2025, 46(4): 30-35.
- SUN Q G, SUN Y H, LU L. Global Path Planning of Unmanned Surface Vehicle Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. *Journal of Qingdao Ocean Shipping Mariners College*, 2025, 46(4): 30-35.
- [19] 白响恩, 孙广志, 徐笑锋. 基于改进粒子群算法的海流环境下无人水面艇路径规划 [J]. *上海海事大学学报*, 2023, 44(4): 1-7.
- BAI X E, SUN G Z, XU X F. Path Planning for Unmanned Surface Vehicle in Ocean Current Environment Based on Improved Particle Swarm Optimization[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2023, 44(4): 1-7.
- [20] 程宇翔, 韩兵, 沈东凯, 等. 混合 LOS 制导的无人艇复杂路径跟踪 [J]. *计算机仿真*, 2025, 42(7): 34-39.
- CHENG Y X, HAN B, SHEN D K, et al. Complex Path Tracking of Unmanned Surface Vehicle with Hybrid LOS Guidance[J]. *Computer Simulation*, 2025, 42(7): 34-39.
- [21] 孙家豪, 韩森, 闫云霄, 等. 基于时变侧滑角补偿的无人艇自适应 LOS 制导方法 [J/OL]. [2025-06-24]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04328>.
- SUN J H, HAN S, YAN L X, et al. Adaptive LOS Guidance Method of Unmanned Surface Vehicle Based on Time-Varying Sideslip Angle Compensation[J/OL]. [2025-06-24]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04328>.
- [22] LIU L, WANG D, PENG Z. ESO-Based Line-of-Sight Guidance Law for Path Following of Underactuated Marine Surface Vehicles with Exact Sideslip Compensation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, 42(2): 477-487.
- [23] FOSSEN T I. An Adaptive Line-of-Sight (ALOS) Guidance Law for Path Following of Aircraft and Marine Craft[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2023, 31(6): 2887-2894.
- [24] MU D, LI J, WANG G, et al. Disturbance Rejection Control of Adaptive Integral LOS Unmanned Ship Path Following Based on Fast Wave Inversion[J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 144: 103907.
- [25] ZHAO Y, SUN X, WANG G, et al. Adaptive Backstepping Sliding Mode Tracking Control for Underactuated Unmanned Surface Vehicle with Disturbances and Input Saturation[J]. *IEEE Access*, 2020, 9: 1304-1312.
- [26] 靳渊, 楼建坤, 王鸿东, 等. 无人船舶局部路径规划算法综述 [J]. *船舶*, 2025, 36(3): 10-22.
- JIN Y, LOU J K, WANG H D, et al. Overview of Local Path Planning Algorithms for Unmanned Ships[J]. *Ship & Boat*, 2025, 36(3): 10-22.
- [27] 吴博, 熊勇, 文元桥. 基于速度障碍原理的无人艇自动避碰算法 [J]. *大连海事大学学报*, 2014, 40(2): 13-16.
- WU B, XIONG Y, WEN Y Q. Automatic Collision Avoidance Algorithm for USV Based on Velocity Obstacle Principle[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2014, 40(2): 13-16.
- [28] HUANG Y, VAN GELDER P, WEN Y. Velocity Obstacle Algorithms for Collision Prevention at Sea[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 151: 308-321.
- [29] HUANG Y, CHEN L, VAN G P. Generalized Velocity Obstacle Algorithm for Preventing Ship Collisions at Sea[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 142-156.
- [30] LIU J, ZHANG J, YANG Z, et al. A Novel Data-Driven Method of Ship Collision Risk Evolution Evaluation During Real Encounter Situations[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 249: 110228.
- [31] 张金泽, 赵红, 王宁, 等. 密集障碍物下无人艇模糊双窗口 DWA 避障算法 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(6): 10-18.
- ZHANG J Z, ZHAO H, WANG N, et al. Fuzzy Double Window DWA Obstacle Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicle Under Dense Obstacles[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(6): 10-18.
- [32] HAN S, WANG Y, WANG L, et al. Automatic Berthing for an Underactuated Unmanned Surface Vehicle: a Real-Time Motion Planning Approach[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 235: 109352.
- [33] HAN S, WANG L, WANG Y. A Potential Field-Based Trajectory Planning and Tracking Approach for Automatic Berthing and COLREGs-Compliant Collision Avoidance[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112877.

- [34] 刘钊, 罗辰汉, 陈阳, 等. 一种基于改进动态窗口法的无人艇路径规划方法 [J]. 中国航海, 2025, 48(2): 80-90.
LIU Z, LUO C H, CHEN Y, et al. A Path Planning Method for Unmanned Surface Vehicle Based on Improved Dynamic Window Approach[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 80-90.
- [35] 顾潮宏, 冯友兵, 仲伟波, 等. 基于优化人工势场法的无人水面艇路径规划 [J]. 舰船科学技术, 2025, 47(5): 126-131.
GU C H, FENG Y B, ZHONG W B, et al. Path Planning of Unmanned Surface Vehicle Based on Optimized Artificial Potential Field Method[J]. Ship Science and Technology, 2025, 47(5): 126-131.
- [36] 任建, 周卫祥. 基于改进人工势场法的无人艇路径规划 [J]. 舰船科学技术, 2025, 47(13): 52-57.
REN J, ZHOU W X. Path Planning of Unmanned Surface Vehicle Based on Improved Artificial Potential Field Method[J]. Ship Science and Technology, 2025, 47(13): 52-57.
- [37] 刘芳, 冯睿智. 基于深度学习的无人船动态路径规划方法 [J]. 舰船科学技术, 2025, 47(24): 196-200.
LIU F, FENG R Z. Dynamic Path Planning Method of Unmanned Ship Based on Deep Learning[J]. Ship Science and Technology, 2025, 47(24): 196-200.
- [38] CLAUSSMANN L, REVILLOUD M, GRUYER D, et al. A Review of Motion Planning for Highway Autonomous Driving[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 21(5): 1826-1848.
- [39] MOON C B, CHUNG W. Kinodynamic Planner Dual-Tree RRT (DT-RRT) for Two-Wheeled Mobile Robots Using the Rapidly Exploring Random Tree[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1080-1090.
- [40] LIKHACHEV M, FERGUSON D. Planning Long Dynamically Feasible Maneuvers for Autonomous Vehicles[J]. The International Journal of Robotics Research, 2009, 28(8): 933-945.
- [41] MARTINSEN A B, BITAR G, LEKKAS A M, et al. Optimization-Based Automatic Docking and Berthing of ASVs Using Exteroceptive Sensors: Theory and Experiments[J]. IEEE Access, 2020, 8: 204974-204986.
- [42] MAKI A, SAKAMOTO N, AKIMOTO Y, et al. Application of Optimal Control Theory Based on the Evolution Strategy (CMA-ES) to Automatic Berthing[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2020, 25(1): 221-233.
- [43] RACHMAN D M, MAKI A, MIYAUCHI Y, et al. Warm-Started Semionline Trajectory Planner for Ship's Automatic Docking (Berthing)[J]. Ocean Engineering, 2022, 252: 111127.
- [44] HAN S, WANG L, WANG Y, et al. An Efficient Motion Planning Based on Grid Map: Predicted Trajectory Approach with Global Path Guiding[J]. Ocean Engineering, 2021, 238: 109696.
- [45] SAWADA R, HIRATA K, KITAGAWA Y, et al. Path Following Algorithm Application to Automatic Berthing Control[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2021, 26(2): 541-554.
- [46] LIAO Y, JIA Z, ZHANG W, et al. Layered Berthing Method and Experiment of Unmanned Surface Vehicle Based on Multiple Constraints Analysis[J]. Applied Ocean Research, 2019, 86: 47-60.
- [47] LI S, LIU J, NEGENBORN R R, et al. Automatic Docking for Underactuated Ships Based on Multi-Objective Nonlinear Model Predictive Control[J]. IEEE Access, 2020, 8: 70044-70057.
- [48] 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 Trends of Intelligent Ship Berthing Technology[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 3-14.
- [49] 张山甲, 王建华, 郑翔, 等. 基于视觉伺服的欠驱动无人水面艇自主靠泊方法 [J]. 船舶工程, 2020, 42(7): 144-151.
ZHANG S J, WANG J H, ZHENG X, et al. Autonomous Berthing Method for Underactuated Unmanned Surface Vehicle Based on Visual Servo[J]. Ship Engineering, 2020, 42(7): 144-151.
- [50] CHIANG H, TAPIA L. COLREGs-RRT: an RRTbased COLREGs-Compliant Motion Planner for Surface Vehicle Navigation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 2024-2031.
- [51] GAN L X, LI X, YAN T, et al. Intelligent Ship Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field in Narrow Inland Waterways[J]. Ocean Engineering, 2025, 317: 119928.

- [52] 张可. 狭水道船舶自主航行决策方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2023.
ZHANG K. Research on Decision-Making Method of Ship Autonomous Navigation in Narrow Waterway[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2023.
- [53] NI S, WANG N, QIN Z, et al. A Distributed Coordinated Path Planning Algorithm for Maritime Autonomous Surface Ship[J]. Ocean Engineering, 2023, 271: 113759.
- [54] QU T, XIONG G, ALI H, et al. USV Path Planning Under Marine Environment Simulation Using DWA and safe Reinforcement Learning[C]//2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering. 2023.
- [55] 李凡, 吕遐东, 黄蔚, 等. 多智能体无人协同控制综述 [J]. 舰船电子工程, 2025, 45(8): 9-15.
LI F, LYU X D, HUANG W, et al. Overview of Multi-Agent Unmanned Cooperative Control[J]. Ship Electronic Engineering, 2025, 45(8): 9-15.
- [56] 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. Overview of Unmanned Surface Vehicle Cluster Control Technology[J]. Chinese Journal of Nature, 2023, 45(3): 207-216.
- [57] 吴迪. 基于多目标优化的多无人船任务分配方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
WU D. Research on Multi-Objective Optimization Based Multi-Unmanned Ship Task Allocation Method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [58] SUN J H, HAN S, DING S F, et al. A Swarm Intelligence Framework in Complex Environments: Optimizing Area Coverage Guidance and Control[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 162: 112662.
- [59] WU G, ATILLA I, TAHSIN T, et al. Long-Voyage Route Planning Method Based on Multi-Scale Visibility Graph for Autonomous Ships[J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108242.
- [60] ZONG C, HAN X, ZHANG D, et al. Research on Local Path Planning Based on Improved RRT Algorithm[C]//Institution of Mechanical Engineers. 2021.
- [61] 徐晓苏, 袁杰. 基于改进强化学习的移动机器人路径规划方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(3): 314-320.
XU X S, YUAN J. Path Planning Method of Mobile Robot Based on Improved Reinforcement Learning[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2019, 27(3): 314-320.
- [62] 罗浩, 赖卓昀. 运动约束下的分布式无人船协同编队与导航方法 [J]. 信息系统工程, 2024(12): 59-62.
LUO H, LAI Z Y. Distributed Cooperative Formation and Navigation Method of Multiple Unmanned Ships Under Motion Constraints[J]. Information Systems Engineering, 2024(12): 59-62.
- [63] 曾江峰, 谢杨柳, 金哲毅, 等. 水面无人艇集群编队控制技术综述 [J]. 导航定位与授时, 2023, 10(5): 7-17.
ZENG J F, XIE Y L, JIN Z Y, et al. Overview of Cluster Formation Control Technology for Unmanned Surface Vehicles[J]. Navigation Positioning and Timing, 2023, 10(5): 7-17.
- [64] TAN G, ZHUANG J, ZOU J, et al. Coordination Control for Multiple Unmanned Surface Vehicles Using Hybrid Behavior-Based Method[J]. Ocean Engineering, 2021, 232: 109147.
- [65] YUAN P, ZHANG Z, LI Y, et al. Leader-Follower Control and APF for Multi-USV Coordination and Obstacle Avoidance[J]. Ocean Engineering, 2024, 313: 119487.
- [66] 闫炳成, 曹乐. 基于虚拟领航者和改进胡克定律的无人船集群避障 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 78-88.
YAN B C, CAO L. Unmanned Ship Cluster Obstacle Avoidance Based on Virtual Leader and Improved Hooke's Law[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(1): 78-88.
- [67] 郭文轩. 面向水面无人集群回收任务的规划与控制方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
GUO W X. Research on Planning and Control Method for Unmanned Surface Cluster Recovery Mission[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [68] 张佳鑫. 无人艇自主回收运动规划与控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
ZHANG J X. Research on Motion Planning and Control Method for Autonomous Recovery of Unmanned Surface Vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024.

- [69] 刘祥. 艉滑道式无人艇回收路径规划与航迹跟踪控制算法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
LIU X. Research on Recovery Path Planning and Track Tracking Control Algorithm of Stern Slipway Unmanned Surface Vehicle[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [70] 游少杰. 基于艉滑道的无人艇自主引导回收控制系统开发与性能试验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
YOU S J. Development and Performance Test of Autonomous Guidance and Recovery Control System for Unmanned Surface Vehicle Based on Stern Slipway[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [71] 程志强, 石宇凌, 谢文浩, 等. 面向多无人艇回收的虚实联合仿真方法及系统 [J]. 船舶, 2025, 36(3): 23-33.
CHENG Z Q, SHI Y L, XIE W H, et al. Virtual-Real Combined Simulation Method and System for Multi-Unmanned Surface Vehicle Recovery[J]. Ship & Boat, 2025, 36(3): 23-33.

