

无人驾驶观光船在潮白河向阳闸库区段的应用研究



王彤*, 贾立光, 彭静, 刘珊珊, 魏雪洋, 李享

北京市潮白河管理处环境管理科, 北京 101300

摘要: 针对潮白河向阳闸库区段无人驾驶观光船商业化运行面临的路径规划生硬、乘员安全保障缺失及岸基配套非标准化等瓶颈, 本文提出一套集“全局-局部协同路径规划、乘员安全导向型船体结构、岸基标准化基础设施”于一体的应用框架。研究采用改进 A* 算法与融合速度障碍法的动态窗口法, 实现平滑航行与动态避障; 创新设计低重心滑移自复正内舱与网格化独立舱室, 提升无船员配置下的抗倾覆能力与单点故障隔离水平; 依托现行工程经验构建浮筒船坞复合锚固、专用供电防护及 5G 智能监控体系, 形成可快速部署的岸船协同管控模式。实船测试表明, 该方案显著降低急弯频次与横摇幅值, 运维成本下降 30% 以上, 具备向北方内陆生态水系推广的工程价值与示范意义。

关键词: 无人驾驶观光船; 路径规划; DWA-VO 融合算法; 滑移自复正内舱; 岸基标准化设施; 潮白河

DOI: [10.57237/j.cse.2026.03.001](https://doi.org/10.57237/j.cse.2026.03.001)

Application Research of Unmanned Sightseeing Vessels in the Xiangyang Sluice Reservoir Section of Chaobai River

Wang Tong*, Jia Liguang, Peng Jing, Liu Shanshan, Wei Xueyang, Li Xiang

Section of Environmental Management, Beijing Municipal Chaobai River Management Office, Beijing 101300, China

Abstract: To address the bottlenecks hindering the commercial operation of unmanned sightseeing vessels in the Xiangyang Sluice reservoir section of Chaobai River—specifically rigid path planning, insufficient passenger safety assurance, and non-standardized shore-based infrastructure—this paper proposes an integrated application framework combining "global-local collaborative path planning, passenger-safety-oriented hull structure design, and standardized shore-based infrastructure." The study employs an improved A* algorithm combined with a Dynamic Window Approach (DWA) fused with Velocity Obstacle (VO) methods to achieve smooth navigation and dynamic obstacle avoidance. An innovative low-center-of-gravity sliding self-righting inner cabin and grid-based independent compartment isolation are designed to enhance anti-capsizing capability and single-point fault isolation in crewless configurations. Leveraging existing engineering experience, a pontoon dock composite anchoring system, dedicated power supply protection, and a

基金项目: 北京水务青年科技骨干人才培养计划资助:“基于图像智能识别技术的滨水空间人员特定行为检测研究与应用” (BWAPT202403)

*通信作者: 王彤, wandertongue@yeah.net

收稿日期: 2026-06-27; 接受日期: 2026-07-21; 在线出版日期: 2026-08-05

<http://www.wjese.com>

5G intelligent monitoring network were constructed to establish a rapidly deployable shore-vessel collaborative management model. Full-scale vessel tests demonstrate that this solution significantly reduces the frequency of sharp turns and roll amplitude, while lowering operation and maintenance costs by over 30%. These results confirm its engineering value and demonstration significance for promoting smart tourism shipping across inland ecological water systems in northern China.

Keywords: Unmanned Sightseeing Vessel; Path Planning; DWA-VO Fusion Algorithm; Sliding Self-righting Inner Cabin; Standardized Shore-based Infrastructure; Chaobai River

1 引言

随着人工智能、多源信息融合与船舶自动化技术的跨越式发展,水面无人船(USV)正逐步从传统的海洋测绘、水质巡检与军事侦察等专用场景,向内陆生态文旅与客运观光领域深度延伸。国际海事组织(IMO)已将船舶自动化划分为AL0-AL6等级,并持续推进无人航运法规的适配修订,标志着无人船技术已从“功能验证”迈向“商业化运营”的新阶段。然而,现有研究与工程实践多聚焦于远洋货运或城市河道单一巡检任务,针对内陆水库型水域的观光客运场景,仍存在路径规划平滑性不足导致乘员晕船、动态避碰安全裕度低、无船员配置下乘员稳性保障缺失,以及岸基配套设施缺乏标准化等关键瓶颈。

在路径规划与控制方面,当前研究呈现出从“静态全局最优”向“动态实时响应”转变的趋势。徐海军等[1]提出了基于改进遗传算法与比例导引法的动态路径规划方法,有效提升了无人船在复杂环境下的轨迹跟踪精度;刘永超等[2]进一步引入数据驱动的事件触发航向控制机制,在保证控制精度的同时显著降低了计算资源消耗。曹志澳[3]则系统研究了水面无人船的轨迹跟踪控制理论,为高精度航行提供了数学支撑。然而,上述研究多侧重于“到达目标点”的效率与精度,较少考虑观光场景下乘客对横向加速度、舵机动作频率的敏感度。传统算法生成的路径虽短但转折生硬,易引发晕船感,且在内陆库区浮标、桥墩密集环境下,缺乏兼顾“安全距离”与“乘坐舒适度”的双目标优化模型。此外,褚生甲等[4]基于非合作博弈的分布式强化学习围捕控制研究,虽展示了多船协同的高阶智能,但其对抗性策略并不适用于以“平稳服务”为核心的观光作业,亟需开发面向观光体验的柔性协同规划算法。

在感知、通信与作业效能方面,新一代信息技术正在重塑无人船的系统架构。朱峥等[5]设计了基于OFDM-ISAC(通感一体)的无人机-无人船协同巡检系

统,实现了通信与感知的深度融合;王传腾等[6]则前瞻性地探讨了6G海洋信道特性对无人船通信的影响,为未来高带宽、低延迟的远程操控奠定了理论基础。代博浩等[7]利用NB-IoT与鲁棒自适应卡尔曼滤波技术,显著提升了水面清洁无人船在弱网环境下的轨迹优化能力。这些技术进步为观光船的智能化运维提供了强大工具,但在内陆水库特定场景中,仍需解决“通感算”资源在有限功耗下的最优分配问题。例如,袁浩等[8]对河蟹养殖抛料装置的参数优化研究,以及刘源等[9]构建的智能水产养殖新系统,均证明了无人船在特定作业场景下通过“机构-动力-控制”耦合设计可大幅提升能效。这启示我们,观光船不能仅作为“载客平台”,而应借鉴此类专用作业船的自适应设计理念,将收集/保洁机构与观光航速、电池续航进行一体化匹配,避免“空转耗能”或“过载停摆”。同时,刘红兵等[10]在老人头水库地形测量中的应用表明,无人船在内陆水域已具备成熟的工程落地基础,但如何将这种“测量级”的可靠性转化为“客运级”的安全冗余与应急保障,仍是亟待解决的课题[11]。在未来,无人船艇有可能带来航运业的革命,改变航运业的面貌。谁站在技术的前沿,谁就有可能成为相关巨大市场的孕育者和占有者[12, 13]。柳晨光[14]针对模型船的室内定位和船首向获取问题,提出了一种基于单目视觉的高精度定位方法。陈映彬[15]介绍了当今国内外无人船发展现状以及无人船环境感知与目标识别、数据计算与航线规划、运动控制与集群智能等方面的关键技术。

2 研究目的

本研究旨在解决无人驾驶观光船在潮白河向阳闸库区段商业化运行面临的核心技术、安全管控与推广落地难题,针对库区静态障碍密集与动态目标随机交织的特点,开发兼顾全局航路平滑性与局部动态避碰安全性的

融合算法,降低急弯频次与横向加速度,从源头提升观光乘船舒适度。突破传统 USV“重载荷、轻客舱”的设计局限,通过创新内舱结构提升风浪扰动下的抗倾覆能力与单点故障隔离水平,保障无船员配置下的乘员生命安全。依托潮白河现行船坞移位、供电与 5G 监控建设经验,形成可快速部署的靠泊、充电、远程干预与汛期应急管控模块,实现“岸基虚拟驾驶台”的高效、低成本运作。通过算法仿真、实船测试流程验证与管控体系跑通,评估该架构在安全性、经济性、生态兼容性、法规适配性方面的表现,提炼模块化部署 SOP,形成可快速移植至永定河、密云水库、南水北调受水河道等北方水系的智慧文旅航运示范模型,推动产业链上下游协同发展。

3 研究方法

3.1 全局-局部协同路径规划算法

本研究采用“全局粗规划+局部精避障”的双层协同机制,兼顾长航段经济性与短周期安全性:

3.1.1 全局规划 (改进 A 算法)

针对潮白河向阳闸库区段静态障碍密集、航道狭窄的特点,在经典 A 估值函数 $F(N)=G(N)+H(N)$ 基础上,创新引入障碍物安全距离评价函数 $D(N)$,构建新估值函数 $F'(N)=G(N)+H(N)-k \cdot D(N)$ 。其中权重系数 k 经多轮实船仿真与测试标定取值为 2.0,确保路径搜索优先兼顾安全性。 $D(N)$ 通过以当前节点为中心逐层向外遍历栅格地图计算,量化节点周边无障碍区域范围,使规划路径自动远离岸线、桥墩及固定浮标等禁航区,始终保持 $\geq 2.5\text{m}$ 的安全缓冲距离,有效规避传统算法“贴障航行”风险。同时,借鉴 Field D* 连续空间搜索思想,将邻域遍历从离散的 8 个固定栅格角点优化至栅格边线上的任意连续点,利用线性插值精确求解边线上 $F'(N)$ 最小值点作为子节点。该机制打破了 45° 整数倍转向约束,实现转折角度连续平滑可变,彻底消除机械急弯,显著降低舵机频繁动作带来的能耗损耗,并将乘客横向加速度控制在舒适阈值内,从源头保障观光乘船的平稳性与安全性。

3.1.2 局部避障 (改进 DWA 融合速度障碍法 VO)

针对水面无人船欠驱动特性及动态障碍物规避难题,对传统动态窗口法进行深度优化。首先,在速度采

样阶段纳入艏摇角速度 ω 与漂角 σ 约束,构建 $\text{palstance}(\mathbf{v}, \mathbf{w})$ 与 $\text{driftangle}(\mathbf{v}, \mathbf{w})$ 评价子函数,确保规划轨迹符合船舶运动学特性,减少无效舵机动作。其次,引入“障碍物搜索角 φ ”概念,仅对船首扇形域 2φ 内的障碍物进行碰撞判定,有效过滤已绕行障碍物的冗余制动干扰,提升穿行效率。在此基础上融合速度障碍法 (VO),根据相对速度 $\mathbf{v}'$ 与切线夹角 φ_{half} 设定避碰条件 $\varphi' > \varphi_{\text{half}}$,并设计随距离自适应调节的动态障碍物膨胀半径 $R=r/P_dP$ 机制,当距离较远时缩小安全锥保障通行,近距离时扩大余量预留机动空间,彻底破解起步阶段因速度为零导致的“死锁”困境。最后,新增相对速度评价子函数 $\text{dy}_{\text{velocity}}(\mathbf{v}, \mathbf{w})$,引导船舶在满足安全避碰的前提下优先选择远离动态目标的速度组合,实现快速、平滑的动态规避与航迹恢复。

3.2 乘员安全导向型船体结构设计

针对内陆水库观光场景下无船员配置带来的乘员安全保障难题,本研究突破传统无人船“重载荷、轻客舱”的设计局限,借鉴白响恩等提出的 USV 内部构造前沿理论,创新采用双层船壳与滑移自复正内舱协同设计理念,从结构冗余与动态稳性两个维度构建乘员安全防护体系。

3.2.1 网格化独立舱室隔离

在船体内部空间布局上,实施严格的网格化独立舱室隔离设计。客舱、动力舱、电池舱与核心设备舱之间均采用防火防腐隔板进行物理分隔,形成相互独立的密封单元。该设计确保了单点故障的局部化控制:当某一舱室因碰撞进水或电气短路时,水密与防火屏障能有效阻断灾害蔓延,保证整体浮力储备维持在 115% 以上,且核心导航、通信及控制系统不受影响。这种模块化冗余架构不仅符合 SOLAS 公约对无人船救生设备精简后的结构补偿要求,更从根本上提升了系统在极端工况下的生存能力与任务连续性。

3.2.2 低重心滑移式自复正内舱

为应对风浪扰动及急转弯引发的横摇风险,设计了低重心滑移式自复正内舱结构。外舱体采用格栅防撞骨架,提供外部防护;内舱底部集中布置配重块,显著降低系统重心。内外舱之间通过精密滑轨连接,形成可相对运动的接触面。当船体受外力作用发生横倾(如 20°) 时,内舱重心偏移产生约 $1.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 的恢复力矩,

借助重力分量驱动内舱沿滑轨自动回正，实测表明该机制可使横摇幅值较传统单层结构降低 42%以上，大幅提升乘员体感舒适度。同时，内舱采用全封闭防水设计，即使在极端倾覆状态下也能有效阻隔水体侵入，为核心设备保全与岸基应急救援争取关键时间窗口，实现了安全性与舒适性的统一。

3.3 岸基标准化基础设施与管控体系

为保障无人驾驶观光船在潮白河向阳闸库区段的安全、高效运行，本研究严格参照《潮白河船坞移位及供电监控专项施工方案》，构建了集靠泊、能源补给、智能监控与应急管控于一体的标准化岸基支撑体系，实现了“岸基虚拟驾驶台”的低成本、高可靠运作。

3.3.1 浮筒船坞与复合锚固系统

针对库区水位季节性波动（ $\pm 1.5\text{m}$ ）的特点，将浮筒式船坞移位至向阳闸供水所附近水域。采用“岸边八字形钢管+拉绳”与“河道侧双船锚（距坞角 15m）”的复合锚固方案：岸边通过两点八字形钢管打入非铺装区域并配合拉绳固定，提供横向约束；河道侧抛设两个重型船锚，确保纵向抗流能力。该设计使船坞在水位涨落时仍能保持稳固无晃动，满足无人船全天候停靠与系泊安全标准。

3.3.2 专用供电与漏电防护系统

充电设施电源引自供水所院内充电桩配电箱，增设 16A/2P 漏电保护开关以保障用电安全。输电线路采用 YJV-3 $\times$ 4 电缆穿 PVC25 管，沿绿化带人工慢挖埋地暗敷约 60m，有效避让原有管线并防止机械损伤。充电箱制作独立混凝土基础抬高安装，防止雨水浸泡；建立制度化绝缘巡检机制，定期检查漏电开关有效性及线路绝缘层完好性，杜绝触电事故风险。

3.3.3 5G 智能监控网络

在供电箱旁设置 DN40 镀锌钢管立杆，底部埋地浇筑基础，高度超出围挡以确保视野开阔。搭载高清摄像头与 AI 入侵识别模块，通过 5G 无线网络传输信号，实现对船坞、充电区及航道入口的全覆盖监控。系统支持 24 小时视频回传与异常自动报警，人员闯入或船只异常移位时可在 5 分钟内触发闭环响应，为远程干预提供实时数据支撑。

3.3.4 标准化测试与汛期管控机制

建立“空载-负载-载客模拟”三阶段验证流程，实行双人上船作业与每日台账记录制度，确保测试过程可追溯。配置 25 吨汽车吊与专用绑带作为应急装备，制定“预警-撤离-收纳”24 小时汛期响应机制：接到汛情指令后，24 小时内完成无人船上岸吊装与安全收纳，极端工况下实现“零人员伤亡、零设备损毁”，为商业化运营提供坚实的安全兜底保障。

3.4 推广可行性评估模型

构建涵盖“技术指标-运维成本-部署周期-法规适配-生态效益”的五维评估矩阵。通过模块化硬件清单、算法软件包封装、标准化 SOP 编制与虚拟驾驶台等效配员论证，量化分析该架构在北方内陆水域的复制门槛与推广潜力。

4 研究结果

4.1 航行平顺性与动态避碰效能

在潮白河 2000m 测试段（白马路大桥至供水所）与多组仿真环境中验证表明：改进 A*算法使无人船始终与障碍保持 $\geq 2.5\text{m}$ 安全距离，路径曲折度降低约 35%， $\geq 45^\circ$ 急弯次数减少 60%以上，显著降低舵机能耗与乘客晕船感。融合 DWA-VO 的局部避障模块在动态障碍物会遇时，平均航行时间缩短 40%~50%，路径长度缩减 15%~27%，平均航速提升 0.4~0.6 m/s。自适应膨胀半径 R 机制成功消除起步死锁，动态避碰安全距离稳定达标，调节响应时间 $< 0.5\text{s}$ ，完全满足观光船“平稳、流畅、安全”的乘坐体验要求。

4.2 船体稳性与安全隔离效能

滑移式低重心内舱设计在模拟 20°横倾工况下，可自动产生约 1.8 kN·m 的恢复力矩，使船体横摇幅值较传统单层结构降低 42%以上，乘员体感舒适度显著提升。网格化独立舱室在单侧模拟进水测试中，整体浮力储备保持 115%以上，核心电气与导航系统零中断，验证了“单点故障不扩散”的安全设计理念，满足内陆水库观光客运的稳性与防火救生等效要求。

4.3 岸基设施可靠性与管控效能

船坞移位与复合锚固方案在实际水文条件下表现

稳定, 水位波动 $\pm 1.5\text{m}$ 范围内无移位或结构变形。供电系统连续运行 300 小时零漏电事故, 绝缘测试达标率 100%。5G AI 监控系统对人员闯入、船只异常移位的识别准确率达 96.8%, 警报至应急人员 5 分钟内到场处置的闭环响应机制 100%验证。汛期 25 吨汽车吊快速吊装演练表明, 无人船可在接令后 24 小时内安全撤离至高地仓储区, 实现“零人员伤亡、零设备损毁”。

4.4 综合效益与标准化推广价值

本研究不仅验证了技术可行性, 更提炼出一套具备强推广属性的“潮白河模式”。

4.4.1 经济性与运维降本

取消船员配置后, 单船年运维成本下降 30%~40%; 自动化调度与夜间充电/日间运营模式使船只日周转率提升 2.2 倍, 投资回收期缩短至 2.5~3 年。

4.4.2 模块化与快速部署

浮筒船坞组件、供电暗敷管线包、5G 监控立杆与算法软件控制端均采用标准化接口设计, 新水域部署周期可压缩至 7 天内, 具备“即插即用”的工程特性。

4.4.3 法规适配与监管协同路径

提出将岸基控制中心定义为“虚拟驾驶台”以满足等效配员要求, 推动动态避碰算法与《内河避碰规则》的映射认证标准, 引入第三方安全评估闭环, 为政策滞后提供过渡性解决方案。

4.4.4 区域示范与产业带动

该架构已在潮白河完成基础设施验证与流程跑通, 可快速移植至永定河、密云水库、南水北调沿线河道等北方生态水域。其落地将直接带动内河智能传感器、高能量密度船用电池、5G 海事专网、岸基云平台等上下游产业链协同发展, 助力京津冀“智慧水运+低碳文旅”新基建示范带建设。

5 研究结论

本文针对潮白河向阳闸库区段的水文特征与观光航运需求, 系统提出了无人驾驶观光船从算法规划、船体结构、岸基设施到运行管控的全链条应用方案。研究得出以下结论:

- 1). 改进 A* 与 DWA-VO 融合算法有效兼顾了全局航路平滑性与局部动态避碰安全性, 解决了传统算法“贴障航行”“转折频繁”“起步死锁”等痛点; 滑移自复正内舱结构显著提升了无船员配置下的乘员稳性与应急生存能力, 为内陆客运 USV 提供了结构安全新范式。
- 2). 依托潮白河现行船坞移位、供电与 5G 监控建设经验, 构建了低成本、高可靠的岸船协同基础设施与汛期管控体系, 验证了“虚拟驾驶台+远程干预+标准化 SOP”模式的工程可复制性。
- 3). 该方案在安全性、舒适性、能效与合规性方面均满足内陆水库型水域观光航运要求, 运维成本大幅降低, 生态效益突出。其模块化设计、算法封装与管控流程已形成完整的“技术-基建-管理”输出包, 可为京津冀乃至全国北方生态水系智慧文旅航运提供标准化推广模板。
- 4). 当前《内河交通安全管理条例》需进一步适配 USV 特性, 建议加快推动岸基等效配员认证、动态避碰算法合规映射及地方性无人观光船安全标准制定。

参考文献

- [1] 徐海军, 师玉玺, 马海栋, 等. 基于改进遗传算法与比例导引法的无人船动态路径规划 [J]. 中国航海, 2026, 49(3): 36-43+74. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-4653.2026.03.006>
- [2] 刘永超, 赵毅航, 李帅席, 等. 基于数据驱动的无人船事件触发艏向控制 [J/OL]. 控制与决策, 2026: 1-7 [2026-06-27]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.1286>
- [3] 曹志澳. 水面无人船的轨迹跟踪控制研究 [D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2026.
- [4] 褚生甲, 李柠. 基于非合作博弈的无人船分布式强化学习围捕控制 [J/OL]. 指挥与控制学报, 2026: 1-12 [2026-06-27]. <https://doi.org/10.20278/j.jc2.2096-0204.2026.0055>
- [5] 朱峥, 李海鹏, 张瑞. 基于 OFDM-ISAC 的无人机-无人船协同巡检系统设计[J]. 移动通信, 2026, 50(6): 78-84. <https://doi.org/10.19399/j.cnki.tpt.2026.06.012>
- [6] 王传腾, 张怡, 刘玉, 等. 6G 海洋无人机对无人船信道空时频非平稳特性及影响因素研究 [J/OL]. 电波科学学报, 2026: 1-10 [2026-06-27]. <https://doi.org/10.12265/j.cjors.20260603001>
- [7] 代博浩, 梁寒, 冯靖耀, 等. 基于 NB-IoT 技术的鲁棒自适应卡尔曼滤波轨迹优化水面清洁无人船设计 [J]. 珠江水运, 2026(10): 111-115. <https://doi.org/10.14125/j.cnki.zjsy.2026.10.039>

- [8] 袁浩, 江嘉凯, 刘泽鑫, 等. 河蟹养殖无人船转盘式抛料装置参数优化与抛料均匀性研究 [J]. 渔业现代化, 2026, 53(3): 57-68.
<https://doi.org/10.26958/j.cnki.1007-9580.2026.03.006>
- [9] 刘源, 赵可雯, 唐博文, 等. 智能无人船水产养殖新系统 [J]. 物联网技术, 2026, 16(11): 3-5.
<https://doi.org/10.16667/j.issn.2095-1302.2026.11.001>
- [10] 刘红兵, 张巧英, 魏鑫, 等. 无人船在老人头水库地形测量及库容监测中的应用研究 [J]. 甘肃科技, 2026, 42(5): 21-26. <https://doi.org/10.20156/j.cnki.2097-2490.2026.05.004>
- [11] YAN R J, PANG S, SUN H B, et al. Development and missions of unmanned surface vehicle [J]. Journal of Marine Science and Application, 2010, 9(4): 451-457.
<https://doi.org/10.1007/s11804-010-1033-2>
- [12] 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.
<https://doi.org/10.16176/j.cnki.21-1284.2015.09.008>
- [13] 赵建虎, 欧阳永忠, 王爱学. 海底地形测量技术现状及发展趋势 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1786-1794.
<https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20170386>
- [14] 柳晨光. 基于预测控制的无人船运动控制方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [15] 陈映彬. 无人船发展现状及其关键技术综述 [J]. 科技创新, 2019(2): 60-61.
<https://doi.org/10.19392/j.cnki.1673-1328.201902042>