

无人船测量系统在水闸工程水下地形测量中的应用策略

张书萍

广西贵港市润港工程勘察设计有限责任公司，广西 贵港 537100

DOI:10.61369/WCEST.2025040021

摘要：本文聚焦无人船测量系统在水闸工程水下地形测量中的应用策略，无人船测量系统凭借小型化、高精度、抗干扰及无人作业优势，可有效适配水闸复杂环境。本文基于水闸测量特殊性与无人船技术特点，构建涵盖前期准备、现场实施、数据处理及成果应用的全流程应用策略，并通过质量控制与风险管理保障成果可靠性。实践表明，该策略能实现厘米级精度测量，并缩短作业周期，为水闸工程安全决策、清淤维护及风险预警提供精准数据支撑，显著提升水下地形测量的智能化与高效化水平。

关键词：无人船测量系统；水闸工程；水下地形测量；应用策略

Application Strategies of Unmanned Surface Vessel (USV) Surveying System in Underwater Topographic Surveying of Sluice Projects

Zhang Shuping

Guigang Rungang Engineering Survey and Design Co., Ltd., Guigang, Guangxi 537100

Abstract : This paper focuses on the application strategies of unmanned surface vessel (USV) surveying systems in underwater topographic surveying for sluice projects. Leveraging its advantages of miniaturization, high precision, anti-interference capabilities, and unmanned operation, the USV surveying system can effectively adapt to the complex environments of sluice projects. Based on the specific characteristics of sluice surveying and the technical features of USVs, this paper constructs a comprehensive application strategy that encompasses the entire process, including preliminary preparation, on-site implementation, data processing, and result application. Additionally, it ensures the reliability of the results through quality control and risk management. Practical applications have demonstrated that this strategy can achieve centimeter-level precision measurements and shorten the operational cycle, providing precise data support for safety decision-making, dredging maintenance, and risk early warning in sluice projects. It significantly enhances the intelligence and efficiency of underwater topographic surveying.

Keywords : Unmanned Surface Vessel (USV) Surveying System; sluice projects; underwater topographic surveying; application strategies

引言

水闸的安全稳定运行对防洪排涝、水资源调配至关重要，而其水下地形的动态变化是影响过流能力与结构稳定性的重要因素。传统测量方法难以应对水闸狭窄、高干扰的复杂水下环境。无人船测量系统凭借小型化、自动化、高精度及多传感器集成的优势，为解决这一难题提供了有效技术手段。本文聚焦水闸工程特殊需求，结合无人船技术特点，构建一套涵盖前期准备、现场实施、数据处理、成果应用及质量控制的全流程应用策略，旨在为提升水闸水下地形测量的精度、效率与安全性提供技术支持，推动其在水利工程智慧化监测中的规范化应用。

一、水闸工程水下地形测量特点与无人船系统技术分析

(一) 水闸工程水下地形测量的特殊性与挑战

水闸工程水下地形测量作为水利工程监测的关键环节，其核

心特质与技术挑战紧密交织。在测量环境上，聚焦于闸室、消力池等狭窄区域，水下密集的闸墩、预埋件等障碍物极易导致设备碰撞、信号遮挡并形成测深盲区，加之泄水期高速射流与非泄水期回流漩涡对声速传播和平台稳定性的干扰，使测量条件异常复杂。精度要求则呈现显著差异化，闸基冲刷坑、闸门底部间隙等

关键结构部位需达到厘米级精度，而普通区域可放宽至分米级，且数据必须与水闸上部结构的工程独立坐标系严格统一，否则无法进行“水上-水下”整体受力分析。安全与效率的平衡是传统方法难以突破的瓶颈，有人船因尺寸限制无法进入狭窄水域且风险高，潜水探测受水深和水质影响效率低下，单波束测深则因数据密度不足难以完整呈现地形细节和局部病害。更重要的是，其数据应用目标远不止于获取高程，而是服务于工程安全决策，需关联冲淤动态评估过流能力与清淤需求，识别结构缺陷为维修提供依据，并通过长期监测对比历史数据，分析冲淤速率与缺陷发展趋势以实现风险预警。

(二) 无人船测量系统核心技术组成

无人船系统利用船内搭载的 GPS 全球定位系统、ADCP 智能测深系统、毫米波雷达自动避障系统等，向被测水下发射波束开角 5° 的单波束声波，根据设备回馈的水底反射的声波信号，依据声波传播时间、传播速度和幅度，计算出水底平面坐标和高程数据^[1]。无人船测量系统是专为水闸水下地形测量“狭窄空间、高精度、抗干扰”需求设计的自动化、多传感器集成平台，其船体设计为 2~5 米高强度玻璃钢，采用双电机矢量推进，具备原地转向和 $\geq 2.5\text{m/s}$ 的抗流能力，轻量化便于转运。定位导航系统采用北斗/GPS 双模 RTK，实现厘米级定位，并由高频惯性导航补偿信号遮挡偏差^[2]。核心传感器包括高密度多波束测深仪、高分辨率侧扫声呐及流速水位计，能精确采集地形、识别结构缺陷并校正环境干扰。数据传输通过 4G/5G 与微波双通道实现远程监控，并具备自动返航和碰撞预警等应急功能^[3]。数据预处理模块通过实时滤波、坐标转换和云端备份，确保数据高效、精准，可直接用于工程设计分析。

(三) 无人船系统应用于水闸测量的优势分析

相较于传统测量方法，无人船系统在水闸工程水下地形测量中展现出全面优势。在安全上，其“岸上操控、无人作业”模式彻底规避了人员进入高速水流和狭窄空间的风险，将人员安全风险发生率降至零^[4]。精度方面，通过多波束测深与 RTK 定位融合，测深中误差 $\leq \pm 3\text{cm}$ ，远超传统方法，高密度采样能发现单波束遗漏的微小冲刷坑，且坐标偏差 $\leq 2\text{cm}$ ，确保了水上水下数据精准关联。效率提升尤为突出，单日作业面积可达 5000~10000 m^2 ，数据处理自动化，使整个测量周期缩短至传统方法的 1/5 至 1/100，极大减少了对水闸正常运行的影响。数据价值上，系统能同步采集地形、结构缺陷及环境数据，形成关联数据集并生成直观的三维模型，为工程决策和长期监测提供精准依据^[5]。其小型船体、高分辨率侧扫声呐及 IP67 防水设计，使其能轻松进入狭窄区域、在浊水中识别缺陷，并适应小雨天气，展现出卓越的复杂环境适配能力。

二、无人船测量系统在水闸工程中的应用策略设计

(一) 前期准备与方案设计策略

前期准备需以“精准适配水闸场景、规避潜在风险”为核心，构建从需求拆解到方案落地的完整链路。需开展全面的现场

勘查与需求梳理，实地记录水闸水域范围、闸体结构尺寸，分时段实测水流速度，标记水下障碍物位置与水质透明度，绘制“水闸水下环境示意图”；同时结合工程目标拆解测量需求，明确不同区域的精度标准，同步确定成果形式及应用场景^[6]。设备选型需紧扣水闸环境特性，狭窄水域选用 2~3m 长的小型抗流无人船，开阔库区则适配 4~5m 长的大续航船体；传感器配置需按需组合，冲淤监测以“多波束测深仪+GNSS RTK”为核心，结构缺陷检测需额外搭载侧扫声呐，作业前 24 小时内完成测深仪零点校准、GNSS 基站设置及惯导静态校准，消除船体吃水与定位偏移误差。航线规划采用“网格覆盖+重点加密”模式，普通区域航线间距设为 2~3m，闸基、闸门底部等关键区域缩至 0.5~1m，避开障碍物设置 1m 以上安全缓冲区，在起点、终点及转弯点布设 3~5 个已知高程校验点；同步制定安全预案，明确信号中断时无人船自动返航流程、流速超 2.5m/s 时的停工机制，以及暴雨、大风等恶劣天气的应急处置方案，确保前期准备覆盖“环境-设备-航线-风险”全要素。

(二) 现场测量作业实施策略

现场作业需遵循“试测验证-正式测量-动态调整”的流程，保障数据质量与作业安全^[7]。试测阶段选取闸前 100~200 m^2 的典型区域开展，采集 3~5 组数据后对比校验点实测高程与已知高程，若关键区域误差超 $\pm 3\text{cm}$ ，需调整测深仪增益、GNSS 采样频率等参数，直至精度达标；同时模拟信号中断、障碍物避让场景，测试无人船自动返航与紧急制动功能，确保应急机制有效。正式测量时，无人船按预设航线自动作业，操作人员在岸上控制室实时监控船体位置、航速、电池电量及数据传输状态，每 30 分钟记录一次水流速度、水位与水温；针对闸基冲刷坑、闸门底部等隐蔽区域，采用“往返航线”重复测量，避免测深盲区；作业过程中若遇水下漂浮物等障碍物，立即远程操控绕开，无法绕开时暂停作业并清理；若遇流速骤增或暴雨等恶劣天气，立即召回无人船，待环境稳定后重新规划航线。整个现场作业需同步填写《无人船测量作业日志》，详细记录作业时间、环境参数、设备状态及异常处理情况，确保过程可追溯。

(三) 数据处理与三维建模策略

数据处理需构建“预处理-融合-建模-验证”的闭环流程，提升数据可用性与模型精度^[8]。预处理阶段采用“ 3σ 准则”剔除水流干扰导致的测深异常值，保留有效数据；将 GNSS 采集的 WGS84 坐标转换为水闸工程坐标系，结合实时水位数据修正测深值；根据实测水温通过公式（声速 = $1449.2 + 4.6 \times \text{水温} - 0.055 \times \text{水温}^2 + 0.00029 \times \text{水温}^3$ ）计算声速，校正测深仪参数，消除水温对测深精度的影响。数据融合阶段整合多源数据，将多波束测深的地形高程数据、侧扫声呐的结构缺陷图像与 GNSS 定位数据关联至同一坐标系，形成“高程-图像-位置”的三维数据集，同时将原始数据转换为 AutoCAD、ArcGIS 可识别的 .shp 或 .tif 格式^[9]。三维建模选用专业水下地形软件，基于预处理后的高程数据构建 TIN 模型，叠加侧扫声呐图像标注冲刷坑位置、淤积厚度及结构缺陷；建模完成后选取 10~15 个未参与建模的校验点进行验证，若关键区域平均误差 $\leq \pm 3\text{cm}$ 、普通区

域 $\leq \pm 5\text{cm}$ ，判定模型合格，否则重新优化数据处理参数并二次建模。

(四) 成果应用与工程决策支持策略

成果应用需聚焦“可视化呈现、场景化落地”，将测量数据转化为工程决策依据。基础成果层面输出1:500~1:2000比例尺的水下地形图、冲淤分析图及侧扫声呐缺陷分布图；核心成果为水下地形三维模型，通过WebGIS平台发布，支持管理人员旋转、缩放及细节查询，同步编制工程分析报告，包含数据精度评估、冲淤动态分析及结构安全建议^[10]。在具体应用场景中，安全评估环节依据三维模型分析闸基冲刷深度是否超设计允许值、闸前淤积是否影响过流能力，如某泄洪闸实测闸基冲刷深度2.5m（设计允许2m），据此提出闸基防护加固建议；维修养护规划结合缺陷分布图制定方案，如针对闸墩水下1~3m处混凝土剥落，设计水下机器人修补流程；工程改造阶段提供精准地形数据，如闸室底部高程实测值用于新闸门安装高程设计；长期监测则对比不同时期的测量成果，分析冲淤速率与缺陷发展趋势，若某防洪闸冲刷速率达0.5m/年，建议将监测周期缩短至半年一次。同时建立“数据-模型-决策”联动机制，将测量成果导入水闸安全监测平台，与水位、流量、结构应力数据协同分析，通过三维模型演示、冲淤动态对比图等可视化形式，辅助管理人员制定清淤、维修、改造等科学决策。

(五) 质量控制与风险管理策略

质量与风险管控需贯穿“事前-事中-事后”全流程，构建多层级保障体系。事前预防阶段，作业前24小时内对无人船动力系统、传感器灵敏度及数据传输设备进行全面检修，确保电池电量充足、GNSS信号稳定；对操作人员开展专项培训，覆盖无人船操控、应急处理及数据处理流程，考核合格后方可上岗。事中控制阶段，现场作业每1小时抽查一次校验点数据，对比实测高程

与已知高程，若误差超允许范围立即暂停作业调整参数；严格填写《作业日志》，记录每时段环境参数、设备状态及异常情况，确保过程可追溯；安排专人负责应急值守，实时监控天气与水流变化，提前规避恶劣环境影响。事后核验阶段实施“三级核验”制度，作业人员先对数据完整性、格式正确性进行自检，技术负责人复核数据精度与建模合理性，最后由第三方机构抽检10%的测量区域，验证成果可靠性，核验合格后方可提交应用。针对核心风险点制定专项应对方案，设备风险方面，配备备用电池与传感器，采用本地+云端双备份存储数据，每月开展设备维护；环境风险方面，作业前实测水流速度，超2.5m/s时暂停作业，提前勘查标注障碍物位置；数据风险方面，采用专业软件进行坐标转换并人工复核，建模后多校验点验证；安全风险方面，航线设置安全缓冲区，配备应急遥控器，信号中断时无人船自动返航。同时建立持续改进机制，每次作业后召开复盘会，总结问题并更新《作业手册》，跟踪无人船与传感器技术发展，适时升级设备以适配水闸工程新需求，不断提升应用策略的科学性与适配性。

三、结束语

本文针对水闸工程水下地形测量的特殊挑战，构建了一套涵盖前期准备、现场实施、数据处理、成果应用及质量控制的全流程无人船应用策略，形成了闭环、科学、可操作的技术体系，有效解决了传统测量方法的瓶颈，为工程安全决策提供了精准支撑。随着人工智能、大数据等前沿技术与无人船的深度融合，测量将向更高阶的智能化、自主化发展。因此，持续深化技术研究、完善标准规范、加强协同创新，是推动该技术更好地服务于智慧水利发展、保障水利工程长治久安的关键。

参考文献

- [1] 魏净静,俞瑾,冯露.无人船测量系统在水闸工程水下地形测量中的应用[J].治淮,2024(10):36-38. DOI:10.3969/j.issn.1001-9243.2024.10.018.
- [2] 徐锦泉,胡金林.水下地形测量方法探讨[J].现代测绘,2024,47(2):22-26. DOI:10.3969/j.issn.1672-4097.2024.02.006.
- [3] 顾洁.智能无人船在水下地形测量中的应用[J].经纬天地,2025(1):65-67. DOI:10.3969/j.issn.1673-7563.2025.01.014.
- [4] 李海洲.无人测量船在水下地形测量中的应用[J].河南水利与南水北调,2024,53(7):102-103. DOI:10.3969/j.issn.1673-8853.2024.07.055.
- [5] 刘婷,何仁德.智能无人船在水下地形测量中的应用[J].科技创新与应用,2024,14(28):185-188. DOI:10.19981/j.CN23-1581/G3.2024.28.041.
- [6] 刘士付.水下地形测量技术分析[J].工程技术研究,2020,5(23):229-230. DOI:10.3969/j.issn.1671-3818.2020.23.107.
- [7] 张红伟,殷冰冰.CORS RTK无验潮技术在水下地形测量的应用[C]//2024(第十二届)中国水利信息化技术论坛论文集.2024:1-6.
- [8] 杨亮,任孜,谭詹.无人船水下地形测量与精度评估[J].四川水利,2023,44(3):160-163,168.
- [9] 薛伟.无人船测量系统在河道水下地形测量中的应用[J].中国高新科技,2024(1):92-94. DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.01.25.
- [10] 于南洋,董堰川,孔淋淋.水下地形测量中无人船测量系统的应用[J].中国水运,2023(17):93-95. DOI:10.13646/j.cnki.42-1395/u.2023.09.033.