

# 无人测量船在水下地形测量中的应用策略

梁居明，杨松柏，曹小伟

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.2025040022

**摘要：**本文聚焦无人测量船在水下地形测量中的应用的策略，系统构建技术体系、作业流程，并提出核心应用优化策略，旨在为相关工程实践提供技术支撑。技术体系涵盖平台系统、传感器载荷与数据处理系统，平台系统依据水域特性定制船体与推进，并采用组合导航与双模控制；传感器载荷按需选配并全周期校准；数据处理系统实现全流程自动化与质量把控。作业流程分为任务规划、外业采集与内业处理三阶段，确保数据有效与成果可靠。核心优化策略包括，通过“平台 – 传感器 – 作业模式”协同适配多场景；依托校准、数据融合与智能规划协同提升精度与效率；从设备、数据、人员三方面构建全方位安全保障体系。研究表明，无人测量船能实现高效、精准、安全的水下地形测量，对提升作业质量与效率具有重要实践意义。

**关键词：**无人测量船；水下地形测量；平台系统；传感器载荷

## Application Strategies of Unmanned Survey Vessels in Underwater Topographic Surveys

Liang Juming, Yang Songbai, Cao Xiaowei

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

**Abstract :** This paper focuses on the strategies for applying unmanned survey vessels in underwater topographic surveys, systematically constructs a technical system and operational process, and proposes core application optimization strategies, aiming to provide technical support for relevant engineering practices. The technical system encompasses platform systems, sensor payloads, and data processing systems. The platform system customizes hulls and propulsion based on water area characteristics and employs integrated navigation and dual-mode control. Sensor payloads are selected according to needs and calibrated throughout their lifecycle. The data processing system achieves full-process automation and quality control. The operational process is divided into three stages: task planning, field data collection, and office processing, ensuring data validity and reliable results. Core optimization strategies include adapting to multiple scenarios through the collaborative alignment of the "platform–sensor–operational mode"; enhancing accuracy and efficiency through calibration, data fusion, and intelligent planning; and constructing a comprehensive safety assurance system encompassing equipment, data, and personnel. Research indicates that unmanned survey vessels can achieve efficient, precise, and safe underwater topographic surveys, holding significant practical value for improving operational quality and efficiency.

**Keywords :** **unmanned survey vessel; underwater topographic survey; platform system; sensor payload**

## 引言

随着我国水利现代化与海洋强国战略的推进，水下测量场景日益复杂，对测量技术的环境适应性、数据精准度与作业安全性提出更高要求。传统有人测量船、人工探测方式存在明显局限，而无人测量船凭借无人化作业、全天候续航、高精度采集等优势，逐步成为破解传统测量痛点的关键技术。本文聚焦无人测量船在水下地形测量中的应用，系统构建“平台 – 传感器 – 数据处理”一体化技术体系，规范任务规划、外业采集到内业处理的全流程作业标准，并针对多场景适配、精度效率优化、安全可靠性保障三大核心需求提出具体策略。旨在通过技术体系化、流程标准化、策略精准化，解决复杂水域应用瓶颈，为提升测量质量与效率提供可落地方案，推动无人测量技术在水下勘察领域的规模化与规范化应用。

# 一、无人测量船水下地形测量技术体系

## (一) 无人测量船平台系统

无人测量船系统是一种通过远程控制船只在水下进行测量的自动化船舶，无人测量船能在恶劣天气和复杂的水域环境中进行长时间的连续作业，且所搭载的先进测量设备能够快速获得高分辨率的水下地形数据，在提高测量效率和安全性的同时，保证了测量数据的精准性<sup>[1]</sup>。其平台系统的设计需围绕环境适应性、航行稳定性、载荷兼容性三大核心需求，结合具体测量场景进行定制化开发。在船体设计上，不同水域适配差异显著。推进系统需平衡动力、静音与防缠绕需求，浅水区/静水区用1-3kW静音螺旋桨推进，高流速水域用喷水推进系统，长航程场景则采用燃油+电动混合动力<sup>[2]</sup>。导航定位模块以“GNSS RTK+IMU”组合为核心，GNSS RTK支持北斗/GPS双模定位，搭配差分基准站保障信号弱区域固定解比例 $\geq 95\%$ ；IMU选用高精度光纤类型，通过时间戳同步技术将多源数据时间偏差控制在 $\leq 1\text{ms}$ ，补偿船体摇晃对测量的影响<sup>[3]</sup>。控制系统支持自主航行与远程遥控双模切换，具备自动避障、航线修正及应急返航等功能，通过双模通信保障操控可靠，全方位提升作业安全与效率。

## (二) 水下地形测量传感器载荷

传感器载荷需根据测量精度、地形复杂度、水域环境选择单传感器或多传感器组合，核心分为测深类与辅助类两大类<sup>[3]</sup>。测深类传感器中，单波束测深仪通过垂直发射声波实现单点水深测量，量程0.1-100m，精度 $0.01\text{m} + 0.1\%$ 水深，波束角8-12°，适合平坦地形与浅水区；多波束测深仪发射扇形波束生成三维点云，量程0.5-200m，精度 $0.01\text{m} + 0.05\%$ 水深，波束数量128-512束，覆盖宽度2-5倍水深，适用于复杂地形与高精度三维测量场景；侧扫声呐向两侧发射声波生成声学图像，分辨率 $\leq 0.1\text{m}$ ，探测宽度单侧50-200m，工作频率100-400kHz，主要用于障碍物探测与地貌特征识别，常与测深仪搭配使用<sup>[4]</sup>。辅助类传感器包括ADCP、水质传感器、毫米波雷达等，ADCP通过多普勒效应测量流速与流向，同步获取水流数据修正水深影响；水质传感器测量水温、浊度等参数，辅助分析地形与水质耦合关系；毫米波雷达探测10-50m内障碍物，辅助自主航行避障。传感器校准是保障精度的关键前提，作业前需在已知水深校验场进行静态校准；作业中结合验潮站数据修正水位变化，随机抽取5%-10%测量点与水下固定标对比，实时调整传感器参数，确保数据有效性。

## (三) 数据处理与软件系统

数据处理与软件系统是无人测量船将原始数据转化为工程成果的核心工具，实现了从数据导入到成果输出的全流程自动化<sup>[5]</sup>。数据导入与预处理模块支持多种主流格式，无需人工转换，并通过“ $3\sigma$ 准则”、物理逻辑判断和相邻点对比自动剔除无效信息，同时基于IMU时间戳实现多源数据高精度同步，并支持坐标系转换以满足工程需求。核心数据处理模块针对不同传感器定制算法，单波束数据计算三维坐标并生成DTM；多波束数据经点云预处理、波束归位和网格化生成DEM与等高线；侧扫声呐数据经校正后自动识别障碍物并与水深数据融合<sup>[6]</sup>。质量检查模块

通过精度验证、完整性检查和逻辑校验三重机制把控成果质量，确保数据准确可靠。成果输出模块可根据需求生成图形成果、数据成果和报告成果，支持多种格式导出，满足工程应用、数据备份及归档验收要求。

# 二、无人测量船水下地形测量作业流程

## (一) 任务规划与准备阶段

任务规划与准备阶段是作业成功的基础，需全面覆盖需求对接、现场调研与设备航线筹备。首先需与工程方深度对接，明确测量目标、成果形式及作业周期，以确定设备配置方案<sup>[7]</sup>。随后开展现场勘查，通过无人机航拍、岸基观测及水文资料查阅，掌握水域的水文条件、环境障碍、气象风险及基础设施情况，为设备选型和作业计划提供依据。最后进行设备与航线准备，包括调试船体电池、校准传感器、测试导航系统，确保设备状态良好；并在专业软件中规划航线，根据精度要求设置测线间距与方向，标注障碍物“禁航区”，确保航线覆盖完整且安全高效，为后续作业扫清障碍。

## (二) 外业数据采集阶段

外业数据采集阶段是数据获取的核心环节，需实时监控作业状态与数据质量，确保数据有效。根据水域条件进行设备部署，浅水区人工投放，深水区借助吊装设备，投放后测试船体姿态与通信链路稳定性。随后在测量范围边缘进行“试采集”，检查定位精度、测深精度与数据完整性，不达标则重新校准。正式采集时，无人船按预设航线作业，岸基操作员需实时监控航行状态（航线偏离、电量、避障）与数据质量（信号稳定性、姿态角、采样密度），遇突发情况立即启动应急模式。采集结束后，现场快速导出并复核数据，确认覆盖完整无漏测，如有异常立即安排补测，避免二次往返成本。

## (三) 内业数据处理与成果输出阶段

内业数据处理与成果输出阶段是将原始数据转化为工程可用成果的关键，需通过标准化处理与严格核验确保精度达标、格式规范。首先进行数据导入与预处理，将外业采集的多源数据导入专业软件，完成格式转换、异常值剔除和水位修正，将相对水深修正为绝对水深<sup>[8]</sup>。随后进入核心数据处理环节，针对不同传感器数据采用定制化算法，单波束数据生成DTM；多波束数据经点云滤波、波束归位和插值生成DEM；侧扫声呐数据经校正后识别障碍物并与水深数据融合。质量检查环节通过精度验证、完整性检查和逻辑校验三重核验保障成果可靠，根据工程需求输出三类成果，图形成果（如水下地形图、剖面图）、数据成果（如DEM/DTM、障碍物属性表）和报告成果（如技术报告、验收报告），均采用标准化格式，满足工程应用与归档验收要求。

# 三、核心应用策略与优化

## (一) 多场景适应性策略

针对不同水域的水文环境、地形复杂度及风险等级，需通过

“平台 – 传感器 – 作业模式”的协同优化，实现“场景 – 技术”精准匹配<sup>[9]</sup>。在内陆浅水区，核心挑战是水浅、障碍物多，因此选用浅吃水、轻量化的船体，搭配单波束与侧扫声呐，采用遥控与短距自主航行结合的模式，灵活避障并加密航线。在近海港航区，核心挑战是风浪和潮汐干扰，因此选用抗风浪的V型船体，配置多波束、ADCP和GNSS RTK，采用全自主航行并与港口交管联动，结合潮汐规律作业。在特殊危险水域，核心挑战是人员安全和环境腐蚀，因此采用全封闭防腐蚀船体，选用非接触式传感器，通过卫星通信进行超视距远程操控，并做好作业前后的安全防护与消毒措施，以隔离风险。

## （二）测量精度与效率优化策略

为解决水下地形测量中精度与效率的核心矛盾，需通过技术参数优化与作业流程改进实现协同提升<sup>[10]</sup>。在精度优化上，建立“全周期校准 – 多源融合 – 动态适配”体系，通过作业前、中、后三级校准确保传感器误差可控；采用“GNSS RTK+IMU+电子罗盘”多源数据融合，修正船体姿态对测深的影响；并根据地形复杂度动态调整测线间距与采样频率，平衡细节捕捉与数据冗余。在效率优化上，构建“智能规划 – 协同作业 – 现场核验”流程，利用A\*智能算法规划最优航线，减少无效航程并支持断点续测；在大范围场景采用“1母船 + 多子船”协同作业模式，通过5G网络实时共享数据，大幅提升效率；同时引入现场即时预判机制，实时生成简易地形图与精度报告，当场确认数据质量，将内业返工率降至5%以下，有效降低成本。

## （三）安全性与可靠性保障策略

无人测量船作业需覆盖“设备 – 数据 – 人员”全维度安全，通过“硬件防护 – 机制建设 – 流程规范”构建可靠保障体系。在设备安全保障方面，从硬件设计到运维管理形成闭环，硬件防护上，船体周侧加装3cm厚防撞橡胶条减少碰撞损伤，螺旋桨配备金属防护网防止水草、树枝卡滞，传感器接口采用防水密封接头；应急机制设置多级响应，电池电量≤20%时自动触发返航程序，通信链路中断≥30s时启动电动锚定装置固定船体位置，船

体倾斜角度≥15°时立即关闭传感器电源防止设备损坏；定期维护建立标准化台账，每作业100小时对推进系统、电池组、传感器进行全面检修，长期存放时将电池电量保持在50%，避免过充或过放影响寿命。在数据安全保障方面，聚焦“存储 – 传输 – 追溯”全生命周期，数据存储采用“本地 + 云端”双备份机制，原始数据实时保存至船体本地防磁硬盘，同时通过加密传输协议上传至云端服务器，云端数据设置定时备份，防止设备丢失或损坏导致数据丢失；敏感区域测量数据采用AES-256加密算法，传输与存储过程全程加密，仅授权人员通过动态密码解密查看，加密密钥每7天自动更新；数据追溯建立“全要素日志”，记录每个数据点的采集时间、设备编号、操作人员、环境参数及处理流程，便于后期精度分析、问题排查及成果溯源。在人员安全保障方面，以“风险前置 – 隔离防护 – 应急能力”为核心，作业前开展现场风险评估，制定《风险评估报告》，识别潜在风险，并对应制定应对预案；作业区域实行物理隔离，在水域周边设置警示浮标与警戒线；定期组织应急培训与演练，每季度开展1次设备失联、船体故障、人员落水等场景的应急演练，确保操作人员熟练掌握应急操作流程。

## 四、结语

本文围绕无人测量船在水下地形测量中的应用核心需求，从技术体系构建、作业流程规范与应用策略优化三个维度展开系统研究，形成了覆盖“硬件 – 软件 – 流程 – 保障”的完整技术方案。本文的研究成果为无人测量船在水下地形测量中的规模化应用提供了技术参考与实践范式，有助于推动相关技术的标准化与规范化发展。随着技术的持续迭代与应用场景的不断拓展，无人测量船将在更多复杂、高危水域测量任务中发挥关键作用，为我国水下空间资源的开发利用、生态环境的保护修复以及重大涉水工程的安全建设提供更加强有力的技术保障，助力水下勘察领域实现更高质量的发展。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 洪德政, 张子航. 探究无人测量船在水下地形测量中的应用前景 [J]. 中国水运, 2023(11): 101–103. DOI: 10.13646/j.cnki.42-1395/u.2023.06.037.
- [3] 周京京. 无人测量船在水下地形测量中的应用前景分析 [J]. 大众标准化, 2023(7): 161–162, 165. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1350.2023.07.057.
- [4] 宁新龙. 浅析无人测量船在水下地形测量中的应用前景 [J]. 水利建设与管理, 2021, 41(3): 47–50. DOI: 10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2021.03.12.
- [5] 袁建飞. 无人测量船在水下地形测量中的应用研究 [J]. 北京测绘, 2017(4): 69–72. DOI: 10.19580/j.cnki.1007-3000.2017.04.017.
- [6] 许继锋. 无人测量船在水下地形测量中的应用研究及安全优势 [J]. 数字化用户, 2023(47): 86–87.
- [7] 李志懂. 无人测量船在水下地形测量中的应用研究 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(7): 2845. DOI: 10.12159/j.issn.2095-6630.2020.07.2717.
- [8] 韩利邦. 无人测量船在水下地形测量中的应用前景分析 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2020(5): 1109–1110. DOI: 10.12277/j.issn.1673-7075.2020.05.0554.
- [9] 常楠楠, 罗龙. 无人测量船在水下地形测量中的应用 [J]. 信息周刊, 2019(4): 0105.
- [10] 陈科. 智能无人测量船在河道水下地形测量中的应用 [J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(6): 167–168. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7596.2018.06.059.