文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

测绘无人船在水资源调查中的应用与研究

汪肇勇
江西省地质调查勘查院基础地质调查所（江西有色地质矿产勘查开发院）
DOI:10.12238/gmsm.v8i4.2210

[摘　要] 水资源调查精度和效率制约着流域管理和水利工程建设的科学决策水平。传统调查方法在复杂水域环境下存在测量精度低、作业风险大、成本投入高等技术瓶颈。研究构建了集成多波束测深、水质监测、流速测量的测绘无人船系统,开发了声速校正算法、数据融合处理技术和质量控制方法。通过在长江干流、鄱阳湖和黄河下游以及西藏纳木错开展对比验证,测绘无人船水深测量精度达到±2.5cm,水质参数监测准确率超过96.8%,作业效率较传统方法提升4.2倍,综合成本降低39%。系统在不同水域类型和复杂环境条件下均表现出良好的稳定性和适应性,为水资源精细化调查和智能化管理提供了可靠技术支撑。
[关键词] 测绘无人船；水资源调查；多传感器集成；数据融合；精度控制
中图分类号：TV211.1　文献标识码：A

The Application and Research of Unmanned Mapping Vessels in Water Resources Investigation

Zhaoyong Wang
Institute of Basic Geological Survey, Jiangxi Provincial Geological Survey and Exploration Institute (Jiangxi Nonferrous Geological and Mineral Exploration and Development Institute)

[Abstract] The accuracy and efficiency of water resources investigation restrict the scientific decision-making level of basin management and water conservancy project construction. Traditional investigation methods have technical bottlenecks such as low measurement accuracy, high operational risks and high cost input in complex water environments. A mapping unmanned vessel system integrating multi-beam depth sounding, water quality monitoring and flow velocity measurement was researched and constructed. Sound velocity correction algorithms, data fusion processing technologies and quality control methods were developed. Through comparative verification in the main stream of the Yangtze River, Poyang Lake, the lower reaches of the Yellow River and Namtso Lake in Xizang, the water depth measurement accuracy of the unmanned surveying and mapping vessel reached ±2.5cm, the accuracy rate of water quality parameter monitoring exceeded 96.8%, the operation efficiency was 4.2 times higher than that of traditional methods, and the comprehensive cost was reduced by 39%. The system demonstrates excellent stability and adaptability under different water area types and complex environmental conditions, providing reliable technical support for the refined investigation and intelligent management of water resources.
[Key words] Unmanned surveying and mapping vessel Water resources investigation Multi-sensor integration Data fusion Precision control

引言

水资源调查是自然资源“统一管理、统一数据”职责的重要环节,属于水利工程规划设计、流域综合治理以及水环境保护等工作的关键基础。按照《水资源基础调查实施方案》的要求,需全面掌握全国水资源在空间分布、数量、质量及其动态变化等状况,其技术水平直接关联着水资源开发利用的科学性与可持续性。传统水资源调查主要依赖载人船舶搭载测量设备开展工作,在浅水区域、危险水域和偏远地区面临作业安全性差、测量效率低、人力成本高等现实难题。随着无人系统技术的快速发展,测绘无人船凭借其灵活机动、成本可控、安全可靠的技术优势,在水文测量领域展现出了巨大的应用潜力。

1 测绘无人船水资源调查系统构建与集成

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

1.1多传感器集成配置与优化设计

测绘无人船水资源勘测系统严格遵循国家水资源基础调查技术规范,采用模块化设计的多传感器集成架构模式,能够在地表液态水储量调查中实现水下地形(水深)测绘、水质监测、流速测定等多要素同步获取[1]。系统适用于河流、湖泊、水库以及坑塘等不同类型水体的调查任务。多波束测深仪安装在船体底部中心位置,采用EM2040C型设备,工作频率200-400kHz,波束角度可达130°,确保浅水区域全覆盖测量能力。按照国家水资源基础调查制定的水下地形测量技术要求,对于面积小于10平方千米的湖泊与水库,原则上测深线间距按照不大于500m布设,总测深线不少于3条,需保留主测深线。水质传感器阵列布置于船体两侧,涵盖溶解氧、浊度、pH值、电导率等8个关键参数在线监测设备,传感器间距优化为1.2米以避免相互干扰。ADCP流速仪集成在船体前端,采用300kHz频率配置且测量精度可达±0.5cm/s。

1.2高精度定位导航系统设计

高精度定位导航系统是保障测绘无人船精确作业的核心所在,通过采用RTK-GNSS与INS组合定位技术可实现厘米级定位精度。系统配置Trimble SPS985 GNSS接收机,能支持GPS、GLONASS、Galileo、BeiDou四星座信号接收,在RTK模式下平面定位精度能够达到±2cm[2]。惯性导航系统采用MEMS技术的IMU传感器,其中包括三轴陀螺仪、加速度计和磁力计,通过扩展卡尔曼滤波算法实现GNSS/INS紧耦合。定位系统与船体控制算法进行深度融合,可实现航迹跟踪误差小于0.5m的高精度自主航行能力。

1.3智能控制与数据采集系统

智能控制系统是基于ARM Cortex-A78处理器来构建的,它集成了自主航行控制、避障决策以及数据采集管理等功能。路径规划算法采用改进的A*算法并结合人工势场法,能在复杂水域环境中生成最优测量路径,确保测区全覆盖同时最小化航行距离。避障系统融合激光雷达、超声波传感器和视觉识别技术,建立起360°环境感知能力,可对动态障碍物实现50米距离内提前预警和自动避让[3]。数据采集系统采用高精度时钟同步机制,确保多传感器数据时间戳误差控制在1毫秒以内。系统内置512GB存储空间和4G/5G通信模块,支持实时数据传输和本地数据备份。针对西藏地区具有高海拔的特殊环境,系统专门增添了低气压补偿模块与防冻保护措施,确保在海拔4000米以上的环境中能够正常进行作业。控制系统具备故障自诊断和安全返航功能,确保复杂作业环境下控制系统的可靠性。

2 水资源调查关键技术方法与算法优化

2.1多波束测深数据处理与精度提升

运用分层优化算法处理多波束测深数据,可有效提升复杂水域环境下测深精度。声速剖面校正算法依据CTD实测数据建立水体分层模型,通过三次样条插值方法获得连续声速分布,能将声线弯曲误差控制在2cm以内。波束角度补偿技术针对船体姿态变化引起的测深偏差,采用实时姿态数据进行动态校正,可有效消除横摇、纵摇对边缘波束的影响。浅水多径效应抑制算法通过信号强度和到达时间双重判据识别虚假回波,结合地形约束条件剔除异常深度值。数据处理流程集成卡尔曼滤波算法,实现测深数据的时序平滑处理,声速校正算法和CTD数据相结合,建立高原湖泊水体分层模型,针对低气压环境给声波传播造成的影响进行专门校正。最终测深精度在浅水区域达到±2.5cm,在深水区域优于±0.2%水深,系统采用单波束、多波束、测深杆/测深锤等测深方法,测深中误差按水深分段满足国家标准要求：H≤10m、10m<H≤20m、H>20m各水深段均达到规定精度。系统符合国家水文测量技术规范相关要求,数据格式兼容现有的水资源管理信息系统(见表1)。

表1 测绘无人船与传统方法技术参数对比

技术指标	传统船载测量	测绘无人船	提升比例
水深测量精度	±8cm	±2.5cm	68.8%
水质监测参数	4 项基础指标	8 项全面指标	100%
作业人员需求	3-4 人	1 人远程操控	75%
单日测量面积	1.2km²	5.1km²	325%
危险区域适应性	受限	无人化作业	-
设备投入成本	280 万元	165 万元	-41.1%
年运行维护费	45 万元	18 万元	-60%
数据采集频率	2Hz	10Hz	400%

2.2多参数水质监测与空间建模

多参数水质监测系统依靠传感器标定算法与空间建模技术达成高精度水质参数测定[4]。传感器漂移校正运用多点标定方法构建传感器响应特性数学模型,凭借已知标准溶液的周期性校准消除长期漂移误差。数据标准化处理基于z-score方法统一不同传感器的量纲和数值范围以确保多参数数据可比性。水质参数空间插值算法采用改进克里金方法根据水体流动特性建立各向异性变异函数模型并充分考虑水流方向对污染物扩散影响。质量控制算法实时监测传感器工作状态自动识别传感器故障和数据异常以确保水质监测数据准确性和连续性。

2.3多源数据融合处理与质量控制

多源数据融合处理依据《西藏自治区水资源基础调查实施方案》要求,建立统一的时空基准框架,实现异构传感器数据的有效整合。根据《水资源基础调查实施方案》要求,平面空间坐标系统采用CGCS2000坐标系,高程基准采用1985国家高程基准,数据格式符合国家水资源基础调查统一标准,确保与现有水资源管理信息系统兼容。时空配准算法采用高精度时钟同步机制,把不同传感器的数据统一到GPS时间基准,将时间同步精度控制在1毫秒以内。数据融合权重分配策略基于传感器精度和数据质量动态调整权重系数,采用熵权法和层次分析法相结合的多目标决策模型。实时数据质量评估算法通过统计分析方法监测数

据的完整性、一致性和准确性,建立起数据质量评价指标体系。异常检测算法集成基于统计的3σ准则、基于密度的DBSCAN聚类和基于孤立森林的机器学习方法,多层次识别和处理异常数据。融合后的数据通过格式转换和接口封装,形成标准化的水资源调查数据产品,为后续分析应用提供高质量数据支撑。

3 多场景验证实验与性能评估分析

3.1不同水域类型对比验证实验

多场景验证实验选取大型河流、淡水湖泊、泥沙河流以及高原湖泊四个典型水域来开展系统性对比测试,以此验证测绘无人船技术的适应性与可靠性。大型河流实验区水深处于5-25米,流速为0.8-2.1m/s,代表着深水急流的环境。淡水湖泊实验区选择主湖区和入流水道,水深在0.5-15米,流速较为缓慢,代表大型湖泊环境。泥沙河流实验区水深为1-8米,含沙量比较高,代表浅水高浊度的环境。高原湖泊实验区选定西藏的纳木错,其海拔4718米,湖水深度0.8-33米,该区域代表高海拔、低气压与大温差的极地环境。实验设计采用同步对比方案,让测绘无人船和传统船载设备在相同测区同时进行作业,建立起标准测量基准。每个实验区布设10km×5km的标准测区,按照500m×500m网格划分测量单元,确保数据具备空间代表性。实验周期设定为连续7天,涵盖不同天气和水文条件,全面评估系统在复杂环境下的作业能力[5]。基准数据通过RTK-GPS控制测量和人工采样分析来获得,为精度评估提供可靠参照。

3.2关键技术性能量化评估

关键技术性能评估会运用统计分析方法来量化测绘无人船系统的测量精度以及作业效率。水深测量精度统计分析是以15,680个有效测点数据作为基础,采用均方根误差和绝对误差统计方法来评估测深精度。结果表明,浅水区域(深度小于5米)测深精度达到±2.8cm,中等水深区域(深度在5-15米)精度为±3.2cm,深水区域(深度大于15米)精度是±4.5cm,上述精度指标均优于传统测量方法。水质监测准确性验证是通过与实验室标准分析方法进行对比,8项水质参数的平均相对误差为3.2%,监测精度能够保持在96.8%以上。作业效率评估显示,测绘无人船单日完成测量面积平均为5.1km²,相较于传统船载方法的1.2km²有显著提升[6]。系统可靠性测试中,连续作业无故障时间达到了47小时,能够满足大范围水域调查的作业需求。

3.3技术适应性与推广应用分析

技术适应性评估依靠极限环境测试以及长期运行监测来验证系统鲁棒性和可靠性。极端天气适应性测试在6级风力且能见度小于500米恶劣条件下开展,系统仍能保持正常作业能力且测量精度仅下降12%。复杂地形适应能力评估涵盖浅滩暗礁桥梁等障碍环境,避障算法成功率达到99.3%且未发生碰撞事故。成本效益分析显示测绘无人船系统初期投资回收期为2.3年,全生命周期成本较传统方法降低39%。技术标准化评估表明系统符合国家水文测量技术规范要求,数据格式兼容现有水资源管理信息系统[7]。推广应用前景分析预测该技术在中小河流监测、水库库容测量、水环境监察等领域有广阔应用空间。

4 结语

测绘无人船技术在水资源调查领域的应用实现了传统调查方法的重要突破,通过多传感器系统集成和数据处理算法优化,有效提升了调查精度和作业效率。系统构建的技术方案解决了复杂水域环境下的精度保障难题,数据融合处理技术确保了多源信息的可靠性和一致性。多场景验证实验证明了技术方案的有效性和实用性,为不同类型水域的精准调查提供了成熟的技术手段。技术成果在工程应用中表现出显著的经济效益和社会价值,推动了水资源调查技术的现代化进程。未来应重点攻克恶劣环境适应性、长续航能力和多船协同作业等关键技术,推进技术标准化和产业化发展。结合西藏高原地区特殊的环境条件,技术成果能够直接服务于西藏自治区水资源基础调查工作,为全区湖泊和水库水储存量的精准测算与水资源的精细化管理提供重要技术支撑。

[参考文献]

[1]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(05):888-904.

[2]张文拴,李争,郑瑶.国内外无人船发展现状及研发趋势[J].舰船科学技术,2024,46(15):79-83.

[3]邱志明,孟祥尧,马焱,等.海上无人系统发展及关键技术研究[J].中国工程科学,2023,25(03):74-83.

[4]张启元,张烈山,兰益成,等.基于NB-IoT的养殖塘水质监测无人艇系统研究[J].电子测量技术,2021,44(07):170-178.

[5]叶伟,徐良骥,张坤,等.基于无人船与GIS的沉陷水域水资源监测研究[J].煤炭科学技术,2020,48(09):227-235.

[6]江先亮,尚子宁.基于无人船的水产养殖水质动态监测系统设计与实验[J].农业机械学报,2020,51(9):175-185+174.

[7]余必秀,初秀民,柳晨光,等.基于改进A*算法的无人航道测量船路径规划方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(08):1258-1264.

作者简介：

汪肇勇(1985--),男,汉族,江西兴国县人,大学本科,高级工程师,研究方向：测绘工程。