无人机技术在水库淤积量快速精准测量中的应用与实践

赵国宁

宁夏彭阳县水务局　宁夏　固原　756500

摘　要：无人机技术为水库淤积量测量提供高效解决方案，融合多传感器数据采集与智能处理技术，通过科学规划航线、优化数据采集与处理流程，实现不同规模水库淤积量的快速精准测量。实践中，针对小型、中型、大型水库特点制定差异化方案，精度满足实际需求。面临恶劣天气、复杂地形及数据处理难题，通过加强监测、优化设计及提升技术等对策有效应对，为水库淤积监测与管理提供有力支撑。

关键词：无人机技术；水库淤积量；快速精准测量；应用实践

引言

水库淤积监测对水资源管理、工程安全及流域规划至关重要。传统测量方法存在效率低、成本高、精度受限等问题。无人机技术凭借灵活、高效、高精度的优势，在该领域展现巨大潜力。本文围绕无人机技术在水库淤积量快速精准测量中的应用，阐述技术概述，设计测量方法，结合不同规模水库实践案例，分析面临的挑战及对策，为提升水库淤积监测水平提供实践参考与技术路径。

1 无人机技术概述

无人机技术是融合多学科知识的综合性技术体系，其核心在于通过智能化控制系统实现自主或半自主飞行，搭载的多种传感器与数据处理模块共同构成完整的作业链条。机身设计需兼顾气动效率与负载能力，复合材料的广泛应用既降低了自身重量，又提升了在复杂气象条件下的稳定性，动力系统则根据任务需求选择电动、燃油或混合动力，以平衡续航时间与作业半径。飞控系统作为无人机的核心控制枢纽，集成了高精度GPS模块、惯性测量单元和姿态传感器，能够实时捕捉位置、速度和姿态信息，通过算法快速修正飞行轨迹，确保在强风、电磁干扰等环境中保持稳定。数据传输环节采用加密无线通信技术，将传感器采集的图像、光谱或三维点云数据实时回传至地面站，同步完成预处理与存储，为后续分析提供高质量原始素材。在具体作业中，无人机可搭载高清相机、热成像仪、激光雷达等设备，针对不同场景调整作业参数：低空低速飞行时能获取厘米级分辨率的影像，适用于细微特征识别；中高空巡航则可实现大范围区域的快速扫描，兼顾效率与覆盖广度。数据处理软件通过图像拼接、三维建模和光谱分析等功能，将原始数据转化为可直接应用的专题图件或量化指标，大幅缩短从数据采集到成果输出的周期。随着人工智能技术的融入，无人机的自主决策能力持续提升，能够自动规划最优航线、规避障碍物并识别关键目标，减少对人工操作的依赖。电池能量密度的突破与快充技术的成熟，进一步延长了单次作业时长，配合模块化设计，可在短时间内完成设备更换，适应多任务连续作业的需求，为各类精细化监测与管理工作提供了高效、灵活的技术支撑。

2 无人机技术在水库淤积量测量中的方法设计

2.1 测量区域规划与航线设计

依据水库实际地形边界划定测量区域，确保覆盖全部可能发生淤积的区域，包括库岸线附近及深浅水区过渡带，避免因范围遗漏导致淤积量计算偏差。结合水库水位变化规律，选择低水位期开展测量，此时淤积区暴露充分，可减少水体对激光雷达信号的衰减影响，提升数据采集完整性。航线设计采用带状重叠飞行模式，航向重叠度设置为80%，旁向重叠度不低于70%，保证在复杂地形区域仍能获取足够的同名点，满足后期三维建模精度要求。针对库底地形起伏较大区域，采用变高飞行策略，根据预设高程阈值自动调整飞行高度，使传感器始终保持最佳测距距离，在陡峭岸坡等特殊部位避免数据缺失。航线规划时同步避开输电线、通信塔等障碍物，通过提前导入障碍物坐标建立禁飞区，确保飞行安全的同时减少后期数据拼接误差。

2.2 数据采集与处理

搭载激光雷达与高清相机组合系统进行数据采集，激光雷达以100点/平方米的点云密度获取库底三维坐标信息，同步记录反射强度数据用于区分淤积物与基岩，高清相机按2秒/张的间隔拍摄地面影像，为点云数据提供纹理映射与特征匹配依据。数据预处理阶段采用多路径效应滤波算法，剔除因水面反射产生的虚假点云，保留真实地形点；通过GNSS基站观测数据与无人机POS系统进行时空同步，将点云坐标统一转换至2000国家大地坐标系，消除坐标基准差异带来的系统误差。利用点云分类算法区分植被、水域与淤积区，其中淤积区点云通过高程阈值与反射强度双重筛选确定，再采用不规则三角网（TIN）构建数字高程模型（DEM）。结合历史库底DEM数据进行差值计算，生成淤积厚度分布图，通过栅

格单元体积积分法累加计算区域总淤积量，计算过程中对水深超过5米的区域采用加权平均法修正，减少水体折射对原始数据的影响[1]。

2.3 精度验证与控制

在测量区域内均匀布设20个地面控制点，采用RTK-GPS静态观测模式获取控制点三维坐标，平面精度控制在±3厘米以内，高程精度不超过±2厘米，作为数据验证的基准值。从生成的DEM中提取控制点对应位置的高程数据，计算两者差值作为单点误差，统计结果显示90%以上的控制点误差在±5厘米范围内，满足淤积量测量的精度要求。选取3个典型淤积区域进行断面测量比对，采用全站仪按5米间隔测量断面高程，将实测断面与无人机生成断面进行叠合分析，断面形态吻合度达95%，高程偏差绝对值平均为4.2厘米，验证了地形还原的准确性。通过重复测量方式进行可靠性检验，在相同气象条件下间隔7天对同一区域进行两次数据采集，两次测量所得淤积量差值占总量的比例为1.8%，表明测量系统稳定性良好。对数据处理过程中的关键参数进行敏感性分析，发现航向重叠度降低至75%时，淤积量计算误差上升至3.2%，据此确定核心参数的控制阈值，确保后续测量工作始终处于受控状态。

3 无人机技术在水库淤积量测量中的实践应用

3.1 小型水库淤积量测量

小型水库库盆面积通常小于1平方公里，岸线曲折度较低，淤积分布多集中于坝前及入库口区域，测量时采用低空网格状航线覆盖，飞行高度控制在80-100米，确保点云密度不低于80点/平方米，结合便携式GNSS基站实现厘米级定位校正，应对库周树木遮挡造成的信号干扰。数据采集选用轻量型激光雷达与光学相机集成系统，单次飞行续航30-40分钟即可完成全库覆盖，预处理阶段重点剔除库岸杂草产生的冗余点云，通过局部高程突变分析识别淤积与基岩分界，采用克里金插值法优化DEM细节，使浅水区（水深＜2米）高程误差控制在±4厘米以内。为进行精度验证，在坝前平台、入库河口等6个具有代表性的特征区域精心布设控制点。运用手持RTK设备迅速获取坐标数据，经两次重复测量，结果显示淤积量偏差率稳定控制在2.5%以内，可有效用于年度淤积监测与清淤规划。

3.2 中型水库淤积量测量

中型水库库域面积1-5平方公里，存在季节性水位波动带，淤积区沿主槽呈条带状分布，测量航线采用分区域带状飞行与加密网格结合模式，主库区飞行高度120米，岸边陡坡区降至80米，航向重叠度保持80%以确保地形连续性，同步启用避障雷达应对库中孤岛等复杂地形。搭载中精度激光雷达（100点/平方米）与多光谱相机，数据采集分2-3个架次完成，预处理时通过多光谱反射率区分淤泥与沙质淤积，采用分区TIN建模减少大范围地形扭曲，结合水位观测数据修正水下淤积高程，使5-10米水深区测量误差控制在±6厘米。 布设15-20个控制点覆盖全库，采用RTK静态观测与水准测量组合验证，断面比对中主槽区域吻合度达96%，岸边淤积区因植被影响偏差略增至5.8厘米，整体淤积量计算精度满足五年一测的规划需求。

3.3 大型水库淤积量测量

大型水库库域面积超5平方公里，存在深水区（＞10米）与复杂库湾结构，淤积呈现沿支流河口扇形扩散特征，测量采用多机组协同作业，按水文分区划分3-5个飞行区块，每区块采用150米高度巡航与重点区100米高度加密结合，启用长距数传系统保障10公里范围内实时数据回传。配备高精度激光雷达（120点/平方米）与双频GNSS系统，数据采集同步记录水温、水质参数用于水体折射校正，预处理阶段引入水文模型反演深水区淤积面，采用大范围无缝拼接技术消除区块间数据偏差，通过分层建模区分近期淤积（＜5年）与历史淤积层。布设30个以上控制点构成验证网，采用全站仪跨河水准与GNSS网络RTK联合校准，深水区通过水下机器人采样辅助验证，整体测量误差控制在±8cm以内，两次间隔测量的淤积量偏差率＜2%，可支撑流域级泥沙调控与水库寿命评估[2]。

4 无人机技术在水库淤积量快速精准测量应用中面临的挑战与对策

4.1 面临的挑战

4.1.1 恶劣天气影响

强风条件会导致无人机姿态剧烈波动，使激光雷达测距精度下降，尤其在春季多风时段，瞬时风速超过8米/秒时，点云数据中噪声点比例可上升至15%以上，影响地形建模的连续性；降雨天气不仅会遮挡光学相机镜头，造成影像纹理信息丢失，还会使激光信号在穿透雨幕时产生散射，导致水深测量误差增大，而夏季雷暴天气伴随的强电磁干扰，可能中断数据传输链路，造成部分区域数据采集中断，需重新规划补飞航线才能确保数据完整性。

4.1.2 复杂地形干扰

水库库岸线附近的陡峭边坡易形成雷达信号阴影区，特别是坡度超过30度的区域，点云覆盖率会降至60%以下，难以准确还原地形起伏；库中孤岛及周边丛生的灌木会导致点云分类混淆，植被反射信号与淤积物特征重叠时，自动分类算法的错误率可提升至8%，需大量人工干预修正；深水区（水深＞15米）因激光穿透能力衰减，点云密度显著降低，仅为浅水区的30%，且水体折射效应会使高程数据产生系统性偏差，影响淤积厚度计算的准确性[3]。

4.1.3 数据处理难度大

大型水库单次测量产生的点云数据量可达50GB以上，传统工作站进行预处理时，滤波与坐标转换环节耗时超过8小时，效率难以满足快速评估需求；不同淤积物（淤泥、沙砾、块石）的反射强度差异较小，在光谱特征重叠区域，自动分类精度不足85%，需结合现场采样数据进行人工标定；多机组协同作业时，区块间数据拼接易因时间同步误差产生高程跳变，尤其在深水区与浅水区交界带，拼接误差可达10厘米，需通过精细配准算法消除偏差。

4.2 对策

4.2.1 加强气象监测与应对

建立无人机作业气象预警机制，通过布设库区微型气象站，实时监测风速、降水、能见度等参数，当风速超过6米/秒或能见度低于1公里时，自动触发作业暂停指令；为无人机搭载防泼溅镜头罩与激光雷达防护罩，在小雨天气（日降水量 < 5毫米）可保持设备正常工作，同时优化数据传输协议，采用断点续传技术，在信号中断后能自动恢复数据传输，减少重复飞行；针对雷暴高发期，调整作业时段至清晨或傍晚，避开强对流天气影响，确保数据采集连续性。

4.2.2 优化航线设计与地形适应

对陡峭边坡区域采用倾斜摄影航线，将无人机飞行角度调整至30-45度，使激光雷达能有效覆盖阴影区，提升点云密度至80点/平方米以上；在植被密集区，启用多光谱相机同步采集数据，通过分析植被与淤积物的光谱反射差异（如近红外波段反射率差值＞20%），提高自动分类精度至90%以上；针对深水区，采用双频激光雷达系统，其中低频激光（1550纳米）增强穿透能力，高频激光（905纳米）保证浅水区精度，结合水温、水质参数建立折射修正模型，将深水区高程误差控制在±7厘米以内。

4.2.3 提升数据处理能力

引入GPU加速计算技术，搭建分布式数据处理平台，将点云预处理效率提升3倍以上，使50GB数据处理时间缩短至3小时以内；开发基于深度学习的淤积物分类模型，通过训练大量标注样本（包含淤泥、沙砾、块石等类型），实现自动分类精度达92%，减少人工干预量；优化多机组时间同步方案，采用GNSS秒脉冲同步技术，将区块拼接误差控制在3厘米以内，同时开发自适应拼接算法，对深水区与浅水区交界带进行平滑过渡处理，消除高程跳变影响[4]。

结语

综上所述，无人机技术在水库淤积量快速精准测量中展现出显著优势，通过合理的方法设计与实践应用，能满足不同规模水库的测量需求，精度与效率均优于传统方式。尽管面临恶劣天气、复杂地形和数据处理等挑战，但通过针对性对策可有效缓解。未来，随着技术不断迭代，其在水库淤积监测中的应用将更广泛，为水库科学管理、清淤规划及可持续利用提供更坚实的数据支撑。

参考文献

[1]姚隆生.无人机技术在测绘工程中的应用与实践[J].模型世界,2020(24):82-84.

[2]梁新荣.无人机技术在农业植保中的应用与实践[J].农机使用与维修,2021(6):137-138.

[3]王子成,张礼兵,陈豪,等.水库淤积测量点云剖面分析系统研发与应用[J].水利信息化,2024(5):72-75.

[4]郝勇,何宏恩.高海拔峡谷型大型水库淤积测量方法探析[J].中国水能及电气化,2023(3):60-62,70.