

LiDAR 技术在水文与水资源工程中的应用研究

刘娟娟

(西安黄河工程建设咨询有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要 激光雷达 (Light Detection and Ranging, LiDAR) 技术作为主动式遥感技术, 具备高密度点云采集与三维地形重构能力, 正逐步应用于水文过程分析与水资源工程管理中。LiDAR 技术可精准扫描河道剖面提取高密度断面结构信息, 构建三维监测网格动态捕捉坝体形变, 生成流域三维模型刻画地形坡向与水文结构, 提取坡面侵蚀特征构建水土流失演化图层, 捕捉水面扩展轨迹反演洪水演进参数分布。本研究围绕 LiDAR 技术在水文与水资源工程领域中的典型应用展开系统研究, 论证了 LiDAR 技术与水文模型的深度耦合机制, 以期智慧水利体系构建提供理论依据与技术参考。

关键词 LiDAR 技术; 水文信息; 三维建模; 点云处理; 水资源工程

中图分类号: TV21; TP7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.22.008

0 引言

随着流域开发强度不断提升与极端气象事件频发, 水文与水资源工程在空间感知、精准监测、动态评估等方面面临更高要求。传统测绘方式在数据分辨率、作业效率、环境适应性等方面存在明显局限, 难以支撑复杂地形条件下的高精度建模与高频次监控^[1]。LiDAR 技术以其主动探测、高密度点云、立体成像等特性, 在水利工程调查、河流地形重构、水体边界识别等方面展现出强大潜力^[2]。本文基于激光雷达技术原理与处理流程, 围绕水文与水资源工程中的典型场景展开研究, 探索其在智慧水利体系构建中的优化路径与应用价值。

1 LiDAR 技术概述

LiDAR 基于激光主动探测原理, 通过测定激光脉冲从发射到返回所经历的时间差, 实现对目标表面三维空间坐标的高精度测定。该技术发源于二十世纪中叶, 伴随激光器稳定性提升、惯性导航系统成熟以及高性能 GPS 集成的逐步完善, 已由早期航空侦察拓展至高精度地理信息获取、水利工程监测、地质灾害预警等多个工程领域。标准 LiDAR 系统由激光发射器、扫描单元、接收器、计时模块和点云处理平台构成, 各子系统协同运行, 可实现地形结构的高密度、非接触式建模^[3]。图1为 LiDAR 技术基本原理示意图, 展示激光脉冲自发射单元经扫描装置辐射至目标面后产生反射信号, 由接收器接收并送入计时模块完成距离计算,

进而形成空间点云数据。该过程具备高度自动化特性, 适用于获取大范围、复杂环境下的高分辨率空间信息, 在各类工程场景中展现出显著的精度优势与时效价值。

2 水文与水资源工程现状分析

水文与水资源工程是一门综合性学科, 旨在研究水循环过程、水资源的开发、利用与保护, 以及相关水利工程的规划、设计、施工和管理。其核心功能在于通过科学调度和工程措施, 确保水资源的可持续利用, 满足防洪、供水、灌溉、发电等多方面需求, 维护生态平衡, 促进社会经济发展^[4]。当前我国水资源面临严峻挑战, 时空分布不均的问题突出。根据国家统计局数据, 近十年来, 我国可供利用的淡水资源总量约为 2.8 万亿 m^3 , 占全球水资源的 6%, 居世界第四位。实际可供利用的淡水资源仅为 1.1 万亿 m^3 , 且南方水资源丰富, 北方相对匮乏, 导致区域性供需矛盾加剧。全球气候变化加剧水资源短缺问题。截至 2020 年, 我国冰川面积已缩减至约 4.6 万 km^2 , 相较 1960 年至 1980 年的约 5.9 万 km^2 , 减少约 26%, 对水资源供给和生态环境造成不利影响。在水利工程建设方面, 我国持续推进重大项目^[5]。数据显示, 2021 年我国完成水利建设投资 7 576 亿元, 150 项重大水利工程累计开工 62 项, 南水北调东、中线一期工程累计完成设计单元完工验收 146 个, 占全部设计单元的 94.2%^[6]。然而上述工程也引发对生态环境影响和移民安置等问题的关注, 亟需在工程规划与实施中加强科学评估和监测。

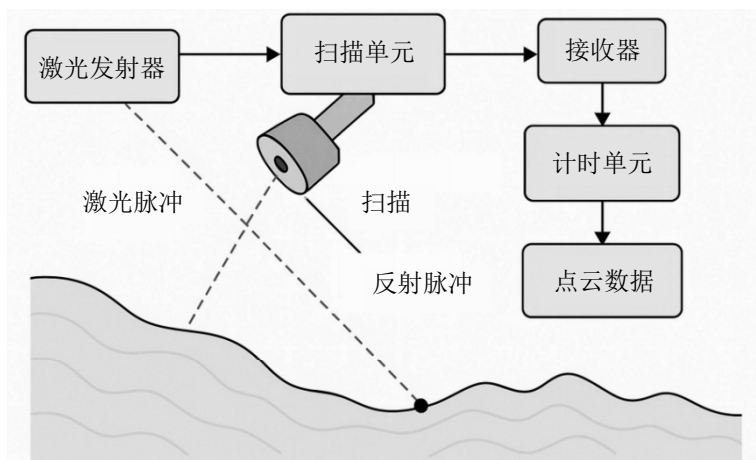


图 1 LiDAR 技术基本原理示意图

3 LiDAR 技术在水文与水资源工程中的具体应用

3.1 河道断面快速测绘

河道断面测绘获取连续、精细、结构明确的空间数据，以支持水文参数提取与水力建模。激光雷达系统具备高频三维扫描能力，适应复杂地貌条件，常部署于固定翼或旋翼无人机平台，沿河道布设航迹实施连续测线。激光束在扫描镜引导下覆盖目标区域，发射时间、姿态参数与空间坐标同步记录，构建带有索引属性的点云数据集。断面测绘方案依据河道形态设定扫描密度与投射角，结合坡度与岸坡变化控制点云分布结构。接收器捕获返回脉冲信号，结合高精度惯性测量单元（Inertial Measurement Unit, IMU）与差分全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）解算出三维坐标信息。断面轮廓提取采用垂向窗口分析与曲率聚类方法识别点群集中方向，构建断面结构线集。多回波数据用于区分水面、地物与障碍物反射特征，点云分类算法提取岸线与裸地交界。浅水区段应用绿色激光波段，基于蓝绿波反射强度阈值提取水下点群，补全断面结构。原始点云完成滤波、配准与误差剔除处理后，导入断面建模模块生成矢量断面线，并与高程基准对齐，完成地理编码转换。多期测绘数据可构建断面时序数据库，基于点云差异分析河床冲淤趋势与断面结构变化。快速测绘流程以参数控制、处理自动化与结构识别算法为核心，构成连续化断面建模链条。

3.2 水库坝体形变监测

以立体空间稳定性捕捉为核心，其作业逻辑依赖于高频面状扫描与点位变异量化。激光雷达系统配置高精度姿态解算模块与动态坐标记录单元，形成以空

间节点为基础的时间序列模型。飞行平台选取低空低速载体，以螺旋路径环绕坝体布设航迹，生成连续多角度数据截面。在扫描过程中，激光束以固定波长在目标表面建立瞬时反射响应，扫描镜阵列控制发射角度、频率与步进节律，反射信号被接收单元记录为空间散点阵列。点云数据未经分层处理即表现出显著表面结构特征，对应坝面材质、构造缝、表皮剥蚀等物理形态。高密度数据集通过点位拟合与误差调控机制，建立连续曲面模型，用于坝面初态空间描述。不同测期的数据需在控制基准下完成全结构配准，运算过程中采用刚性变换+局部非刚性差分匹配策略，分区提取偏移量。坝肩、溢洪道、基础交界区等应力集中区域作为高灵敏点云聚焦窗口，构建局部三维动态监测域。反复测量间的微位移行为可通过法向变化分析与曲面内差统计模型识别形变趋势。结构单元间的缝隙边界由点云切线偏移行为捕捉，用于识别张拉、沉降或剪切迹象。扰动期系统转入高频模式，动态记录形变过程，实时更新曲面状态。测区数据节点全部标注时间属性，统一导入状态数据库，用于支撑坝体全生命周期结构行为追踪与历史趋势建模。

3.3 流域三维建模分析

基于多尺度地貌集成策略，激光雷达系统采集高密度空间点云数据构建地形框架。飞行平台沿主河道及一级支流布设测线，在冲积区、阶地带、丘陵交错区设交叉航向，完成连续覆盖。激光束以固定频率发射，回波信号由接收器转换为空间坐标。点云数据经姿态解算、轨迹同步与误差校正处理后，进入模型预处理阶段，执行高度归一、回波分层与地物分类操作，提取裸地点集。数字高程模型构建采用多分辨率

曲面拟合与剖面插值策略,依据坡向、水文边界与断面结构重建地貌表面。岸坡剧烈或边界模糊区域,利用回波强度差值与梯度分析识别边界结构。三维建模按河谷切割深度与地貌类型划分子区,分别进行网格重构与节点加密。地表层叠区域采用纹理特征聚类提取主成分,并结合高差信息构建多层体元单元。植被密集与噪点区域,执行滤波剔除与空洞重建处理,提升表面连续性。整体模型融合数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)与水文边界线数据,执行拓扑统一运算,建立流域内部的高程、坡度、流向三重因子空间组合关系。用于集水区边界线提取的区域,以激光扫描高程变化率为输入,接入分水线算法提取次级流域结构。模型完成后以标准 TIN 或 B-rep 格式输出,便于后续接入水文模拟系统或作为参数输入源。针对高动态变形区段可建立时序点云叠加模型,反映流域地貌演化过程,支撑流域尺度建模更新机制。

3.4 水土流失动态评估

依托高精度激光雷达点云构建时序地形模型,测区选取坡度剧烈与地貌复杂区域,实施多期航测,控制飞行高度、扫描重叠率与脉冲频率,生成连续点云序列。数据经惯性导航与卫星定位系统解算,完成统一坐标框架下的三维结构对齐。坡面结构提取采用局部曲率识别与多方向梯度矩阵分析,定位沟蚀起点、面蚀集中区与剥蚀过渡带。多期点云变化检测基于体素偏差匹配法,追踪微地形单元高程差异与地表响应结构。裸露区域通过回波层级筛选机制剔除植被干扰,提取稳定反射面进行侵蚀深度运算。空间差分运算融合高程变化阈值与反射强度趋势分析,识别侵蚀热点与剥蚀路径。植被密集地段采用反射能量映射构建高风险因子图层,辅助坡面稳定性间接判断。面向流域单元,引入结构划分策略将测区分解为多个空间子区,分别建立坡面因子模型与剥蚀演化图层。高程变化栅格经剖面差积处理转换为体积参数,量化侵蚀速率与流向趋势。动态监测框架中嵌入多期点云配准算法,执行表面边界重叠检测与变化指数提取,捕捉核心区迁移轨迹。输出成果以剖面图、等值图与体积变化图形式表达坡面侵蚀演化过程,接入结构化地形数据库,完成过程建模与区域对比。

3.5 洪水演进参数提取

洪水演进参数提取以时变水位、断面几何、地表阻力与流速场重建为核心任务,激光雷达技术通过高

频扫描与多源点云融合构建精细化输入数据集。激光平台采用倾斜扫描机制捕捉洪泛区边界扩展与河槽开挖变化过程,航测规划围绕水文断面密集分布区设定扇形覆盖路径,动态更新河道地形模型。多期点云在统一参考坐标系下叠加,采用反射强度与高程差值联合分析提取洪水淹没边界线及水面变化轨迹。水流横向扩散特征依据点云高程梯度场计算表面坡向矢量分布,结合流向指标生成流动趋势图谱。局部积水区域以连续面变化函数重建水面演进过程,提取非规则淹没体积与等水深分布参数。岸坡过渡区引入线性断裂识别算法捕捉突变边界,辅助构建不规则断面结构,用于非恒定流计算中断面响应模拟。植被扰动区域采用反射率分类策略剔除非水面回波,提取净水域动态轮廓。底部糙率估算基于地形粗糙因子反演与点云分布密度指标,构建空间阻力分布格局,用于模型参数校正。多期扫描数据构建洪水前后对比序列,提取淹没面积变化率、水头差异带宽与流速剖面演化指标,形成演进全过程参数集合,支撑水文过程高分辨率建模输入标准化。

4 结束语

激光雷达技术在水文与水资源工程中的拓展应用,体现出高精度建模、高频率感知与多尺度融合的多重能力,为复杂地形结构识别与动态过程建构提供稳定支撑。围绕典型任务场景建立的点云处理机制与参数提取流程,形成完整、闭环、面向模型输入的数据体系。未来,基于激光雷达的智能解译、多源协同与全周期监测将进一步推动水利工程管理体系的数字化发展,拓宽其在多场景、多维度中的集成潜力。

参考文献:

- [1] 张雪莲. 水文水资源标准化管理在水利工程中的应用研究[J]. 水利技术监督, 2024(12):205-208.
- [2] 张志林, 王少千. 遥感技术在水文水资源勘测中的创新应用研究[J]. 水上安全, 2025(02):196-198.
- [3] 郑威, 左小清, 李勇发, 等. 融合 InSAR 和机载 LiDAR 技术的滑坡早期识别与分析[J]. 测绘通报, 2024(05):1-6.
- [4] 孙志强, 翟长风. 提高农田水利工程水资源利用效率的策略研究[J]. 农家参谋, 2024(35):75-77.
- [5] 刘玉年, 李万荣, 李素, 等. 沂沭泗直管区水资源监测能力分析[J]. 治淮, 2025(01):10-12.
- [6] 郝黛妮, 白璐. 浅析宝鸡市全口径水利建设投资统计现状及对策[J]. 陕西水利, 2025(01):171-173.