

基于三维激光扫描的水利工程测绘方法与应用

张 顺

山东省水利勘测设计院有限公司 山东 济南 250000

摘 要：随着科技发展，水利工程对测绘数据的精度与效率要求提高。本文聚焦三维激光扫描技术在水利工程测绘的方法与应用，阐述其通过激光测距与测角获取高精度三维坐标的原理，及高精度、高效率、非接触测量、数据全面等优势。还系统介绍项目准备、数据采集、预处理、解译分析、成果输出全流程，重点探讨扫描站点优化、数据拼接精度控制等关键技术。结合水库地形测绘、大坝变形监测等场景，验证该技术提升效率、保障数据质量、支撑智能决策的价值，为水利工程全生命周期管理提供技术支撑。

关键词：基于三维；激光扫描；水利工程；测绘方法；应用

引言：水利工程作为国家基础设施建设的核心领域，其规划、建设与运维高度依赖精准的测绘数据。传统测绘方法受限于地形复杂度、测量效率及数据完整性，难以满足现代水利工程对高精度、动态化管理的需求。三维激光扫描技术凭借其非接触、高密度、实时化的数据采集能力，成为突破传统测绘瓶颈的关键手段。该技术通过发射激光束并接收反射信号，结合精密定位系统，可快速获取目标物体表面毫米级精度的三维点云数据，同时记录反射强度与纹理信息，为水利工程提供全要素、高保真的空间数据支撑。

1 三维激光扫描技术原理与特点

1.1 技术原理

三维激光扫描技术是一种集激光测距、全球定位系统（GPS）、惯性测量单元（IMU）于一体的空间信息获取技术。其核心原理是通过激光发射器向目标物体发射脉冲激光束，光束遇到物体表面后反射回接收器，系统根据激光往返时间差或相位差计算出扫描点与扫描仪的距离。同时，结合扫描仪内置的角度测量装置记录扫描方向的水平角和垂直角，通过空间坐标转换，将距离和角度信息转化为扫描点在三维坐标系中的绝对坐标。

1.2 技术特点

1.2.1 高精度

三维激光扫描技术的高精度主要体现在空间坐标测量精度上。其距离测量误差通常可控制在毫米级至厘米级，例如地面式三维激光扫描仪的单点测距精度可达 $\pm 2\text{mm}$ ，配合高精度角度编码器（角度误差小于3秒），可实现三维坐标毫米级的定位精度。在水利工程测绘中，这种高精度能够满足大坝变形监测（精度要求0.1mm级）、水库库容计算（误差需小于1%）等对数据精度敏感的场景需求，为工程决策提供可靠的量化依据。

1.2.2 高效率

与传统测绘方法相比，三维激光扫描技术的数据采集效率显著提升。一台地面式扫描仪单站扫描时间通常为5-15分钟，可获取数十万至数百万个点云数据，覆盖范围可达数百米；机载或车载扫描系统更是能以每小时数公里的速度完成大范围地形测绘。例如，对一座中型水库的岸线地形测绘，传统全站仪需要数天时间，而三维激光扫描技术结合移动测量平台，1-2天即可完成数据采集，大幅缩短了野外作业周期，尤其适用于水利工程紧急抢险、大范围地形普查等时效性要求高的任务。

1.2.3 非接触测量

三维激光扫描技术采用非接触式作业模式，无需与目标物体直接接触即可完成数据采集。这一特点使其在水利工程中具有独特优势：对于高陡边坡、坝体陡坡、河道激流区域等人员难以抵达的危险区域，可通过远距离扫描获取数据；在大坝、闸门等运行中的水利设施测绘中，不会干扰设施正常工作，也避免了接触测量可能带来的安全风险，同时减少了对工程现场的扰动，保障了测绘作业的安全性与可行性。

1.2.4 数据全面性

该技术能够全面捕捉目标物体的表面细节，形成高密度、全要素的点云数据。不仅可以记录物体的几何形态（如坝体轮廓、河道断面、地形起伏），还能通过反射强度信息反映物体表面材质差异（如混凝土、岩石、水体的区分）。相比传统测绘仅采集特征点的方式，三维激光扫描的点云数据包含了目标的完整空间信息，可用于后续的三维建模、体积计算、断面分析等多维度应用，为水利工程的设计优化、运维管理提供全方位的数据支撑^[1]。

2 基于三维激光扫描的水利工程测绘方法

2.1 测绘流程

基于三维激光扫描的水利工程测绘流程是一套系统化的作业体系，涵盖从前期规划到成果输出的全环节。该流程以数据精准性和工程适用性为核心，通过科学规划扫描方案、高效采集点云数据、专业处理原始信息、深度解析数据价值，最终形成符合水利工程需求的测绘成果。各环节紧密衔接，前期准备为数据采集奠定基础，预处理保障数据质量，解译分析挖掘数据内涵，成果输出则实现数据向工程应用的转化，确保技术优势在水利场景中充分发挥。

2.1.1 项目前期准备

项目前期准备是测绘工作的基础环节，直接影响后续数据质量与作业效率。首先需开展现场踏勘，明确水利工程测绘范围（如水库坝体、河道岸线）、地形复杂度及周边环境干扰因素（如植被遮挡、电磁干扰）。其次，根据工程需求确定精度指标（如变形监测需毫米级精度），选择适配的扫描设备（地面式、机载式或移动式）。同时，规划扫描站点分布，确保相邻站点数据重叠度不低于30%以满足拼接需求，并布设足够数量的控制点（如GPS基准站）用于坐标校准。

2.1.2 数据采集

数据采集是获取水利工程三维信息的核心环节，需结合工程特点优化作业模式。对于大坝、闸门等构筑物，采用地面式扫描仪进行多站静态扫描，每站设置10-30分钟扫描时长，确保关键部位（如坝体接缝、闸门轨道）点云密度不低于50点/平方厘米。针对河道、水库等大范围地形，可搭配无人机载扫描系统，以50-100米飞行高度实现每秒百万级点云数据采集，兼顾效率与细节。采集过程中需实时记录扫描参数（如激光强度、扫描角度）及环境数据（温度、湿度），并通过内置GPS模块同步获取绝对坐标，为后续数据拼接与坐标转换提供基础。

2.1.3 数据预处理

数据预处理是提升点云质量的关键步骤，旨在消除噪声与误差。首先进行点云去噪，通过统计滤波算法剔除因环境干扰产生的离散点，保留置信度95%以上的有效数据；对植被覆盖区域，采用聚类分析分离植物点与地面点。其次实施数据配准，利用相邻站点的重叠特征点或标靶球，通过迭代最近点（ICP）算法将多站数据统一至同一坐标系，配准误差控制在5毫米以内。随后进行坐标转换，结合前期布设的控制点将相对坐标转换为工程所需的绝对坐标。

2.1.4 数据解译与分析

数据解译与分析是挖掘点云数据工程价值的核心环

节。基于预处理后的点云模型，首先进行特征提取，通过边缘检测算法识别水利设施关键结构（如坝顶轮廓线、河道横断面），计算特征参数（如坝体坡度、河道宽度）。针对变形监测场景，采用多期点云对比分析，通过点云配准与差分计算获取坝体沉降、位移量，精度可达0.1毫米级。在库容计算中，利用点云数据构建三维地形模型，通过格网法或断面法计算不同水位对应的库容量，误差较传统方法降低3%-5%。

2.1.5 成果输出

成果输出需满足水利工程多样化应用需求，提供多种形式、高精度的测绘成果。基础成果包括点云数据文件（如.las、.ply格式），附带详细元数据（采集时间、精度指标、坐标系参数）。可视化成果涵盖三维点云模型、彩色渲染图及断面剖面图，直观呈现水利工程地形地貌与结构特征。工程化成果则根据需求生成数字高程模型（DEM）、数字线划图（DLG），其中DEM分辨率可达0.5米，满足库容计算、洪水模拟等分析需求；DLG标注关键设施坐标、尺寸等属性，为工程设计提供基础数据。

2.2 关键技术与要点

2.2.1 扫描站点优化布置

扫描站点优化布置需结合水利工程场景的地形与结构特征，遵循“视野最大化、干扰最小化”原则。针对坝体、溢洪道等复杂构筑物，采用“环绕式+递进式”布站，确保每个站点能覆盖目标结构的关键区域，相邻站点的有效扫描范围重叠率不低于35%，以保障数据拼接的连贯性。对于水库、河道等开阔区域，优先选择地势较高且无遮挡的位置布设基准站，搭配移动扫描设备形成立体观测网络，避免因地形起伏导致的扫描盲区。同时，需远离高压线缆、大型金属结构等电磁干扰源，站点间距根据扫描仪有效观测范围确定，通常控制在设备最大测距的60%-70%，并预留备用站点应对突发天气或设备故障，确保扫描过程的连续性。

2.2.2 数据拼接精度控制

数据拼接精度控制聚焦于消除多站点云数据的坐标偏差，核心在于建立统一的空间基准。对于有条件的场景，可通过布设人工标靶构建局部控制网，标靶需分布在扫描区域的边缘及中心位置，利用其稳定的空间坐标作为拼接基准，减少累积误差。在无标靶场景中，采用基于特征匹配的算法，提取坝体边角、河道岸线等具有几何稳定性的特征点，通过迭代优化实现点云数据的自动对齐。拼接过程中需重点关注重叠区域的一致性，通过计算点云间的距离偏差评估拼接效果，若偏差超出工

程允许范围,需重新调整拼接参数或补充扫描数据,确保整体模型的几何完整性。

2.2.3 点云数据分类与特征提取

点云数据分类与特征提取旨在从海量数据中提取水利工程所需的关键信息。分类过程采用“先粗分后细分”的层级策略:先依据高程差异分离地面与非地面点,地面点用于生成地形模型,非地面点进一步按反射强度与空间形态区分人工构筑物 and 自然地貌。特征提取则聚焦工程核心参数,通过边缘检测算法识别坝顶轮廓线、河道横断面等线性特征,利用曲面拟合并计算坝体坡度、曲率等形态指标,通过密度分析标记结构表面的异常区域。提取的特征需与工程设计标准比对,为后续的安全评估与运维决策提供直观的空间信息支撑。

2.2.4 精度验证与质量控制

精度验证与质量控制贯穿测绘全流程,通过多环节校验确保成果可靠性。前期需对扫描设备进行校准,检查激光发射器稳定性、角度测量装置精度等关键指标,确保设备处于正常工作状态。数据采集阶段实时记录环境参数(如光照、风速),避免极端条件对数据质量的影响。后期处理中,采用“内外业结合”的验证方式:内业通过对比不同扫描时段的点云数据,核查特征点坐标的一致性^[2]。

3 三维激光扫描技术在水利工程中的应用

3.1 水库地形测绘

三维激光扫描技术为水库地形测绘提供了高效且精准的解决方案。通过在水库周边布设多个扫描站点,可快速获取库区岸线、库底地形及周边山体的高密度点云数据。相较于传统测深仪与全站仪组合的测绘方式,该技术能同时捕捉水陆交界带的细微地形变化,如岸坡冲刷痕迹、淤积区域等,且无需中断水库正常运行。在实际应用中,扫描数据经处理后可生成高精度数字高程模型(DEM)和三维地形模型,为水库库容计算、防洪调度及清淤规划提供数据支撑。

3.2 大坝变形监测

大坝变形监测是保障水利工程安全的核心环节,三维激光扫描技术在此领域展现出显著优势。通过定期对坝体进行全方位扫描,可获取坝顶、坝坡及坝基的三维坐标变化数据,实现对沉降、位移、倾斜等变形的定量分析。与传统的布设监测点方法相比,该技术能覆盖坝体全域,避免因监测点布设不足导致的局部变形遗漏。在数

据处理中,通过多期点云对比可生成变形热力图,直观呈现坝体变形的空间分布特征,尤其对混凝土坝的裂缝扩展、土石坝的滑坡隐患等早期异常具有高敏感性。

3.3 河道地形测量

河道地形测量是河道整治、防洪规划的基础,三维激光扫描技术可突破传统测量的局限。针对蜿蜒曲折的河道,采用车载或船载移动扫描系统,能沿河道连续采集两岸堤防、河床及滩地的三维数据,高效完成长距离河道地形测绘。该技术不仅能精准捕捉河道横断面形态、河床深浅变化等关键信息,还能同步记录堤防工程的结构细节,如堤顶宽度、边坡坡度等。在应用中,扫描数据可用于构建河道三维模型,模拟不同流量下的水流态势,为河道疏浚、堤防加固及生态护岸设计提供参数。

3.4 水利设施建模与数字化管理

三维激光扫描技术推动了水利设施从实体管理向数字化管理的转型。对于水闸、渡槽、泵站等复杂水利设施,通过扫描可生成与实体等比例的三维模型,模型包含设施的几何尺寸、结构连接及表面特征等细节信息。这些模型可导入BIM(建筑信息模型)平台,实现设施设计参数、施工记录、运维数据的集成管理。在实际应用中,数字化模型可用于设施运行状态模拟,如闸门启闭过程中的应力分析。也可辅助维修方案制定,通过模型预演维修步骤,减少现场作业风险^[3]。

结束语

三维激光扫描技术在水利工程测绘中展现出显著优势,其高精度、高效率等特点革新了传统测绘模式。从水库地形到水利设施建模,该技术提供了全面精准的数据支撑,为工程设计、施工及运维筑牢基础。未来,随着技术不断升级,需进一步优化数据处理效率、降低成本,推动其与BIM等技术深度融合,助力水利工程向更智能、高效的数字化管理迈进,为水利事业高质量发展持续赋能。

参考文献

- [1]郑欣.三维激光扫描技术在水利工程坝址地形图测绘中的应用[J].广东水利水电,2021,(11):146-149.
- [2]蔡文生,尚化庄,邓科.三维激光扫描技术在水利工程地形测绘中的应用[J].西部资源,2021,(02):138-139.
- [3]韩慧颖.三维激光扫描技术在水利测绘中的应用[J].河南水利与南水北调,2021,(5):189-190.