

机载激光雷达在水利工程测量上的误差分析

凌 艺

中水珠江规划勘测设计有限公司 广东 广州 510000

【摘 要】：随着水利工程建设规模和精度要求不断提高，传统测量方法难以满足快速、高精度的测量需求。机载激光雷达（LiDAR）作为一种高效、精确的三维测量技术，已广泛应用于河道、水库及水工建筑物的测绘工作。然而，受系统设备性能、飞行平台姿态、环境条件、地表目标特性及数据处理等多因素影响，测量数据中存在多种误差，影响工程应用精度。基于此，本文基于水利工程测量需求，系统分析了机载激光雷达的误差来源，建立误差传播模型，探讨姿态误差及地形特性对点云精度的影响，并提出了外业采集优化、设备校准、点云处理及精度检核等综合误差控制措施。通过理论分析和工程实例，研究表明，合理规划采集方案、优化设备参数及采用多源数据融合技术，可以有效减小误差，提升测量精度，为水利工程设计、施工及动态监测提供可靠数据支撑。

【关键词】：机载激光雷达；水利工程；测量误差；点云精度；误差控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.071

1 引言

水利工程是保障水资源合理利用、防洪安全及生态环境保护的重要基础设施，其建设和运行依赖于高精度的地形测量数据。随着水利工程规模扩大及设计精度要求提升，传统测量方法在效率和精度方面存在局限，难以满足复杂地形和大量水域的测量需求。机载激光雷达技术凭借快速扫描、高点密度和三维成像能力，能够在短时间内获取大面积高精度地形和水工建筑物数据，已成为水利工程测量的重要手段。然而，机载激光雷达测量过程中，由于系统设备误差、飞行平台姿态变化、环境条件影响、地表目标特性及数据处理方法等多因素的综合作用，点云数据中不可避免地产生误差。若不进行系统分析和控制，误差将直接影响高程精度、平面位置精度及三维模型的可靠性，从而影响工程设计和施工管理的科学性与安全性。因此，针对水利工程特点，开展机载激光雷达测量误差分析与控制研究具有重要理论意义和应用价值。

2 机载激光雷达测量技术概述

2.1 机载激光雷达系统组成

机载激光雷达系统主要由激光扫描系统、GNSS 定位系统、IMU 惯性导航系统和数据处理系统组成。具体而言，激光扫描系统通过发射激光束并接收回波信号，测量激光飞行时间来计算目标点距离，从而实现高精度三维测量。GNSS 定位系统为机载平台提供实时空间位置，为点云数据提供地理参考，确保测量结果的空间准确性。IMU 惯性导航系统记录飞机的姿态信息，包括俯仰角、横滚角和航向角，保证激光点云数据的空间精度和完整性。数据处理系统则对采集到的原始点云进行滤波、配准、坐标转换和三维模型重建，为水利工程测量提供可靠的数据基础。这四大系统相互协作，使机载激光雷

达能够在复杂环境下高效、精准地获取地形信息，为工程测量提供坚实支撑。

2.2 机载激光雷达测量原理

机载激光雷达的测量原理主要依赖激光测距技术，当激光遇到地面或其他目标物体反射回接收器时，根据发射与接收的时间差计算目标点到雷达的精确距离，并结合扫描角度及飞行平台位置和姿态信息，确定每个激光点的三维坐标，形成密集的点云数据。点云数据的获取方式可采用单条扫描或多条航线叠加覆盖，通过重复扫描保证复杂地形的完整性和测量精度。随后，数据经过坐标解算、点云配准及噪声滤波处理，最终生成可直接用于水利工程设计、施工和监测的高精度三维地形模型，为后续工程分析提供精准数据支撑。

2.3 水利工程测量特点

水利工程测量对机载激光雷达提出了特殊要求，因河道、水库及其周边地形复杂，存在水面、坡地、坝体和桥梁等多种地物类型。水面反射特性复杂，容易产生回波信号弱或丢失的问题，同时坡度和植被覆盖会影响激光回波的完整性。机载激光雷达凭借其高点密度、快速扫描和全覆盖能力，可以有效克服传统测量方法的局限，为水利工程提供精确、快速和动态的数据支持，提高工程设计和管理的科学性与安全性。

3 水利工程中机载激光雷达测量误差来源分析

3.1 系统设备误差

机载激光雷达测量过程中，系统设备本身的精度水平直接决定了数据质量，其中激光测距误差是最基础的误差来源之一，主要由激光发射与接收器件的时间分辨率限制以及信号处

理精度不足引起,从而导致距离测量存在微小偏差。扫描角误差则来源于扫描镜或旋转机构的不稳定性,使得激光束偏离理论扫描方向,造成点云空间位置偏移。GNSS定位误差主要受卫星信号遮挡、多路径效应以及大气延迟等因素影响,会使飞行平台的空间坐标解算出现偏差。IMU姿态误差则表现为俯仰角、横滚角与航向角测量不准确或存在漂移,这类误差在长航时飞行中会逐渐累积,进而影响点云整体空间精度。

3.2 飞行平台与环境误差

飞行姿态变化会导致激光扫描角度不断变化,使点云数据产生系统性偏移,尤其在复杂地形或强气流条件下更为明显。飞行高度与速度的变化会影响点云密度与覆盖均匀性,高度过高会降低地面分辨率,而速度不稳定则会造成数据条带间重叠不均。气象条件如降雨、雾霾和强风会削弱激光信号强度或改变传播路径,导致回波信号不稳定甚至丢失。电磁干扰则可能影响GNSS与IMU的正常工作,使定位与姿态解算结果出现异常,从而间接降低整体测量精度。

3.3 地表目标特性误差

水利工程测量区域地表类型复杂,不同地物对激光反射特性差异明显。水面反射误差尤为突出,由于水体具有镜面反射与吸收特性,激光信号可能无法形成稳定回波,导致高程数据缺失或异常值。植被遮挡误差会使激光无法到达真实地面,造成“上层点”现象,从而影响地形真实表达。地形坡度较大区域,由于入射角变化明显,会放大测距误差并影响点云分布均匀性。此外,不同材质如岩石、湿土、混凝土等具有不同反射率,会导致回波强度差异,从而影响数据提取与分类精度。

3.4 数据处理误差

在机载激光雷达数据处理阶段,同样存在不可忽视的误差来源。点云配准误差主要发生在多条航线数据拼接过程中,由于时间同步误差或姿态差异,会造成条带间错位现象。坐标转换误差则源于不同坐标系统之间的转换模型不完善或参数设置不准确,使数据空间位置产生偏移。数据滤波误差主要体现在噪声点去除过程中,过度滤波可能删除真实地形信息,而滤波不足则会保留干扰点。DEM模型构建误差则是在点云插值生成数字高程模型时产生的,由于算法选择、采样密度及地形复杂程度不同,会导致地形表达与真实地表之间存在差异。这些误差相互叠加,最终影响水利工程测量成果的整体精度与可靠性。

4 误差传播机理与精度影响分析

4.1 激光测距误差传播模型

激光测距误差是机载激光雷达系统中最直接的误差来源,

其传播规律对点云精度具有决定性影响。激光测距误差不仅取决于激光束的发射与接收精度,还受飞行平台位置、扫描角度及大气折射的综合影响。当距离增加时,误差会按比例放大,导致高程偏差明显增加。同时,扫描角度变化会引入额外误差,尤其在扫描边缘区域,激光束与地面法线之间夹角较大时,测距误差沿斜面投影放大,造成点云空间位置偏移。

4.2 姿态误差对点云精度影响

飞行平台姿态误差是点云精度的重要影响因素,主要包括横滚角、俯仰角和航向角误差。横滚角误差会引起激光扫描面倾斜,使点云在横向方向上产生系统性偏移;俯仰角误差则影响点云的纵向位置,导致坡度测量或水面高程存在连续偏差;航向角误差会造成整个扫描条带沿航向方向偏移,使多条航线叠加时产生错位现象,这些姿态误差往往具有累积效应,尤其在长航程或高飞行高度下,其对点云的高程和位置精度影响更为显著。

4.3 水利工程场景下误差特征

在河道测量中,由于水面光滑且存在植被遮挡,误差表现为局部高程丢失或偏高偏低交错,点云密度不均匀。水库坝体测量时,平整坝面与边坡的高度差异较大,激光束入射角变化明显,导致坝体边缘点云出现高程偏差集中分布。水工建筑物如溢洪道、闸门和桥梁等结构复杂,误差主要体现在点云稀疏、几何形状变形和边缘不清晰。针对不同场景特征,误差呈现出系统性与局部性并存的特点,需要结合工程目标进行针对性精度分析与修正。

4.4 测量精度评价方法

对机载激光雷达测量精度的评价,通常采用多维度指标综合分析。RMSE(均方根误差)是最常用的精度指标,用于衡量点云高程或平面位置与控制点的偏差大小,能够反映整体精度水平。点云密度分析用于评估扫描覆盖均匀性,密度不足的区域可能存在数据缺失或精度下降。高程精度分析侧重于水利工程中地形变化和水位信息的准确性,结合DEM模型可反映高程误差空间分布。平面位置精度分析则关注点云在水平坐标上的偏移,通过控制点比对、条带重叠检验等方法进行验证。

5 机载激光雷达测量误差控制措施

5.1 外业数据采集优化

航线设计应根据水利工程区域的地形特征、河道曲折度以及水库坝体结构进行合理布设,确保扫描条带交叠合理、覆盖完整,并避免盲区和数据稀疏区域。飞行高度与速度的优化同样重要,较低飞行高度能够提高点云分辨率,但需要兼顾航线长度和数据量,过高或过快均会降低测量精度或造成点云疏密

不均。此外,加强GNSS基站布设,提高基站数量和分布合理性,可以有效改善定位精度,减小单点误差对整体测量结果的影响。外业作业还应尽量选择气象条件良好的时间段,避免强风、降雨或雾霾对激光信号传播和回波接收造成干扰,从而最大程度地保证点云数据的完整性与精度。

5.2 系统设备校准与优化

激光扫描仪的校准需包括激光发射器的零点误差、扫描镜旋转偏差及激光束方向校正,确保扫描角和距离测量准确。IMU与GNSS联合校准能够有效减小平台姿态误差对点云空间位置的影响,通过惯性导航数据与高精度GNSS定位数据融合,纠正累积漂移和零偏,从而提高整体三维测量精度。同时,对设备进行定期维护和稳定性检查,包括仪器温度控制、电源稳定以及机械部分的润滑与紧固,也能减少因设备老化或机械振动引起的随机误差。

5.3 点云数据处理优化

首先,点云滤波优化可以有效剔除噪声点和异常值,同时保留地形和水工建筑物的关键特征信息,避免误差在后续模型构建中放大。其次,自动配准算法改进能够提高多条航线或多次扫描数据的空间一致性,减少条带错位或重叠误差,使点云拼接更加紧密。多源数据融合处理则是通过结合航空影像、地面激光扫描和无人机低空测量数据,弥补单一数据源的局限,进一步优化三维模型的精度和完整性。在处理过程中,应综合考虑激光反射强度、点云密度和目标材质特性,采用针对性算

法修正误差,确保最终生成的点云数据能够真实反映水利工程区域的地形和水工建筑物特征。

5.4 精度检核与质量控制

在水利工程应用中,测量精度验证应结合坝体、河道、水库以及相关建筑物的实际需求,采用高程偏差统计、点云密度分析和空间对比方法进行全面评估。建立数据质量评价体系,可以将测量精度、点云完整性、噪声比例和模型误差等指标系统化管理,为工程设计、施工监测和后续数据更新提供科学依据。此外,结合精度检核结果,形成闭环改进机制,持续优化外业采集方案、设备校准方法及数据处理流程,有效降低测量误差,确保机载激光雷达在水利工程测量中的高精度应用和长期稳定性。

6 总结

本文系统分析了机载激光雷达在水利工程测量中的应用及误差特征。研究表明,激光测距误差、扫描角误差、GNSS定位误差和IMU姿态误差是系统设备的主要误差来源。针对这些误差,本文提出了外业数据采集优化、系统设备校准与维护、点云处理改进及精度检核等综合控制措施,并结合水利工程实例验证了方法有效性。研究结果表明,合理规划采集方案、优化设备参数、采用多源数据融合和严格质量控制,能够显著提升机载激光雷达测量精度,为河道、水库及水工建筑物测量提供可靠数据支撑,为水利工程的设计、施工及动态监测提供科学依据。

参考文献:

- [1] 李星星,杨龙.无人机载激光雷达在水利工程测量中的应用[J].广西水利水电,2025,(1):15-18.
- [2] 胡志权.水利工程中机载激光雷达技术的应用探讨[J].低碳世界,2021,11(5):105-106.
- [3] 李慧.浅谈机载激光雷达技术在水利工程中的应用[J].水利技术监督,2021,(11):50-52+82.
- [4] 李庆松.探究机载激光雷达技术在水利工程项目中的应用[J].内蒙古水利,2019,(2):30-31.