

机载激光雷达在山区输电线路选线设计中的实践研究

莫祥光

广西博阳电力勘察设计有限公司 广西 南宁 530029

摘要：山区输电线路选线受制于地形起伏、植被覆盖及气象条件等多重约束，传统勘测手段在信息获取精度与效率上难以满足工程要求。本文在系统梳理山区选线技术需求的基础上，阐明机载激光雷达系统的基本构成与测量原理，进而论述该技术在地形测绘、点云处理与三维建模全流程中的作业体系。该项技术能够穿透植被层获取真实地表高程，精确提取地貌特征与障碍物空间分布，为路径可视化分析与方案比选提供可靠的数据基础。

关键词：机载激光雷达；输电线路选线；山区地形；点云数据；三维建模

引言：输电线路路径选择是电力工程建设中的关键环节，直接影响投资规模与运行安全。山区地形高差大、植被茂密且气象多变，选线工作面临的信息获取困难尤为突出。传统人工踏勘方式受通行条件限制难以覆盖全部可选的路径区域，光学遥感手段则在植被遮挡与云雾干扰下无法准确获得林下地形数据。机载激光雷达作为主动式对地观测技术，具备植被穿透与高密度点云获取能力，能够为山区输电线路选线提供精细化的空间数据支撑。

1 山区输电线路选线基础特征与技术需求

1.1 山区输电线路选线地形环境特征

山区地形环境对输电线路选线构成显著约束。地表起伏剧烈，高程落差变化频繁，沟壑纵横交错，坡度陡缓差异巨大。植被覆盖状况复杂，乔木、灌木及草本植物分布密集且种类繁多，在不同海拔高度呈现明显分带特征。地质条件不稳定区域广泛分布，包括滑坡体、崩塌堆积物及风化破碎岩层，这些因素直接制约杆塔基础建设与线路安全运维。气象条件随高程变化剧烈，覆冰、大风及雷暴等极端天气事件出现频率较高，进一步增加选线工作的复杂程度。

1.2 传统选线技术的固有局限性

传统选线方法依赖人工踏勘与光学遥感影像判读，在山区复杂环境下暴露出诸多不足。地面人工踏勘受制于地形通行条件，人员难以抵达高差悬殊区域，调查范围极度受限，工作效率低下且存在安全隐患。光学遥感影像受云雾遮挡与阴影干扰严重，山区阴雨天气频繁，可用影像获取窗口期短暂，且影像几何畸变明显，难以提取精确的地形与地物空间信息。航摄像片立体判读依

赖作业人员主观经验，不同人员判读结果差异较大，定量化程度不足，无法满足精细化选线要求。传统测量手段单次获取信息量有限，难以在大范围区域内实现全面勘测。

1.3 山区复杂场景下输电线路选线技术要求

山区输电线路选线对技术手段提出明确要求。需要具备穿透植被覆盖的能力，以获取地表真实高程数据，避免因植被遮挡导致的地形误判。需要获取高密度、高精度的三维空间信息，能够精细刻画微地形起伏变化及地表附着物空间分布。数据采集应具备大范围快速作业能力，以缩短选线周期并降低野外作业强度^[1]。数据处理结果需具备定量化与可视化特征，能够为线路路径比选、杆塔定位及交叉跨越分析提供可靠的数据支撑。技术方案还应具备良好的环境适应性，能在多云雨、高海拔等恶劣作业条件下稳定运行。

2 机载激光雷达技术体系与作业原理

2.1 机载激光雷达系统核心组成模块

机载激光雷达系统由激光扫描单元、动态差分卫星定位接收机、惯性导航测量单元及同步控制模块构成。激光扫描单元负责发射与接收激光脉冲信号，是实现距离测量的核心部件。动态差分卫星定位接收机持续追踪卫星信号，获取载体平台在绝对坐标系中的三维位置信息。惯性导航测量单元记录载体平台在飞行过程中的俯仰、横滚及航向姿态角变化，为激光脚点空间坐标解算提供姿态基准。同步控制模块协调各子系统工作时间基准，确保测距数据、定位数据与姿态数据在统一时间序列下精确对应。各模块之间通过高精度时间同步机制形成紧密耦合关系，任一环节的时间偏差都会直接传递到

最终点云坐标的计算结果中。

2.2 机载激光雷达测距与点云数据采集原理

机载激光雷达通过发射激光脉冲并接收地面反射回波来测定传感器与目标点之间的距离。激光扫描仪以一定频率向地表发射窄脉冲光束,光束抵达地物表面后产生反射,部分回波能量返回传感器接收端。通过精确测量脉冲发射与接收之间的时间间隔,结合光速恒定值计算出斜距距离。扫描光学机构使激光光束在垂直于飞行方向上来回摆动或旋转,形成对地表的带状扫描覆盖。载体平台持续向前飞行,扫描线与飞行轨迹共同构成连续覆盖地表的之字形扫描路径^[2]。每个激光脚点对应一个三维空间坐标,结合卫星定位与惯性导航提供的精确位置姿态信息完成坐标解算,整个飞行航次即可获取覆盖测区的海量离散点云数据。激光脉冲在大气传播过程中会受到气溶胶及水汽分子的散射作用,这部分能量损失需要借助辐射传输模型进行校正。

2.3 机载激光雷达数据预处理核心流程

原始点云数据需经系列预处理操作后方可投入后续应用。系统误差检校环节消除激光测距仪、惯性导航单元及卫星定位接收机之间因安装偏差与时间不同步引入的系统性误差。航带间配准处理将不同飞行航带获取的点云数据纳入统一坐标基准,消除航带重叠区域的相对偏差。噪声点滤除操作剔除因大气散射、多路径效应及飞鸟干扰等产生的离群点与异常点。数据分类处理将点云依据回波特征区分为地面点、植被点和人工构筑物点等不同类别,其中地面点滤波是关键环节。数据精简操作在保证地形表达精度的前提下合理降低点云密度,减少后续处理的数据负担。配准质量直接决定多航带数据融合后的几何一致性,是后续所有应用分析是否可靠的前提条件。

2.4 机载激光雷达技术适配山区复杂地形的技术特性

机载激光雷达技术具备穿透植被遮挡的独特能力。激光波长能够穿透树冠层间隙到达地表,部分能量经地表反射后返回传感器,在密集植被覆盖区域仍可获取一定数量的地面回波点。多回波记录功能使系统能够记录同一个激光脉冲在穿透植被过程中遭遇不同高度物体时产生的多次反射信号,从而同时获取树冠表面、枝干层及地表多个高程信息。高密度点云获取能力保证在山区地形起伏剧烈区域获得足够采样密度,精确刻画沟谷、陡坡及山脊等微地形特征^[3]。主动遥感的工作方式使其不依赖太阳光照条件,可在夜间或弱光照条件下作业,有效延长可作业时段。激光脉冲的穿透能力与植被密度

及激光波长存在关联,合理选择波段可增强对特定植被类型的穿透效果,提升林下地形数据获取的成功率。

3 机载激光雷达山区输电线路选线作业流程体系

3.1 前期作业参数规划与设备适配调试

作业参数规划直接影响数据质量与采集效率。航线设计需综合考虑测区范围、地形高差、飞行高度及旁向重叠率等因素,合理规划航线走向与航带间距。激光扫描参数设置应根据植被覆盖密度与地形起伏程度调整激光脉冲发射频率、扫描角度及扫描频率,在点云密度与数据量之间取得平衡。飞行高度设定需兼顾测距精度与覆盖宽度,过高则点云密度降低,过低则作业效率下降。设备安装与检校在地面完成,将激光扫描仪、卫星定位天线及惯性导航单元牢固安装于载体平台并精确测定各部件空间相对位置关系。

3.2 山区全域点云数据航测采集实施

航测采集按照规划航线执行飞行作业。飞行员操控载体平台沿预定航线保持恒定高度与速度飞行,激光扫描仪持续向地表发射并接收激光脉冲信号。动态差分卫星定位基准站与机载接收机同步记录卫星观测数据,为后续差分处理提供基础数据。飞行过程中需实时监控设备工作状态、卫星信号锁定情况及数据记录完整性。对于高差悬殊的山区,需采用变高飞行策略使激光扫描仪与地表保持相对稳定的距离,避免测区边缘点云密度过度稀疏。作业完成后现场检查数据覆盖完整性,对存在数据缺失的区域及时安排补飞。

3.3 原始点云数据去噪、分类与精简处理

去噪处理识别并剔除各类噪声点。孤立离群点通过统计邻近点云空间分布特征予以检测并移除。分类处理将点云划分为地面、植被、建筑物及电力线等类别。地面点滤波算法采用渐进加密三角网或基于坡度判别的策略,从混杂点云中提取真实地表回波点。非地面点依据其空间位置、回波强度及回波次数等特征分别归类。精简处理在平坦区域适度抽稀点云密度,在地形变化剧烈区域保留足够密集的点云以保证地形细节不被丢失。各类别点云数据分别存储以便后续建模使用。

3.4 地形、地物三维模型重构生成

分类后的点云数据用于构建各类三维模型。地面点云经插值生成数字高程模型,精确表达山区地表起伏形态。植被点云用于生成植被高度模型,反映树高及树冠空间分布。建筑物与电力设施点云构建精细三维线框模型。各类模型叠加融合形成测区完整的三维地理场景,真实再现地形、植被、水系、道路及既有电力线路等要

素的空间分布与相互位置关系。模型分辨率可根据应用需求灵活调整,在关键节点区域保持高分辨率以支持精细化分析与判读。

3.5 基于三维模型的线路初选与迭代优化

三维模型为线路路径选择提供直观准确的决策依据。设计人员在三维场景中初步选定线路起点、终点及关键转角点,生成初始路径方案。基于数字高程模型提取路径纵断面与横断面,分析沿线地形起伏对杆塔布置的影响。利用植被高度模型与建筑物模型识别路径穿越区域的障碍物分布,评估线路与障碍物之间的空间冲突程度^[4]。对初始方案中存在的冲突区域调整路径走向或杆塔位置后重新评估,通过多轮迭代使路径方案在技术可行性与经济合理性之间达到较优平衡。多个比选方案在同一三维场景中并列展示便于综合评判。

4 机载激光雷达在输电线路选线中的应用内容

4.1 山区高精度地形地貌信息提取

数字高程模型以高分辨率栅格形式精确记录山区地表高程信息,为线路坡度分析、汇水区域划分及土石方量估算提供基础数据。坡度与坡向分析识别陡坡、悬崖及不稳定边坡分布区域,辅助杆塔位避开地质灾害高风险区。等高线追踪与地形特征点提取进一步概括地形骨架,为线路路径走向规划提供宏观地形认知。不同分辨率的地形模型满足从初步选线到详细设计各阶段对地形信息精度的差异化需求。地表粗糙度及地表曲率等地形派生参数可用于量化评估塔基处的场地稳定性,为具体塔位的地基处理方案选择提供参考依据。

4.2 地表障碍物识别与空间信息统计

点云分类结果能够精确识别线行通道内的各类障碍物。植被点云经聚类分析提取单木位置、树高及冠幅信息,统计分析通道内植被平均高度及最高高度,判断树木生长对线路安全间距的潜在威胁。建筑物点云重构三维轮廓并计算其平面尺寸与高度,明确线路与建筑物的水平及垂直净空距离。交叉跨越设施的空间位置与几何参数也被精确提取用于跨越分析。障碍物的动态变化因子也应纳入考量,如树木在覆冰或大风条件下的倒伏方向及最大偏斜距离,这些因素会影响安全净距的最终确定。

4.3 线路走廊带空间资源精准勘测

线路走廊带三维模型完整呈现通道内的地形起伏与地物分布状况。走廊带纵断面图沿线路中心线提取地面高程变化及地物高度分布,直观反映线路沿线的起伏趋势与障碍物分布密集区。不同偏移距离的横断面图揭示

线路两侧各宽度范围内的地形变化与障碍物展布情况。在走廊带范围内提取满足杆塔基础建设要求的平缓地段,为塔位优选提供空间依据。走廊带内各类地物的平面位置、高度及面积等属性信息统计汇总形成完整的勘测成果资料。走廊带资源评估还应对不良地质段、生态敏感区及重要基础设施分布进行专题标注,供设计人员决策时参考。

4.4 线路路径三维空间可视化分析

三维可视化环境支持线路路径的多角度漫游浏览与交互式分析。设计人员可从任意视角观察线路与地形、地物的相对空间位置,直观判断路径方案的合理性与安全性。线路弧垂模型与地形模型叠加后动态模拟导线在各种工况条件下的对地距离与对障碍物净空距离,提前发现不满足设计规范要求的区段^[5]。多方案同屏对比显示功能支持设计人员在三维场景中直观比较各路径方案穿越地形的难易程度、跨越障碍物的数量与规模、以及线路总长度等关键指标,为方案优选与决策提供直观可靠的空间信息支撑。动态飞行漫游功能可沿设计路径自动生成模拟飞行视频,便于设计审查人员快速了解全线空间环境概况。

结束语: 机载激光雷达技术将数据采集、处理与建模环节串联为完整的技术链条,有效解决了山区输电线路选线中植被遮挡与地形信息缺失的难题。高精度数字高程模型与三维地物模型为路径优化提供了详实的数据基础,障碍物识别与空间分析功能提升了选线决策的科学性与准确性。该技术在高大差、植被密集区域的适用性已经得到充分验证,能够显著降低外业劳动强度并提高选线成果质量。

参考文献

- [1] 龚建宗. 机载激光雷达在山区输电线路设计中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(1):170-172.
- [2] 尹亚东. 机载激光雷达技术在输电线路设计中的应用[J]. 河北电力技术,2021,40(6):10-11+54.
- [3] 张虎. 机载激光雷达技术在输电线路设计中的应用[J/OL]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024,(4):0053-0056.
- [4] 邓平,李斌. 基于机载激光雷达的输电线路通道树障在线识别方法[J]. 现代雷达,2026,48(6):77-83.
- [5] 郑晶,温玉维. 无人机激光雷达辅助输电线路勘测设计应用研究[J]. 测绘与空间地理信息,2025,48(10):147-149+153.