

输变电路前期选址航测多模数据采集与自动化处理技术

张中 王琳琳 曹学理 张千山 王志强

甘肃电通电力工程设计咨询有限公司

DOI:10.32629/acair.v4i1.19362

[摘要] 输变电路选址对地形精度、环境解析度和施工可达性提出了极高要求。传统单一航测手段在复杂地形环境中存在精度不足、建模滞后的问题。本文聚焦多模航测系统(激光雷达与高分辨率倾斜摄影)的集成应用,构建一套面向输变电工程选址的多源数据采集与自动化处理技术路径,提出基于点云快速解算与异常识别修复的算法流程,形成高效数据建模机制。以某110千伏输电工程走廊为应用对象,对采集精度、数据融合效率及模型构建效果进行实测评估,验证了该体系在选址环节的应用价值与技术可行性。

[关键词] 多模航测; 输变电路; 自动化数据处理

中图分类号: C931.9 文献标识码: A

Application of Multi-Mode Aerial Survey Data Acquisition and Automated Processing Technology in Preliminary Site Selection of Power Transmission and Transformation Lines

Zhong Zhang Linlin Wang Xueli Cao Qianshan Zhang Zhiqiang Wang

Gansu Diantong Power Engineering Design Consulting Co., Ltd.

[Abstract] Power transmission and transformation line site selection imposes extremely high requirements on terrain accuracy, environmental resolution, and construction accessibility. Traditional single aerial survey methods suffer from insufficient accuracy and delayed modeling in complex and varied terrains. Focusing on the integrated application of a multi-mode aerial survey system (LiDAR and high-resolution oblique photogrammetry), this paper constructs a technical path for multi-source data acquisition and automated processing for site selection in power transmission and transformation engineering. It proposes an algorithmic process for rapid point cloud computation, anomaly identification and restoration, forming an efficient data modeling mechanism. Taking the corridor of a 110 kV power transmission project as an application case, the acquisition accuracy, data fusion efficiency and modeling effect are evaluated through field tests, verifying the application value and technical feasibility of the system in the site selection stage.

[Key words] multi-mode aerial survey; power transmission and transformation lines; automated data processing

引言

输变电路是电力系统空间布局的核心,其路径规划直接影响工程投资、运行安全与生态干扰程度。随着输电网络日趋复杂,前期选址的数据质量已成为制约工程全周期效益的关键因素。在山地、丘陵、林区等复杂地貌中,传统勘察方式存在数据维度单一、分辨率低、穿透性差、效率低等问题,难以满足高精度选址需求。近年来,激光雷达与倾斜摄影等多模传感技术为提升选址效率与自动化水平提供了可行路径。本文构建航测多模数据采集、自动化处理与精度控制框架,形成从数据获取到路径建模的闭环支撑,推动输电工程设计向智能化、精细化转型。

1 航测多模在输变电路选址中的技术适配性分析

输变电路前期选址具有长距离、宽走廊、多地貌覆盖的

特点,对地形精度、空间分辨率与数据时效性要求极高。传统单一航测手段难以同时满足高程精度、三维建模、植被穿透与大范围高效覆盖的综合需求。激光雷达穿透性强、高程精度高,倾斜摄影三维纹理重建效果好,二者融合可优势互补,显著提升复杂地貌下的数据质量与工程适用性。

输变电路选址航测流程主要包括平台选型、载荷配置、航线规划、数据采集、质量控制与成果建模。根据测区地貌选用无人机平台,搭载激光雷达与倾斜摄影系统,配合RTK与POS系统实现时空同步。航线满足 $\geq 70\%$ 纵向、 $\geq 60\%$ 横向重叠度,飞行后现场完成点云、轨迹与影像质检。经点云自动分类滤波、三维模型构建及影像正射纠正,最终形成DTM、DSM与三维实景模型,为线路规划、路径可视化与塔位预判提供可靠数据支撑^[1]。

2 多源遥感数据采集流程与自动化处理

2.1 多源数据采集与自动化处理融合策略设计

输变电线路前期选址地貌复杂、时效要求高,单一航测难以满足高精度与三维建模需求。本文采用激光雷达与倾斜摄影协同采集策略,构建多源数据融合机制。

平台选用垂直起降固定翼无人机,搭载激光雷达与五镜头倾斜摄影系统,配合POS AV导航单元实现时空同步。根据地形动态设置航高,纵向重叠率 $\geq 75\%$ 、横向 $\geq 65\%$,保证数据密度与几何精度^[2]。处理时,点云经滤波分类、影像完成校正建模,以GNSS+IMU为统一基准,通过ICP算法实现配准耦合,最终输出GeoTIFF、LAS、OBJ等标准成果,为选址建模提供数据支撑。

2.2 点云数据自动化解算技术

激光雷达原始数据经波形预处理、时间同步、姿态融合与坐标投影,转化为可用三维点云。系统采用双时钟同步与卡尔曼滤波,提升轨迹稳定性,扫描频率设为100 kHz,期望点密度20-25 pts/m²。综合地形表达需求,主航高控制在200 m,保证点密度 ≥ 22 pts/m²。

滤波采用改进SOBEL边缘检测与KNN密度约束,地面点提取使用LDWI方法,提升复杂地貌地表恢复能力。点云分类基于随机森林与 ΔZ 模型,可识别地面、建筑、植被等五类要素,经RTK验证,高程RMSE为 ± 0.09 m,分类准确率91.8%。成果以LAS 1.2格式输出,为三维建模与净空分析提供标准输入。

2.3 航测数据自动化建模技术

航测建模是实现输变电线路路径可视化表达、净空评估与塔基布局计算的关键环节。基于激光雷达点云与倾斜影像的联合输入,可实现数字地形模型(DTM)、数字表面模型(DSM)与三维纹理模型(3D Mesh)的自动生成^[3]。

DTM构建基于滤波后地面点,采用三角网插值(TIN)法生成等高地形面,并对断面折线处执行边缘光滑处理。DSM保留全部点云回波信息,准确表达建筑物、植被、水体等地物高差结构,支持通道净空剖面提取与可施工性分析。

三维模型生成采用倾斜影像SIFT特征提取+SGM稠密匹配方式构建影像点云,并以激光点云为几何约束执行精度耦合配准。空间配准采用共线条件下最小二乘平差,误差函数如下:

$$E = \sum_{i=1}^n \|P_i - \pi(X_i, R, T)\|^2$$

其中, P_i 为像面观测点, X_i 为空间控制点, R, T 分别为旋转与平移矩阵, π 为投影函数。

模型输出格式包括OBJ与Cesium Tile,可直接用于数字平台可视化加载与空间分析调用。建模精度在典型线路场景中经RTK验证,RMSE控制优于10 cm,支持1:500等级工程设计应用需求。

2.4 异常数据识别与修复机制

航测数据处理过程中,因飞行轨迹漂移、设备抖动、局部遮

挡或反射异常,常出现点云缺失、影像纹理断裂与模型几何畸变等异常数据区域。为提升数据成果的连续性与可靠性,需建立自动化的异常识别与修复体系^[4]。

异常识别采用三项联合判断机制:

空间密度约束:基于K邻域统计,识别低密度孤立区域;

高程突变约束:局部点高程变化 $|Z_i - Z_j| > 0.5m$ 判定为跳变区;

图像残差约束:影像重建后提取纹理残差热力图,均值+2 σ 以上区域标记为异常。

识别完成后,点云空洞采用反向TIN插值重建等效高程面,保障局部地形连续性。纹理缺损区通过多视图冗余影像块重采样并执行局部配准,保留纹理一致性并恢复视觉表达完整度。

修复后成果经残差再配准与RMSE校验,确保整体精度控制在 ± 0.15 m以内。系统自动输出异常区矢量图层与处理日志,支持成果质量可视化、存档与审查。

3 选址过程中的航测精度影响因素分析与自动化控制方法

为保障输变电线路前期选址数据成果满足工程设计要求,需对多模航测数据在不同地貌下的精度表现进行实测验证,并建立自动化精度控制策略。

3.1 不同地形类型对精度影响的实测对比

针对典型输电走廊工程,在平原、丘陵、林区三种典型地貌类型下分别组织多模航测作业,并选取RTK控制点进行精度验证。精度分析涵盖不同地形条件下的RMSE误差、点密度变化、配准一致性与分类能力,结果如表3-1所示:

表3-1 不同地形条件下航测数据精度对比

地形类型	平面精度 RMSE_xy (m)	高程精度 RMSE_z (m)	点密度 (pts/m ²)	数据一致性 CE (m)	特征识别率 FR (%)
平原区域	0.078	0.092	21.6	0.038	94.3
丘陵区域	0.094	0.137	19.2	0.053	91.5
林区区域	0.115	0.176	14.7	0.067	87.2

实测数据显示,林区场景中点云穿透率下降,造成高程误差和一致性误差显著上升,特征识别率亦因植被遮挡而下降。平原区域具备最优精度表现,适合采用轻量化数据处理流程;丘陵与林区则需引入冗余采样、双向航线与滤波增强等策略以维持数据质量稳定性。

3.2 自动化优化算法与控制策略

为降低复杂地形对航测精度的影响,构建以三维空间误差约束为核心的自动化精度优化体系,主要包含航线动态调整、点云滤波优化与模型联合配准三方面:

(1) 航线动态调整:基于地形高差自适应调节航高与重叠率,保持地面分辨率稳定,提升点密度与影像质量;

(2) 点云滤波优化:采用体素网格重构与法向量平滑滤波,增强地物边缘清晰度,抑制林区与斜坡区域噪声^[5];

(3) 影像-点云联合配准: 构建纹理与高程耦合残差函数, 利用最小二乘估计优化配准参数, 实现模型误差协同控制。

控制上采用闭环精度反馈, 布设监测控制点实时校验误差, 并建立成果质量等级标记机制, 实现数据自动化筛选与回溯, 提升选址成果精度与交付稳定性。

4 基于航测多模数据输变电线路前期选址案例

以安徽省池州市东至县110kV黄渡变至胜利输电线路工程为应用案例, 线路全长约27.6 km, 途经丘陵、林区、水塘与农田交错的复杂地貌, 需满足双回路铁塔布设、林地避让及通道可行性分析等工程需求。测区面积约72.4 km², 线路走廊覆盖宽度200 m, 采用垂直起降固定翼无人机搭载激光雷达与五镜头倾斜摄影系统, 配套POS AV导航单元实现多源数据时空同步, 于2025年3月中旬完成航测作业, 总航线长度336km, 作业周期3天。

本次采用同平台同步采集模式, 航高设定为250 m, 纵向重叠率75%、横向重叠率65%, 地面分辨率优于10 cm, 点密度目标不低于20 pts/m²。原始数据经专业软件完成波形解算、自动滤波、裸地提取与三维重建, 基于CGCS2000坐标系实现点云与影像模型融合配准, 输出GeoTIFF、DSM、OBJ等标准成果, 并完成塔基点位自动布设与通道宽度分析。数据处理采用GPU加速, 总处理量188 GB, 整体建模耗时约12小时, 成果通过第三方验收并接入国网输电通道预选平台。

4.1 精度评估结果与对比分析

项目选取52个独立RTK控制点(未参与建模)进行精度验证, 并分别对激光雷达数据、倾斜摄影成果与多模融合数据进行误差统计分析。结果如表4-1所示:

表4-1 不同航测方式在实测工程场景下的精度对比结果

指标类型	激光雷达结果	倾斜摄影结果	多模融合结果
平面精度 RMSE _{xy} (m)	0.085	0.122	0.073
高程精度 RMSE _z (m)	0.110	0.153	0.089
点密度 (pts/m ²)	22.8	18.5	24.6
数据一致性 CE (m)	0.042	0.058	0.035
特征识别率 FR (%)	95.1	91.6	96.7

从表4-1可以看出, 多模融合数据在所有精度评价指标中表现最优。高程精度提升约19%, 平面误差缩减至0.073 m, 同时具备更高点密度与更强的模型一致性。特征识别率方面, 多模融合依托影像与点云互补特性, 在植被遮挡严重的区域依然保持较高地物提取率, 有效支持障碍物分类与通道布设。

此外, 工程技术组实地对比布设的初始塔位与多模模型中的路径识别结果, 在28个选点中有26个位于可施工平台或坡度<10°地带, 塔基优化率为92.8%, 显著降低后期塔位调整工作量。

4.2 多模数据应用

在本案例中, 多模航测数据不仅用于构建基础选址地形信息, 还在多项关键环节实现高效应用:

(1) 塔位预选智能分析: 基于DEM自动提取可布塔区域, 输出初选塔位点143个供设计复核^[6]。

(2) 通道净空三维建模: 融合点云与三维模型, 按10 m间距完成三维净空计算, 支撑防护距离设计。

(3) 林地与障碍物统计: 自动分类地物要素, 输出林地穿越与风险分布, 辅助通道避让优化。

(4) 施工路径模拟: 基于三维模型仿真施工路线, 评估机械可达性与施工条件。

工程实践验证了多模航测在选址全过程中的数据支撑与决策辅助优势, 可为同类电力线路规划提供可复制的技术路线。

5 结语

输变电线路前期选址对空间数据的精度、覆盖与处理效率提出了系统化要求。本文基于激光雷达与倾斜摄影的多模航测系统, 构建了从数据采集、自动处理到建模分析的完整技术路径, 提出了适配输电工程场景的精度评价指标体系, 并通过实测案例验证了多模融合在精度提升、异常修复与工程适应性方面的技术优势。结果表明, 多模航测不仅显著优化路径识别与塔位布设流程, 也为通道净空分析、障碍物避让与施工规划提供了可靠的数据基础。该方法具备良好的可推广性, 适用于多地形复杂区域的输电工程选址应用, 为电力工程空间决策提供了更高效、更智能的解决方案。

[参考文献]

[1] 杨文杰. 基于机载激光雷达点云的输电线路关键部位语义分割研究[D]. 华北电力大学, 2024.

[2] 张睿卓, 唐杰, 张思, 等. 激光雷达探测输电走廊安全风险研究现状[J]. 测绘通报, 2024, (01): 51-57.

[3] 陶晰, 杨杰. 输电线路多旋翼无人机激光雷达点云数据自动分类技术研究及应用[J]. 电气技术与经济, 2023(6): 135-137.

[4] 刘宁宁. 道路目标的雷达自动分类识别技术研究[D]. 电子科技大学, 2022.

[5] 刘晓磊, 郑顺义, 许磊. 基于LiDAR点云数据的电力线自动提取算法研究[J]. 测绘地理信息, 2017, 42(04): 13-16.

[6] 王鹤, 刘军, 王秋玲. 利用无人机影像进行滑坡地形三维重建[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(12): 68-71.

作者简介:

张中(1988—), 男, 汉族, 甘肃天水人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 输变电工程航测及其应用关键技术研究。