

无人机激光雷达在输电通道树障测量中的应用

王 昊

国网西藏电力有限公司超高压分公司 西藏 拉萨 850000

【摘 要】：复杂地形输电通道树障隐蔽性较强，人工巡检存在采集偏差，隐患漏检、运维处置不够及时，本文搭建全流程无人机激光雷达点云采集体系，适配山地、跨江、林区巡检场景，调试设备搭载、航迹规划、数据质控流程；依托 CSF 滤波、Hough 变换、密度聚类算法处理点云，分割电力设施与植被并重构模型，搭建净空测算、电场耦合研判体系，完成树障量化分析。取用五省份巡检数据开展对照试验，实测数据印证，相较于人工、可见光航拍巡检，方案通道覆盖率 99%，测距误差±3cm，隐患漏检率降至 2%；投入工程应用后，输电树障跳闸故障同比下降 62%。研究可输出输电通道树障智能化管控技术方案，推动电网运维前置开展安全预警。

【关键词】：无人机激光雷达；输电通道；三维点云；树障检测；智能运维

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.023

引言

输电线路穿行山林、河谷、水域各类地貌，植被肆意生长诱发树线放电、线路跳闸事故，成为电网运维核心安全风险。现有人工徒步巡检受地形阻碍，采集数据存在偏差，可见光航拍缺少三维空间维度数据，不能甄别侧边枝杈潜藏隐患，现存点云技术适配能力薄弱，地物分类混杂、风险分级标准粗放，无法匹配超高压线路运维要求。整合无人机巡检、激光雷达三维测绘两类技术，搭建采集、预处理、研判、落地一体化技术框架，依托多地现场工程数据打磨算法参数与作业准则，对标传统巡检模式核算技术成效，推进电网运维数字化落地，强化极端工况输电通道安全管控水平。

1 无人机激光雷达输电通道点云数据采集体系

1.1 机载激光雷达设备选型与搭载方案

山区、跨江、林区各类输电通道工况不同，搭载机载激光雷达需要匹配对应载重、测距指标与点云密度参数。行业轻量化机载设备整体载重限定 1.3kg 以内，适配六轴巡检无人机搭载平台，长距离超高压线路可装配多回波激光雷达，穿透外层枝叶采集林下地形、树干三维坐标数据^[1]。设备依托减震云台刚性固定，削弱机体晃动带来的坐标偏移问题，配套集成存储单元同步留存惯性定位、差分定位、航拍影像三类数据。南方电网 500 千伏山地运维线路实地测试中，搭载多回波雷达的中型无人机，采集林下植被点云完整度相较单回波设备提升 37%，预留外置摄像对接端口联动影像数据，达成空间时序对齐。整套设备无需改动机身结构，野外拆装耗时控制在 15 分钟，适配多点位连续外勤作业场景。

1.2 输电通道航迹规划与外业扫描作业流程

输电通道无人机三维扫描航迹规划，调取杆塔坐标、通道地形 DEM 高程、实时风速三类基础参数搭建运算模型，舍弃固化单行扫描航线，组合分段平行航线、垂直导线交叉航线重构飞行路径，优化扫描采集效果。飞行主线布设至导线正上方，

输电通道两侧 30 米范围增设侧向辅飞航线，抵消山体遮挡、密林遮蔽造成的数据缺损，填补边界采集盲区。航线飞行高度绑定线路电压等级划分阈值，兼顾飞行安全与采集质量：110kV 线路离地航高 40m，220kV 线路航高 50m，500kV 线路航高 70m；扫描重叠参数固定横向 80%、纵向 60%，稳固海量点云拼接效果，减少后期三维建模形变误差。现场外勤作业拆分坐标校对、分区扫描、补飞核验三项固定工序。一处总长 25.9 公里跨省 110 千伏林区输电工程内，无人机按照预设航迹自主巡航，全线三维点云采集耗时仅 2 天。规避户外环境扰动，外勤锁定上午 9 时、下午 3 时光线平稳时段开工，避开正午强光、晨间薄雾损耗激光反射信号。飞行采集同步配套分段核验，每完成 5 公里线路扫描调取原始点云，树冠密集、峡谷遮蔽这类信号薄弱区域，切换定点盘旋模式补强采集，填补模型数据空洞。优化整套外勤流程后，单个作业班组单日可完成 12 至 18 公里通道扫描，压缩输电巡检整体工期。

1.3 多源原始数据同步采集与质量校验标准

作业阶段同步归集激光点云、GPS 定位、惯性姿态、航拍影像四类数据，叠加统一时间戳归档存储^[2]。原始采集数据囊括激光三维坐标、回波强度、反射次数、拍摄像素矩阵四类基础信息，数据质控引入均方根误差 RMSE 作为评判依据，点位匹配测距误差管控阈值划定±3cm。拼接产生超标 RMSE 数值判定航线偏移，开展局部补飞校正。搭建多层级核验准则把控数据成色，首轮核验原始点云疏密程度，树障重点区段布设点位密度不低于 50 点/m²，开闭输电通道点位密度下限 20 点/m²；次轮核验坐标配准效果，杆塔实测基准坐标对标点云提取坐标，偏移幅度控制 5cm 以内；末轮核验影像、点云时空联动效果，同一杆塔点位成像、激光扫描时序差值小于 0.02s。南方超高压运维机构跨省五地、跨季度采集数据集期间落实这套核验标准，筛除 12%密度不达标、坐标偏移超限的无效数据，筑牢树障测算底层数据源可靠性。

2 输电通道激光点云预处理与地物分类技术

2.1 原始点云滤波去噪与坐标配准处理

无人机外业采集生成的机载原始激光点云混杂成分繁杂,数据字段内部裹挟空中飞鸟、漂浮云雾、坡面松动碎石等各类外界干扰点位,巡检作业期间机载传感组件高频震动持续扰动采集信号,催生海量无序离散噪声点位,直接干扰电力设施目标辨识效果,拉低全域三维重建建模水准。数据预处理落实分层处置逻辑,调用布料模拟滤波 CSF 算法剥离地表冗余杂点,拆分地面基准点位与杆塔、导线、山林植被各类电力关联目标点位。依托固定高程阈值筛选规则清理高空悬浮零散噪点,完成首轮原始数据集净化工作^[3]。降噪作业结束后绑定高精度 GPS 差分坐标开展全局配准,把机体系下碎片化零散点云统一转换至 2000 国家大地坐标系,消解分段巡航飞行引发的坐标偏移、数据断层割裂问题。地形落差剧烈的跨江、深山峡谷输电区段,叠加专属高程分段校正工序,抵消大气折射衍生测距偏差,严控纵向坐标累积误差。选取长江主干段 220 千伏跨江输电线路开展现场实操核验,整套预处理工序落地运行后无效噪点剔除率达到 91%,杆塔、导线、植被三类地物点位边界区分清晰,全线三维模型衔接连贯顺滑,不存在分层错位、曲面撕裂问题,为后续地物拆分、输电通道隐患研判输出标准化纯净数据源。

2.2 基于 Hough 变换的电力线、杆塔点云提取

滤波、坐标配准工序收尾后,引入 Hough 直线变换算法筛选电力线点云,依托极坐标公式 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ 归集同向排布导线点位,参数空间相交坐标匹配单根导线空间参数,拆分多分裂导线点位完成矢量化拆分。处置杆塔点云先执行图像腐蚀运算,剥离贴合塔体表层的导线杂点,再开展膨胀运算圈定杆塔连通域点位,叠加高程聚类划分塔头、塔身、塔基分层结构。调取山区 500 千伏输电线路开展点位提取试验,整套算法省去逐基杆塔人工标注流程,全域 99 基杆塔、四分裂导线采集完整度可达 98.7%,绝缘子遮挡造成的零星异常点位仅需小幅人工修正。对标手动描线作业模式,线路特征提取工时缩减 70%,落地电力构件自动化拆分作业。

2.3 植被点云分割与树木三维轮廓重构方法

筛除非地面类别点云内部电力构件、建筑点位,留存点位归集为植被原始数据集。调用密度聚类算法切割独立林木边界,依托树冠点位分布构建三维凸包模型,复原林木外部立体轮廓,同步读取树冠顶点、树干基底坐标、冠幅半径、竖向树高多项特征参数。选取连片茶园覆盖的 500 千伏输电通道开展现场实测,这套分割重构算法可划分 700 余株独立乔木,自动生成连贯林木三维轮廓,留存树冠偏向导线一侧延伸枝杈的空间坐标,弥补二维航拍缺失林木竖向长势、风偏形变特征的短板。林木三维轮廓绑定对应杆塔分段编码,打通植被点位、输

电区段一一对应的映射关系(见图1)。

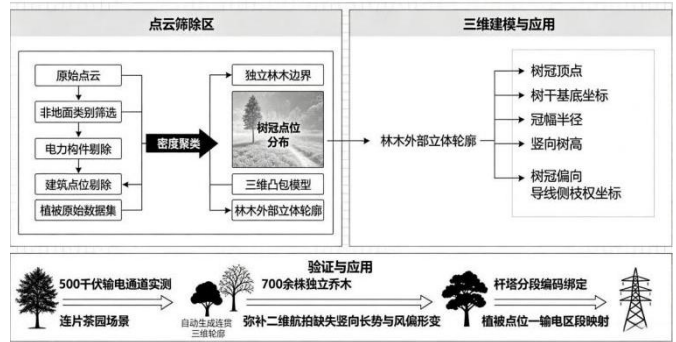


图1 植被点云分割与树木三维轮廓重构方法

3 基于三维点云的树障精准测量与隐患判定模型

3.1 分段截面三维净空距离计算数学方法

依托矢量化电力线作为参照基准,顺着导线延展方向均分剖切截面,套用三维空间距离公式 $d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}$ 逐截面核算导线点位、林木凸包轮廓点位空间间距,拆分垂直净空、水平风偏净空两类测算维度。程序遍历单株林木全部树冠采样点位,提取线路最短间距作为树线安全研判依据。摒弃单一竖向高度核验模式,三维截面测算能够捕捉枝干侧倾、树冠横向延展催生的潜藏隐患。东部林区 220 千伏输电线路实地测验期间,这套算法识别 23 处垂直高度合规、水平间距低于 4.5 米的隐性树障,同类隐患无法依靠人工目测、常规航拍完成辨识。

3.2 树高参数提取与线路场强关联量化分析

调取重构完毕的林木三维轮廓,直接输出单株树木竖向高度 h ,搭建场强关联函数 $E=f(h)$ 量化树高扰动对导线周边电场的作用效果。线路通道工况对称场景内,锁定树冠体量、运行电压等级等外部变量,求解不同树高对应的场强变化导数 $f'(h)$ 。导数数值偏大,对应高度区间树木小幅长势即可推升周边电场强度,处于高场强区间的林木划入重点动态监测台账^[4]。南方运维机构梳理四季林区巡检数据集,树木高度贴近安全阈值阶段,电场变化速率涨幅超 3 倍。结合实测规律划分复测频次,高场强风险林木按季度开展雷达扫描,负面影响偏弱林木执行年度复测,落实输电通道树障分级动态管控。

3.3 分级安全阈值设定与树障隐患自动标识

依照《架空输电线路运行规程》划定电压适配安全阈值,110kV 基准限值 4m、220kV 限值 4.5m、500kV 限值 7m。叠加属地气象环境增补安全缓冲余量,台风、强对流频发区域额外预留 2m 防护间距。对照实测净空数值与规范阈值偏差划分四级隐患档位,囊括安全、预警、高危、紧急清障四类等级。系统判别空间距离 d_i 超限后,自动对对应林木三维模型叠加红色标识,同步归集点位坐标、树体高度、最小通道间距、隐患档位、归属杆塔区段全量台账信息。西南丘陵 110 千伏桉树输电

线路落地测试，平台自主甄别 132 处高危、紧急层级树障，点位偏差维持分米区间，生成台账直接联动运维工单平台，省去外勤复测、手动填报数据流程。

4 实测对比实验与工程应用效果分析

4.1 多场景实验数据集构建与分组设计

实验数据源取自五处地貌差异化省份，囊括山地林区、跨江水域、农田经济林、城郊绿化带、丘陵灌木五类输电巡检场景，采集周期贯穿春夏秋冬全季度，固定每日上午 9 时、下午 3 时两个时段同步采样。数据集整合 2000 份机载激光雷达点云、1500 组直升机航拍影像，按 7:3 拆分训练样本、测试样本。搭建三组对照实验组别，划分人工徒步巡检、可见光航拍、激光三维融合采集三类作业模式，实测线路覆盖 35kV 至 500kV 全电压梯度，巡检总长突破 3000 公里，囊括电网树障运维全部现场工况，保障比对结论适配一线工程场景。

4.2 人工/普通航拍/激光雷达测量指标对比

依托三类巡检模式开展多维度指标量化比对，山体遮挡、密林阻隔会压缩人工巡检通行范围，通道有效覆盖率仅有 82%，线路单程巡检单公里耗时 120 分钟，测距依托手持设备配合目视判读，平均测量偏差 1.2 米，侧向隐蔽枝杈隐患漏检占比突破 40%。常规航拍仅能生成二维影像，无法解算三维净空参数，只能粗略判定林木长势异常，空间量化偏差 0.7 米，树冠下层遮挡点位无法识别^[5]。无人机激光雷达作业覆盖范围可达 99%，单公里外勤耗时压缩至 5 分钟以内，三维测距偏差稳定维持±3cm，树冠内部、侧向延伸枝干潜藏隐患漏检率控制至 2% 以下。依托跨江 220 千伏线路开展对照测验，激光雷达工况隐患识别效率高于人工巡检 40%，一线运维人力投入压降 30%，投入山区复杂场地后作业效率提升 24 倍（见图 2）。

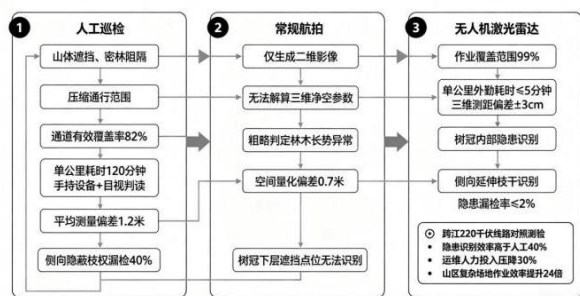


图2 人工/普通航拍/激光雷达测量指标对比

参考文献:

- [1] 刘海波,张苏,荣经国,等.基于多源遥感数据的输电通道森林地上生物量扰动分析[J].测绘通报,2025,(11):15-21+39.
- [2] 张天浩.融合视觉与激光雷达点云的输电通道安全监测技术研究[D].东南大学,2025.
- [3] 焦靖哲,景超,张兴忠,等.基于 3D 点云的输电通道空间隐患检测方法[J].应用激光,2025,45(3):114-126.
- [4] 焦靖哲.基于 3D 点云的输电通道障碍物感知研究与应用[D].太原理工大学,2024.
- [5] 李旭晖.基于深度学习的输电通道激光点云杆塔部件识别方法[D].兰州交通大学,2024.

4.3 树障测量数据整合与电网运维落地应用

归集激光雷达生成的隐患台账、三维点云模型、季度复测时序数据，统一汇入电网运维故障数据库。取用杆塔分段坐标作为关联索引，匹配线路历史跳闸、放电故障台账，统计高风险林区故障频次搭建树障风险评估模型，搭建单线专属林木数字化档案，同步生成制式清障工单，标记林木点位、修剪参考高度、现场安全管控准则。多地供电机构落地应用这套体系，年内闭环处置数千项线路隐患，树线间距不达标诱发的跳闸故障同比回落 62%。雷达采集的林木空间数据，能够支撑林区青苗赔付核算，规避人工估测带来的赔付纠纷。逐年归集复测数据推演林木生长速率，提前排布次年通道整治任务，扭转故障抢修的被动运维模式，完成输电通道树障前置防控的智能化升级。

5 结语

本文搭建适配多类输电工况的激光雷达巡检成套技术，补齐外勤采集、点云解算、隐患研判全流程作业规范，依托现场实测核验技术可靠性与工程落地能力。这套技术弥补二维巡检固有缺陷，识别潜藏树障隐患，削减运维人力开支，压低线路跳闸概率，兼顾林区青苗赔付核算、植被长势预判衍生价值。极端天气引发大气折射扰动点位精度、高密度遮蔽区域微弱点位提取，仍是现阶段技术短板。叠加跨季度时序数据迭代算法参数，联动气象因子校正采集误差，搭建自动化运维联动平台，打通测绘解析、风险研判、现场清障闭环链路，夯实输电线路长效安全运行基础。