

无人机航拍数据在线路隐患排查中的准确性探讨

魏珂¹ 田向科² 杨文淼² 庞统² 丁一²

1.国网河南省电力公司焦作供电公司 河南 焦作 454000

2.国网河南省电力公司沁阳市供电公司 河南 沁阳 454500

【摘要】：随着输电线路由传统的地面架设方式逐步演变成立体架设、远距离、大跨越、高悬挂空间的配置方式，线路运行安全越来越依赖对空间状态的精确掌握。导线相对于线路走廊范围内的各类区域目标（主要包括与其他跨越物、边坡以及各种建筑物等）的位置关系主要是空间上的几何位置关系，即三维几何约束关系，而人类通过肉眼观察或者地面单幅影像判读的手段无法看到实际的空间位置情况，所以不能准确地识别隐患的真实空间位置。通过搭载了激光雷达和高精度定位系统的无人机来获取多源多时相无人机航拍数据，可以将线路与通道环境等以高分辨率点云模型同时映射到同一个空间坐标系中，从而实现从“视觉判断”到“空间量测”的转变。因此下文将对无人机航拍数据在线路隐患排查中的准确性进行探讨，以供参考。

【关键词】：无人机航拍；线路隐患排查；航拍数据；准确性

DOI:10.12417/3041-0630.26.02.002

近年来，电网输电线路延伸到山区、高林密区、城镇交叉区，线路通道空间受限、植被生长快、外破隐患多、极易导致隐患呈现“隐蔽化、空间化、动态化”等特点。单纯依靠人工巡线、单一图像巡检等传统手段难以及时有效发现隐患。无人机携带激光雷达对输电线路高密度扫描并形成高精度点云建模，通过在每个杆塔上精准打点的方式可使线路从“二维影像描述”升级到“真实三维数字映射”，为进一步开展隐患识别奠定定量依据。

1 无人机航拍数据获取与建模体系

1.1 航拍数据的获取方式

无人机巡检系统中的航拍数据采集是通过激光雷达载荷和高精度飞控系统相互配合实现的。在某一路线范围下，在指定杆塔位置以及通道边界的前提下完成系统扫描工作，再由无人机在飞行的过程中按照预先设置好的扫描频率、发射角度以及高度参数，不断地发射出激光脉冲，对线路上的导线、杆塔、植被、地面目标进行多次回波采样，从而得到具有空间坐标的原始点云数据。通过规划飞行航线，采用条带式分布的方式沿线路飞行，并采用旁向、航向重叠的方式获得各个扫描带之间的有效交叠来减小遮挡和漏扫所带来的空缺^[1]。

1.2 杆塔打点与线路空间基准构建

在输电线路无人机扫描建模作业中，可采用无人机携带定位及激光测距的方式进行打点，获得每基杆塔的塔基位置、塔身轴线以及一些重要零部件等的三维坐标。根据事先准备好的线路杆塔清册及起始桩号和终止桩号，沿着途经的路线进行低空悬停定点扫描和多角度采样，从而使输电杆塔的塔顶、横

担、基脚及其他结构部位在点云内呈现完整的几何形态。对所有的杆塔坐标进行统一投影与时序配准后，将其收束于同一空间之内，并利用杆塔坐标建立导线点云之间的空间定位约束关系。杆塔作为控制点所建立的线路骨架，使得不同的档距范围内的各个挡距导线、跨越结构、通道边界均可以在模型空间内有一个彼此联系在一起的拓扑关系。其在后续三维建模过程中的位置、弧垂以及到旁边树木、建筑物之间的距离均由杆塔本身作为起点来衡量并确定距离尺寸，从而形成稳定一致的线路空间表达体系。

2 影响无人机航拍数据准确性的关键因素

2.1 飞行参数与扫描几何条件

在输电线路扫描过程中，无人机的航高、航速和激光发射频率决定了最终点云空间分辨率。如果无人机距离过近或飞行速度不匹配扫描频率会导致线路上杆塔间的扫描参数匹配不当，使得线状目标在点云图像中出现断片现象。此外，由于两个侧面投影相距较远而造成的相邻扫描条带之间存在较大空洞也会影响到两个侧面投影之间的几何重构，尤其是在植被遮盖或者跨越较为复杂的线段、重叠度较小的情况下容易出现这种情况，导致几何重构完整度有所下降。

2.2 传感器稳定性与定位精度

在输电线路激光航测的过程中，机载传感器的状态是否稳定、定位计算是否精准直接影响点云坐标形成。而激光雷达和惯性导航单元在在高速飞行条件下应当保持时间上的严格同步以及姿态上的充分耦合，否则就有可能出现如下情形：在作业飞行过程中，假如在滚转角、俯仰角或航向角发生了很小

第一作者简介：魏珂（1993.10），性别：男，民族：汉族，籍贯：河南焦作，学历：硕士，职称：工程师，研究方向：配网运检、配网无人机。

的漂移,则会导致导线和杆塔在点云中出现相应的位置偏移;卫星定位模块在山坡地带、树林地区、城镇中心地带或者高密度楼宇之间穿行的时候,受多路径效应以及可见卫星数量的不同而产生瞬时定位解算的变化,都会造成相邻的扫描条带产生错位。

2.3 地物遮挡与环境复杂度

在输配电线路无人机激光扫描中,地物遮挡以及环境的复杂程度会严重影响到点云数据完整性的获得,且在密布植被区的地物树冠层会对激光束实现数次的反射和遮挡,造成线路下方或塔身背面出现扫描死角,在单一切线高度时容易造成空间上的空白^[2]。除此之外,城镇区内各个建筑群房屋的外墙和各类构筑物会对激光发射的位置造成散射状干涉,在点云上的导线和横担等都会呈现间断的分布情况;对于跨越公路、河流以及其它的通信设施线路区段来说,在线路上导线和地面之间的高度是属于同一水平面内,所以此时回波信号可能会发生重叠。

2.4 点云处理与分类精度

在输配电线路激光扫描建模时,点云处理与分类精度直接关系到导线及周围地物的空间表达效果,为消除噪声、去除非目标物的异常点,应对原始点云进行预处理,以去除点云噪声、离散点、孤立点等杂质,否则会因这些因素导致在后续间距、通道等计算上存在误差,干扰到后面的导线、杆塔等线性要素定位精度的确定。分类阶段依据高度分布、点密度特征及空间连续性对地面、植被、导线、杆塔及建筑物进行分组,其中导线点具有细长、线性且高程变化连续的特征,一旦分类阈值设置偏差,易被误并入植被或背景类别。杆塔构件在点云中呈现规则几何形态,其识别依赖于空间聚类与形态约束算法,当塔身与周边建筑物距离较近时,类别混淆将导致塔位偏移。

2.5 杆塔基准与航线一致性

在输配电线路无人机巡检体系中,杆塔基准与航线一致性共同约束点云模型的空间稳定性,在杆塔打点过程获取的塔基坐标、塔身轴线以及横担节点形成线路三维骨架,如果出现单个杆塔定位存在系统性偏移,必然导致前后相邻档间导线空间解算呈现同幅同步的漂移,反之如航线规划中没有严格绑定杆塔基准模型,则飞行轨迹和真实线路走线的方向距离会产生一定的偏移,导致不同航线次序、同一导线位置点云差异较大。

3 提高无人机航拍数据在线路隐患排查中准确性的策略

3.1 以杆塔三维基准约束航线规划体系

在输配电线路无人机激光扫描作业中,以杆塔三维基准约束航线规划需依托项目实施阶段形成的杆塔打点成果,将塔基

坐标、塔身中心轴线及横向节点构建为统一空间控制框架,并作为航线设计与飞行控制的几何参照,使无人机飞行轨迹在空间上与实际线路走向保持刚性一致,在17条输电线路与9条配电线路扫描建模任务中,应基于已获取的900基杆塔点位反演导线悬垂曲线与档距分布特征,对航点位置、航向角及飞行高度进行约束性校正,避免因航线偏移导致导线点云在相邻条带间产生系统性错位,在跨越密集植被区、城镇区及交叉跨越区段时,通过将杆塔三维模型与精细航线参数联动,使扫描路径始终围绕导线空间包络展开,同时结合多高度层扫描策略对塔身背向区域进行补偿覆盖,从而保证不同航次获取的点云数据能够在同一杆塔基准体系下完成精确配准与空间对齐。

3.2 基于线路形态特征优化飞行参数配置

在输配电线路无人机激光扫描建模过程中,飞行参数配置需以线路悬垂形态、档距变化及杆塔空间分布为约束条件进行精细化设定,在长档距及大跨越区段应通过降低航高并同步控制飞行速度与扫描频率,使激光束在导线表面形成连续致密的采样带,避免点云沿线路方向出现稀疏断裂,在转角塔及耐张塔密集区段需通过提高航向与旁向重叠率,使横担、绝缘子串及导线连接部位获得多角度扫描覆盖,从而抑制遮挡引起的结构缺失,在城镇区与密集植被区应结合项目方案中分层扫描策略,分别在导线高度层与塔身高度层布设航线,使导线与背景地物在回波维度上保持分离,在扫描频率与飞行速度匹配关系上,通过将脉冲发射间隔与无人机地速进行动态耦合,使相邻激光足迹在导线宽度尺度内保持稳定重叠,从而维持导线空间轮廓在点云模型中的连续表达^[3]。

3.3 针对遮挡场景实施多路径扫描组织

在输配电线路无人机激光扫描作业中,针对密集植被、城镇建筑及多线交叉区段的遮挡特征,应在项目实施阶段依据现场勘察结果对扫描路径进行多航向、多高度组合布设,使激光束从正向、侧向及斜向同时覆盖导线与塔身空间,在树冠覆盖严重的线路通道内,通过设置低仰角侧扫航线并配合中高度主扫航线,使激光从树冠侧缘及下方进入导线分布区,削弱垂直扫描条件下形成的遮挡阴影,在跨越道路、河道及通信设施的复杂区段,通过调整传感器扫描角与飞行高度,使导线回波与地面及构筑物回波在高度维度上保持分离,同时结合多条带重叠扫描获取导线在不同视角下的补充点集,在点云拼接阶段以杆塔三维基准对多路径获取的数据进行配准,使被遮挡区段的导线与横担轮廓在模型中形成连续完整的空间表达。

3.4 通过姿态与定位协同校正稳定点云坐标

通过姿态与定位协同校正稳定点云坐标是在无人机航拍解算过程中,将飞行器姿态角、航向信息与卫星定位结果统一纳入同一坐标调整框架,在影像匹配与点云生成的同步阶段对

每一条航迹的滚转、俯仰与偏航变化进行动态补偿,使影像投影关系与实际飞行状态保持一致,再以地面控制点和杆塔基准坐标作为外部约束,对GNSS定位在遮挡、反射及高度波动条件下产生的漂移进行逐段修正,通过最小二乘平差方式对航线间的重叠区域实施联合调整,使不同架次获取的点云在同一空间基准下完成拼接,在此基础上将导线与塔位的已知空间关系引入姿态解算结果中,对局部点云中出现的扭曲和错位进行二次约束校正,使跨距方向的导线轨迹在多角度观测下保持一致,从而在点云整体结构中消除由姿态不稳和定位误差引起的累积偏移,为后续隐患坐标判读提供稳定可靠的空间参考。

3.5 以导线与杆塔特征约束点云分类流程

以导线与杆塔特征约束点云分类流程是在无人机航拍点云解算完成后,将输电线路构件的几何特征直接引入点云分割与标注环节,通过对导线在跨距方向上呈连续细长分布、在垂向上具有稳定弧垂变化规律以及在局部邻域内点间距均匀的特性进行量化描述,先行锁定疑似导线点集,再以杆塔点云在高度方向集中、底部存在规则基座平面且与导线连接位置固定的空间形态作为约束条件,对支撑结构同步提取,使导线与杆塔在同一分类框架内建立明确的拓扑关联,在此基础上对周边植被、地面及附属设施点云实施逐级剔除,仅保留与导线弧行走势和塔位节点关系一致的点集,从而避免背景点混入线路类别,同时将航线姿态解算结果与杆塔实测坐标进行配准校核,对不同架次点云中同一塔位的空间偏差进行统一调整,使导线点云在多视角叠加后保持连续一致的几何轨迹,为后续跨距分析与隐患定位提供稳定的分类基础。

参考文献:

- [1] 陈杰,唐占元,安之焕,等.基于无人机采集图像的输电线路异常检测方法研究[J].电测与仪表,2023,60(7):122-127.
- [2] 方博,吴阳阳,陈远登,等.小型无人机在输电线路故障排查定位中的应用[J].自动化应用,2023,64(1):113-116.
- [3] 许强,张柯龙.无人机输电线路通道树障隐患识别与故障数据整合研究[J].电气时代,2025(9).

3.6 基于模型反演结果校验隐患判读位置

基于模型反演结果校验隐患判读位置的技术路径是在无人机航拍点云与影像解算完成后,将导线弧垂曲线、杆塔节点坐标及跨距参数输入到线路几何反演模型中,对各相导线在实际工况下的三维空间形态进行重构,并以该反演模型输出的标准导线轨迹作为空间参考框架,将图像识别或点云分析得到的隐患目标坐标投影到对应跨距的导线曲线上,通过计算隐患点到反演导线中心线的最短空间距离以及在跨距方向上的相对位置比值,对其是否处于真实导线附近进行一致性检核,当判读点在高度、横向偏移或跨距位置上与反演结果偏差超过设定阈值时即触发自动修正,将该点重新映射到反演曲线约束下的合理位置区间,同时结合杆塔基准点的已知坐标,对隐患点到相邻塔位的距离进行双向比对,以消除由航姿误差、影像拼接偏移或点云稀疏造成的位置漂移。

4 结语

总而言之,唯有将无人机航拍技术嵌入到严密的空间基准体系和几何约束框架中去,才能最终实现由“获取影像”转向“表达真实线路形态”,这也是本文建立杆塔为中心控制点、以导线几何形态为约束对象、以姿态与定位协同解算为基础精度控制体系的目的。由本体和相机载荷获取的航拍信息将不再是零散的点云集合,而是一套具有明确物理意义、工程使用价值的线路数字图景。在这种情况下,隐患点的识别就不是用单一的照片或是局部点集来做简单的判断,而是通过多源数据在一个空间框架下的互相校核来实现精确收敛,极大程度上避免错误和漏识的情况发生。