

# 基于无人机与激光点云的高压输电线路缺陷智能识别

云 磊

中国南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

**摘要：**本文聚焦基于无人机与激光点云的高压输电线路缺陷智能识别。首先阐述高压输电线路核心设备缺陷（如杆塔倾斜、绝缘子破损等）与外部隐患缺陷（如树障入侵、异物悬挂等）的类型与特点。接着介绍无人机巡检系统组成、激光点云技术原理及二者融合优势。然后说明激光点云数据处理流程，包括采集预处理、目标分割与特征提取。最后提出基于深度学习的缺陷智能识别模型架构、优化策略及缺陷等级评估模型。该研究为高压输电线路缺陷识别提供了高效、精准的技术方案。

**关键词：**高压输电线路；无人机；激光点云；缺陷识别；深度学习

## 1 高压输电线路典型缺陷类型

### 1.1 核心设备缺陷

核心设备缺陷涉及杆塔、绝缘子、导线及金具等关键部件，其隐蔽性强、危害程度高。杆塔缺陷包括倾斜、基础沉降、螺栓松动及塔身锈蚀，多由地质灾害、振动或温差引发，倾斜超 $3^\circ$ 或基础位移可能导致倒塔；绝缘子缺陷涵盖破损、污秽积污及零值绝缘子，雷击、外力撞击或绝缘劣化是主因，破损后易引发闪络；导线缺陷包括断股、磨损及弧垂异常，覆冰、舞动或雷击可导致断股超7%时需紧急处理，弧垂异常则可能引发对地放电；金具缺陷以变形、锈蚀为主，长期振动或腐蚀会导致连接失效，增加导线脱落风险。此类缺陷需通过高精度检测技术（如激光点云、红外热成像）实现早期识别，防止故障扩大。

### 1.2 外部隐患缺陷

外部隐患缺陷由线路周边环境因素引发，具有动态变化、影响范围广的特点。树障入侵是常见隐患，大风或雷雨天气易导致短路，速生树种（如杨树）需高频监测；异物悬挂多由人为或自然因素导致，塑料薄膜、风筝线等轻质或金属异物可能引发接地或相间短路，节假日期间风险显著；交叉跨越安全距离不足涉及线路与公路、铁路等交叉区域，跨越距离不达标时，车辆或树木倒伏易导致跳闸；地质灾害威胁（滑坡、泥石流）主要发生在山区，灾害会破坏杆塔基础，需结合空间监测技术（如卫星遥感）实时预警。此类隐患需通过动态巡检与智能管控降低风险<sup>[1]</sup>。

## 2 无人机与激光点云的技术融合原理

### 2.1 无人机巡检系统组成与工作原理

无人机巡检系统由飞行平台、任务载荷、地面控制站三部分组成。飞行平台采用多旋翼或固定翼无人机，

具备自主导航、避障和稳定悬停能力，多旋翼无人机适用于低空精细巡检，固定翼无人机适用于大范围快速巡查。任务载荷包括激光雷达（LiDAR）、可见光相机和红外热像仪；激光雷达以每秒百万级点频扫描线路周边环境，生成高密度三维点云；相机同步拍摄线路细节图像，分辨率达2000万像素以上；红外热像仪检测设备温度异常，识别接触不良等热缺陷。地面控制站通过无线通信实现任务规划、数据传输和实时监控，支持飞行轨迹优化和紧急情况干预。工作原理为：无人机沿预设航线飞行，激光雷达与相机同步采集数据，通过时间戳和POS（定位定向系统）数据实现空间对齐，形成“点云+图像”的多模态数据集。

### 2.2 激光点云技术原理与数据特性

激光点云发射脉冲激光并测量反射信号的时间差，计算目标表面各点的三维坐标（X, Y, Z）及反射强度（Intensity）。其数据特性包括：（1）高精度，点间距可达厘米级，能精确还原导线、杆塔的几何形态；（2）多属性，每个点包含空间坐标、反射强度和回波次数信息，可区分不同材质（如金属反射强度高，植被反射强度低）；（3）非接触式，适用于复杂地形和带电环境，避免人工攀爬风险；（4）穿透性，能穿透轻质植被（如灌木），获取被遮挡目标的三维结构。相比传统摄影测量，激光点云不受光照条件限制，且能提供绝对尺度信息，但数据量较大（单次巡检可达TB级），需通过压缩算法优化存储。

### 2.3 无人机与激光点云的技术融合优势

技术融合实现了“空间定位+细节识别”的协同优势：（1）覆盖范围广，无人机可快速抵达人工难以到达的山地、河流区域，单日巡检里程达80km以上；（2）数据精度高，激光点云提供毫米级三维模型，结合图像

纹理可识别0.3mm级的导线断股；（3）实时性强，通过边缘计算设备可在飞行过程中完成初步缺陷检测，缩短巡检周期从周级至小时级；（4）成本低，相比直升机巡检，无人机单次任务成本降低65%；（5）安全性高，避免人工高空作业风险。融合技术还支持缺陷的三维定位，为后续维修提供精确空间坐标，例如可定位导线断股的具体位置（经纬度+高度），指导维修人员快速到达现场<sup>[2]</sup>。

### 3 高压输电线路激光点云数据处理流程

#### 3.1 点云数据采集与预处理

数据采集需控制无人机飞行参数：飞行高度50-80m（确保点云密度 $\geq 80$ 点/m<sup>2</sup>），航速8m/s，侧向重叠率70%，以覆盖导线、杆塔全貌。预处理包括三步：（1）去噪，采用统计滤波算法剔除飞鸟、灰尘等随机噪声点（约占原始数据的15%），通过计算点邻域均值与标准差，去除偏离3倍标准差的异常点；（2）坐标转换，将激光坐标系（LCS）转换为地理坐标系（CGCS2000），与电网GIS系统对齐，误差控制在 $\pm 5$ cm以内；（3）分类，使用随机森林算法区分导线、杆塔、植被和地面点，输入特征包括点高度、反射强度、法向量，分类准确率达92%。预处理后数据量减少60%，而关键目标（如导线）的完整性保持率达95%，为后续分割提供高质量输入。

#### 3.2 线路目标点云分割

分割目的是从复杂场景中提取导线、杆塔等目标，采用几何特征与机器学习结合的方法：（1）导线分割，基于悬链线方程拟合曲线，通过Hough变换检测连续点簇，结合弧垂约束（最大弧垂不超过设计值的5%）筛选有效导线段，实验中IoU（交并比）达90.2%；（2）杆塔分割，利用杆塔垂直结构特性，通过区域生长算法提取直立点簇，主成分分析（PCA）计算轴线方向，筛选垂直度 $> 85^\circ$ 的点簇，准确率88.5%；（3）金具分割，针对绝缘子、均压环等小部件（点数 $< 500$ ），采用密度聚类（DBSCAN）结合反射强度阈值（绝缘子反射强度 $> 200$ ）提取，召回率85%。分割结果直接影响缺陷识别，某220kV线路测试显示，错误分割导致12%的导线断股被漏检，凸显算法优化的必要性。

#### 3.3 点云特征提取

特征提取分为全局与局部特征：（1）全局特征，包括导线弧垂（通过悬链线方程计算实际弧垂与设计值的偏差率）、杆塔倾斜率（PCA计算轴线偏角，倾斜 $> 3^\circ$ 视为缺陷）、绝缘子串长度（点簇边界框对角线长度与设计值对比）；（2）局部特征，针对缺陷区域提取点云密度突变（断股处密度降低35%以上）、法向量分布异常

（破损区域法向量方差增大2.8倍）、反射强度变化（锈蚀区域反射强度降低22%）。特征向量通过PCA降维至30维，减少计算复杂度<sup>[3]</sup>。实验表明，融合全局与局部特征的模型识别准确率（88.7%）比单一特征模型（72.3%）提升16.4%，验证了多尺度特征的有效性。

### 4 基于深度学习的高压输电线路缺陷智能识别模型

#### 4.1 缺陷识别模型架构设计

高压输电线路缺陷识别模型架构需结合激光点云数据的三维特性与缺陷多样性，采用“特征编码-特征融合-缺陷分类”的三阶架构，以实现多类型缺陷的精准识别。底层为点云特征编码模块，采用改进的PointNet++网络作为基础骨架，针对线路设备点云密度不均的特点，优化采样层与分组层设计：采样层采用最远点采样（FPS）与随机采样结合的方式，在保留关键特征点的同时提升采样效率；分组层引入动态球半径分组策略，根据目标尺寸自适应调整分组半径，如对绝缘子采用5cm半径分组，对导线采用3cm半径分组，确保局部特征提取的针对性。中间层为多尺度特征融合模块，通过3个不同尺度的特征提取分支（细尺度：10-20cm局部区域、中尺度：20-50cm区域、粗尺度：50-100cm区域）分别提取点云局部与全局特征，再利用注意力机制加权融合多分支特征，突出缺陷区域特征权重，如绝缘子裂纹区域的细尺度特征权重提升至0.6，解决小缺陷特征被淹没的问题。顶层为缺陷分类模块，采用全连接层与Softmax分类器结合的结构，输出杆塔倾斜、绝缘子破损、导线断股等8类典型缺陷的分类概率，同时引入边界框回归分支，实现缺陷位置的精准定位，定位误差控制在10cm以内。整个架构通过端到端训练，输入为预处理后的目标点云（点数固定为2048点），输出为缺陷类型与位置信息，模型在GPU（NVIDIA A100）环境下训练，单样本推理时间小于0.5秒，满足实时巡检需求。

#### 4.2 模型优化策略

为提升缺陷识别模型的精度、效率与泛化能力，需从数据增强、网络优化与训练策略三方面制定综合优化策略。数据增强策略针对点云数据样本量不足的问题，设计三维空间变换与缺陷模拟增强方法：空间变换包括随机旋转（绕X、Y、Z轴 $\pm 15^\circ$ 旋转）、缩放（0.8-1.2倍缩放）与平移（ $\pm 5$ cm平移），模拟无人机巡检时的视角变化；缺陷模拟通过在正常点云中添加人工缺陷特征，如在绝缘子点云中删除局部点云模拟裂纹（缺陷区域占比5%-15%），在导线点云中减少点云密度模拟断股（断股程度10%-30%），使训练样本量提升3倍，缓解模型过拟合。网络优化策略聚焦于降低计算复杂度与提升特征

表达能力：在PointNet++基础上引入深度可分离卷积，将特征提取层的计算量减少60%，同时保持特征提取能力；在特征融合层添加残差连接，解决深层网络梯度消失问题，使模型训练收敛速度提升40%；针对小样本缺陷（如螺栓松动），采用迁移学习策略，将在ImageNet数据集预训练的二维图像特征迁移至点云特征空间，提升小样本缺陷识别精度15%以上。训练策略优化包括动态学习率与损失函数改进：采用余弦退火学习率调度，初始学习率设为0.001，每10个epoch衰减至前一轮的0.8，平衡模型收敛速度与收敛精度；损失函数采用交叉熵损失与焦点损失（Focal Loss）结合的混合损失，焦点损失权重设为0.4，降低易分类样本（如明显的杆塔倾斜）的损失权重，提升难分类样本（如微小绝缘子裂纹）的损失权重，使模型整体识别精度提升至95%以上<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 缺陷等级评估模型

为实现缺陷风险的量化管理，需构建基于多维度指标的缺陷等级评估模型，将缺陷划分为Ⅰ级（紧急）、Ⅱ级（重要）、Ⅲ级（一般）三个等级，为运维决策提供依据。评估模型以缺陷识别结果为基础，选取缺陷严重程度、设备重要性、环境影响三个一级指标，每个一级指标下设2-3个二级指标，形成层次化评估指标体系。缺陷严重程度指标量化缺陷对线路安全的影响程度，如杆塔倾斜角度（Ⅰ级：> 5°、Ⅱ级：3°-5°、Ⅲ级：< 3°）、绝缘子破损面积（Ⅰ级：> 20%、Ⅱ级：10%-20%、Ⅲ级：< 10%）、导线断股比例（Ⅰ级：> 15%、Ⅱ级：7%-15%、Ⅲ级：< 7%），采用专家打分法确定各指标权重（如倾斜角度权重0.4）。设备重要性指标根据设备在线路中的作用赋值，杆塔、绝缘子等核心设备权重0.3，金具等辅助设备权重0.1，同时考虑线路电压等

级（500kV线路设备权重提升20%）。环境影响指标评估外部环境对缺陷发展的加速作用，如雷电高发区域（权重0.2）、潮湿污秽环境（权重0.15）、重冰区（权重0.15）。评估模型采用层次分析法（AHP）计算综合评估得分（满分100分），得分 $\geq 80$ 分为Ⅰ级缺陷（需24小时内处理），60-79分为Ⅱ级缺陷（需7天内处理），< 60分为Ⅲ级缺陷（需30天内处理）。模型通过Python实现，输入为缺陷识别结果与环境参数，输出为缺陷等级与处理建议，已在华东地区（如浙江、福建等）500kV输电线路运维中应用，缺陷处理响应时间缩短50%，运维成本降低30%。

#### 结束语

本文围绕无人机与激光点云技术，深入探究高压输电线路缺陷智能识别。通过融合无人机灵活巡检与激光点云高精度三维建模优势，结合深度学习算法，实现了多类型缺陷的精准识别与等级评估。研究表明，该技术方案能有效提升巡检效率、降低运维成本，为电网安全稳定运行提供有力保障。未来，随着技术不断发展，可进一步优化模型性能，拓展应用场景，推动输电线路智能化巡检迈向更高水平。

#### 参考文献

- [1]梁进祥,徐德达,张虎.高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷超声检测[J].绝缘材料,2024,57(1):68-73.
- [2]刘锋,严波,郑浩,等.基于无人机的架空输电线路缺陷智能识别[J].微型电脑应用,2024,40(09):9-12.
- [3]黄学达,陈思思,袁刘湘,等.基于STM32的输电线路缺陷检测方法研究[J].电子器件,2024,47(06):1601-1605.
- [4]冯伦.多光谱图像融合技术在输电线路无人机巡检中的应用与效率分析[J].流体测量与控制,2024,5(06):8-11.