

[无人机]

无人机输电线路通道树障隐患识别与故障数据整合研究

文/许强 张柯龙

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司曲靖局

针对目前树障检测的效率与精确度低的问题，开展一系列深入研究。通过利用无人机搭载的高清影像设备和激光雷达技术，实现对输电线路通道内树障隐患的精准识别。在无人机影像数据获取方面，采用先进的航拍技术和图像处理算法，有效提高数据的采集效率和质量。利用激光点云分类技术，精确分类处理所获取的点云数据，为后续隐患识别提供数据支撑。此外，还研究不同树高对于输电线路场强的影响，为制定针对性的隐患防范措施提供了科学依据。在故障数据整合方面，建立完善的故障数据库，实现对故障信息的全面整合和分析。通过对比实验证明，所提出的方法能够显著提高树障隐患识别的准确性和故障数据整合的效率，为输电线路的安全运行提供有力保障。

随着电力系统的快速发展和智能电网建设的不断推进，输电线路的安全稳定运行成为确保电力供应可靠性和社会稳定性的关键因素之一。在输电线路的运行维护中，树障隐患作为一种常见的自然因素，对线路的安全运行构成严重威胁^[1]。因此，及时、准确地识别输电线路通道内的树障隐患，并采取有效措施进行预防和处理，对于保障电网安全、提高供电质量具有重要意义。

近年来，无人机技术飞速发展为输电线路巡检提供新的解决方案。无人机以其高效、灵活和低成本的特性，在电力巡检领域得到广泛应用。无人机能够实现对输电线路及其周边环境的全方位、高精度监测，有效提升巡检效率和隐患发现能力^[2]。特别是在树障隐患识别方面，无人机巡检能够克服传统人工巡检难以到达、效率低下和安全隐患大等缺点，实现对树木生长状态、与线路距离等关键信息的快速采集与分析。

然而，尽管无人机巡检技术在树障隐患识别上展现出巨大潜力，但如何高效整合识别结果与故障

数据，构建智能化的树障隐患管理与预警系统，仍是当前研究的热点和难点。本研究旨在探索无人机技术在输电线路通道树障隐患识别中的应用，并深入研究如何将识别结果与故障数据进行有效整合。

输电线路的树障隐患识别

基于提取的电力线路信息，采用分段截面距离法来计算并分析输电线路与其下方地面物体（如树木）之间的垂直距离^[3]。在数学上，将分段截面距离表示为

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 + (z_i - z_o)^2} \quad (1)$$

式中， d_i 为第*i*个分段截面处输电线路与地面物体的三维空间距离； (x_i, y_i, z_i) 为输电线路在第*i*个分段截面处的三维坐标； (x_o, y_o, z_o) 为地面物体在第*i*个分段截面处的三维坐标。

基于安全距离比较逻辑，设置安全距离阈值，若 d_i 小于安全距离阈值，则标记为存在树障隐患；否则，标记为不存在树障隐患。式（1）和上述逻辑用于自动化分析输电线路与地面物体之间的距

离，并判断是否存在树障隐患，从而支持输电线路的巡检和维护工作。

利用无人机影像获取点云数据

1. 无人机影像数据获取

在无人机输电线路通道树障隐患识别与故障数据整合的研究中，无人机影像数据的获取是至关重要的一环。无人机通过搭载高分辨率相机或激光雷达（LiDAR）等传感器，能够高效地采集输电线路通道及其周边环境的影像数据，为后续的树障隐患识别和故障分析提供基础。依据输电线路布局、地形特征及气象状况，科学规划无人机航迹，确保影像数据采集全面且质量优良^[4]。针对获取到的无人机影像，在影像拼接过程中，需要计算拼接误差以评估拼接质量。对误差计算方法的选择，本文选用均方根误差（RMSE）法，其表达式为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - \hat{d}_i)^2} \quad (2)$$

式中， N 为匹配点的数量； d_i 为实际距离； $\hat{d}_i$ 为计算得到的距离。

通过无人机影像数据的获取和处理，可以高效地获取输电线路通道及其周边环境的影像信息，为后续的树障隐患识别和故障分析提供有力的数据支持。

2. 激光点云分类

鉴于点云数据的高密度和密集分布特性，直接进行几何数据的分类与特征提取面临较大挑战^[5]。为实现这一目标，首先需从原始激光雷达点云数据中人工挑选出训练样本^[6]。将电力线和杆塔的种类进行人工区分，并利用滤波算法将地面点与其他点云分离。

对于电力线的识别，采用Hough直线检测算法，数学上，Hough变换可以表示为

$$\rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta \quad (3)$$

式中， ρ 为直线外一点到直线的最短距离； θ 为直线与x轴垂直方向的夹角，取值范围为 $[0, \pi)$ 。

若点集共线，则在参数空间内，其对应的正弦曲线将交汇于一点 (ρ, θ) ，该点值即为所求直线的参数。在处理杆塔时，视其为点集，先以腐蚀运算去除电力线边界，再以膨胀运算获取连通域。

3. 不同树高对于输电线路场强影响

在输电线路走廊下方，若树木恰在线路正下方

且模型具有对称性，则沿线场强将展现沿线中心线对称的特征。在这种情境下，如果树木的高度发生变化，而树冠的大小保持不变，那么场强的变化规律基本上不会受到影响。为了量化这种影响，引入一个数学模型来描述树木高度与输电线路场强之间的关系。假设输电线路的场强为 E ，树木的高度为 h ，其他影响因素（如树冠大小、线路电压等）保持不变，则场强 E 可以表示为树木高度 h 的函数，即

$$E = f(h) \quad (4)$$

在实际情况下，当树木高度较低时，场强的增加值并不会很大。假设函数 $f(h)$ 在某一高度 h_0 处的导数为 $f'(h_0)$ ，则当 $f'(h_0)$ 较大时，说明在该高度附近，树木高度的微小变化会引起场强的显著变化。通过监测树木高度与场强之间的关系，以及观测场强随树木高度变化的趋势来实现。

故障数据整合

在无人机输电线路通道树障隐患及故障数据整合流程中，完成数据采集、预处理、点云分类及特征提取后，进入隐患识别与数据整合的最终阶段。隐患识别的核心在于利用分类后的点云数据，特别是植被点和杆塔点，结合树木的高度信息，来判断树木与输电线路之间的空间关系，从而识别出是否存在树障隐患。定义一个安全距离阈值 d_{safe} ，该阈值根据输电线路的电压等级、树木种类和天气条件等因素确定。然后，对于每一棵树木，计算其最高点与最近输电线路之间的垂直距离 d 。如果 $d < d_{\text{safe}}$ ，则认为存在树障隐患。故障数据整合的任务是将识别出的树障隐患与已有的故障记录进行关联，以便进行更深入的分析和预警。这通常涉及数据库管理和数据分析技术。建立一个故障数据库，其中包含每条输电线路的历史故障记录、故障类型、故障时间和故障位置等信息。然后，对于识别出的每个树障隐患，将其位置信息与故障数据库中的位置信息进行匹配，以找出是否存在与树障隐患相关的历史故障记录。如果匹配成功，可以进一步分析故障类型、故障频率等统计信息，以评估树障隐患的严重程度和潜在风险。这些信息可以用于制定针对性的检修计划和预防措施。综上所述，无人机输电线路通道树障隐患识别与故障数据整合的最后步骤包括利用数学模型和算法识别树障隐患，以及将识别出

的隐患与故障数据库进行关联和分析。

实验分析

1. 数据分析

1) 数据整合策略。将无人机与直升机收集的树障信息合并, 构建一个更为详尽的树障信息库。图1所示为树障信息库基本结构。

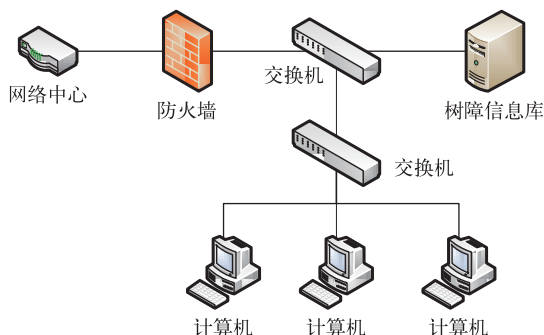


图1 树障信息库基本结构图

2) 图特征筛选。从这一综合数据库中提炼出与树障紧密相关的关键属性, 诸如树种类型、树木高度和树冠覆盖范围等。

3) 分类与辨识。运用机器学习技术, 对这些特征进行细致分类与识别, 旨在精确判断树障隐患的存在与否。

4) 数据校验。借助实地数据, 验证整合后信息的实用性和精确度。

当前输电线路树障风险管理中, 管理部门常采用人工巡检、无人机巡检及远程遥感监控等手段。人工巡检能直接观测到树障风险, 但易受地理与气候条件制约; 无人机巡检虽能跨越地形与天气障碍, 但在识别精确度上尚有提升空间; 遥感监控能快速捕捉树障迹象, 却受限于图像清晰度和识别算法效能。因此, 探索一种结合对比分析的高效、精确树障风险管理方案, 成为当前研究的焦点。

2. 实验设计与数据处理

为证实本文所提方法的实用性和效果, 实施一系列实验验证。在这些实验中, 广泛收集无人机与直升机获取的树障数据, 覆盖多样的地理区域、季节变化及不同时间点。随后, 将这些数据科学地划分为训练集与测试集, 并应用数据整合、特征筛选及分类识别技术进行处理。本研究采用对比分析策略, 对现有输电线路树障风险管理手段进行深入

比对与剖析。具体而言, 收集多种管理方法下的样本数据, 涵盖人力巡检、无人机巡检以及遥感监控等。相关实验数据见表1。

表1 实验数据记录

序号	项目	数据/描述
①	地理区域覆盖	5个不同省份
②	季节变化	春、夏、秋、冬四季
③	时间点	每天上午9:00、下午3:00
④	数据来源	无人机: 2 000组; 直升机: 1 500组
⑤	训练集比例	70%
⑥	测试集比例	30%

接着, 从效率、精确度和应用场景等维度, 对这些方法进行定性与定量评估。

3. 结果与讨论

根据上述实验设计内容, 在完成实验后, 将得到的结果绘制成如图2所示。

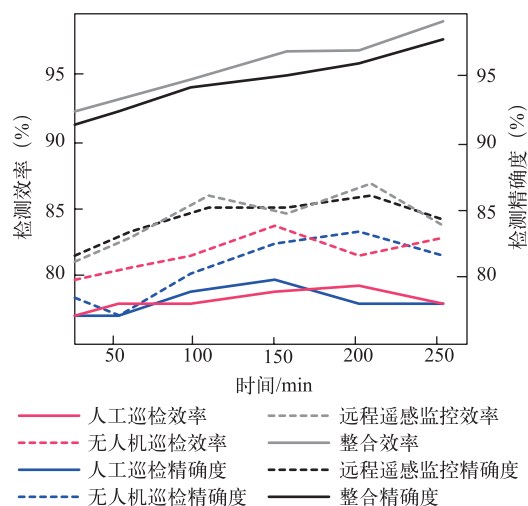


图2 实验结果对比图

实验结果显示, 本文所提出的综合方法显著提升树障检测的效率与精确度。具体而言, 融合无人机与直升机采集的树障数据, 能够更全面地监控输电线路周边的树障风险; 通过特征抽取与分类技术, 能够更精确地辨识出存在隐患的树木; 而数据验证过程则进一步证实整合数据在树障检测中的优越性和效果提升。通过对比分析, 发现当前输电线路树障风险管理的几种主要方式各有局限: 人力巡检受限于地理与气候条件; 无人机巡检面临识别精准度不足的挑战; 遥感监控则受图像清晰度与识别算法所限。针对这些不足, 提出如下改进策略: 首先, 针对人力巡检的局限, 可考虑部署智能巡检

体系，借助GIS与GPS技术实现远程监控与即时预警；其次，针对无人机巡检识别精度问题，可通过优化识别算法及提升图像质量来增强识别能力；最后，针对遥感监控的局限，可引入高分辨率遥感影像与人工智能技术，以提升识别与分析的准确性。

结束语

综上所述，无人机输电线路通道树障隐患识别与故障数据整合研究，是提升电网安全运维水平、促进智能电网建设的重要一环。通过本研究，实现无人机巡检技术在树障隐患识别领域的深化应用，为输电线路的预防性维护提供技术支撑。这一研究成果不仅提高巡检效率，降低运维成本，更重要的是，通过提前预警和精准定位潜在隐患，有效减少因树障引起的线路故障，保障电力供应的稳定性和安全性。

未来，随着人工智能、物联网等技术的不断发展，无人机巡检与数据分析系统的智能化水平将进一步提升。期待通过持续地技术创新和优化，构建更加完善的输电线路智能运维体系，为构建安全、高效和绿色的现代能源体系贡献力量。同时，也呼吁行业内外的专家学者、技术人员加强交流与合作，共同

推动无人机巡检技术在电力巡检领域的广泛应用，为电力行业的高质量发展注入新的活力。[EA](#)

(收稿日期：2024-11-06)

参考文献

- [1] 韩绍禹，秦迪，韩雨彤，等．基于双端数据时频相关的输电线路故障定位方法[J]．自动化技术与应用，2024，43(8)：91-94．
- [2] 阚光强，杨勇波，鲜永辉．基于双数据源的直流输电线路故障测距方法[J]．内蒙古电力技术，2024，42(3)：68-73．
- [3] 马慧．基于数据中台的输电线路故障状态自动检测方法[J]．自动化应用，2024，65(9)：200-202．
- [4] 张潇．基于大数据的输电线路智能化故障诊断分析[J]．电子技术，2023，52(8)：386-387．
- [5] 王志强，宋新新，常英贤，等．数据驱动下具备高抗干扰能力的输电线路故障检测技术[J]．电网与清洁能源，2023，39(6)：80-87，97．
- [6] 陶冶，范凯，王开白，等．基于时空全数据的输电线路单端行波测距故障定位[J]．制造业自动化，2023，45(4)：39-43．

