

配电线路树障隐患预警模型与机械化清障技术应用

姜帆¹, 巩楠²

(1. 国网陕西省电力有限公司丹凤县供电分公司; 2. 国网陕西省电力有限公司商洛市商州区供电分公司)

【摘要】在配电线路运行环境中, 树木生长对线路安全构成长期威胁, 传统人工巡检与清障方式存在效率低、覆盖不足和安全风险高等问题。针对这一现状, 构建了树障隐患预警模型, 配套应用机械化清障技术, 形成预警与清障的闭环运行机制, 为配电线路安全稳定运行提供技术支撑。

【关键词】配电线路; 树障隐患; 预警模型; 机械化清障; 闭环运行机制

中图分类号: TM75

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.156

Early Warning Model of Tree Barrier Hidden Danger on Distribution Lines and Application of Mechanized Barrier Clearance Technology

JIANG Fan¹, GONG Nan²

(1.State Grid Shaanxi Provincial Power Co., Ltd. Danfeng County Power Supply Branch; 2.State Grid Shaanxi Provincial Power Co., Ltd. Shangluo City Shangzhou District Power Supply Branch)

【Abstract】In the operation environment of distribution lines, tree growth poses a long-term threat to line safety. Traditional manual inspection and barrier clearance methods have problems such as low efficiency, insufficient coverage and high safety risks. In response to this situation, an early warning model of tree barrier hazards has been built, and mechanized barrier clearance technology has been applied to form a closed-loop operation mechanism for early warning and barrier clearance, providing technical support for the safe and stable operation of distribution lines.

【Keywords】distribution line; hidden danger of tree barrier; early warning model; mechanized barrier clearance; closed-loop operation mechanism

1 引言

配电线路作为电力系统向终端用户输送电能的重要环节,其运行环境常受植被生长影响,尤其是线路通道内外的树木在季节性生长和极端天气条件下容易侵入安全距离,造成短路、跳闸等故障。传统的人工巡视和清障作业受地形、气候及人力资源限制,存在覆盖率低、响应不及时和作业风险高等问题,难以满足现代电网对安全性与可靠性的要求,亟需引入更加智能化和高效化的隐患治理手段。

2 树障隐患预警模型构建

2.1 树障监测数据的采集与特征提取

树障隐患预警模型的核心输入是高精度、多维度的监测数据,为确保模型在不同运行环境下的适用性,应建立由多源传感器融合的采集体系。该体系可集成机载激光雷达、高清可见光相机、多光谱传感器及红外热成像设备,通过无人机巡航、地面激光

测距与杆塔安装固定监测点相结合的方式,对配电线路通道两侧植被高度、冠幅宽度、树干倾角、与导线的最小空间距离、冠幅生长速度等几何与动态特征进行采集;同时引入气象监测数据,包括风速风向、湿度、降雨量及季节性温度变化,作为外部环境变量。采集数据需在GIS坐标系下完成地理配准,并通过空间缓冲区分析精确计算植被与导线的空间关系^[1]。在特征提取阶段,针对时间序列数据采用滑动窗口差分与指数平滑方法提取生长趋势特征,针对空间数据可利用基于体素的三维建模技术获取冠层体积与空间形态参数,结合树种数据库赋予不同树木的折断概率系数和导电性参数,最终形成包含几何类、生长动态类和环境影响类三大维度特征向量,为风险评估提供可量化且可计算的输入基础^[2]。

2.2 隐患风险分级与优先级排序

获得完整特征向量后,需构建多指标融合的树障隐患风险评估模型,实现对不同树障点的量化

分级。模型可采用改进的层次分析法(AHP)结合模糊综合评价的混合方法,将最小安全距离、树高超限幅度、冠幅生长速率、折断概率系数、线路重要性系数、气象暴露强度等指标纳入风险矩阵,通过专家打分与历史事故数据回归确定权重。综合风险值可按公式(1)计算。

$$R = \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_i \quad (1)$$

式(1)中: R 为风险综合值, w_i 为第 i 个指标权重, S_i 为归一化后的指标评分。风险等级可分为极高风险($R \geq 0.85$)、高风险($0.70 \leq R < 0.85$)、中风险($0.50 \leq R < 0.70$)、低风险($R < 0.50$),并在此基础上引入优先级排序模型。排序采用多目标优化法,将风险等级、清障资源消耗、作业可达性、对供电的影响系数作为目标函数,求解最优作业序列,使高风险、高影响区域优先处理,为机械化清障技术提供明确且可执行的任务清单。

2.3 模型预警阈值的确定与验证

在风险分级与排序模型基础上,阈值可通过历史树障数据集与已处理隐患案例建立训练样本,利用受试者工作特征曲线(ROC)分析不同阈值下的真阳性率与假阳性率变化,选取曲线下面积(AUC)最大的拐点作为全局最优阈值,并针对不同线路类别、地理区域和季节变化建立分层动态阈值模型^[3]。该动态模型可表示为:

$$T_{adj} = T_{base} \times (1 + \alpha E + \beta S) \quad (2)$$

式(2)中, T_{adj} 为调整后阈值, T_{base} 为基础阈值, E 为环境风险因子(如风暴频率), S 为季节生长速率系数, α 与 β 为调节系数。阈值验证应在独立测试集上进行,采用K折交叉验证方法计算准确率、召回率、F1值等性能指标,对误差偏大的场景分析其特征变量贡献度,调整模型输入或权重分配,确保在实际运行中能在隐患风险逼近危险水平前发出稳定可靠的预警信号。

3 机械化清障技术实施

3.1 基于风险优先级的作业设备选型

机械化清障的实施需依据风险优先级结果建立设备选型决策机制,具体做法是将风险分级结果与线路区段的地形条件、植被类型、通道宽度等参数导入设备适配度计算模型,输出各候选设备的适用性评分。适配度计算公式为:

$$M = \gamma_1 R + \gamma_2 A + \gamma_3 P + \gamma_4 C \quad (3)$$

式(3)中: R 为风险等级系数, A 为地形可达性指数, P 为植被处理能力指数, C 为运行成本系数, γ 为权重。在实施中,高风险且植被密集区段可部署大功率臂架式清障机,地形复杂区域可使用履带式割灌机,长距离低风险区可使用牵引式割草设备。为提高应用效率,应建立设备与作业任务的动态匹配数据库,并在任务调度系统中调用,实现风险结果到设备选型的自动化对接。

3.2 清障路径规划与安全作业流程

实施阶段需将选定设备与风险地图结合,利用GIS路径优化算法生成设备在各作业区段的最短时间路径,同时考虑转场路线、地形坡度及通道宽度等限制条件。系统根据风险等级自动安排优先作业区段,确保高风险点先行处理。应用中,操作人员按标准化作业流程执行:设备检修、作业区隔离、设备定位、逐段推进作业及作业后现场清理,作业过程由监控终端实时上传设备状态、作业位置和 risk 处置进度至调度中心。安全防护措施包括:在作业区域设置警戒线、布置应急撤离通道,必要时与配电调度中心确认带电作业风险,保障人员与设备安全。

3.3 清障作业结果的记录与质量评价

在作业完成后,须立即对清障区域进行复测,使用激光雷达和高清相机采集的三维数据与作业前数据进行比对,评估清障完成度、安全距离保持率及作业效率。质量评分可按公式计算

$$Q = \delta_1 D + \delta_2 S + \delta_3 E \quad (4)$$

式(4)中: D 为完成度, S 为安全距离保持率, E 为效率指数, δ 为权重。实施中,所有作业数据应自动上传至运维数据库,与预警模型形成闭环,确保下一轮风险分析时能引用最新清障成果;质量评价低于设定阈值的任务需在系统中自动生成二次处理工单,并指派至相应设备与作业班组,实现清障作业从任务分配、执行到结果验证的全流程闭环应用。

4 预警与清障的闭环运行机制

4.1 预警结果转化为清障任务计划

树障隐患预警模型在完成特征提取、风险分级和优先级排序后,会生成包含隐患点地理坐标、风险等级指数、优先处置顺序、预计风险升级时间以及推荐处置方式的综合数据清单。为了将这些模型输出

有效转化为可执行的作业任务,需要借助机械化清障实施环节对接的调度管理平台,将隐患点信息与配电线路的GIS地图数据、线路资产数据库和作业资源池进行自动关联。

在实施过程中,系统会先调用设备与作业人员的实时位置和可用状态信息,对比任务需求中的设备能力要求(如切割高度、臂展长度、通过性等级)与可达性条件(通道宽度、坡度限制、环境障碍等),筛选出适合的设备类型,并根据风险等级确定任务优先处理顺序。系统会在任务生成环节将高风险、高影响区段优先分配给高性能机械设备,如臂架式多功能清障机分配至密林密集区,高功率履带式割灌机分配至坡度大且地表条件差的线路走廊;中低风险任务则分配至轻量化、高机动性的机械设备,以优化作业效率和资源利用率。

生成的任务计划表不仅包含任务编号、隐患位置、设备类型、作业班组、计划时间、预计工期,还会包含作业路径建议、安全操作规范和应急处置预案。为保证模型输出的时效性保持一致,系统在任务生成前会调用最新气象预报、线路运行状态及交通可达性数据进行校核,确保在恶劣天气或线路检修冲突情况下自动调整任务顺序或延迟非紧急任务,形成由“风险识别—优先排序—资源匹配—任务生成”构成的全自动化计划链路。

4.2 作业执行情况的实时监控与调整

在机械化清障任务进入执行阶段后,实时监控是确保计划有效落实、应对突发状况和提高资源利用效率的关键环节。每台执行设备都会在作业前进行终端初始化,接入配套的北斗/GPS定位模块、作业状态监测传感器、视频采集终端和环境数据采集单元,实现对作业过程的全方位感知。

定位模块以秒级更新频率上传设备地理位置和作业轨迹,状态监测传感器采集动力系统负载、刀具转速、油耗/电耗等作业参数,视频终端提供现场作业影像,环境采集单元实时监控风速、湿度、温度和光照条件。所有数据通过无线专网或4G/5G通信链路回传至调度中心,调度平台将这些实时数据生成的任务计划表进行比对,自动判定作业是否按计划推进。当发现作业进度滞后、设备状态异常或作业环境发生突变时,系统会即时启动调整流程,包括任务顺序调整、备用设备调配、临时增加作业人员或更换作业路线等措施,以确保高风险任务在时限内完

成。在数据化管理中,监控平台会实时生成任务执行进度表和作业效率报表,该表格不仅可用于实时判断执行效率,还能为反馈分析提供准确的量化依据,从而使监控调整环节与机械化实施、模型紧密相连,形成动态响应的执行机制。

4.3 清障结果数据反馈促进模型迭代优化

清障任务完成后,须开展成果复测与数据归档,并将实际执行数据反馈至树障隐患预警模型,为模型参数更新与算法优化提供支撑,形成持续迭代的闭环体系。复测环节需采用与数据采集阶段一致的技术手段,包括机载激光雷达扫描、高清立体影像采集、多光谱植被分析等,对作业完成区域实施全覆盖扫描,获取作业后线路走廊的安全距离、残留植被密度、净空率及潜在新生隐患点。系统将复测数据与作业前的风险预测结果逐项比对,分析预测值与实际值的偏差,按线路类型、植被种类、季节条件分类统计,精准识别模型在特定场景下的精度短板。例如,若发现某类树种雨季生长速度显著高于模型预测,将在特征权重计算中提高该类特征权值,提升下一轮预测精度。所有反馈数据经清洗、结构化及标签化处理后,存入模型训练数据库,供机器学习模块在后续训练中调用,实现风险预测与任务规划策略的持续优化。

5 结语

本文围绕配电线路树障隐患治理,构建了基于多源监测数据的风险预警模型,提出了风险分级、优先排序与阈值优化方法,并结合机械化清障技术实现了设备选型、路径规划、安全作业与质量评价的全流程实施,形成预警、执行、反馈、优化的闭环运行机制,有效提升了隐患发现的精准度与处置效率。

参考文献

- [1]刘汉君,吴锦秋,陈浩洋,等.配电线路树障隐患预测研究[J].电力安全技术,2021,23(6):47-50.
- [2]张红.农村配电线路除树障面临问题及对策探析[J].现代国企研究,2015(22):184-185.
- [3]戴炳明.配电线路常见故障及预防措施分析[J].企业技术开发,2014,33(23):101-102.