

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.016

面向山火风险的林区配电线路树线故障研究综述

张亮^{1,2}, 贾娟³, 黄程², 夏明², 徐庚琛², 廖林西², 唐茂平²,
阳弘毅², 张华⁴, 林牧⁴, 熊嘉宇⁴

(1. 西南石油大学丝路清洁能源转化与利用研究中心, 成都 610500; 2. 西南石油大学电气信息学院, 成都 610500; 3. 四川省森林和草原防火监测中心, 成都 610081; 4. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610041)

摘要: 由于全球气候变化, 高温、低湿叠加极端天气, 山火发生风险和过火面积都成倍增加, 近年来频发的山火已成为全球性的重大灾害, 在人员伤亡、财产损失、生态环境、社会治理等多个层面造成深远影响。统计表明配电线路故障已成为引发山火的重要致因, 且破坏性强、造成的损失最大。为明晰林区配电线路树线故障致灾过程、支撑山火风险防控, 文中针对面向山火风险的林区配电线路树线故障进行综述, 从树线故障演化机理、检测识别、风险预测、引发山火4个层面展开。首先剖析林区配电线路树线故障机理, 揭示树线故障演化依次经历接触导通、炭化燃弧、引燃成灾3个阶段, 是由热—电—化学耦合作用驱动的渐进致灾过程; 其次在机理研究基础上, 分析电气波形、局部放电、磁场及多模态融合4类树线故障检测技术; 进而梳理统计模型、数据驱动模型及数据受限场景预测方法的差异化应用特性; 最后综合多类影响因素开展故障引发山火风险的评估, 并总结展望相应防范措施。未来利用卫星遥感、无人机巡检、三维激光点云扫描等科技手段, 监测融合气象、植被、线路、地形等多源火险因子, 动态、定量、精细评估山火风险, 并进行时空风险预测推演, 是科技赋能救灾、减灾、防灾的重要方向。

关键词: 林区配电线路; 树线故障; 山火风险; 故障检测; 风险评估

Review of Research on Tree-line Faults in Forest Distribution Lines Under Wildfire Risks

ZHANG Liang^{1,2}, JIA Juan³, HUANG Cheng², XIA Ming², XU Gengchen², LIAO Linxi²,
TANG Maoping², YANG Hongyi², ZHANG Hua⁴, LIN Mu⁴, XIONG Jiayu⁴

(1. Silk Road Research Center of Sustainable Energy Conversion and Utilization, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Sichuan Provincial Forest and Grassland Fire Prevention Monitoring Center, Chengdu 610081, China; 4. State Grid Sichuan Electric Power Company Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: Due to global climate change, the superposition of high temperature, low humidity and extreme weather conditions has led to a manifold increase in both the risk of wildfires and the area burned. In recent years, the frequent occurrence of wildfires has become a major global disaster, exerting far-reaching impacts across multiple dimensions, including casualties, property losses, ecological environments and social governance. Statistical data indicate that faults in distribution lines have emerged as a critical trigger for wildfires, exhibiting severe destructive potential and accounting for the most substantial damages. To clarify the disaster-inducing process of tree-line faults in forest distribution lines and to support wildfire risk prevention and control, in this paper a comprehensive review

收稿日期: 2026-03-17; 修回日期: 2026-05-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2025YFE0212900); 四川省科技计划(穿越林区的35 kV及以下配电线路森林火灾风险精准识别研究)。

Project Supported by the National Key Research and Development Program of China(2025YFE0212900), Sichuan Science and Technology Program(Research on Precise Identification of Forest Fire Risks for Distribution Lines of 35 kV and Below Crossing Forest Areas).

of tree-line faults in forest distribution lines is presented from the perspective of such four key aspects as evolutionary mechanism of tree-line faults, fault detection and identification, risk prediction, and wildfire ignition. First, the formation mechanism of tree-line faults in forest distribution lines is analyzed, revealing that such faults sequentially undergoes such three stages as contact conduction, carbonization arcing and fire ignition-induced disaster. This is a progressive hazard process driven by thermo-electrical-chemical coupling effects. Then, based on the research of above mechanism, such four categories of tree-line fault detection technologies as electrical waveform detection, partial discharge monitoring, magnetic field sensing and multi-modal fusion detection are analyzed. After that, the differentiated application characteristics of statistical models, data-driven models and forecasting algorithms for data-scarce scenarios are systematically summarized. Finally, an assessment of the wildfire risk caused by such faults is conducted by integrating multiple categories of influencing factors, and corresponding preventive measures are summarized and prospected. In the future, leveraging technological means such as satellite remote sensing, unmanned aerial vehicle(UAV) patrol inspection and 3D laser LiDAR scanning are used to monitor and integrate multi-source fire hazard factors, including meteorologys, vegetation, power line status and terrain, enable dynamic, quantitative and refined wildfire risk assessment of wildfire risks, as well as spatiotemporal risk deduction and simulation, representing a critical technical direction for technology-empowered disaster relief, migigation and prevention.

Key words: forest distribution lines; tree-line fault; wildfire risk; fault detection; risk assessment

0 引言

近些年来,极端高温、干旱、大风天气频发加剧了山火的发生,国内外山火普遍具备突发性强、扩散快、损失惨重的特点。数据显示,近些年来配电线路故障成为引发山火的重要致因,属于典型“低占比、高危害”火源。从各国火情统计来看,美国树

线接触故障诱发山火占比达25%左右^[1],澳大利亚丛林配网树障起火占有稳定比例,中国南方、西南地区同类故障起火占比逐年缓慢提升。近年来典型电力故障引发山火事件汇总见表1,包括多起国内四川西部、云南和广西,以及美国、澳大利亚等地严重山火,它们在人员伤亡、财产损失、生态环境、社会治理等多个层面造成深远影响,各地区火灾现场见图1。

表1 典型山火事件统计表

Table 1 Table of typical wildfire incidents

时间	国家/地区	山火名称	山火损失
2024-12-09	四川雅江	雅江森林火灾	转移群众140余人,明火2天内扑灭
2024-02-21	广西百色	“2·21”乐业山火	火灾过火面积约16.67公顷,火场一度扩大至约133.33公顷
2024-02-19	四川广元	旺苍森林火灾	过火面积约0.67公顷
2022-03-15	云南大理	大理森林火灾	森林资源受损,局部生态环境遭到破坏
2020-11-17	四川雅安	回隆镇竹马村陡坎子 “11·17”森林火灾	无人员伤亡,未造成重大财产损失
2020-03-30	四川凉山	西昌森林火灾	19人牺牲,3人受伤,直接经济损失9 731.12万元
2020-03-08	四川雅安	银台子森林火灾	无人员伤亡,一般森林火灾
2025-01-07	美国洛杉矶	“伊顿”山火	遇难人数31人,摧毁超16 000栋建筑,经济损失巨大
2024-08-10	希腊雅典	希腊山火	1人死亡,过火超10 000公顷
2017-10-08	美国加利福尼亚州	北湾山火群	44人死亡,约8 900处建筑受损或毁坏
2009-02-07	澳大利亚维多利亚州	“黑色星期六”山火	173人死亡、超2 000栋房屋被毁



云南大理山火



四川西昌山火



美国加州山火



澳洲“黑色星期六”山火

图1 各个地区火灾现场照片

Fig. 1 Fire scene photographs of different areas

山火架空线路断线、设备放电、树枝触碰导线等故障一旦与干燥植被耦合,容易由局部放电发展为大范围山火,造成停电、人员伤亡和生态破坏^[2-4]。因此,研究林区配电线路树线故障及其引燃山火风险,对提升供电可靠性和支撑森林火灾主动防控具有重要意义。

现有研究已从多层面展开:Keeley、Syphard等揭示了火源类型对山火时空分布的影响^[2-3],Jazebi、Panossian等系统总结了电网山火成因、检测、预防和风险度量方法^[4-5],Bandara等归纳了配电系统故障引燃山火的主要机制^[6],Yang等综述了树相关高阻故障建模、检测及引燃风险研究^[7],Gashteroodkhani等提出以高阻故障检测降低配电网火灾风险^[8],Savva、Rhodes等分别研究了通道植被遥感监测和高风险天气下停电优化决策^[9-10]。但现有成果多侧重单一环节,树线接触后高阻导通、炭化燃弧、引燃成灾的连续机理仍不清晰,早期弱故障特征与火灾后果、多源监测信息与林区配电运维之间的耦合关系仍待深入。

基于此,文中围绕面向山火风险的林区配电线路树线故障,系统梳理树线故障热—电—化学耦合演化机理,归纳电气波形分析、局部放电监测、磁场信号检测以及多模态融合4类故障检测技术,对比统计模型、数据驱动及数据受限场景下的风险预测方法,总结运行控制、工程加固、监测预警、植被管理4类防控措施,最后剖析当前研究瓶颈并展望未来方向,旨在为林区电网山火风险的主动防控提供理论依据与技术参考。

1 树线故障机理

树线故障通常经历由弱电接触到热—电—化学耦合失稳的连续演化过程,见图2。真型试验表明,树枝搭接导线初期多表现为单相高阻接地,树体等效阻抗高、泄漏电流小、故障特征不明显,但局部电场与湿度分布已开始改变^[11-13]。随着水分迁移、蒸发和细胞组织受热,电流通道由离散湿润路径逐步转向树皮形成层及炭化路径,炭化层电导率升高后,电流增大并诱发间歇燃弧、弧根漂移和高频暂态^[13-16]。当炭化通道贯通、树体温度超过热解和着火条件时,电弧热、火花、熔融金属颗粒及周围细小可燃物共同作用,故障可能由线路事件扩展为山火事故^[6, 17-24]。因此,树线故障机理研究的核心,是从实验观测和多物理场仿真中揭示阻抗、电流、电弧、温度和可燃物状态之间的因果链。

现有研究可将上述链条概括为接触导通、炭化燃弧和引燃成灾3类物理模型:接触导通阶段主要由树体等效阻抗、接触电阻、含水率和泄漏电流共同表征;炭化燃弧阶段可用焦耳热传导、含水率迁移、热解动力学和炭化层电导率随温度演化以及电弧电压、电流、弧长、弧根运动和能量沉积来描述;引燃成灾阶段则需把局部热流/温度与细小可燃物含水率、临界着火能量和风速等因素耦合起来。相应地,阶段转换可初步以等效阻抗持续下降、泄漏电流突增或非线性畸变增强、炭化通道贯通、局部温度达到热解/着火条件、连续电弧能量超过周围可燃物点火需求等作为判据。

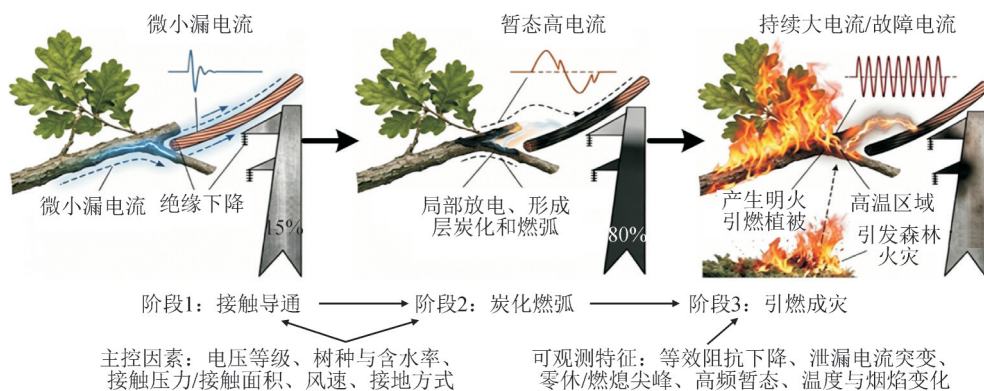


图2 树线故障机理演化

Fig. 2 Evolution mechanism diagram of tree-line fault

1.1 接触导通阶段机理

树木与带电导线发生初始搭接时,最直观的现象并不是强短路,而是高阻、弱电流和电压保持较高的单相接地状态。宁鑫等在竹线搭接真型试验中发现,初始搭接阶段泄漏电流较小,等效阻抗较

大,故障电气量容易被正常负荷扰动或暂态噪声掩盖,见图3^[12]。杨淳岚等的中压线路试验也表明,树木接近或接触导线后,其放电强度与树木接地条件、外部火焰和线路电压密切相关,树体并不能简单等效为金属接地体^[11]。

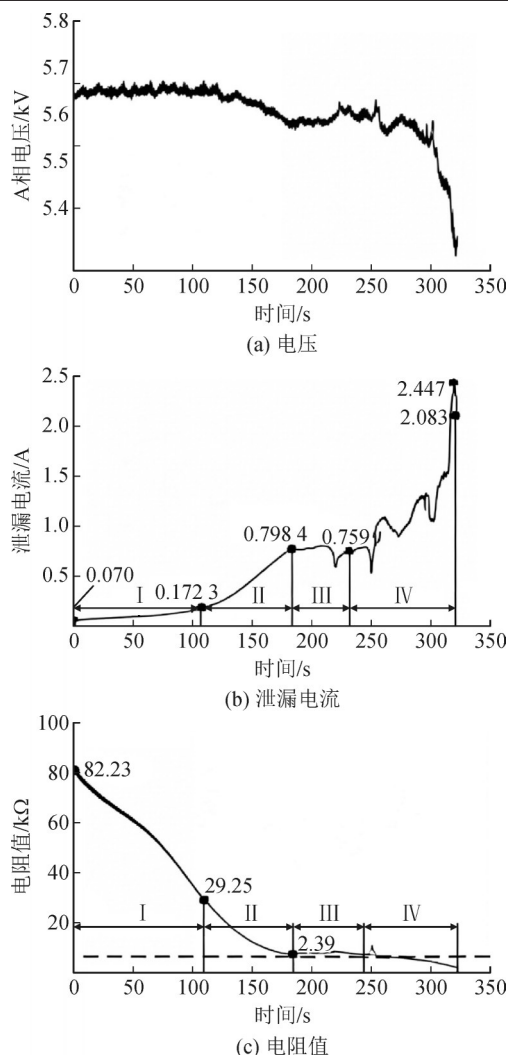


图3 引燃过程电压、泄漏电流和电阻值

Fig. 3 Voltage, leakage current and resistance during ignition process

从更深层看,高阻形成首先来自树体材料本身的非均匀性。活体枝干由树皮、形成层、木质部和含水组织构成,导电离子主要存在于水分和汁液中,通道截面小且分布离散,不同树种、含水率和枝径会导致阻抗差异明显。Goodfellow 和 Appelt 的植被导电试验指出,带电导线附近树枝的电阻抗具有显著树种差异,物种应作为植被风险评价的重要变量^[17,21]。Marxsen 的植被导通引燃试验进一步显示,植被能否从导通发展到引燃,与接触点热积累、湿度和电流持续时间有关^[19]。

其次,接触导通阶段的电场分布具有强局部性。树枝并非规则电极,接触点粗糙、接触压力随风摆变化,导致微小接触斑点处电流密度和电场强度集中,当气隙仍存在或接触间歇分离时,局部空气击穿可能先于稳定导通发生。输电线路树冠临近试验和有限元计算表明,树木靠近导线会改变周围电场分布,临界击穿距离与电压等级、树冠形态

和间隙有关^[22]。

因此,接触导通并不是静态电阻问题,而是“树体非均匀阻抗—接触微结构—局部气隙放电”共同决定的早期高阻故障过程。

1.2 炭化燃弧阶段机理

当树线接触持续一段时间后,故障会从弱导通进入炭化燃弧阶段。表观上,树皮附近先出现水汽蒸发、烟雾、局部发黑,随后伴随间歇性电弧和电流突变。

徐会凯等在 10 kV 架空线路树线放电发展试验中观察到,树木温度变化和水分迁移改变了内部电流通道,炭化通道在点燃前已沿树皮皮下形成层发展,并在贯通后显著降低树体接地阻抗、增大故障电流,见图 4^[13]。宁鑫等将放电引燃过程划分为初始搭接、放电击穿、水汽蒸发和明火蔓延阶段,也说明炭化并非燃烧后的附属现象,而是故障升级的关键中间环节^[12]。

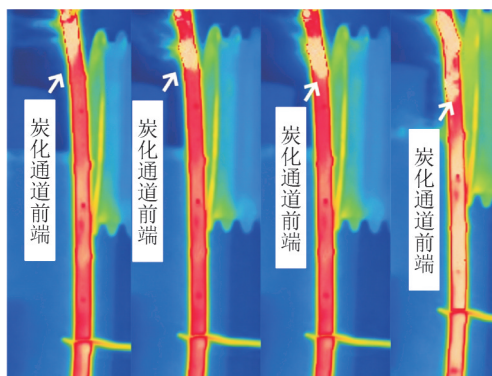


图4 炭化通道红外图像

Fig. 4 Infrared image of carbonization channel

炭化燃弧的底层原因在于热效应和电效应相互促进。泄漏电流通过高阻树体时产生焦耳热,湿润组织先吸热蒸发,局部含水率下降后绝缘性能和导热边界发生改变;继续升温会引发纤维素、半纤维素和木质素热解,生成电导率更高的炭化产物。炭化路径一旦形成,电流更倾向沿低阻路径集中,进一步加剧局部升温,形成“阻抗下降—电流增大—热解炭化增强”的正反馈,见图 5^[13,15]。

电弧行为则决定了该阶段的波形特征和危险性。丛子涵等基于磁流体动力学建立树闪电弧模型,发现树枝与导线分离速度会影响电弧温度和燃熄尖峰,自然风会拉长电弧并驱动弧根在导线和树枝表面移动^[14]。后续仿真与试验进一步指出,树线早期故障电流过零附近存在零休现象,电弧长度增加时温度下降、零休持续时间增加,这些特征与树枝运动速度和树种关系较弱,更多受电弧发展机理控制^[15]。梁栋等对触树单相接地故障进行综合建模

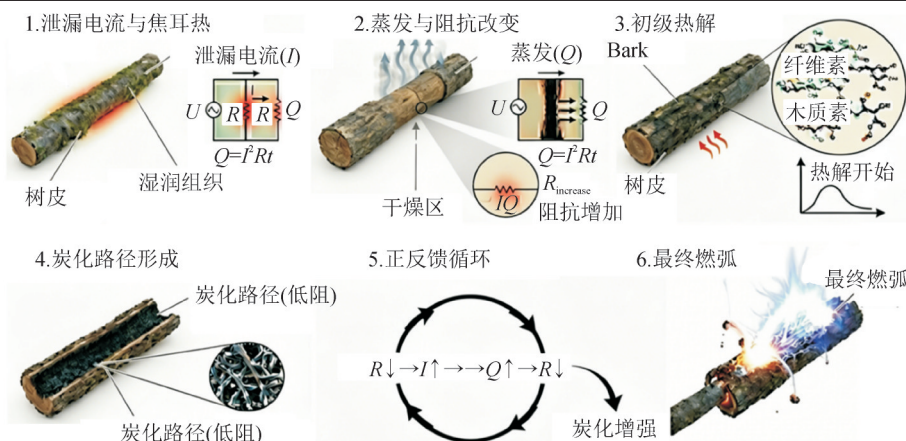


图5 炭化燃弧机理简图

Fig. 5 Mechanism diagram of carbonization and arc ignition in vegetation faults

和检测建议梳理,强调应将树体电阻、电弧模型和接地方式耦合考虑^[16]。可见,炭化燃弧阶段是树线故障由隐蔽高阻状态转向可检测、可致灾状态的临界阶段。因此,炭化通道是否贯通以及等效阻抗是否由缓慢下降转为突降,可作为从接触导通向炭化燃弧转换的工程判据之一。

1.3 引燃成灾阶段机理

进入引燃成灾阶段后,树线故障的危险不再局限于线路保护动作,而表现为炭化组织、火花、电弧热和外部可燃物之间的点火耦合。浅层现象是炭化部位被持续加热后出现明火,电弧喷射火花或熔融颗粒,落入枯枝落叶、针叶层和干草等细小可燃物中形成初始火点。Russell等总结配电馈线诱发山火的机制时指出,导线接触、断线、设备故障和高阻电弧均可能成为足够的点火源,干旱和大风会显著放大后果^[18]。Bandara等也将植被接触、电弧、熔融金属和保护失灵视为电力系统山火的重要机制链条^[6]。

从点火机理看,引燃需要同时满足能量释放、可燃物热解和环境扩散条件。电弧等离子体温度

高、能量密度大,能够快速加热树皮和周围细小燃料;炭化层表面孔隙增多,挥发分释放,降低了持续燃烧所需的外部能量。蒋陈世豪等关于树线放电电弧特性和燃烧特征的研究显示,风速与导线温度会改变电弧形态和树线温升,从而影响燃烧发展^[22]。Shao等针对10 kV 配电线路树线电弧放电的研究进一步表明,枝条含水率和风速对电弧持续性、热输入和故障演化具有重要影响^[24]。

成灾则取决于初始火点能否越过线路走廊尺度。典型森林植被燃烧过程会改变导线间空气间隙击穿特性,火焰、烟尘和热羽流可能降低间隙绝缘裕度,诱发相间或对地二次放电^[23]。而大风一方面促使树枝摆动和弧根漂移,另一方面加速火星输运和火线蔓延,使局部树线故障转化为多点点火风险。由此可见,引燃成灾阶段不是单一“电弧点火”事件,而是电气故障、植被燃烧和气象传播共同耦合的风险外溢过程,见图6。当电弧持续输入能量、炭化层温度及周围细小燃料含水率共同满足点火条件时,可认为故障已由线路内部演化转入山火点火风险状态。

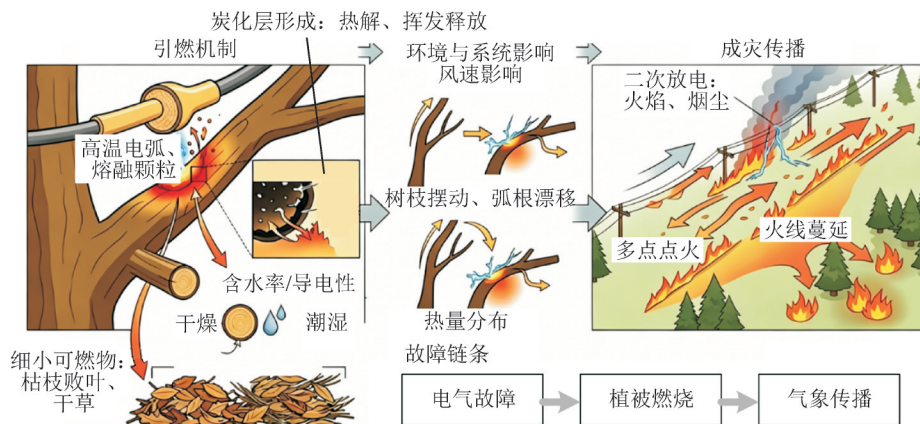


图6 引燃成灾机理简图

Fig. 6 Schematic diagram of ignition and disaster formation mechanism

综上,树线故障机理可归纳为由接触导通、炭化燃弧到引燃成灾的渐进链条。接触导通阶段以树体高阻、微弱泄漏电流和局部电场畸变为主,解释了树线故障早期难以被常规保护识别的原因;炭化燃弧阶段中,水分迁移、焦耳热、热解炭化和电弧漂移形成正反馈,使等效阻抗下降、故障电流增大并产生高频暂态;引燃成灾阶段则由电弧热、炭化层、火花颗粒和林下可燃物共同决定点火概率,并受风速、湿度和燃料状态放大。但总体看,现有工作对单一现象的试验描述较多,对“树线接触—炭化燃弧—引燃成灾”的统一定量模型仍不足,尤其缺少可跨树种、含水率、接触压力、接地方式和气象条件迁移的参数化转换判据。后续需要建立可由现场监测量反推的阈值体系,将电气特征、温升/热解程度、炭化长度或等效阻抗突变、可燃物含水率

和点火能量纳入同一风险状态空间。面向山火风险防控,后续研究应在机理层面强化树种含水率、接触动态、接地方式和气象环境的耦合建模,在工程层面把早期电气特征、通道植被状态和点火风险评估联动起来,从而实现由故障识别向主动防灾的转变。

2 树线故障检测

树线故障是配电网架空线路中的典型高阻故障形式,目前主要有基于电气波形的检测方法、基于局部放电信号的检测方法以及其他检测方法。其中,基于电气 waveform 的方法研究最成熟,局部放电检测则主要应用于覆盖导线与森林线路故障监测,而其他检测则有基于磁场、多模态信息融合,其中多模态信息融合检测是未来研究方向。各个检测方法从各个维度的对比分析见表2。

表2 检测方法对比分析

Table 2 Comparison analysis table of detection methods

检测方法	检测范围	灵敏度	准确度	实时性
电气波形分析	安装点上下游0~30 km	接地电阻 $\geq 5\text{ k}\Omega$ 电流突变量 mA 至 A 级 波形捕捉 μs 至 ns 级	定位误差 100~500 m	工频周期采样暂态分析可达 ms 级
局部放电信号	单传感器覆盖半径 0.5~2 km	视在放电量 $<10\text{ pC}$	定位误差 10~50 m	高频脉冲检测, μs 级响应
磁场信号	有效监测 1~2 个档距	电流变化引起的磁场波动 mA 至 A 级	故障检出率 70%~85%	高频磁场在线检测
遥感+电气波形融合	遥感百公里级幅宽 遥感识别净空距离 $<1\text{ m}$ 的树线故障		树障识别率 $>85\%$ 综合预警准确率 $\geq 90\%$	遥感数据更新周期约 5 天,电 气波形采样周期可达 ms 级

2.1 基于电气波形的树线故障检测方法

当树木接触三相配电线路时,会产生高阻接地故障,导致零序电流和零序电压出现瞬态畸变和长期波动。通过在线路上布置量测点采集这些波形,再对波形进行多维特征分析,进而将这些特征输入规则判别或机器学习模型,最终实现对树线故障的检测和识别,电气波形的树线故障检测方法原理见图7。

2.1.1 基于时域波形特征分析的检测方法

由于树枝接触导线后会形成非线性电弧,因此故障电流通常会出现明显波形畸变,因此Wei等提出区间斜率(interval slope)指标描述波形变化特征,并通过比较不同馈线之间的零序电流波形差异实现故障线路识别。在真实 10 kV 配电系统中进行的多组树障实验,结果表明该方法能够有效检测谐振接地系统中的弱树障故障,并显著降低负荷波动导致的误判^[25]。

除了瞬态波形畸变外,研究人员还发现树线故障通常伴随明显长期波动特征。Wang等提出基于

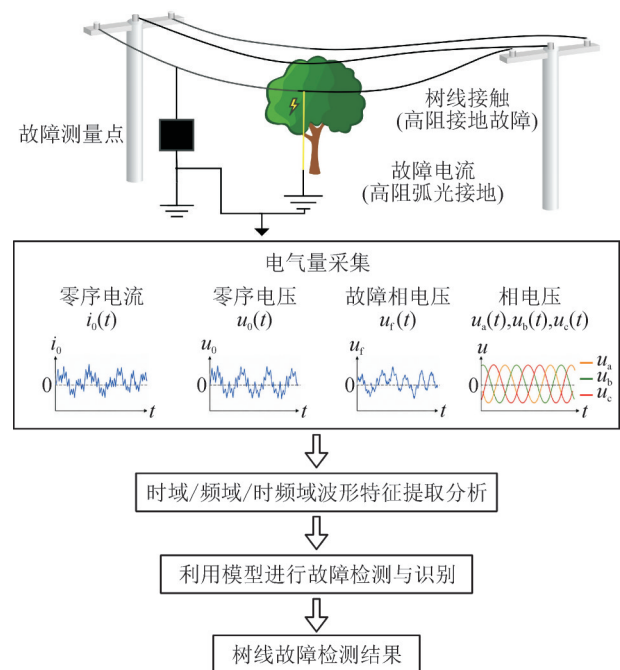


图7 电气波形的树线故障检测方法原理图

Fig. 7 Schematic diagram of tree-line fault detection method based on electrical waveforms

零序电流长期波动特性的树线故障检测方法^[26],指出树枝接触导线后通常会经历树木加热、水分蒸发以及炭化燃烧3个阶段,因此零序电流会呈现明显长期波动现象。为了更加准确描述这种动态变化过程,文中采用近似弧长参数化(approximate arc-length parameterization, AALP)对零序电流曲线进行标准化处理,并提取当前标准偏差(current standard deviation)、平均电流变化率(mean current variation rate)以及电流变化率的标准差(standard deviation of current variation rate)等特征参数。随后,研究建立改进灰狼优化概率神经网络(IGWO-PNN)分类模型实现故障识别。实验结果表明,该方法识别准确率达到97.5%,明显优于传统谐波分析方法^[26]。

以上研究表明树线故障不仅具有瞬态特征,同时还具有明显长期动态变化特征,因此长期波动分析逐渐成为树线故障研究的重要方向。

2.1.2 基于频域波形特征分析的检测方法

Gomes等提出了一种基于高频信号与稀疏编码(sparse coding)的树线高阻抗故障检测方法^[27],利用移位不变稀疏编码(shift-invariant sparse coding)提取树线故障高频电压信号中的频域特征,并结合随机森林(random forest)模型实现故障识别^[28]。基于22 kV真实树障故障数据进行验证,结果表明该方法故障识别准确率达到94.52%,能够有效提取10~1 000 kHz频段内的高频暂态特征,实现树线故障与正常工况的有效区分^[27]。

2.1.3 基于时频域波形特征分析的检测方法

在基于时频域波形特征分析的树线故障检测研究中,研究人员主要通过小波变换、时频能量分析以及智能分类模型提取故障暂态特征,以提高高阻抗故障的检测性能。Baqui^[29]采用离散小波变换对故障电流进行时频分解,并结合人工神经网络建立高阻抗故障检测模型,实现了故障状态与正常运行状态的有效区分,提高了复杂工况下故障识别的准确率。Garci等^[30]利用小波变换提取故障电流中的瞬态时频特征,通过分析不同频带能量变化实现高阻抗故障检测,结果表明该方法对弱故障电流特征具有较好的敏感性和检测能力。

Garci等^[30]在小波时频分析基础上,引入重现图(recurrence plot)对故障电流的小波系数进行特征映射,并结合随机森林(random forest)分类模型实现高阻抗故障识别,结果表明该方法能够有效提高不同故障类型之间的区分能力。Lai等^[31]则利用离散小波变换提取电压、电流信号中的高频暂态分量,并结合继电保护算法构建随机高阻抗故障检测模型,

实现了随机高阻抗故障的快速检测,提高了故障检测的灵敏度与可靠性。

总体而言,基于电气波形的检测方法依托既有互感器,具备全线路覆盖、成本低、实时性强等工程优势,但其对早期高阻态弱故障特征的辨识能力存在固有局限。为克服这一不足,时频域波形特征分析方法被引入,它能够有效提取树线故障中的非平稳暂态信息,并进一步结合智能分类模型,从而在复杂配电环境下显著提升故障检测的整体性能。两类方法相辅相成——前者提供经济高效的底层数据支撑,后者则针对性地增强了弱故障识别能力,共同构建了更完善的检测体系。

2.2 基于局部放电信号的树线故障检测方法

局部放电信号数据通过鞭状天线、罗科夫斯基传感器、电容分压器、电压型传感器等方式进行采集^[32]。局部放电信号采集示意图见图8。

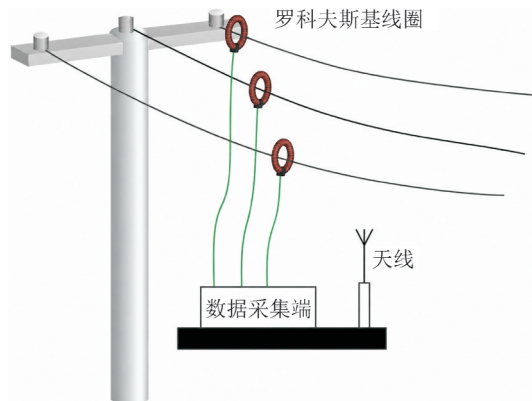


图8 局部放电信号采集示意图

Fig. 8 Schematic diagram of partial-discharge signal acquisition

2.2.1 基于高频局放与高频电脉冲检测方法

树枝接触导线时通常伴随局部放电与高频电脉冲, Misak等研究覆盖导线系统中的树障故障检测问题,采用高频局放分析、高频脉冲检测以及频谱分析模型实现树线故障识别^[33]。结果表明树枝接触导线后会产生明显高频电脉冲,同时伴随强电磁辐射,而高频局放特征能够有效识别覆盖导线中的树障故障,说明局部放电信号中包含大量树障故障信息,因此局放检测具有较高检测灵敏度。

2.2.2 基于单根鞭状天线监测方法

Fulnecek和Misak开发了一种更廉价的检测方法,使用单根鞭状天线替代3个单层电感传感器,通过计算信号陡度、基于Z-score的软阈值消除离散谱干扰、聚类去除随机脉冲干扰,最终识别局部放电模式^[34]。在12 km长的真实线路上采集26 660个信号,实验结果表明该方法准确率为99.5%,精确率为

83.3%, 召回率为 50%^[35]。虽然性能略低于多传感器方案, 但成本显著降低, 便于大规模部署用于故障定位。

总的来说, 局部放电检测能捕捉故障萌芽阶段的高频电磁信号, 灵敏度卓越, 利于超前预警, 但需专用传感器且抗干扰性要求较高。

2.3 基于磁场信号的树线故障检测方法

相比传统电流检测, 磁场检测具有非接触、高频敏感以及安装灵活等优点, 因此近年来受到广泛关注。树线故障电弧会产生明显高频电磁辐射, 而高频磁场传播过程中会产生相位变化, 因此可以利用不同位置磁场信号之间的相位差实现故障检测与定位^[7]。

Nooshin Bahador 等提出基于高频磁场相位变化的树线故障定位方法^[35], 通过测量故障传播过程中的高频磁场相位变化实现故障定位。该方法采用非接触式磁场传感器采集故障信号, 并建立高频磁场传播模型。研究发现树线故障电弧会产生明显高频电磁辐射, 而高频磁场传播过程中会产生相位变化, 因此不同位置磁场信号之间存在稳定相位差。实验结果表明, 该方法故障定位误差小于 1.5%, 能够实现树障故障在线定位, 并对弱电弧信号具有较高灵敏度。相比传统接触式测量方法, 磁场检测更适合山区线路与复杂环境中的在线部署。

总的来说, 磁场检测以非接触方式实现高频电弧信号的精准定位, 适于复杂林区部署, 然其工程化程度与抗背景噪声性能仍有待提升。

2.4 基于卫星遥感与电气波形分析的融合检测方法

N. Bahador 等人提出了一种面向中压配电网树障高阻抗故障的广域监测框架, 首先利用 Sentinel-II 卫星遥感光谱数据和 Daubechies-10 小波变换提取线路周围树木信息, 并建立树木电导率与光谱指数之间的回归模型, 实现了危险树木区域的识别与风险映射^[36]。结果表明, 该模型能够较好反映树木电导率与光谱特征之间的关系, 回归模型相关系数达到 $R^2=0.4409$ 。

在故障检测阶段, 作者采用经验模态分解(EMD)对树障故障电流进行分解, 将信号划分为高频分量与基波分量, 并结合分位数回归(quantile regression)建立两者之间的特征关系模型, 通过 Quantile-Quantile 图和回归斜率实现树障高阻抗故障识别。实验结果表明, 该方法能够有效检测杨树、胡桃树和白蜡树等不同树种产生的树线高阻信号, 并具有较好的抗噪声能力和检测准确性^[36]。

卫星遥感与电气波形融合方法兼顾广域植被

风险识别与局部故障确认, 是林区火灾主动防控的前沿方向, 当前面临时空分辨率与实时性的技术瓶颈。

目前树线故障检测已经形成基于电气波形和基于局部放电信号两大主流研究方向。其中, 基于电气波形的方法研究最成熟, 适用于传统配电网保护系统; 而基于局部放电的方法则具有较高灵敏度。

当前研究趋势主要集中于多模态信息融合、深度学习识别、高频在线监测以及边缘智能检测等方向。

未来, 随着智能配电网与高频传感技术的发展, 树线故障检测技术将在森林线路安全运行与电网防火领域发挥更加重要的作用。

3 树线故障预测

树线故障预测是在故障机理分析和隐患检测评估基础上的进一步研究, 本节围绕树线故障预测模型展开, 梳理不同模型在历史故障、气象预测、线路台账、运行状态、树线距离及 LiDAR/遥感植被数据等输入条件下的建模思路、适用场景和预测输出。树线故障预测的核心目标并非对故障成因进行事后解释, 而是面向故障发生前的风险识别与预警, 预测树枝触线等故障事件可能发生的时间、空间位置及其概率水平。在此基础上, 可为差异化巡检与树障修剪以及必要情况下的停运决策提供依据, 同时为后续输电线路故障引发山火的风险评估提供故障概率输入。

树线故障预测方法也可归纳为 3 类: 统计模型预测方法、数据驱动预测方法和数据受限场景预测方法。统计模型主要适用于故障率和故障次数等宏观预测, 数据驱动模型适用于多源特征下的非线性风险预测, 数据受限场景方法则面向树线故障样本少、标签弱、极端事件少和监测不足等实际问题。3 类方法的本质区别在于风险信息的来源不同。统计模型预设故障计数或故障率的概率分布, 强调可解释的总体规律。数据驱动模型不预设固定函数, 而由样本学习多变量非线性映射。数据受限方法则通过重采样、事件条件化、时空相关或物理约束补足有效标签。

3.1 统计模型预测方法

统计模型预测方法的代表性研究见表 3。

统计模型预测方法可以分为传统故障统计与计数回归两类, 其以历史故障记录和气象统计规律为基础, 适合描述“故障频次如何随天气和时间变化”。它通常不直接刻画某一棵树的摆动、倒伏或树线距离变化, 而是从区域、馈线或线路尺度估计故障率、停电数量和可靠性指标。

表3 统计模型预测方法对比

Table 3 Comparison of statistical model prediction methods

方法类别	参考文献	模型或方法	输入	典型输出/效果	适用条件/局限
传统故障统计	[37]	分天气状态可靠性模型	历史故障、修复时间 系统结构	长期平均故障率 可靠性基准	适合中长期、区域/馈线尺度;难反映局部树线状态
	[38]	非齐次泊松过程、时序 Monte Carlo	强风、雷电、修复时间、线路 故障率	季节性故障率 可靠性分布	适合有长期天气—故障序列;依赖过程与分布假设
	[39]	Fourier、Gaussian 和 Weibull 函数	月故障率、季节性灾害	月尺度周期性故障率	适合季节规律稳定的长期预测;细尺度不足
计数回归	[40]	泊松回归	天气变量、线路故障记录	天气相关故障次数 预测区间	适合稀有计数且均值近似 方差;不适合过度离散
	[41]	负二项回归	阵风、大气放电、停电数量	期望故障次数与单位长度故障率,反映过度离散特征。	适合方差大于均值、含异常峰值的计数;仍缺少树木机理

传统可靠性统计法的基本思路是利用长期统计量描述线路或元件的平均可靠性。Billinton 和 Singh 的可靠性评价体系以故障率、修复率、停运率和系统结构为基础,形成负荷点和系统可靠性指标,可用于估计线路或元件在较长时间尺度内的平均风险水平^[37]。该研究还表明故障率会随天气状态改变,平均故障率能够提供区域或线路的基准风险,但它只能说明“长期平均上容易故障到什么程度”,不能判断某一处近线树木在强风下是否会接触导线。

在此基础上,Alvehag 和 Soder 将严重天气的季节分布、强风和雷电等因素引入配电系统可靠性模型,通过非齐次泊松过程和顺序 Monte Carlo 表达严重天气发生频率及其对故障率和修复时间的影响^[38]。Wang 等用 Fourier、Gaussian 和 Weibull 函数拟合月尺度故障率分布,强调线路故障率会随季节性气象灾害呈现周期性变化^[39]。

计数回归模型适用于故障次数、停运次数等非负整数型响应变量的建模,其核心是建立气象因素与单位时间内故障事件发生数量之间的统计关系。Zhou 等采用泊松回归描述架空配电线路天气相关故障的计数特征,通过 Monte Carlo 方法给出预测边界^[40]。

该研究说明,气象条件可以通过统计模型转化为故障次数或故障概率,这为树线故障中“强风、雷电、降雨与故障频次关系”的建模提供了基础。

极端恶劣天气下故障数量往往波动较大,普通泊松回归可能不足以描述方差大于均值的计数特征。Fanucchi 等采用负二项回归,将阵风风速、大气放电等变量与配电系统停电数量和单位长度故障率联系起来^[41]。对于树线故障而言,强对流天气可能在短时间内造成多个树枝触线、倒树压线或树障接地事件,负二项回归更适合表达这种集中爆发和离散性强的故障计数。该研究中负二项回归的 AIC 和 BIC 分别为 4 124.65、4 141.52,明显低于泊松回归的 7 925.59、7 938.24,说明当故障计数存在过度离散和异常峰值时,负二项回归比泊松回归更合适。

总体而言,统计模型更适合分析不同天气、季节及线路条件下故障总体水平的变化,但对局部线路区段及树线空间关系的刻画相对有限。为进一步支持线路段风险分级和清障决策,可在统计分析的基础上引入树线距离、植被特征和线路状态等信息,并结合数据条件采用数据驱动方法进行补充。

3.2 数据驱动预测方法

数据驱动预测方法的代表性研究见表4。

表4 数据驱动预测方法对比

Table 4 Comparison of data-driven prediction methods

方法类别	参考文献	模型或方法	输入	典型输出/效果	适用条件/局限
个体学习模型	[42]	逻辑回归、ANN	停电、天气、季节、线路设备	输出故障原因类别,可识别树木接触	适合有原因标签的诊断/识别;提前预测能力有限
	[43-44]	SVM	历史故障、气象、台账、负荷	输出运行工况或风险类别,与状态转移模型衔接计算时变故障概率	适合中小样本、高维非线性分类;依赖特征筛选和参数
集成学习模型	[44-45]	XGBoost	天气因素、10 kV 停电数据	输出停电数量及变化趋势,可刻画多因素的非线性影响	适合复杂天气组合的非线性计数预测;依赖标签质量
	[44,46-48]	随机森林	环境、线路、植被、树木停电	区段输出树障停电风险等级,融合多源线路植被特征	适合多线路—植被特征和风险排序;漏报时重视召回率。

数据驱动预测方法以特征学习为核心。与统计模型相比,它不再预先假定故障率函数,而是从气象、历史停电、线路结构、运行状态、地形、植被管理和LiDAR/遥感树木变量中学习风险映射。对于树线故障预测而言,这类方法的价值在于能够把树线检测评估得到的树线距离、近线树木、树高和通道净空转化为预测特征。

数据驱动预测模型中又可分为个体学习模型和集成学习模型,其中个体学习模型通常包括逻辑回归、SVM和ANN等,它们适合把故障预测转化为分类或回归问题。Xu和Chow将逻辑回归和人工神经网络用于配电系统故障原因识别,输入包括停电记录、天气、季节、线路和保护设备等信息,其中树木接触故障是典型故障类型之一^[42]。该研究不是严格意义上的提前预测模型,但它说明树线相关故障可以被数据化表示,为后续树线故障分类和风险识别提供了思路。

个体学习模型也可以嵌入故障概率计算过程。谢桦等先利用Relief算法筛选与故障密切相关的特征变量,再采用SVM预测配电线路运行工况,并结合状态转移模型计算时变故障概率^[43]。在该文献中,SVM承担运行工况分类功能,后续概率计算依赖状态转移模型。该研究表明,个体学习模型可以与概率模型结合,用于构建动态故障概率。算例中SVM工况分类准确率为0.924,随后通过状态转移模型将工况类别转化为各线路时变故障概率。因此选择SVM的依据是其适于小样本、高维非线性分类,而不是它能直接输出故障概率。

集成学习模型通过多个基学习器共同完成预测,典型方法包括随机森林、XGBoost、BART、GBDT和集成决策树。树线故障受气象、树木、线路和地形共同影响,变量之间往往存在非线性和交互作用,集成学习模型因此比单一模型更适合用于多源风险预测。

严道波等以天气因素和10 kV配电线路停电数据为输入,采用XGBoost建立区域线路停电数量预测模型,结果表明模型能够较好反映实际停电变化趋势,且超高温、暴雨等恶劣天气条件下配电线路停电概率较高^[45]。该研究没有专门区分树线故障,但它说明天气因素对配电线路停电数量的影响具有非线性特征,XGBoost适合处理复杂天气组合下的风险变化。该研究的交叉验证中,XGBoost的平均绝对误差和均方根误差分别为3.33、5.00,均优于RF(4.14、7.78)和GBDT(3.48、5.23)。对暴雨、超高温样本加权后,两项误差进一步降至2.78条和4.23。

该结果表明,当目标是预测复杂天气组合下的区域停电数量时,可优先选择XGBoost。

需要指出的是,区域停电预测与树线故障预测在预测对象和数据需求上存在明显差异。前者面向区域或馈线的停电数量和概率,主要依赖气象、历史停电及设备台账。后者需判断特定树木或枝条是否侵入线路安全净空,预测尺度细化至树木、档距或线路段,因而还需动态树线距离以及树高、冠幅、倾倒方向和导线位置等几何信息。对于临界接触场景,树线距离应达到厘米级或至少能够分辨安全净空裕度。一般停电模型只能提供区域风险背景,难以替代具体树线故障预测。

植被管理和树木相关停电研究中,随机森林较多。Cerrai等采用统计方法和OPM两种思路评估增强树木修剪对配电网停电的影响,其中OPM基于随机森林和BART,将天气、土壤、植被、电网特征和历史停电联系起来^[46]。如图9所示,其模型流程可概括为“多源特征输入—随机森林建模—故障点预测输出”3个层次。将线路空间分布、树冠覆盖、线路周边植被缓冲区以及ETT完成比例等作为输入特征,利用随机森林学习线路环境和植被管理水平与停电故障点之间的非线性关系,最后输出故障点预测结果,并通过预测值与实际故障点的对比评价模型效果。

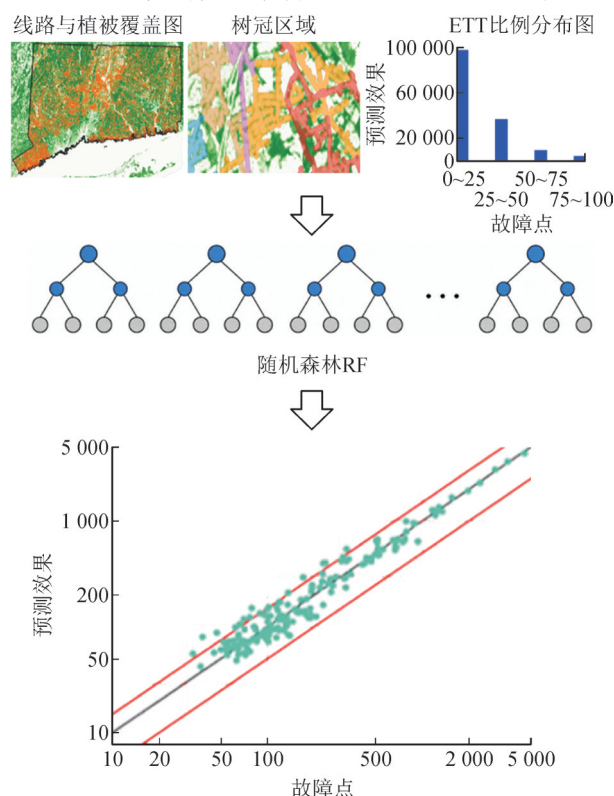


图9 基于RF的植被管理与停电预测模型流程图

Fig. 9 Flowchart of the vegetation management and power outage prediction model based on RF

Taylor等进一步建立随机森林OPM,以植被管理、土地覆盖、干旱、地形、天气和电网设施为输入,预测风暴事件下配电网停电点,并量化增强树木修剪的减灾作用^[47]。这类研究表明模型不仅预测停电,同时能评价树木修剪等运维措施对风险的影响。

更贴近树线故障预测的是树木相关停电风险建模。Wedagedara等采用随机森林和SHAP方法,利用LiDAR树木变量、土壤地形、线路属性和植被管理信息预测树木相关停电风险,并解释近线树木、树高和线路属性等变量的重要性^[48]。同一研究团队还比较决策树、随机森林、KNN、SVM和XGBoost等非参数机器学习模型在树木致停电风险预测中的表现,结果显示随机森林整体表现较优,SVM在召回率上具有优势^[44]。上述研究表明,集成学习模型能够融合环境与线路特征,但树线故障预测还需重视高风险样本的识别。在模型对比中,随机森林的准确率、AUC-ROC和F₁值分别为0.753、0.746、0.693,整体表现较好。SVM的召回率最高,为0.727,更适用于强调高风险区段检出的场景。因

此,模型选择应结合风险排序和漏报控制需求,不能仅依据准确率。

此外,多源数据融合仍受数据一致性的制约。气象、电气量测、LiDAR、遥感和GIS数据在采样周期、空间分辨率及数据单元上存在差异,增加了数据同步、时空配准和特征对齐的难度。若时间错位、坐标偏差和尺度差异未得到有效处理,可能引入额外误差。因此,后续研究需统一时间基准、空间坐标和事件编码,建立“树木—导线—档距”映射关系。目前尚未形成通用且可迁移的融合流程。

总体来看,数据驱动模型把树线故障预测从宏观故障率估计推进到多源特征映射。其不足也比较明确,模型依赖较可靠的标签和足够样本,而树线故障往往低频、高危、正负样本不均衡,极端天气样本也不足。面对这些数据条件,单纯增加模型复杂度并不能解决问题,需要进一步引入标签补偿和机理融合方法。

3.3 数据受限场景预测方法

数据受限场景下树线故障预测方法的代表性研究见表5。

表5 数据受限场景预测方法对比

Table 5 Comparison of prediction methods in data-limited scenarios

方法类别	参考文献	模型或方法	输入	典型输出/效果	适用条件/局限
标签 补偿法	[49]	事件严重度分类、Conditioned OPM	天气事件、历史停电、相似度	提高高影响事件在训练中的权重	适合有相似历史极端事件;事件库不足时受限
	[50]	SMOTE+SVM	强对流气象、树障接地标签	分区评估树障风险, SMOTE增样本提升识别精度	正样本不足10%,核验合成样本偏差与跨场景泛化
	[51]	无监督分区、时序模型、ML回归	植被停电、区域、天气	先分区再分别预测生长型/天气型植被停电	适合标签不完整但有区域与时序信息;分区质量决定上限
	[52]	Gaussian Conditional Random Field	天气、植被指数、馈线分段、停电	输出馈线分段植被风险并补偿缺失/异常数据	适合区段风险存在空间相关;依赖相关结构假设
机理 融合法	[53]	LiDAR+风荷载距离评估	LiDAR几何、风荷载、树线距离	输出风荷载下动态净空与接触风险	适合高精度几何和风场数据;受LiDAR/风荷载误差影响
	[54-57]	概率脆弱性模型	通道偏差、树木接触、风/冰荷载	输出树木接触、元件失效概率及系统影响	适合极端天气外推;参数校准与计算成本较高
	[58]	图像识别+有限元损伤评估模型	卫星图像、树高、风荷载、电杆参数	连接树木识别、倒伏概率与电杆损伤概率	适合缺少故障标签但具备影像/结构参数;建模链较长

数据受限场景预测方法并不是新的单一算法类别,而是针对树线故障预测中“数据不理想”的建模策略。树线故障通常低频、高危、局部性强,很多线路段没有历史故障记录并不代表未来风险为零。强对流、台风、冰雪和山火相关天气事件样本也较少,常规监督学习模型若直接训练,容易被大量普通样本主导,导致高风险事件被低估。

数据受限场景预测方法可分为标签补偿和机理融合两大类,标签补偿方法主要解决样本组织和类别分布问题。Yang等提出的Conditioned OPM针对风暴停电预测中的事件严重度不均问题,通过Quantile Weight Distance衡量待预测事件与历史事件的相似性,并将训练样本划分为不同严重度子集,而后进行预测^[49]。该方法提出一种思路,当强风

暴或强对流即将发生时,模型应更多参考相似高影响事件,而不是被大量普通天气样本稀释。

姚福星等的研究直接面向树线矛盾风险预警。该研究将强对流气象监测信息按时间尺度对齐并编码,结合各区域树障接地故障标志变量构造SVM输入数据。由于发生树障接地的数据占比不到10%,文献采用SMOTE对少数类样本进行插值生成,以改善输入样本均衡性^[50]。这里的重点不是简单使用SVM,而是通过样本补偿让模型能够学习到少数但关键的树障接地样本。该文将1 115组数据划分为900组训练样本和215组检测样本,8个区域分类正确率为86.976 7%~92.558 1%, F_1 值均不低于0.855 7。在一个实际强对流日,综合正确率达到98.958 3%。这些结果说明SMOTE+SVM适合少数

类不足的故障预警,但仍需用独立事件检验合成样本偏差和跨事件泛化能力。

标签补偿也可以体现在区域划分和空间相关建模中。Doostan等先采用无监督机器学习确定植被相关停电预测的目标区域,再将植被停电划分为生长相关和天气相关两类,分别采用时间序列模型和非线性机器学习回归模型预测^[51]。Dokic和Kezunovic采用Gaussian Conditional Random Field建立馈线分段植被风险预测模型,利用相邻区段之间的空间相关性处理缺失和异常数据^[52]。这两类方法说明,在树线故障样本本身不充分时,先整理样本边界、区分机理类型和利用空间相关性,往往比直接更换分类器更重要。

文[49-52]中的标签补偿处理思路概括见图10。

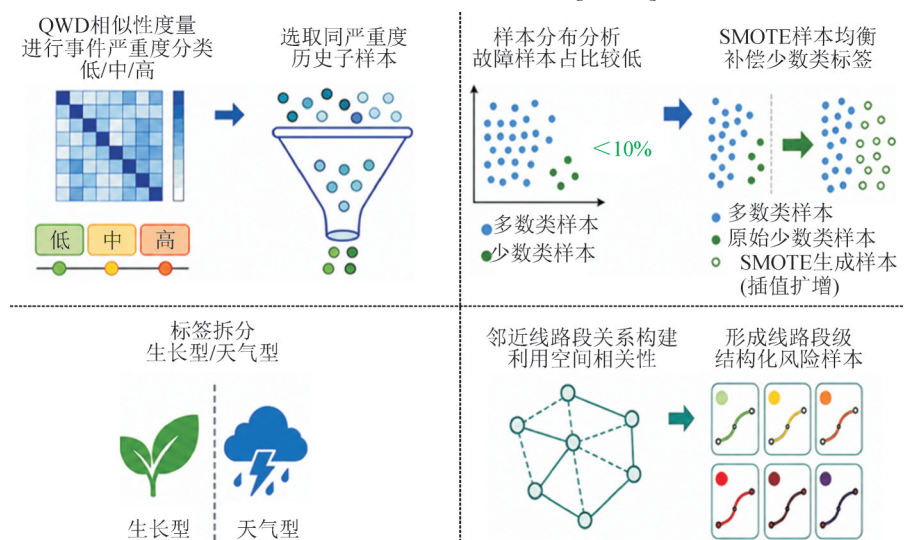


图10 数据受限场景下标签补偿方法总结图

Fig. 10 Summary diagram of label compensation methods in data-limited scenarios

机理融合方法面向另一类数据困难:真实树线故障样本不足,但树木、导线、风荷载和通道状态等物理量可以被观测或计算。Ciapessoni等针对植被接触导致架空线路失效建立概率脆弱性模型,将通道管理偏差、树木接触、风荷载和冰雪荷载纳入线路失效概率评估^[54]。Lee和Ham则利用LiDAR和风荷载分析计算强风下树木与导线之间的动态距离,评估树线距离减小带来的风险提升^[53],这类方法能够把“检测到的树线距离”转化为“未来风荷载下的接触风险”。

进一步,机理融合方法把结构机理与历史停电数据结合。Hughes等指出,纯数据驱动停电预测模型在高影响、低频极端天气下容易受到样本不足限制,因此将杆线结构脆弱性曲线与数据驱动OPM耦合,用物理模型提供极端风下的结构失效概率,用历史数据校准实际停电影响^[55]。Lu和Zhang利用

CNN和滑动窗口方法从卫星图像中提取树木位置,结合树高、异速生长关系和有限元分析建立树木失效风险模型,并计算电杆在风荷载和倒树冲击下的失效概率^[58]。这类研究把“树在哪里、树会不会失效、树失效后是否损伤线路”连接成预测链条,更接近树线故障的真实形成过程。

另一类研究关注树木在强风下倒伏后对线路或杆塔造成的损伤风险,Hou和Chen基于树木有限元模型和风倒脆弱性曲线评估倒树对架空线路等基础设施的中断概率^[56]。Hou和Muraleetharan将树木脆弱性、配电系统元件脆弱性、连接性评估和恢复模型组合起来,分析极端风下倒树对配电系统韧性的影响^[57]。这些研究的预测对象不完全等同于单一树线故障概率,但它们说明树木失效、线路元件失效和系统功能损失可以被统一纳入概率评估框架。

标签补偿方法改善样本组织和类别分布,机理

融合方法补充历史样本中难以充分覆盖的物理过程。对于面向山火风险的林区配电线路,后续预测研究需要将树线检测评估结果、气象预测、植被状态、线路运行信息和物理脆弱性模型结合起来,形成能够服务于树线故障早期预警和风险分级的预测体系。

4 故障引燃山火风险评估

树线故障的产生,有可能产生高温或电弧点燃可燃物,并最终蔓延成为山火,因此自然地还关心故障引燃山火风险评估。



图 11 引燃山火风险评估

Fig. 11 Wildfire ignition risk assessment

4.1 风险评估

在风险评估方面,现有研究逐渐由单一火源识别转向“故障识别—引燃判定—蔓延评估”的链式风险分析框架,该框架首先关注电力系统故障是否具备形成触发源的条件,其次评估故障作用下周边可燃物是否会被点燃,最后进一步分析火灾蔓延过程及其对电网和区域安全的影响。因此,风险评估不再局限于静态火源统计,而是逐步发展为融合气象、设备状态、植被特征、地形条件和电网运行状态的多源耦合评估方法,但仍存在参数依赖强、现场数据获取困难、模型区域适应性不足等问题。

在故障评估方面,Jazebi等系统梳理了高阻接地故障、导线碰撞、设备失效、植被接触及断线落地等典型电网引燃机制^[4],为识别电力设施可能形成触发源的故障类型提供了基础。Mitchell结合加州与澳大利亚典型山火案例,分析了强风、树障接触、导线舞动和设备故障等极端天气条件下的点火链

现有关于引燃山火的研究主要集中在风险评估与防控治理两个方面。其中,风险遵循“故障触发源—点火源—扩展源”的演化过程,核心涵盖点火概率感知建模、山火蔓延时空模拟以及电网后果与脆性评价三大核心环节,旨在全面量化不同环境与工况下的复合风险。防控治理则紧密依托评估结果,构建起覆盖运行控制、工程加固、植被管理和监测预警的多层级防御体系,通过多手段协同全链条切断风险的演化路径,实现从“灾后被动响应”向“源头主动阻断”的转变,见图 11。

条^[59],进一步说明电力山火往往不是由单一设备异常引起,而是由气象条件、线路结构、植被接触和设备失效共同作用形成。Bayani等针对极端风条件下导线舞动和导线碰撞问题,提出结合三维非线性导线振动方程与机器学习代理模型的WRAP风险感知运行规划方法^[60],提高了导线碰撞等复杂物理故障在运行优化中的建模能力。Kandanaarachchi等则利用时域和频域特征识别植被接触高阻故障导致的早期点火风险^[61],解决了高阻故障电流弱、传统保护难以及时识别的问题。

在引燃评估方面,研究重点由“是否存在火源”进一步转向“故障能否点燃周边可燃物”。Keeley与Syphard利用长期火源记录指出,尽管总体火源数量下降,电力线路引燃仍是重点风险来源^[9],说明电力设施在山火火源体系中具有持续关注价值。Muhs等提出将线路故障概率与植被持续点燃概率相结合的山火点火概率模型,并综合考虑气象、潮流和

保护动作等因素^[62],实现了从“电气故障”到“植被点燃”的概率化表达。Ozansoy 从不同植被物种接触导线时的高阻故障电流谐波特征出发,提出植被火险排序方法^[63],解决了不同树种或植被点火风险差异难以量化的问题。由此可见,引燃评估的核心在于综合气象、可燃物、载量、含水量和故障能量等因素,判断故障是否能够转化为实际点火事件。

在蔓延评估方面,研究进一步从点火概率扩展到火势发展及其电网影响。Taylor 与 Roald 结合野火风险图、历史点火趋势及线路故障概率,提出最优线路升级与地下化改造框架^[64],用于识别高风险线路和优先治理对象,同时也指出,若要评估高火险条件下线路停运对系统运行的影响,还需进一步结合潮流约束和负荷削减分析,从而在降低引燃风险与控制停电影响之间进行权衡。Sohrabi 等将野火蔓延模拟与潮流分析结合,从线路易感性、节点脆弱性和系统风险角度开展风险评级^[65],解决了仅评估“是否点火”而忽略火灾扩散和电网后果的问题。该类方法表明,故障引燃山火后,火场蔓延可能导致线路、节点或变电设备退出运行,进而改变电网拓扑和潮流分布,使相邻线路承受转供压力,并诱发过载、电压越限、负荷削减等二次影响。Yusuf 等进一步提出面向电网的野火风险评估框架,将地理火险值、火到达时间、动态潮流仿真、加固策略和电网部件点火概率纳入统一分析^[66],并通过线路、变压器和负荷停运情景刻画山火对电网运行可靠性的影响,体现了从单一部件受火威胁向级联跳闸、欠频减载和系统可靠性评估的扩展。

总体来看,故障引燃山火风险评估仍存在数据和模型两方面不足:故障能量、植被含水率、微地形风场等参数时变性强,真实点火样本、火场观测和电网运行数据又难以充分共享,导致模型迁移和验证受限。同时,现有研究对多灾种耦合、保护动作、通信中断、抢修延迟以及新能源接入后的运行方式变化考虑仍不充分。未来需面向“故障—点火—蔓延—电网后果—恢复”构建闭环评估体系,强化多源数据融合、区域化参数校准和实际案例复盘验证。

4.2 防控措施

针对电力设施引燃山火的复合风险,目前主要通过“时空动态运行控制、长期结构工程加固、时域早期特征检测、精细化植被空间管理”等多维手段协同,构筑起全链条主动防御框架。

1)在运行控制措施方面,引入风险感知运行方法与风险评级模型。通过在极端天气下选择性停运或降载高风险线路,协助调度部门精准识别薄弱区

域并量化资源配置优先级,实现主动规避点火风险。

2)在植被管理措施方面,将线路走廊清障、修剪、巡检和燃料管理作为降低点火概率的基础手段。同时,依据不同树种的火险差异制定差异化清理优先级,解决传统按固定周期或统一距离修剪忽视物种差异的问题。

3)在工程加固措施方面,推进高火险区线路地下化改造、物理加固、关键节点保护和老旧设备更新。从根本上降低电网的长期结构性风险,解决线路长期暴露和重复故障的痛点。

4)在早期检测和预警措施方面综合利用电流波形特征、多源传感器、遥感、视频监控及无人机巡检等手段。在植被接触和高阻故障早期实现异常识别,改变传统“火灾发生后才响应”的被动处置滞后局面。

尽管目前的多维防控手段已初具规模,但各项措施之间仍多处于分立运作状态,缺乏深度的时空协同与全链条闭环交互。未来研究亟需打破各防灾业务板块的数据壁垒,深入探究“运行控制—工程加固—早期检测—植被管理”之间的动态耦合互补机理,以及在投资成本与供电可靠性约束下的多目标权衡策略。同时,依托跨行业的数据共享,推动防控决策由“定性经验型”向“数据驱动的定量精准型”演进,并通过实际复杂电网的长周期工程验证,最终构建起具备全时空自适应进化能力的现代化电网山火闭环治理体系。

针对电力林火“触发源—点火源—扩展源”的链式演化特征,文中提出“电气隔离—物理阻隔—生态阻燃”三级防御体系。①电气隔离面向故障触发源,主要措施包括高火险天气下优化网架运行方式、调整潮流分布、加强高阻接地和断线等故障识别、缩短故障切除时间,并在极端场景下对高风险线路实施选择性停运,同时保障重要负荷供电。②物理阻隔面向故障向点火转化的过程,主要措施包括在高风险区段采用绝缘导线、防弧金具和阻燃设备,改造老旧或薄弱线路,设置杆塔和配电设备周边防火隔离区,并根据树高、风偏和导线弧垂动态管控树线安全距离。③生态阻燃面向火势扩展源,主要措施包括按植被易燃性开展分区分级清理,在线路走廊建设低燃性乡土植被带,对枯枝落叶、灌草密集区和重点坡向区域进行可燃物减载,并在变电站、重要杆塔和居民点周边设置生态防火缓冲区。通过上述3级措施,可分别降低故障点火概率、阻断点火接触路径,并削弱火势蔓延及其对电网的反向冲击。

从国内外现状看,国外高火险地区已较多采用公共安全停电、线路地下化、绝缘导线改造、设备耐火加固、遥感监测和火险地图驱动的投资排序;国内则主要依托输配电通道治理、山火在线监测、无人机巡检、卫星热点识别、重要通道差异化运维和政企联动应急处置。未来防控将从单项措施叠加转向链式协同,通过气象、林草、应急和电网数据融合,形成动态风险地图,并将评估结果嵌入调度控制、检修计划、投资规划和植被治理,实现从经验处置向量化决策、从灾后响应向源头阻断和韧性恢复转变。尽管目前国内外防控手段已初具规模,但运行控制、植被管理、工程加固、监测预警和应急恢复之间仍缺乏充分协同。未来应打破气象、林草、应急、交通和电网等数据壁垒,在投资成本、停电风险、供电可靠性和生态保护约束下开展多目标权衡,推动电网山火防控由定性经验型向数据驱动、闭环协同和自适应治理演进。

5 结论

在全球气候变暖、极端天气频发、山火灾害日趋严峻的今天,林区配电线路作为重要火源隐患,已成为森林防火与电网安全的重点关注对象。为系统梳理树线故障致灾机理、技术方法与防控体系,文中以林区配电线路树线故障诱发山火为研究对象,系统综述故障机理、检测技术、预测方法与山火风险评估四部分内容,旨在加深对树线故障和山火的认识和防控,总结如下:

1)在故障机理层面,明确树线故障历经接触导通、炭化燃弧、引燃成灾3个递进阶段,揭示了热—电—化学多场耦合的渐进致灾本质,阐明树线故障早期高阻隐蔽、中后期逐级演化引发山火的内在规律。

2)在故障检测层面,现有技术涵盖电气波形分析、局部放电监测、磁场信号检测以及多模态融合4类方法,各类技术优势互补,多模态融合也是复杂林区场景下故障智能检测的主流发展趋势。

3)在风险预测层面,统计模型、数据驱动模型与数据受限场景方法构成完整预测体系,可分别适配宏观风险统计、非线性精准预测、小样本极端场景预估等不同应用场景。

4)在风险防控层面,现有防控体系涵盖运行控制、工程加固、监测预警、植被管理四大维度,通过风险感知调度、线路改造、智能监测、通道治理等措施构建了多环节防御框架,但各项措施协同性不足,且在跨尺度耦合机理、极端场景预警、多源信息融合等方面仍存在明显短板。

未来利用卫星遥感、无人机巡检、三维激光点云扫描等科技手段,监测融合气象、植被、线路、地形等多源火险因子,动态、定量、精细评估山火风险,并进行时空风险预测推演,是科技赋能救灾、减灾、防灾的重要方向。

参考文献:

- [1] Vahedi S, Zhao Junbo, Pierre B, et al. Wildfire and power grid nexus in a changing climate[J]. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 2025, 2(4): 225-243.
- [2] Syphard A D, Keeley J E, et al. Location, timing and extent of wildfire vary by cause of ignition[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2015, 24(1): 37-47.
- [3] Keeley J E, Syphard A D. Historical patterns of wildfire ignition sources in California ecosystems[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2018, 27(12): 781-799.
- [4] De Leon J S. Review of wildfire management techniques-part I: causes, prevention, detection, suppression, and data analytics[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 35(1): 430-439.
- [5] Panossian N V, Elgindy T. Power system wildfire risks and potential solutions: a literature review & proposed metric[R]. 2023-06-08.
- [6] Bandara S, Rajeev P, Gad E. Power distribution system faults and wildfires: mechanisms and prevention[J]. *Forests*, 2023, 14(6): 1146.
- [7] Yang Chunlan, Zhang Wenhui, Tang Rui, et al. Tree-related high-impedance fault in distribution systems: modeling, detection, and ignition risk assessment(review)[J]. *Energies*, 2025, 18(3): 548.
- [8] Gashteroodkhani O A, Majidi M, Etezadi - Amoli M, et al. Fire hazard mitigation in distribution systems through high impedance fault detection[J]. *Electric Power Systems Research*, 2021(192): 106928.
- [9] Rhodes N, Ntamo L, Roald L. Balancing wildfire risk and power outages through optimized power shut-offs[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 36(4): 3118-3128.
- [10] Savva A, Kyrkou C, Kolios P, et al. Advances in remote sensing and AI for vegetation monitoring in power line corridors: a review and future directions [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2025, 13(3): 2-26.
- [11] 杨淳岚, 陈天翔, 杨博闻, 等. 中压线路树木接地故障放电特性试验[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(4): 38-44.
Yang Chunlan, Chen Tianxiang, Yang Bowen, et al. Discharge characteristic test of tree grounding fault of medium voltage line[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(4): 38-44.
- [12] 宁鑫, 胡馨月, 张华, 等. 配电线路单相触树接地故障特征分析[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(7): 137-143.
Ning Xin, Hu Xinyue, Zhang Hua, et al. Characteristic analysis of tree-contact single-phase-to-ground fault in power distribution lines [J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2023, 35(7): 137-143.
- [13] 徐会凯, 黄小龙, 杨淳岚, 等. 10 kV 架空线路树线放电发展过程及其特征研究[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(4): 278-289.
Xu Huikai, Huang Xiaolong, Yang Chunlan, et al. Development

- process and characteristics study of tree line discharge in 10 kV overhead power lines[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(4): 278-289.
- [14] 丛子涵, 刘亚东, 严英杰, 等. 基于磁流体动力学的配电线路树—线早期故障仿真分析[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(s2): 562-568.
Cong Zihan, Liu Yadong, Yan Yingjie, et al. Simulation analysis of tree contact incipient fault in the distribution network based on magnetohydrodynamic[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(s2): 562-568.
- [15] 丛子涵, 刘亚东, 严英杰, 等. 配电线路树线早期故障动态特性仿真与试验[J]. *高电压技术*, 2023, 49(3): 1224-1233.
Cong Zihan, Liu Yadong, Yan Yingjie, et al. Simulation and experiment on tree-contact incipient fault dynamic characteristic in the distribution network[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(3): 1224-1233.
- [16] Liang Dong, Xu Bingyin, Wang Pengwei, et al. Comprehensive study on tree contact single phase to ground faults: modelling, risk analysis, and detection recommendations[J]. *High Voltage*, 2024, 9(6): 1280-1287.
- [17] Appelt P J, Goodfellow J W. Research on how trees cause interruptions - applications to vegetation management[C]//*Rural Electric Power Conference*, 2004: 1-6.
- [18] Don R B, Benner C L, Wischkaemper J A. Distribution feeder caused wildfires: mechanisms and prevention[C]//*2012 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2012: 43-51.
- [19] Tony M. Vegetation conduction ignition test report-final[R]. 2015-07-16.
- [20] Yang Kai, Wu Hong, Liu Shitao, et al. Research on critical breakdown distance of 110 kV/220 kV AC transmission lines with trees approaching[C]//*The proceedings of the 10th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering(FAFEE2022)*, 2023: 863-871.
- [21] Goodfellow J, Appelt P. How trees cause outages[C]//*Utility Vegetation Management Conference*, 2014: 1-6.
- [22] Jiang Chenshihao, Bi Maoqiang, Zhang Shiyu, et al. Study on arc characteristics and combustion feature of tree-wire discharge fault in distribution line[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024(230): 110210.
- [23] Chen Guowei, You Fei, Chen Siyi, et al. Influences of typical forest vegetation combustion processes on breakdown characteristics and mechanisms of wire - wire air gaps[J]. *Fire Safety Journal*, 2025(155): 104431.
- [24] Shao Qianqiu, Fan Songhai, Fu Zhengzheng. Research on arc discharge characteristics of 10 kV distribution line tree line[J]. *Eng.*, 2026, 7(1): 7.
- [25] Wei Mingjie, Shi Fang, Zhang Hengxu, et al. Detection and feeder identification of the high impedance fault at distribution networks based on synchronous waveform distortions[EB/OL]. [2026-03-17]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.03411>.
- [26] Wang Pengwei, Xu Bingyin, Yip T, et al. Identification of tree-related high-impedance earth faults based on long-term fluctuations in zero-sequence current[J]. *Energies*, 2025, 18(1): 179.
- [27] Gomes D P S, Ozansoy C, Ulhaq A. Vegetation high-impedance faults' high-frequency signatures via sparse coding[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(7): 5233-5242.
- [28] 陈砚圃, 杨蕾, 张介秋. 基于组合余弦窗加权的高精度电力谐波分析[J]. *高压电器*, 2021, 57(8): 127-135.
Chen Yanpu, Yang Lei, Zhang Jieqiu. Analysis on high precision power harmonic based on combinatorial cosine window weighting method[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(8): 127-135.
- [29] Baqui I, Zamora I, Mazón J, et al. High impedance fault detection methodology using wavelet transform and artificial neural networks[J]. *Electric Power Systems Research*, 2011, 81(7): 1325-1333.
- [30] Torres Garcia V, Ruiz Paredes H. High impedance fault detection in distribution system using wavelet transform[C]//*2011 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control*, 2011: 6106620.
- [31] Lai T M, Snider L A, Lo E. Wavelet transform based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults[J]. *Electric Power Systems Research*, 2006, 76(8): 626-633.
- [32] 张兴辉, 常文治, 杜非, 等. GIS局部放电多特征量传感研究进展[J]. *高压电器*, 2022, 58(4): 8-16.
Zhang Xinghui, Chang Wenzhi, Du Fei, et al. Research progress of multi-physics sensing in partial discharge of GIS[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(4): 8-16.
- [33] Mišák S, Pokorný V. Testing of a covered conductor's fault detectors[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(3): 1096-1103.
- [34] Fulneček J, Mišák S. A simple method for tree fall detection on medium voltage overhead lines with covered conductors[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(3): 1411-1417.
- [35] Bahador N, Namdari F, Matinfar H R, et al. Tree-related high impedance fault location using phase shift measurement of high frequency magnetic field[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018(100): 531-539.
- [36] Bahador N, Matinfar H R, Namdari F. A framework for wide-area monitoring of tree-related high impedance faults in medium-voltage networks[J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2018, 13(1): 1-10.
- [37] Billinton R, Singh G. Application of adverse and extreme adverse weather: modelling in transmission and distribution system reliability evaluation[J]. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 2006, 153(1): 115-120.
- [38] Alvehag K, Soder L. A reliability model for distribution systems incorporating seasonal variations in severe weather[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 26(2): 910-919.
- [39] Wang Jian, Xiong Xiaoning, Zhou Ning, et al. Time varying failure rate simulation model of transmission lines and its application in power system risk assessment considering seasonal alternating meteorological disasters[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2016, 10(7): 1582-1588.
- [40] Zhou Y J, Yang S S, Pahwa A. Modeling weather-related failures of overhead distribution lines[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(4): 1683-1690.
- [41] Fanucchi R Z, Bessani M, Camillo M H M, et al. Failure rate prediction under adverse weather conditions in an electric distribution system using negative binomial regression[C]//*2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2016: 478-483.
- [42] Xu, L, Chow M Y. A classification approach for power distribution

- systems fault cause identification[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 53-60.
- [43] 谢桦, 陈昊, 张沛. 配电线路多源数据挖掘时变故障概率计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9): 63-67.
Xie Hua, Chen Hao, Zhang Pei. Time-varying fault probability calculation for distribution line based on multi-source data mining[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2020, 32(9): 63-67.
- [44] Wedagedara H, Witharana C, Fahey R, et al. Non-parametric machine learning modeling of tree-caused power outage risk to overhead distribution powerlines[J]. Applied Sciences, 2024, 14(12): 4991.
- [45] 严道波, 杨勇, 邱丹, 等. 基于天气因素和XGBoost算法的配电线路故障停电预测[J]. 电力与能源, 2019, 40(2): 168-171.
Yan Daobo, Yang Yong, Qiu Dan, et al. Failure prediction of distribution line based on weather factors and XGBoost algorithm[J]. Power & Energy, 2019, 40(2): 168-171.
- [46] Cerrai D, Watson P, Emmanouil N. Assessing the effects of a vegetation management standard on distribution grid outage rates[J]. Electric Power Systems Research, 2019(175): 105909.
- [47] Taylor W O, Watson P R L, Cerrai D, et al. Dynamic modeling of the effects of vegetation management on weather-related power outages[J]. Electric Power Systems Research, 2022(207): 107840.
- [48] Wedagedara H, Witharana C, Fahey R, et al. Modeling the impact of local environmental variables on tree-related power outages along distribution powerlines[J]. Electric Power Systems Research, 2023, (221): 109486.
- [49] Yang Feifei, Watson P, Koukoulou M, et al. Enhancing weather-related power outage prediction by event severity classification[J]. IEEE Access, 2020(8): 60029-60042.
- [50] 姚福星, 苗世洪, 涂青宇, 等. 考虑强对流天气的乡镇配电网树线矛盾风险预警及优化处理[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6188-6203.
Yao Fuxing, Miao Shihong, Tu Qingyu, et al. Risk warning and optimization processing for tree-line contradiction in rural distribution network considering severe convective weather[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6188-6203.
- [51] Doostan M, Sohrabi R, Chowdhury B L, et al. A data driven approach for predicting vegetation related outages in power distribution systems[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(1): e12154.
- [52] Dokic T, Kezunovic M. Predictive risk management for dynamic tree trimming scheduling for distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4776-4785.
- [53] Lee S, Ham Y. Measuring the distance between trees and power lines under wind loads to assess the heightened potential risk of wildfire[J]. Remote Sensing, 2023, 15(6): 1485.
- [54] Ciapessoni E, Cirio D, Pitto A, et al. Modelling the vulnerability of overhead lines against tree contacts for resilience assessment[C]// 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems(PMAPS), 2020: 1-6.
- [55] Hughes W, Zhang Wei, Cerrai D, et al. A hybrid physics-based and data-driven model for power distribution system infrastructure hardening and outage simulation[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022(225): 108628.
- [56] Hou Guangyang, Chen Suren. Probabilistic modeling of disrupted infrastructures due to fallen trees subjected to extreme winds in urban community[J]. Natural Hazards, 2020, 102(3): 1323-1350.
- [57] Hou Guangyang, Muraleetharan K K. Modeling the resilience of power distribution systems subjected to extreme winds considering tree failures: an integrated framework[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2023, 14(2): 194-208.
- [58] Lu Qin, Zhang Wei. An integrated damage modeling and assessment framework for overhead power distribution systems considering tree-failure risks[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2023, 19(12): 1745-1760.
- [59] Mitchell J W. Power line failures and catastrophic wildfires under extreme weather conditions[J]. Engineering Failure Analysis, 2013(35): 726-735.
- [60] Bayani R, Waseem M, Manshadi S D, et al. Quantifying the risk of wildfire ignition by power lines under extreme weather conditions[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(1): 1024-1034.
- [61] Kandanaarachchi S, Anantharama N, Muñoz M, A. Early detection of vegetation ignition due to powerline faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(3): 1324-1334.
- [62] Muhs J W, Parvania M, Nguyen H T, et al. Characterizing probability of wildfire ignition caused by power distribution lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3681-3688.
- [63] Ozansoy C, Sianaki O A. Fire probability risk ranking of vegetation species in vegetation high impedance faults[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024(157): 109804.
- [64] Taylor S, Roald L A. A framework for risk assessment and optimal line upgrade selection to mitigate wildfire risk[J]. Electric Power Systems Research, 2022(213): 108592.
- [65] Sohrabi B, Arabnya A, Thompson M P, et al. A wildfire progression simulation and risk-rating methodology for power grid infrastructure[J]. IEEE Access, 2024(12): 112144-112156.
- [66] Yusuf J, Eagleston H, Bester M, et al. A framework for wildfire risk assessment to electric grid[J]. IEEE Access, 2025(13): 115433-115445.

张亮(1988—),男,博士,副教授,研究方向为电气设备在线监测与状态评估(通信作者)(E-mail: liangzhangswpu@gmail.com)。