

配网电气维修中的故障诊断技术应用研究

黎瀚龙

清远市新能电力工程有限公司，广东 清远 511500

DOI:10.61369/ETQM.2025070021

摘 要： 配网运行中故障频发对供电连续性构成直接威胁，文章面向电气维修场景提出了故障诊断技术方案，完整设计了信号采集结构以获取多维电气量参数，构建特征提取方法提炼短路、接地及接触不良与绝缘老化等故障的诊断量，建立神经网络模型实现故障类型识别与位置判断。工程验证环节基于实际配网部署环境开展判别效果测试，诊断流程在准确性与响应效率方面展现良好性能，具备广泛应用价值与潜力。

关 键 词： 配网电气维修；故障诊断；信号采集；特征提取

Research on the Application of Fault Diagnosis Technology in Distribution Network Electrical Maintenance

Li Hanlong

Qingyuan Xinneng Power Engineering Co., Ltd., Qingyuan, Guangdong 511500

Abstract： Frequent failures in the operation of the distribution network pose a direct threat to the continuity of power supply. This article proposes a fault diagnosis technology solution for electrical maintenance scenarios, designs a complete signal acquisition structure to obtain multi-dimensional electrical parameters, and constructs a feature extraction method to extract diagnostic quantities for faults such as short circuits, grounding, poor contact, and insulation aging. A neural network model is established to achieve fault type identification and location judgment. The engineering verification process is based on the actual deployment environment of the distribution network to carry out discrimination effect testing. The diagnosis process demonstrates good performance in terms of accuracy and response efficiency, and has wide application value and potential.

Keywords： distribution network electrical maintenance; fault diagnosis; signal acquisition; feature extraction

引言

配网电气维修是保障电能稳定输送的关键环节，其运行状态直接关系到城市配电系统的供电质量与设备安全。配电自动化水平提升和负荷结构复杂化发展趋势持续加剧，使得电气设备在长期运行中表现出频繁的非线性扰动特征与隐蔽性故障风险，检修方式在多变量电气扰动识别与响应效率方面已难满足现阶段运行要求，现需依托高频信号处理与智能化识别手段提升故障状态感知与精度判别能力，以满足配网运行环境中复杂工况下的需求。

一、配网电气维修中的故障机理分析

（一）短路与接地故障特征分析

短路与接地故障在配网运行中表现为电流突升与母线电压骤降，常由绝缘破损、小动物侵入或外力引起，故障初态下的低压侧线路对地电势快速变化，保护动作响应时间约为0.05秒^[1]。短路时线路阻抗趋近零，电流幅值通常超过稳态负荷电流3倍，易导致开关触点过热与弧光碳化残留^[2]。接地故障以零序电流偏移为

主特征，环网结构中可能产生接地电流循环，引起护套感应电压升高。

（二）接触不良故障表现规律

接触不良多出现在电缆终端、刀闸及馈线接头部位，主要由接触电阻升高引起局部持续发热。热致膨胀和负载扰动共同作用下，接触面缩小形成熔接与周期性接触重构^[3]。该类故障表现为负荷波动与温升变化的非线性关联，节点温度常高于85℃，红外热斑呈扩散趋势。相电流抖动频率约为2~6Hz，低频波动可持续

存在而不触发保护，致使热老化与电弧击穿风险增大^[4]。

（三）绝缘老化与击穿诱发因素

绝缘老化是配网电缆常见的渐变失效，受电应力、热应力及环境条件共同影响，聚乙烯类绝缘材料在长期运行中产生微裂纹与分子链断裂，导致性能退化。击穿前常见局部放电频率上升与泄漏电流增大，绝缘电阻可下降至 $2\text{M}\Omega$ ^[5]。潮湿、腐蚀或接地不良会加快介质常数与损耗角正切变化，引发局放扩展。部分电缆电容下降幅度达 200nF ，降低局放信号识别灵敏度。击穿过程伴随高频脉冲与能量释放，常发生于应力锥、接头或端头薄弱处，具有明显的电场畸变特征^[6]。

二、配网电气维修中故障诊断方法设计

（一）信号采集方案设计

信号采集是配网电气维修中故障诊断的起点，需对故障相关电气参量的高精度和高时效的获取。配网设备节点中部署分布式电参数传感器，用于实时采集母线电流、相电压、零序电流和漏电流及导体接点温度，采集位置有进出线开关柜、馈线开关，以及环网柜和接地变压器端口。数据采样以高频同步机制完成，采用 μs 级时间戳绑定，保证事件触发类故障（如短路、电弧）在信号层面完整保留动态特征^[7]。

电流与电压信号的实时采样可以用滑动窗口机制，窗口长度依据采样频率设为200至400个采样点， 10kHz 频率下能覆盖1至2个工频周期，其具备识别电流突变与瞬态干扰的时域分辨率。在零序信号与谐波成分提取方面，使用FFT算法获取频域响应特征，便于后续与接地、接触不良故障特征相匹配，定义每一时间段内电压有效值 U_{rms} 计算公式如下：

$$U_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2}$$

其中， u_i 为第 i 个采样点的瞬时电压值， N 为滑动窗口内总采样数，该公式用于构建母线电压稳定性评估序列，可实时判断是否存在低压脱扣和电压塌陷等突发事件。数据采集模块统一接入本地边缘计算节点，拥有信号预处理与传输路径压缩能力来减少后端模型的冗余计算压力，并增强低延迟响应能力^[8]。关键电缆段还可配置红外热像传感器或电缆护套电流检测装置，用于热异常及局部漏电特征的采集补充。

（二）特征参数提取方法

完成信号的实时采集与缓存处理后，需对原始多维电参量数据进行特征提取，来形成结构化诊断向量。特征参数设计遵循“诊断有效性优先”原则，覆盖时域、频域与统计特征三个维度，主要提取量有电流突变幅值、零序电流偏移率、电压畸变率以及温升梯度与频域谐波能量分布等^[9]。短路与接地类故障伴随瞬时电流快速拉升，采用电流突变差值计算表达如下：

$$\Delta I_t = |I_t - I_{t-\Delta t}|$$

其中， I_t 表示当前采样周期内的电流有效值， $I_{t-\Delta t}$ 表示上一

周期的电流有效值，差值 ΔI_t 可作为突变类故障触发判据。在采样频率为 10kHz 时，该指标对短路、接地的检测响应时延可控制在 1ms 内^[10]。

接触不良类故障特征表现为电流微扰与周期性发热，提取其电压-电流相关性曲线的残差波动值、相电流三相不平衡度与接点温升趋势作为主要识别特征。温升斑点梯度从红外图像中提取热场轮廓，形成平均温升率指标作为输入特征维度。绝缘老化与击穿风险相关参数有泄漏电流变化率、局部放电频率和工频电容变化趋势，提取连续观测周期内的介质损耗因子与电容变化斜率，构建时序诊断向量来用于后续模型的趋势识别。全部特征量经 Z -score标准化处理，统一缩放范围至 $[-1,1]$ ，以保证不同量纲数据在神经网络中的训练权重等效性，特征维度经Fisher判别法评估信息增益，对多余特征进行剔除来提升模型精度与收敛速度。

（三）故障模型训练策略

故障识别模型使用多层神经网络结构构建，训练样本由采集模块提供的电气信号经特征提取后标准化生成，输入特征维度为36及时间步长设置为64，模型主干结构基于双向LSTM网络，适用于处理配网运行过程中具有连续扰动特性的状态序列。输入序列经LSTM层提取时间相关特征后进入Dropout与归一化模块，防止过拟合并平衡不同特征维度的激活响应。图1展示了神经网络整体结构与诊断逻辑路径。Dropout比例设定为0.3，采用批归一化对隐藏层输出进行稳定化处理。优化器选用Adam算法，初始学习率设置为0.001，配合动态学习率调整策略保障训练过程中的梯度传导稳定。损失函数采用加权交叉熵形式，有效抑制各类故障样本数量差异引发的判别偏置。样本生成采用滑动窗口机制，增强时序结构在模型中的表达完整性，窗口重叠率控制在50%，用于扩大训练样本数量并提升模型对早期故障演化的响应能力。

模型输入为构建后的二维样本矩阵，内部结构支持多模态电气特征的同步处理，其覆盖了电压、电流、零序量和温度梯度等信号在同一通道下的联合表达。训练过程中引入残差连接结构强化非线性表达力，并结合注意力机制动态调整关键特征的响应权重。模型训练流程统一封装为边缘适配结构，支持在工业部署平台完成模型加载与快速推理，推理周期控制在 100ms 以内，可满足配网一线诊断任务的实时性要求。整体策略实现了从采集、特征到识别的技术闭环，具备较强的工程实用性与扩展能力。

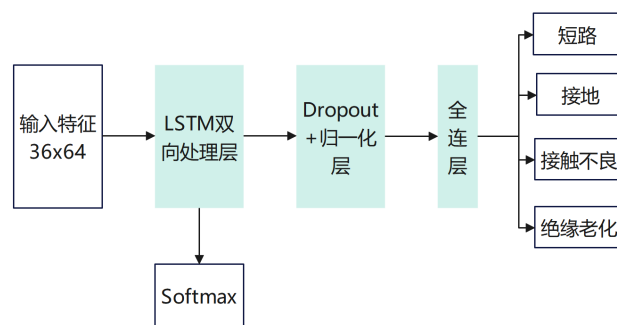


图1 LSTM神经网络结构图

三、工程应用与验证

（一）现场部署结构设计

工程选取位于某10kV城郊架空配电线路的典型供电单元作为诊断技术部署对象，线路长度4.2公里，有3处配电变压器与5处环网开关。部署方案结合配网故障类型的监测需求进行结构化设计，监测点设置于进线开关柜、分支开关节点与变压器低压侧引出端，每个节点安装三相电流、电压传感器与接地电流检测装置，且局部区域辅以温度传感器与低速热成像探头。

数据采集设备运用集中组网模式，所有采样终端接入一体化边缘分析装置，其具有本地计算与模型推理功能，内部加载经训练的LSTM故障诊断模型可实现采集—判断—推送闭环。边缘设备以以太网连接现场运维终端，界面提供当前负荷状态、故障类型推理结果与采样数据回溯功能。图2展示该工程应用中的现场部署结构拓扑。

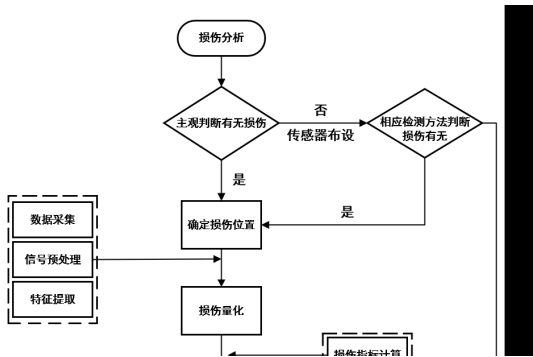


图2 配网故障诊断部署结构拓扑图

（二）故障判别结果验证

配网运行实测中诊断模型连续监测线路负荷状态、电参量变化与热场数据，累计生成18次预警记录，其中判定为短路故障3次、接地故障5次和接触不良4次，其余为未达故障阈值的弱扰动。以其中一次馈线接头发热事件为例，检测到A相电流抖动频率升高至5.8Hz，电压偏移波动明显，同时红外探测到接点温升速率异常，模型输出“接触不良—中度”结果。维护人员现场检查确认压接不牢，存在微弱放电痕迹，验证模型判断准确性。

模型输出时间戳与采样节点数据对齐误差不超过300ms，诊断逻辑对短时信号突变和周期性热扰动具备较高灵敏度。模型自动生成诊断报告与工单信息，供值班人员核查，这提升了现场排

查效率与诊断响应速度。对部分早期绝缘老化引发的电容下降趋势，模型可持续跟踪泄漏电流与介质参数的演化曲线，在未达到跳闸阈值时实现预测预警，具备预故障诊断能力。

（三）技术指标对比分析

与传统人工巡检方式进行了三项关键指标对比，这可量化所构建诊断技术的实际效果，其涵盖了故障识别准确性、响应时间与重复报修概率。诊断准确性以人工核查后确认故障类型的一致性为基准，响应时间以采样触发至故障工单推送时间计算，重复报修指三个月内同一节点再次出现相同类型故障的次数，对比结果如表1所示。

表1 故障诊断方式关键技术指标对比

指标项	基于 LSTM 模型的诊断方法	人工巡检方式
故障识别准确性 (%)	94.60	78.20
响应时间 (分钟)	1.2	55.3
重复报修概率 (次 / 季度)	0.4	2.1

基于特征提取与LSTM模型训练的诊断路径在故障响应时效方面表现出明显优势，特别是在负荷扰动频繁、电弧特征不稳定及绝缘退化过程不连续等情形中，有更高的响应灵敏度与状态分类能力。人工巡检依赖固定周期与经验判断，难以捕捉异常趋势的早期演变，周期延迟与环境干扰易导致故障误判或漏报。诊断流程结合多参量信号建模与时序数据推理，可连续跟踪状态变化，完成故障前兆识别与故障类型分类，具备强适应性与工程可实施性。对比显示该方法在准确性、响应效率与再故障抑制方面具有明显优势，适用于复杂运行环境下的配网电气设备故障判断需求。

四、结束语

文章围绕配网电气维修场景中常见故障类型，构建了以多源信号采集、特征参数提取与深度学习模型训练为核心的诊断技术路径，并依据短路、接地和接触不良及绝缘老化等问题设计参数体系与模型结构，并在边缘设备上实现本地推理部署以完成诊断闭环。基于10kV配网实际工程进行部署验证，展现出在故障类型识别准确性、响应时效与重复故障预警等方面的稳定性能，实证表明该方法具备良好的适应性与推广价值，可为配网设备运行状态感知与诊断提供技术支撑。

参考文献

[1] 玉清. 10kV 配网电力设备触点温度监测技术 [J]. 大众用电, 2025, 40(01): 47-49.
[2] 李曼, 薛涵拓. 电力继电保护故障的检测与维修技术研究 [J]. 科技资讯, 2025, 23(02): 88-90.
[3] 唐江博, 田家豪. 10 kV 配网运行维护及检修策略探讨 [J]. 电工技术, 2024, (S2): 586-588.
[4] 师超. 配网小电流接地故障点快速自动查找方法研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(21): 165-167+174.
[5] 李昂, 王浩楠, 姜楠. 配电自动化系统中的继电保护故障分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(05): 142-143.
[6] 田浩, 刘军, 杨敏. 探讨“行波放测”在配网故障预警与定位中的应用 [J]. 电器工业, 2024, (03): 64-66+71.
[7] 李彬, 袁振华. 电气工程中电气继电保护的常见故障及维修策略分析 [J]. 电气技术与经济, 2023, (10): 344-347.
[8] 谢冰雪, 夏琴, 周健, 等. 电气控制线路故障诊断及维修策略的探讨 [J]. 粮食与食品工业, 2023, 30(03): 41-43.
[9] 缪继鹏. 电气自动化控制设备常见故障的维修及预防 [J]. 农业工程与装备, 2023, 50(02): 26-27+30.
[10] 屈世栋, 汪斌. 电气分析技术在电机故障诊断中的应用 [J]. 设备管理与维修, 2022, (21): 135-137.