

基于边缘计算与物联网的智能配电网状态监测及故障预警系统设计

张方位

河南省同祥电力设计有限公司，河南省郑州市，450018；

摘要：随着智能电网的快速发展，配电网的状态监测与故障预警成为了保障电力供应稳定性和可靠性的关键。传统的配电网监测方法往往依赖于中心化的数据处理与分析，然而，随着物联网技术的兴起和边缘计算能力的提升，我们提出了一种基于边缘计算与物联网的智能配电网状态监测及故障预警系统。该系统旨在通过物联网技术实现配电网设备的实时监测，利用边缘计算对海量数据进行快速处理与分析，从而实现对配电网状态的准确评估与故障预警。

关键词：边缘计算与物联网；智能配电网状态监测；故障预警系统设计

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.018

引言

目前，随着电力系统规模的不断扩大和复杂性的增加，传统的监测方法已经难以满足对配电网实时性、准确性和可靠性的要求。特别是在面对极端天气、设备老化等复杂多变的运行环境时，传统的中心化数据处理方式往往存在延迟高、带宽受限等问题，难以实现对配电网状态的快速响应和有效预警。因此，开发一种能够适应大规模、分布式配电网状态监测与故障预警需求的新型系统显得尤为重要。

1 研究方法与系统架构

1.1 系统架构设计

本系统采用“三层分布式架构”，各层既独立承担功能，又通过标准化接口实现数据交互，确保架构的灵活性与可扩展性。最底层为感知层，由部署在配电网线路（如电缆接头、杆塔）、设备（如变压器、开关）、环境（如温湿度、覆冰）的物联网终端构成，负责采集电流、电压、温度、振动、绝缘状态等多维度数据，采用 LoRa、NB-IoT 等低功耗广域网协议实现数据初步传输；中间层为边缘层，由分布在配电网片区的边缘节点（如边缘网关、本地服务器）组成，核心功能是对感知层传输的原始数据进行“预处理-分析-决策”：先过滤冗余数据、修正异常值，再通过轻量化算法进行状态评估与故障初判，最后将关键结果（如异常数据、预警信息）上传至云端，同时本地存储高频数据；最上层为云端层，承担全局管理功能，包括接收边缘层上传的汇总数据、构建配电网全局状态模型、优化预警算法参数，

以及向边缘层下发控制指令（如调整感知终端采样频率、更新预警阈值），形成“本地响应+全局优化”的双层决策机制。

1.2 系统功能模块设计

系统功能模块围绕“数据流转全流程”展开，共分为五大核心模块，各模块通过数据总线实现协同。数据采集模块是系统的“入口”，负责对接感知层各类终端，支持多协议适配（如 Modbus、MQTT），可根据配电网工况动态调整采样周期（如正常状态下 1 分钟/次，异常状态下 1 秒/次），确保数据采集的时效性与经济性；边缘数据处理模块是“核心中枢”，包含数据清洗（剔除噪声、填补缺失值）、特征提取（提取电流突变、温度趋势等关键特征）、实时分析（通过轻量化算法判断设备是否处于正常状态）三个子功能，实现“数据不落地即分析”；状态监测模块负责将边缘处理后的结果可视化呈现，包括配电网拓扑图实时更新、设备状态（正常/预警/故障）标识、关键参数曲线展示，支持运维人员直观掌握配电网运行态势；故障预警模块基于边缘层分析结果与云端优化模型，生成分级预警信息（轻度预警/中度预警/重度预警），并自动关联故障可能影响的区域与用户；指令下发模块则根据预警结果，向边缘节点或感知终端下发控制指令（如启动备用设备、调整终端采样频率），实现“预警-响应”的快速联动。

2 配电网状态监测技术

2.1 物联网感知技术

配电网物联网感知技术的核心是“按需感知、精准

采集”，其设计需贴合配电网复杂的现场环境（如户外高温、高湿度、电磁干扰）。从感知终端类型看，可分为电气量感知终端（如智能电流互感器、电压传感器）、设备状态感知终端（如变压器油中溶解气体传感器、开关机械特性监测器）、环境感知终端（如线路覆冰传感器、杆塔倾斜监测器），各类终端需具备低功耗、抗干扰、宽温域的特性，以适应户外长期运行；从感知网络构建看，采用“分层组网”模式：近距离感知终端（如设备内部传感器）通过 ZigBee、蓝牙等协议接入本地采集器，远距离终端（如线路杆塔传感器）通过 LoRa、NB-IoT 接入边缘网关，既确保覆盖范围，又降低能耗；从感知参数设计看，需兼顾“全面性”与“必要性”——除传统的电流、电压、功率等电气参数，还需增加设备温度、绝缘电阻、环境温湿度等非电气参数，形成多维度监测矩阵，为后续状态评估提供完整数据支撑。

2.2 边缘计算数据处理技术

边缘计算在配电网状态监测中的数据处理，核心是“轻量化、实时化、本地化”，避免数据传输至云端造成的时延与带宽浪费。其处理流程分为三步：第一步是数据过滤与清洗，通过预设的阈值判断（如剔除超出设备额定范围的异常值）、时序平滑（如采用滑动平均法消除短期噪声），去除原始数据中的冗余与干扰，降低后续分析的计算量；第二步是特征工程，针对配电网监测数据的时序特性（如负荷随时间变化的趋势）与突变特性（如故障时的电流冲击），提取时域特征（如均值、峰值、方差）与频域特征（如谐波分量、频谱峰值），将原始数据转化为可用于分析的“特征向量”；第三步是实时状态评估，采用轻量化算法（如决策树、支持向量机的简化版本）对特征向量进行分析，判断设备或线路是否处于正常运行状态——例如，通过变压器油温与负荷的关联分析，判断是否存在过载风险；通过线路电流谐波分量的变化，判断是否存在三相不平衡问题。此外，边缘节点还具备“数据分流”功能：仅将异常数据、关键特征与评估结果上传至云端，高频原始数据本地存储，既节省带宽，又为后续故障追溯保留数据依据。

2.3 多源数据融合技术

配电网状态监测中，单一类型感知数据往往存在“信息片面性”（如仅靠电流数据无法判断故障原因），多源数据融合技术的作用是将不同感知终端、不同维度的数据进行协同分析，提升状态评估的准确性。其核心逻辑是“互补性融合”：一方面，融合电气量与非电气量数据——例如，将线路电流数据（反映负荷情况）与

环境覆冰数据（反映外部影响）融合，判断线路过载是因实际负荷过高，还是因覆冰导致电阻增大；另一方面，融合不同位置的感知数据——例如，将配变低压侧电流数据与用户侧智能电表数据融合，校验是否存在线损异常或偷电行为。从融合方法看，采用“分层融合”策略：在数据层，对同一参数的多终端采集数据进行加权平均（如多个传感器监测同一线路的温度，按传感器精度分配权重），降低测量误差；在特征层，将不同类型数据的特征向量拼接，形成多维度特征矩阵；在决策层，对不同数据来源的状态评估结果进行投票或加权（如电气量评估结果权重 0.6，环境量评估结果权重 0.4），输出最终的状态判断。通过多源数据融合，可有效避免单一数据误判（如仅因环境温度过高导致的设备温度上升，不判定为故障），提升监测的可靠性。

2.4 状态量化评估技术

状态量化评估技术是将配电网“模糊的运行状态”转化为“可量化的指标”，为故障预警提供明确依据，核心是构建“多维度评估指标体系”与“综合评估模型”。评估指标体系需涵盖设备、线路、环境三个维度：设备维度包括老化程度（如变压器绝缘寿命、开关动作次数）、运行负荷率（实际负荷与额定负荷的比值）、参数偏差（如电压偏差、功率因数偏差）；线路维度包括潮流合理性（是否存在反向潮流、过负荷）、绝缘状态（如线路泄漏电流、接地电阻）、环境影响（如覆冰厚度、雷击次数）；每个指标需设定“正常-预警-故障”三个阈值区间，如变压器负荷率“<80%为正常，80%-100%为预警，>100%为故障”。综合评估模型则采用“层次分析法（AHP）+模糊综合评价”的组合方法：先通过 AHP 确定各指标的权重（如设备老化程度权重高于环境影响），再将各指标的实际值转化为模糊隶属度（如负荷率 90% 对应“预警”的隶属度 0.8），最后通过模糊运算得出配电网整体的状态等级（如“良好”“一般”“较差”“危险”）。量化评估结果不仅能直观反映配电网当前状态，还能为后续故障预警提供“阈值触发”依据——当某一指标或综合状态等级达到预警阈值时，自动启动预警流程。

3 故障诊断与预警技术

3.1 故障特征提取与识别

配电网故障的核心特点是“突发性、多样性”（如短路、接地、断线），故障特征提取与识别的关键是“捕捉故障时的独特信号，区分故障类型与正常波动”。从特征提取角度，需聚焦故障的“暂态特征”与“稳态特

征”：暂态特征是故障发生瞬间的信号突变，如短路故障时电流骤升、电压骤降，接地故障时零序电流增大，这些特征需通过高频采样（如 10kHz 以上）捕捉，提取暂态电流的峰值、上升速率、振荡频率等参数；稳态特征是故障持续期间的信号规律，如三相短路时三相电流对称增大，单相接地时故障相电压降低、非故障相电压升高，这些特征可通过工频采样（50Hz）提取，如三相电流不平衡度、零序电压幅值。从识别方法看，采用“规则匹配+机器学习”的混合模式：先通过预设规则（如“电流骤升 10 倍以上且电压骤降 50% 以上，判定为短路故障”）快速识别典型故障；再通过机器学习模型（如训练 LSTM 神经网络学习历史故障数据的特征模式）识别非典型故障（如间歇性接地故障），避免规则库的局限性。此外，还需引入“特征筛选”机制，剔除正常波动（如负荷突变）与故障特征的相似干扰，确保识别的准确性——例如，通过对比故障特征持续时间（故障特征持续数秒，负荷突变仅持续数十毫秒），区分两者差异。

3.2 故障诊断与预警策略

故障诊断与预警策略需实现“从异常识别到故障定位、从即时诊断到提前预警”的双重目标，核心是“分级响应、精准定位”。在故障诊断层面，采用“分层定位法”：先通过边缘节点初步判断故障所在的片区（如某一馈线、某一配变台区），依据是边缘节点采集的片区总电流、电压异常信号；再通过片区内的分布式感知终端（如线路分段开关处的传感器）定位具体故障点，依据是各终端采集的故障信号时序差（如故障信号先到达靠近故障点的终端，后到达远端终端），结合配电网拓扑结构计算故障距离。在预警策略层面，采用“三级预警”机制：轻度预警针对“潜在风险”（如设备温度接近预警阈值、负荷长期处于 80%-90%），仅向运维人员推送提醒信息，无需立即处理；中度预警针对“大概率故障”（如设备参数持续偏离正常范围、出现间歇性异常信号），启动边缘节点的加强监测（如提高采样频率），同时通知运维人员准备检修；重度预警针对“即将发生或已发生的故障”（如参数达到故障阈值、捕捉到明确故障特征），立即触发声光报警，自动推送故障位置、类型至抢修终端，并启动备用电源切换等应急措施。此外，预警策略还需具备“自适应调整”能力——根据配电网工况变化（如夏季负荷高峰、冬季覆冰期）动态调整预警阈值，避免误预警或漏预警。

3.3 故障预警模型设计

故障预警模型的核心是“基于历史数据与实时数据，预测故障发生概率与时间”，需兼顾“预测精度”与“计算效率”（适配边缘节点的轻量化需求）。模型采用“时序预测+故障概率评估”的双输出结构：输入层接收边缘层传输的多维度数据（如近 1 小时的设备温度、负荷、绝缘电阻时序数据，以及环境温湿度数据）；处理层分为两个分支，一个分支采用轻量化时序预测算法（如 ARIMA、Prophet 的简化版本），预测未来 12 小时内各参数的变化趋势（如预测变压器油温将在 6 小时后达到预警阈值）；另一个分支采用逻辑回归或朴素贝叶斯算法，基于实时参数与历史故障数据的关联关系，计算故障发生的概率（如当前参数组合下，变压器发生过载故障的概率为 75%）；输出层将两个分支的结果融合，生成“故障概率-预测时间”的预警报告（如“未来 6 小时内，变压器过载故障概率 75%，建议立即降低负荷”）。模型还需具备“在线更新”能力：云端定期将新增的故障数据与优化参数下发至边缘节点，边缘节点通过增量学习（无需重新训练整个模型）更新模型参数，确保模型能适应配电网设备老化、负荷变化等长期动态。

4 结语

总之，基于边缘计算与物联网的智能配电网状态监测及故障预警系统设计，通过综合应用物联网感知技术、边缘计算数据处理技术、多源数据融合技术以及状态量化评估技术，实现了对配电网状态的全面、实时、准确监测。同时，故障诊断与预警技术的引入，进一步提升了系统的故障预测与应对能力。这一系列技术创新不仅提高了配电网的运行效率和安全性，也为配电网的智能化、自动化发展奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 张晓玲, 杨亮, 姚菊梅, 等. 基于时间敏感技术的异构工业物联网确定性传输方法[J]. 信息与控制, 2025, 54(03): 488-501.
- [2] 吴恺. 基于大数据分析的工程安全治理机制探析[J]. 边疆经济与文化, 2025(03): 48-52.
- [3] 刘忠堂. 智能故障定位技术在输配电网中的应用[J]. 电子技术, 2025, 54(01): 326-327.
- [4] 刘譞, 尹宏. 基于 5G 的智能配电网通信终端设计与应用[J]. 信息记录材料, 2025, 26(01): 169-171.