

基于物联网的电气设备远程监控与故障诊断技术

邱春¹ 赵强¹ 孟祥伦²

1. 鲁南中联水泥有限公司 山东滕州 277500

2. 邹城华东材料有限公司 山东邹城 273501

摘要: 随着工业自动化和电力智能化进程的不断推进,电气设备的运行状态监控与故障诊断面临更高要求。传统的人工巡检模式已难以满足实时性与精准性的需求。物联网技术通过构建多层感知网络、实时数据通信与智能诊断模型,实现了对电气设备远程、持续、高效的管理。本文聚焦物联网技术在电气设备监控与故障诊断中的实际应用,分析系统架构、关键技术路径及智能诊断方法,并探讨未来的发展方向与挑战,以提升设备运维的智能化水平和系统运行的稳定性。

关键词: 物联网; 电气设备; 远程监控; 智能诊断; 边缘计算

电气设备在现代工业、交通、建筑及基础设施中处于核心地位,其运行状态直接关系到系统安全与经济效益。然而,设备数量庞大、运行环境复杂、维护成本高等问题,使得传统的定期巡检与被动响应方式逐渐暴露出局限性。近年来,随着传感技术、无线通信与智能算法的不断成熟,物联网逐步渗透至电气系统运维管理中,催生出一整套基于“实时感知—远程传输—智能分析”的技术体系。通过感知层对设备运行状态的多维数据采集,网络层的稳定传输,以及应用层的数据处理与故障预警机制,物联网不仅提升了监测的实时性和准确性,也为构建高效、低成本、智能化的设备运维模式提供了新路径。

一、电气设备远程监控系统的物联网架构设计

1. 系统构成与层级功能划分

电气设备远程监控系统基于物联网架构,通常由感知层、网络层和应用层组成,各层之间相互配合,构成一个完整的信息采集与处理闭环^[1]。感知层主要负责对设备运行状态的实时感知,常用的传感器包括温度、电流、电压、振动和湿度传感器,具备高灵敏度与抗干扰能力。这些传感器部署于关键设备节点,对故障征兆实现精准捕捉。感知数据经过初步预处理后,通过无线或有线方式上传至网络层。

网络层作为数据传输通道,起到连接设备与平台的桥梁作用。常见的通信方式包括Wi-Fi、NB-IoT、LoRa、4G/5G等,根据场景需求进行灵活配置。工业场合中对时延和稳定性要求较高,需搭配低功耗广域网或工业以太网保障通信质量。为提升系统安全性,传输过程中通常辅以TLS加密、身份认证与防干扰机制。

应用层作为数据分析与业务决策的核心载体,承载着实时监控界面、历史数据查询、设备健康评估、预警推送等功能。平台可按设备类型或区域进行分组管理,支持用户自定义监测策略、告警阈值与数据展示方式。通过可视化仪表盘,运维人员能够快速掌握设备整体运行状况,实现多设备、分布式的统一管理。

2. 边缘计算与云平台协同机制

远程监控系统在面对大量数据、高并发请求与低延迟需求时,单一依赖云计算平台难以满足全部技术指标,边缘计算的引入为系统架构提供了有效补充。边缘节点部署在设备或网关附近,具备初步的数据处理、事件识别与本地响应能力,能够在网络不稳定或云端不可达时维持系统的基本功能。

边缘设备可依据预设规则,对异常温升、电流突变等现象进行即时分析和响应,减轻云平台压力的同时加快响应速度。在此基础上,经过边缘初筛的数据汇总后上送至云端平台,进行深度学习训练、趋势预测和诊断建模等高级处理。通过云边协同机制,系统兼顾了处理效率、数据安全和灵活性。

此外,边缘节点的智能化设计支持本地固件升级与远程配置管理,提升了设备的自适应能力与运维便捷性。云平台则通过集中式数据分析,对不同场站或系统进行横向对比和纵向评估,帮助企业制定长期运维策略与资源优化路径,构建覆盖全生命周期的智能化运维体系。

二、关键技术远程监控系统中的集成应用

1. 传感与数据采集技术

电气设备远程监控的基础在于准确、稳定的数据采

集。传感技术是实现设备状态全面感知的前提，其性能直接决定了后续分析与诊断的准确性^[2]。当前广泛应用的传感器类型包括电流互感器、霍尔传感器、热电偶、光纤传感器、振动加速度计等，可对温升、电压波动、电流负载、机械振动等关键参数进行连续采样。为了适应复杂电力环境，传感器需具备高耐压、高绝缘、强抗干扰等特性，同时实现长时间稳定运行。

新型MEMS（微机电系统）传感器因其微型化、集成度高、功耗低等优势，逐步应用于变电站和开关柜中，实现空间受限区域的多参数并行监测。无线传感器网络（WSN）作为集群部署的重要方式，通过自组织方式构建局部通信网络，不依赖传统电缆布线，具有部署灵活、可拓展性强等优势，特别适合老旧变电系统的改造场景。

为提升数据采集的可靠性与一致性，现场端通常配套信号调理电路和滤波模块，避免瞬时尖峰、电磁干扰等信号失真问题。此外，时间同步机制（如GPS时钟同步或IEEE 1588）保障了多点传感数据在时间维度上的一致性，为后续的数据融合与故障定位提供技术基础。

2. 数据通信与协议优化

在远程监控体系中，数据传输技术是系统响应速度和信息完整性的重要保障。通信方案需根据场景特征选择合适技术架构，在高频率、低延迟需求下，工业以太网、5G通信成为主流；在分布式、低功耗需求背景下，NB-IoT、LoRa等广域通信协议展现出良好适应性。NB-IoT可实现大量低速率数据的定时上传，适合分散布点的中低频监测任务，而LoRa则在小型工业园区和配电终端中应用广泛，具备良好的抗干扰性能和距离覆盖能力。

通信协议的轻量化处理对系统稳定运行尤为关键。MQTT因其发布-订阅机制、传输数据小、断点重连能力强，被广泛用于工业物联网监控场景。Modbus协议作为传统设备通信接口，依然在大量变电设备和工控终端中承担着基础通信任务。新型边云协同系统往往通过协议网关实现不同协议间的转换与整合，确保异构设备间的无缝对接。

在保障数据传输安全方面，系统普遍采用TLS/SSL加密技术、设备身份认证机制以及数据完整性校验方法。对传输过程中可能出现的数据丢失、延迟、篡改等问题，配合数据包冗余校验与回传机制，可实现高可靠的数据交互。通信质量评估机制（如链路丢包率、时延指标监控）也已嵌入多数平台，为通信策略动态调整提供依据。

3. 平台融合与智能控制技术

远程监控系统的上层应用平台是支撑智能化决策与

控制的核心。在平台构建中，通常采用B/S架构与模块化设计思路，通过分布式数据存储、多线程处理引擎及任务调度系统，实现设备数据的统一接入、实时刷新与事件联动。平台界面可视化设计强调数据直观呈现，运维人员可通过图表、热力图、曲线等方式快速洞察异常状态，支持移动终端远程查看与响应。

平台内嵌规则引擎与策略配置模块，可根据传感器上报的实时参数判断故障征兆，如电流突变超过设定阈值触发报警、温度持续升高引发强制风冷启动等控制策略。系统预留的API接口可与第三方SCADA系统、MES系统等对接，实现数据共享与业务融合。平台还支持批量设备远程配置、在线升级、运行日志管理等功能，显著提升设备管控的灵活性与便捷性。

随着人工智能的引入，平台具备了更强的自学习与预测能力。利用大数据分析与训练算法，平台可识别设备运行状态中的异常模式，提取特征向量并与历史样本比对，判断是否存在潜在故障。部分系统已实现基于模型预测控制（MPC）与数字孪生技术的联动操作，对关键设备状态进行建模仿真并提前介入调控，在保障设备安全的同时减少不必要的停机维护。

三、电气设备故障诊断的智能化建模与应用实践

1. 数据驱动的智能识别模型构建

电气设备在长期运行中容易受到多种因素的干扰，例如电压波动、负荷变化、环境湿度、机械老化等，容易引发设备性能下降甚至故障。传统基于规则的诊断方式依赖于人工经验和固定阈值判断，在面对设备多样性、故障复杂性以及运行条件动态变化时，准确率和适应性均受限制^[3]。而基于物联网平台采集的大量运行数据为构建数据驱动型智能诊断模型提供了基础条件。

利用机器学习技术，可以对大量的传感器数据进行特征提取与模式识别，形成对故障类型、发展趋势和潜在风险的学习能力。例如，支持向量机（SVM）可用于电机温升与负载异常的分类判别，随机森林能够处理特征维度高、变量关系复杂的故障特征；K近邻算法在局部敏感特征提取方面表现稳定，适用于高噪声数据的初步筛查。在实际应用中，将多个模型进行集成组合，可提升诊断准确率与鲁棒性。

深度学习技术的引入为复杂场景下的智能诊断带来了更高维度的解决路径。通过将设备的运行数据转换为二维图像或时频图谱，卷积神经网络（CNN）能够自动学习信号中的空间特征变化，尤其适合处理电气故障中带有突变或周期波动的信号数据，如配电柜内部电弧放

电引起的瞬态信号变化。对需要时序建模的故障演化问题，可采用长短期记忆网络（LSTM）进行状态序列学习，适用于预测设备老化趋势、故障发生时机等场景。

在建模过程中，为避免出现“过拟合”或“误诊”的风险，需对训练数据进行充分标注，并引入正则化技术与交叉验证机制，提升模型的泛化能力。同时，诊断结果的可解释性也是实际部署的重要要求。通过引入可视化工具，如Grad-CAM、SHAP值等方式，可以帮助运维人员理解模型作出判断的依据，增强模型在工程实践中的信任度。

2. 诊断结果的反馈与闭环管理机制

智能故障诊断系统不仅承担识别故障的职能，更应嵌入到电气设备管理体系中，形成“发现—响应—干预—记录”的闭环机制，确保监测、诊断、处置之间的高效联动。故障诊断结果一经确认，系统可立即触发响应策略，包括发送报警通知、自动下发控制指令、联动安全防护装置等，保障设备与人员安全。

在远程平台上，系统可对诊断信息进行归档与可视化展示，生成故障类型、影响范围、严重等级、发生频次等维度的综合报表，为运维管理提供数据支持。对关键设备，如变压器、高压开关、应急发电装置等，还可设定多级诊断策略，根据不同风险等级分层处置。如初级异常由远程复检机器人进行复核，中等级别安排现场检修，高危等级可自动断电处理或切换至备用线路。

闭环机制中不可或缺的一环是诊断精度与运维行为之间的反馈匹配。若实际检修结果与智能诊断结果出现偏差，系统需记录该误差并自动更新诊断权重或模型参数。长期积累的诊断事件与处理记录还能反向作用于模型训练库，不断完善模型精度。

此外，趋势预测功能作为闭环管理的重要延伸，可通过对同类设备在不同时间段的运行数据进行聚类分析，提取潜在的故障演化路径，提前发出维护建议。系统可结合设备运行寿命、维修历史、负载变化等参数，构建“健康画像”，并设定最佳维护窗口，实现“按需维护”与“预测性维修”的转变。

3. 模型更新与持续优化策略

智能诊断系统的可靠性依赖于诊断模型的持续适应与动态优化能力。电气设备的运行环境与负载条件会随时间发生变化，若模型长期依赖原始训练数据，可能导致判断滞后或失真，因此构建灵活的模型迭代机制显得尤为重要。

在线学习机制可实现模型在运行过程中自我优化。

系统会持续接收现场新数据及其反馈标签，通过增量学习技术更新模型参数，避免全量重训带来的资源浪费。在工业多站点应用中，可引入联邦学习架构，通过各边缘节点协同训练共享模型权重，在不上传原始数据的前提下，实现跨站点经验融合。这种方式既保证了数据安全性，又提升了模型的泛化性能。

优化策略还应包括多源异构数据的协同建模。不同传感器如温度、电流、红外图像、音频信号等在数据格式、时效性与噪声干扰方面存在差异，需通过特征对齐、数据融合与统一标准化处理，实现信息价值最大化。融合后的特征数据再输入至神经网络模型中，能有效提升系统对多维特征的感知能力，增强对复杂耦合故障的判别效果。

模型部署策略亦是系统可持续运行的技术保障。在终端设备计算资源有限的情况下，轻量化模型成为部署首选。通过模型剪枝、量化、蒸馏等手段，可在保持诊断准确率的同时，大幅度减少模型运算量与存储开销，使其具备在边缘端实时推理的能力。此外，系统可设置远程集中训练与边缘快速更新的机制，通过定时或事件驱动的方式实现模型版本滚动升级，保障系统适应最新运行环境。

全面考虑数据源、模型结构、部署环境与反馈机制，构建具备学习能力、反馈机制与部署灵活性三大要素的智能诊断系统，方能真正实现电气设备远程运维中的智能化管理，为未来大规模、分布式电力系统提供高可靠性的支持手段。

结语

物联网技术在电气设备远程监控与故障诊断中的应用，显著提升了管理精度与效率，加速电力系统智能化进程。感知、通信、分析、控制协同运行，使系统具备自适应与预测能力，为故障防控提供支撑。随着边缘智能、5G等技术发展，智能运维将更加高效可持续。

参考文献

- [1] 邵俊松. 基于物联网技术的电力设备远程监控与故障诊断系统研究[J]. 中国设备工程, 2025, (06): 199-201.
- [2] 钟振涛. 基于物联网的煤矿开采电气设备远程监控系统研究[J]. 电气技术与经济, 2025, (04): 58-60+64.
- [3] 梁海超, 郭吉祥. 基于物联网的电气设备远程监控与故障诊断研究[J]. 中国设备工程, 2025, (05): 171-173.