

基于物联网技术的电气二次系统状态监测与远程诊断研究

刘 通

内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前旗乌拉特发电厂 内蒙古 巴彦淖尔 014400

摘要：基于物联网技术的电气二次系统状态监测与远程诊断研究聚焦于通过智能传感、数据融合与远程交互技术，实现对保护装置、控制回路等二次设备的实时状态感知与智能运维管理。集成温湿度、振动、电流/电压等传感器（如ML33-5mm电涡流传感器 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 精度），实时采集设备运行参数。采用“5G+LPWAN”双模通信（如NB-IoT），实现高频数据实时传输（延迟 $< 10\text{ms}$ ）与低频状态数据低功耗上传。基于云计算/边缘计算平台（边缘算力达5TOPS），部署故障诊断算法与可视化决策界面。

关键词：物联网技术；电气二次系统状态监测；远程诊断

多维感知电气量、机械量及环境量，建立设备运行档案并实时预警异常（如压板位置偏移、绕组温度超限）。结合机器学习模型（如故障特征提取算法）与专家知识库，实现故障定位准确率 $\geq 90\%$ ，支持绝缘子闪络、机械应力故障等复杂场景分析。

1 电气二次系统状态监测的重要性分析

1.1 保障电网安全稳定运行的核心防线。实时故障预警与快速隔离，电气二次系统（如继电保护装置、控制回路）直接承担故障检测与隔离任务。状态监测通过实时采集电流/电压信号、压板位置、断路器状态等数据，可提前发现TA断线、直流接地、逻辑回路异常等隐患，避免保护误动或拒动，防止故障蔓延。关键作用：将事故处理从被动响应转向主动防御，降低大规模停电风险。电磁兼容性与系统可靠性强化，微电子器件易受电磁干扰导致采样失真或元件损坏。状态监测系统通过屏蔽接地监测、回路绝缘测试（如直流回路绝缘监测告警）及抗干扰性能评估，显著提升二次设备在复杂电磁环境下的可靠性。

1.2 推动运维模式变革与效率跃升。替代传统定期检修，实现精准维护，传统定期检修存在人力浪费、针对性弱的问题（如常规继电器回路点分散难监测）。状态监测通过设备自诊断（CPU/存储器巡查）、边缘计算过滤冗余数据，结合历史故障训练预测模型，实现按需检修。远程诊断与无人值守运维，基于物联网的“云边协同”架构（如5G+边缘计算）支持远程校核定值、压板状态核对及故障录波分析。上海院通过远程诊断锁定风电网录波装置定值配置错误，避免保护误动作。配电房智能运维系统更实现“少人值守”，削减人工成本60%。

1.3 支撑智能电网决策优化的数据基石。全生命周期管理与数字孪生应用，状态数据为设备健康评估（如剩

余寿命预测）、故障根因分析提供依据。例如：融合振动频谱（0.01g分辨率）与热成像数据，精准定位风机齿轮箱磨损或光伏热斑；构建数字孪生体模拟设备退化路径，优化更换策略。赋能电网智能化升级，二次系统状态数据联动一次设备监测，助力高级应用场景：“二次防误系统”整合软压板状态至防误逻辑库，操作风险识别准确率达100%；配电自动化系统通过一二次融合技术（DTU/FTU终端），实现故障自愈与负荷优化。

1.4 现存挑战与应对方向。尽管重要性显著，当前仍面临：数据安全与协议兼容性：多系统协议差异导致数据孤岛，需强化加密传输与标准互通；复杂故障误报率：深度学习模型需结合专家知识库优化诊断精度；经济性瓶颈：推广低成本传感器与轻量化算法，适配中小变电站。

2 远程诊断在电气系统维护中的应用

2.1 关键技术架构与功能实现。“云-边-端”协同体系，端侧感知层：部署多模态传感器（电流/电压探头 $\pm 0.1\%$ 精度、双光谱测温仪 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 精度、振动传感器0.01g分辨率），实时采集设备运行参数与环境数据。边缘计算层：就地处理高频数据（延迟 $\leq 100\text{ms}$ ），执行故障预判与紧急控制，如配电箱跳闸0.5秒内自动重试。云端分析层：构建数字孪生模型，实现故障根因追溯与寿命预测（如变压器放电早期预警）。智能诊断核心能力，故障精准定位：融合深度学习与专家规则库，故障定位准确率 $\geq 90\%$ （如TA断线、直流接地等二次回路故障）。预测性维护：基于历史数据训练模型，实现设备健康评分与剩余寿命预测（如风机齿轮箱磨损预警）。

2.2 典型行业应用场景。场景1：电力系统关键设施维护，变电站二次设备：实时监视保护装置定值状态与压板位置，海南电网实现压板状态100%远程可控，减少

70%现场巡检。故障录波远程分析系统精准锁定定值配置错误，避免保护误动作。输电线路监测：双光谱测温技术实现500米外导线接头温度监测，精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，预警过热风险。场景2：新能源与工业设备运维，风电场智能运维：AR远程协作平台通过可穿戴设备传递现场画面，专家远程指导故障处理。振动数据分析提前2周预测齿轮箱故障，减少非计划停机80%。起重装备保障：门桥机远程诊断系统实时监测机械应力，同步诊断电控故障（如某船厂降低65万/年维保成本）。场景3：配电系统智能化升级，智能配电箱：电流监测精度0.1A，电弧故障0.1秒切断。某小区通过用电量异常分析查获比特币矿机，年省电费28万元。水电站远程支持：水电站采用全志T507芯片Ubuntu通信机，实现故障数据回溯与远程桌面调试，山区故障响应时间缩短70%。

2.3 应用效益与瓶颈分析。核心价值，运维效率提升：替代人工巡检（如某电网公司数据采集密度提升3000倍），配电室智能运维减少60%人力成本。故障损失控制：预测性维护降低非计划停机（工厂故障停机减少92%），某配电自动化案例预防事故挽回经济损失数千万。现存挑战，数据传输安全：多系统协议兼容性不足导致数据孤岛，需强化加密传输（如区块链技术探索）。算法可靠性：复杂故障误报率高达15%（如电磁干扰引发的误判），需融合物理模型与AI算法。经济性制约：中小变电站传感器部署成本占比超总投入30%，需开发轻量化边缘算法。

2.4 技术演进方向。实时性升级：推广“5G+边缘计算”架构，目标诊断延迟压缩至50ms内。决策智能化：数字孪生技术实现设备全生命周期模拟，优化更换策略（如GIS设备寿命预测误差 $\leq 5\%$ ）。人机协同深化：AR远程运维平台整合三维模型库，故障处置效率再提升40%。

3 物联网的关键技术

3.1 感知与识别技术（物理世界数字化入口）。传感器技术，部署温度、振动、电流/电压等传感器（如 $\pm 0.1\%$ 精度电流探头），实时采集设备运行参数与环境数据（如导线接头 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 测温精度）。在电力监测中用于变压器温度预警、机械应力分析。射频识别（RFID），通过电子标签（唯一编码）与读写器实现非接触识别，应用于电力资产追踪（如变电站设备身份管理）、故障配件快速溯源。嵌入式系统，将软件与硬件固化集成（如全志T507芯片通信机），适用于实时多任务场景（如水电站远程调试响应提速70%）。

3.2 网络与通信技术

（数据互通通道）。异构网络

融合，短距通信：ZigBee、蓝牙用于设备密集场景（如配电房传感器组网），广域传输：5G+LPWAN（如NB-IoT）支撑高频数据实时回传（延迟 $< 10\text{ms}$ ）与低功耗监测。电力应用：海南电网压板监控系统通过无线传输实现100%远程可控。

4 电气二次系统的监测与远程诊断技术

4.1 技术架构创新。“云-边-端”协同体系，端侧感知层：部署高精度传感器（电流/电压探头 $\pm 0.1\%$ 精度、双光谱测温仪 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ），实时采集继电保护装置状态、压板位置及断路器动作信号。边缘计算层：就地处理高频数据（延迟 $\leq 100\text{ms}$ ），执行故障预判与紧急控制（如配电箱电弧0.1秒切断）。云端诊断层：构建数字孪生模型，实现故障根因追溯与寿命预测（如变压器放电早期预警）。智能诊断核心引擎，融合深度学习与专家规则库，二次回路故障定位准确率 $\geq 90\%$ （如TA断线、直流接地）；基于历史数据训练预测模型，实现设备健康评分（如风机齿轮箱提前2周预警磨损）。

4.2 关键技术突破与应用。继电保护智能诊断，远程定值校核：上海院通过RTDS实验室动模试验远程锁定风电场录波装置定值配置错误，避免保护误动；压板状态可视化管理：海南电网实现压板状态100%远程监测，减少70%现场巡检量；五防系统升级：浙江电网整合软压板状态至防误逻辑库，操作风险识别准确率达100%。故障溯源与预测性维护，录波数据深度分析：故障波形智能解析技术识别电磁干扰导致的采样失真，误动事故率降低60%；多模态感知融合：结合振动频谱（0.01g分辨率）与热成像数据，精准定位GIS设备机械缺陷。新能源场站远程支持，AR远程协作平台通过三维模型指导现场维修（如深远海风电场运维效率提升40%）；

5 电气二次系统远程诊断的实现方式

5.1 端侧感知与数据采集。多模态传感技术，部署高精度电流/电压探头（ $\pm 0.1\%$ 精度）、双光谱测温仪（ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 精度）及振动传感器（0.01g分辨率），实时采集继电保护装置状态、压板位置及断路器动作信号。采用二维码模块与电压互感器结合，快速定位二次回路故障点（如开关进出口点），支持零基础人员远程锁定故障元器件。嵌入式通信终端，基于全志T507芯片等嵌入式系统构建本地通信机，实现故障数据实时回传与远程桌面调试（如西南水电站山区响应时间缩短70%）。

5.2 数据传输与协议处理。异构网络融合，通过5G+LPWAN（如NB-IoT）实现高频数据低延时回传（延迟 $< 10\text{ms}$ ），支撑遥控、遥测、遥信信号实时交互。建立IEC 61850与物联网协议转换架构，消除多系统数据孤

岛。开关量智能诊断，调度主站构建开关量字典库，利用模糊匹配算法规范开入名称，实现通道自动匹配与一致性核查，误操作风险下降90%。

5.3 智能诊断与决策。深度学习与专家系统融合，结合历史数据训练预测模型，实现TA断线、直流接地等二次回路故障定位（准确率 $\geq 90\%$ ）。数字孪生技术模拟设备全生命周期，如变压器放电早期预警及GIS设备寿命预测（误差 $\leq 5\%$ ）。多源数据分析，智能解析故障录波数据，识别电磁干扰导致的采样失真，误动事故率降低60%。融合振动频谱与热成像数据，定位GIS机械缺陷。

5.4 远程交互与控制。AR远程协作，通过可穿戴设备传递现场画面，专家远程指导维修（如深远海风电场运维效率提升40%）。云端远程操作，电网实现压板状态100%远程监测与可控，减少70%现场巡检量。配电自动化终端（DTU/FTU）支持故障自愈，恢复时间缩短至30秒内。

6 电气二次系统的故障诊断策略

6.1 分层诊断技术框架。基础感知层，多模态传感网络：部署 $\pm 0.1\%$ 精度电流/电压探头、 $\pm 1^\circ\text{C}$ 双光谱测温仪及0.01g振动传感器，实时捕捉继电保护装置状态、压板位置及断路器动作信号。嵌入式终端处理：基于STM32F746等芯片实现故障电弧0.1秒级快速切断，边缘计算响应延迟 $\leq 100\text{ms}$ 。智能诊断层，深度学习融合专家规则：CNN-Transformer混合模型分析故障录波数据，TA断线/直流接地定位准确率 $\geq 90\%$ 。数字孪生预测：构建设备全生命周期模型，实现变压器放电早期预警及GIS机械缺陷预测（误差 $\leq 5\%$ ）。决策控制层，AR远程协

作平台指导现场维修，深远海风电场运维效率提升40%；云端定值校核与压板状态可视化，误操作风险下降90%。

6.2 核心诊断策略。传统方法升级，电位测量法：通过节点电位分析定位二次回路开路/短路故障（如防跳继电器线圈断线）；短接测试法：分段短接控制回路验证触点状态，快速锁定失效元件。系统级防护策略，五防逻辑强化：整合软压板状态至防误系统，浙江电网操作风险识别准确率100%；故障自愈机制：DTU/FTU终端实现配电故障30秒内自动隔离与恢复。

6.3 行业验证案例。电网，压板状态100%远程监测，现场巡检量减少70%，通过区块链保障数据安全。水电站，嵌入式通信机实现山区故障回溯，响应时间缩短70%。新能源场站，基于IEC 61850协议转换架构消除数据孤岛，支撑风电并网故障快速定位。

总之，电气二次系统故障诊断策略的优化需结合智能化技术、标准化建设及运维模式创新，融合设备电磁特性库（如断路器动作波形、GIS机械参数）与LSTM/Transformer模型，解决复杂电磁干扰导致的15%误报率问题，提升TA断线定位精度至 $> 95\%$ 。整合振动频谱（ $\pm 0.01\text{g}$ 精度）、双光谱测温（ $\pm 1^\circ\text{C}$ ）及故障录波数据，构建设备全维度健康画像，实现变压器放电预警误差 $\leq 5\%$ 。

参考文献

[1] 马琛,浅谈物联网技术的电气二次系统状态监测与远程诊断.2023.

[2] 张翔,物联网技术的电气二次系统状态监测与远程诊断分析.2022.