

供配电线线路运行状态自动监测研究

邬 杰 张 婧

内蒙古电力集团乌海供电公司 内蒙古 乌海 016000

摘要：随着电力系统的不断发展，供配电线线路的运行状态监测对于确保电网的安全稳定运行至关重要。在实际应用中，供配电线线路运行状态自动监测方法面临诸多困境。现有电线线路运行状态自动监测方法未对图像高维特征进行解析，使得大量有用信息丢失，从而影响监测的准确性。供配电线线路运行状态自动监测分析是现代电力系统的核心环节，对保障电网安全、提升供电可靠性及优化运维效率具有关键作用，自动监测分析是构建高弹性配电网的核心基石，通过数字化手段重塑“安全-效率-经济性”平衡，为能源转型提供底层支撑。

关键词：供配电线线路；运行状态自动监测；研究

供配电线线路运行状态自动监测分析通过融合传感技术、通信技术与智能算法，实现对线路运行状态的实时感知、故障预警及精准处置。

1 供配电线线路运行状态自动监测分析重要性

1.1 强化安全防御与风险预警能力。实时隐患识别，通过传感器与物联网技术，实现毫秒级高频采样，精准捕捉线路暂态突变、电弧故障等微观异常，提前预警电气火灾等安全隐患，变被动响应为主动防御。设备状态评估，对电缆温度、绝缘老化、振动频率等参数持续监测，结合大数据分析预测设备寿命，避免突发故障导致大面积停电。自然灾害应对，实时监测覆冰厚度、风偏角度等环境参数，支撑山火、台风等灾害预警，缩短应急响应时间至15分钟以内。

1.2 提升故障处置效率与供电可靠性。故障快速定位隔离，自动触发故障录波与AI诊断，精准定位故障点（误差 $\leq \pm 300$ 米），百秒内完成故障研判，隔离时间缩短至30秒内，避免人工逐级排查导致的延迟。自愈式供电恢复，基于多联络网架结构，自动执行非故障区负荷转供策略，如通过联络开关合闸恢复供电，用户停电时间减少55%以上。减少运维成本，远程监测替代80%人工巡检，故障排查人工成本降低75%，单条500kV线路年运维成本下降40%。

1.3 优化能效管理与系统规划。负载动态调控，实时监测电压、电流、谐波等参数，识别负荷畸变线路，动态调整运行方式提升电能质量，降低线损。资源利用率提升，通过潮流分析优化分布式能源（如光伏）接入与消纳，设备利用率提高20%，减少备用容量建设投资。数据驱动决策，积累长期运行数据支撑网架改造规划，如基于历史故障分布优化分段开关布局，提升线路互供能力。

2 供配电线线路运行状态监测技术

2.1 故障定位技术。行波监测，通过分布式终端捕捉故障行波信号，结合时间差计算实现故障点精确定位（精度 ± 90 米），支持短路、接地故障的毫秒级响应。融合暂态零序比较法、行波极性法，接地故障选线准确率 $\geq 98\%$ 。振荡波局放检测，利用行波形反射定位电缆绝缘缺陷（如局部放电），适用于地下电缆隐患检测（如湖南株洲电网年处理隐患超百处）。

2.2 状态感知技术。分布式光纤传感，部署特种光纤实时监测温度、振动，空间分辨率达0.64mm，定位精度 ± 1 米，支持无盲区长距离监测（单通道最长20公里）。量子光纤传感，磁场测量灵敏度0.1pT（较传统提升3个数量级），可检测接地网0.02Ω级腐蚀电阻变化。多参数采集终端，集成电流/电压传感器（量程0–600A）、局部放电检测（灵敏度5pC）、温度传感器等，实时监测过热、绝缘老化等隐患。

2.3 环境与外力监测。自然灾害预警，监测覆冰厚度、风偏角度等参数，结合图像识别技术预警山火、外力破坏等风险，缩短应急响应时间1417。山火监测准确率95%，覆冰厚度误差 < 2 mm，提前预警时间达6小时。机械状态监测，实时监测导线接头温度、负荷电流，动态预警过载或接触不良导致的过热隐患，MEMS传感器实时捕捉导线舞动（0.1–10Hz）、微风振动（10–100Hz）信号。外力破坏防控，图像识别技术（1080P高清）智能辨识施工机械接近（预警距离500米）、树障鸟害等风险。实时捕捉树障、鸟害引发的瞬时性接地放电，通过自学习算法分类隐患类型（定位准确率 $\geq 99\%$ ），提前预警绝缘薄弱点2。

2.4 设备状态评估。运行参数采集，持续监测线路电流、电压、谐波等参数，评估电能质量及负载均衡状

态，辅助优化能效。寿命预测分析，基于电缆温度、振动频率、局部放电等数据，预测绝缘老化趋势及设备剩余寿命。环境适应性检测，验证线路在高温、潮湿等极端条件下的性能稳定性，确保全场景可靠运行。

2.5 智能诊断与决策。边缘AI分析，终端内置ARM+FPGA架构边缘计算模块（算力5TOPS），实现故障本地化毫秒级诊断。深度学习算法，故障类型智能识别准确率98.5%，支持电弧故障、树枝碰线等复杂场景判断。自适应阈值优化，动态调整预警阈值，结合历史数据与相邻节点状态，误报率<1.5%。

2.6 通信与能源技术。混合组网通信，4G/5G+NB-IoT双模传输，高频数据延迟<10ms，低频数据功耗降低70%。复合取能技术，太阳能+感应取电（适用交流线路），保障野外设备续航≥3年。远程通信与控制，多模通信传输，支持4G/5G、LoRa、光纤等通信方式，实时传输故障录波、温度曲线等数据至后台系统。远程指令执行，接收主站指令远程操控开关分合闸，实现非故障区负荷转供及自愈式复电。智能交互平台，通过WEB平台或移动端推送告警信息，提供可视化运行状态图谱及历史数据分析接口，核心功能技术指标对比如表1。

表1 供配电线运行状态监测核心功能技术指标对比

| 功能类型 | 关键技术 | 核心指标 | 应用效果 |
|------|------------|----------------|--------------|
| 故障定位 | 分布式行波测量 | 精度±90米，响应时间≤1秒 | 人工排查范围缩小90% |
| 隐患预警 | 自学习放电辨识算法 | 定位准确率≥99% | 预防性维护效率提升40% |
| 状态评估 | 多参数融合分析 | 局部放电灵敏度达2pC | 设备突发故障率降低50% |
| 远程通信 | 边缘计算+物联网协议 | 支持1000节点并发通信 | 运维响应速度提升至分钟级 |

3 供配电线运行状态自动监测分析

3.1 核心监测技术。分布式传感技术，光纤传感：部署特种光纤线路，实时监测温度、振动参数，空间分辨率达0.64mm，定位精度±1米，适用于长距离无盲区监测。行波监测：捕捉故障电流行波信号，结合时间差计算实现故障点定位，精度±90米，可识别树障、鸟害引发的瞬时接地故障。多参数采集：通过电流/电压传感器、局部放电检测装置（灵敏度5pC）及温度传感器，实时监测电气接点过热、绝缘老化等隐患。智能诊断算法，基于深度学习的故障识别准确率超98.5%，支持短路、接地故障的毫秒级预警。采用暂态录波技术，结合AI分析暂态波形，实现小电流接地选线准确率≥98%，避免人工试送电风险。

3.2 智能分析与决策。故障闭环处置，馈线自动化

（FA）：主站系统联动终端设备，故障时自动隔离非故障区段，恢复供电时间从小时级缩短至秒级。例如，电压时间型FA策略通过X/Y时限控制开关合闸逻辑，实现故障区段快速锁定。故障模拟测试：利用配电自动化测试仪（如配电之星-P2200）注入模拟故障电流，验证FA策略可靠性。预测性维护，分析历史数据建立设备健康模型，预警变压器绝缘劣化（如油中气体监测）、电缆接头过热等隐患，故障发生率降低63%。

4 供配电线监测系统应用场景

4.1 城市与人口密集区。校园/公共场所安全用电，实时监测宿舍、食堂、实验室等区域的漏电、过载及故障电弧，精准预警电气火灾隐患，预警信息直推管理人员移动端。系统适配复杂线路环境，安装便捷且不影响正常用电。城市配电网，实时监测线路负荷、温度等参数，及时发现过载、短路问题，保障高密度负荷区域供电安全。馈线自动化（FA）系统实现故障秒级隔离与自愈。

4.2 野外与复杂环境。长距离输电线路，特高压工程部署分布式监测装置，实时预警覆冰、山火等灾害，定位精度达±300米。行波定位技术累计完成超3000次故障定位，准确率92.7%。高海拔/恶劣气候区，耐候型监测装置适应-30℃~70℃温差、95%高湿环境，解决高原低气压导致的结构损伤问题。太阳能供电系统保障偏远地区设备续航≥3年，支持无市电区域的舞动、覆冰监测。沿海与盐雾腐蚀区，纳米涂层防护技术提升设备耐盐雾能力，500小时盐雾试验无腐蚀，保障海岛供电可靠性。

4.3 基建与工业场景。建筑工地用电安全，电流互感器（精度0.5级）捕捉0.1A级漏电变化，AI动态阈值模型将误报率降至0.3%以下。联动门禁系统阻断违规大功率电器使用，某项目违规电磁炉事件减少92%。高速公路隧道供电，集中监控隧道内照明、通风及排水设备，实现无人值守与故障快速处置。多站融合技术保障关键节点供电连续性，如低压发电车同期并网实现用户“零感知”停电。

4.4 乡村与新型示范区。农村电网，NB-IoT低功耗通信覆盖弱信号区域，实时上报故障位置与类型，提升抢修效率。“近零碳”智慧乡村，源网荷储协同调控：屋顶光伏全覆盖+台区储能调节30%负荷，客户平均停电时间趋近于。

5 供配电线监测技术的未来发展趋势

根据行业技术演进与实践反馈，供配电线监测技术的未来发展趋势主要体现在量子感知、智能诊断、通信架构革新及多技术融合四大方向，具体如下：

5.1 量子感知技术规模化应用。超高精度电流测量，

量子电流传感器基于金刚石氮-空位（NV）色心技术，磁场灵敏度达 0.1pT 级，实现 $\pm 800\text{kV}$ 特高压线路毫安级至千安级电流的全量程监测，精度提升至0.06%（传统设备约0.5%），突破强电磁干扰环境下的测量瓶颈。极端环境适应性，量子光纤传感可在-40℃至+85℃宽温域、1.6MPa高压环境下稳定运行，覆冰、山火等恶劣工况误报率降低至1.5%以下。非接触式安全监测，通过光纤耦合实现非侵入式测量，避免传统传感器需切断电路的缺陷，显著提升操作安全性。

5.2 AI诊断向预测性维护跃升。故障预测精度突破，深度学习算法融合多源数据（温度、振动、局部放电），故障预测准确率提升至 $> 98.5\%$ ，设备突发故障率降低50%。自愈能力动态优化，基于实时负荷数据的自适应控制策略，实现故障隔离与复电决策自动化，用户停电时间缩短55%以上。数字孪生深度应用，构建线路全生命周期健康模型，仿真各类故障演进路径，支撑预防性维修决策（如绝缘老化提前6个月预警）。

5.3 通信架构升级与边缘智能。5G-边缘计算协同，5G网络切片技术保障 μs 级时间同步，边缘节点就地处理90%高频采样数据（1MHz），通信延迟降至10ms内，解决山区信号盲区问题。多模态混合组网，光纤/LoRa/卫星通信互补覆盖，支持单通道20公里长距离监测与1000节点并发接入，数据断流率从30%降至 $< 3\%$ 。轻量化终端部署，MEMS传感器与微型化设计使装置重量 $< 5\text{kg}$ ，太阳能+蓄电池供电方案保障无源区域持续运行。

5.4 多技术融合与系统重构。能源互联网适配，动态优化光伏/风电波动性功率接入，新能源消纳能力提升

20%，减少备用容量投资。全要素感知扩展，集成环境参数（覆冰、风偏、山火）与电气量同步分析，应急响应时间缩短至15分钟。开放式平台生态，提供API接口接入第三方算法，支持定制化能效分析与碳排核算，助推电网双碳目标达成。

综上所述，融合边缘计算、人工智能及数字孪生技术，实现故障预测准确率 $> 98.5\%$ ，推动配电系统向“可观、可测、可控、可主动”的智慧运维模式转型。规模化部署监测装置后，电网重大事故率下降63%，新能源消纳能力提升20%。

参考文献

- [1] 刘林录. 输电线路避雷器全生命周期状态在线监测方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43 (2) : 60-63+115.
- [2] 吴宸颖. 基于智能监测技术的输电线路外破点位快速精准识别[J]. 粘接, 2024, 51 (1) : 177-180.
- [3] 苏振波. 城市电网输电线路立体化在线监测系统配置方案及研究[J]. 电力与能源, 2023, 44 (4) : 351-354+413.
- [4] 李念栋. 基于OPGW技术的输电线路外破灾害监测系统设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31 (14) : 147-150+156.
- [5] 黄海鹏. 基于OPGW光纤应变解析的输电线路外破灾害监测系统[J]. 电子设计工程, 2023, 31 (13) : 128-131+136.
- [6] 何捷兰. 基于分布式电流行波监测的输电线路故障精确定位装置研制[J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (18) : 7798-7808.