

电力设备故障诊断与自动化维护方法分析

张凯登

(湖南金塘冲水利枢纽建设管理有限公司, 湖南 益阳 413000)

摘要 电力设备故障诊断与自动化维护技术呈现出跨越式发展态势, 智能电网建设与数字化转型驱动了诊断维护理念与方法的深刻变革。本文系统分析了当前电力设备故障诊断领域面临的核心技术挑战, 包括数据采集质量不稳定、故障样本稀缺、诊断模型准确性与泛化能力不足等关键问题, 并提出了多维度优化策略框架, 以期优化电力设备故障诊断与自动化维护方法提供有益参考。

关键词 电力设备; 故障诊断; 自动化维护

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.006

0 引言

电力系统作为国民经济命脉与社会运行基础, 其安全稳定运行直接关系到国家能源安全与经济发展。随着电网规模扩大与复杂度提升, 设备故障诊断与维护面临着前所未有的挑战。电力设备故障具有隐蔽性、复杂性与链式反应特征, 若微小缺陷未能及时发现, 往往会演变为严重事故。变压器绕组局部过热、断路器动作特性劣化、输电线路绝缘老化等早期缺陷, 传统检测手段难以有效捕捉。传统依赖人工巡检与经验判断的维护模式已难以满足现代电力系统高可靠性要求, 智能化诊断与自动化维护技术成为行业发展必然趋势。

1 电力设备故障诊断与自动化维护的重要性

1.1 提高电力系统运行可靠性与安全性

电力系统作为国民经济命脉, 其运行可靠性与安全性直接关系到社会生产生活的稳定。电力设备故障诊断与自动化维护技术的应用, 为电网安全运行构筑了坚实屏障。传统的人工巡检与被动维修模式已难以满足现代电网高可靠性要求, 设备状态监测与故障预警系统的部署使电力企业从“故障处理”向“故障防范”转变, 大幅降低了设备非计划停运率。随着智能电网建设的深入推进, 电力设备状态监测与故障诊断技术日趋成熟, 覆盖了变压器、断路器、电缆等关键设备的全生命周期管理。智能巡检机器人和无人机等新型检测手段的应用, 克服了人工巡检在高危环境和恶劣天气条件下的局限性, 实现了24小时不间断监测。

1.2 降低维护成本与延长设备使用寿命

随着电力企业资产规模持续扩大, 设备维护成本在运营总支出中所占比重日益攀升, 科学高效的维护

策略对企业经济效益影响深远。传统的定期检修模式往往依据时间间隔安排维护工作, 难以准确反映设备实际状态, 造成维护资源配置不合理, 会表现为对状态良好的设备过度维护, 而对潜在故障设备维护不足。自动化故障诊断系统的应用改变了这一局面, 基于设备实际运行状态制定的维护计划使企业维护投入更具针对性。

1.3 提高发电效率与可靠性

提高发电效率与可靠性是电力系统现代化进程中的核心命题。设备状态监测系统在发电单元运行参数偏离标准值时能及时触发预警机制, 使电力企业得以在故障扩大前实施精准干预。此类前瞻性维护策略显著减少了非计划停机时间, 据《中国电力企业联合会2024年设备智能化应用报告》显示, 某大型火力发电厂引入智能诊断系统后, 年平均可用率提升至94.3%, 较传统维护模式高出近8%。先进的故障预测算法能识别设备性能衰减趋势, 优化运行参数配置。发电机组边际效率提升直接转化为燃料消耗降低, 碳排放减少。基于大数据分析的负载优化调度使发电机组始终运行于最佳工况点, 有效减轻运行应力, 延长关键部件寿命周期。

2 电力设备故障诊断与自动化维护的难点

2.1 数据采集与处理的挑战

水力发电站运行环境极为复杂, 水流冲击、高湿环境、机械振动等恶劣条件对传感器设备性能构成严峻考验。水轮机组区域长期处于高湿状态, 部分水道压力超过15 MPa(《水力发电工程技术手册》, 2018年版), 电子元器件在此环境下容易受潮腐蚀, 降低了数据采集精度。例如: 某700 MW水电机组(中国电力企业联合会

《大型水电机组安全运行分析报告》，2022 年）曾因水轮机振动监测系统受水流脉动干扰，传感器输出信号严重畸变，错误触发保护装置，导致机组非计划停运 18 小时，造成直接经济损失超过 280 万元（国家能源局《水电站典型事故案例分析》，2023 年）。

数据采集系统的抗干扰能力与供电可靠性构成另一技术瓶颈。水轮机导水叶片区域传感器信号受到水流湍流产生的压力波动影响，数据起伏异常；尾水管道系统中传感器长期浸泡于高含沙量水体环境，零点漂移现象显著，测量数据准确性难以保障。大型水电站分散布置的数百个测点形成庞大监测网络，地下厂房复杂地形条件下，数据传输面临诸多困难^[1]。

2.2 发电设备故障诊断模型的准确性挑战

水力发电设备故障诊断模型面临复杂环境下信号干扰的严峻考验。在实际运行工况中，各类环境因素交织影响，使得故障特征识别与分析难度显著增加。在电站水轮机组运行过程中，振动信号常受水流脉动噪声影响，导致特征提取偏差。水流湍流、气穴效应以及其他机械振动源共同作用，使得采集到的信号中故障特征与噪声难以有效分离。设备在工作中的这种微小安装误差在设备长期运行过程中较为普遍，却可能引发连锁反应，导致诊断决策偏离实际运行状态。水电站受来水含沙量波动影响，水轮机叶片磨损特性变化显著，水力参数呈非稳态关系。季节性降雨、上游水库调度以及地质环境变化等因素，使得含沙量在不同时期波动幅度较大，叶片磨损程度与模式呈现高度不确定性。这种动态变化使得水力参数难以建立确定性模型，给故障预测带来挑战。

2.3 实时监控与预警系统的构建难题

现代化电网包含数以万计的传感节点，每秒产生 TB 级数据流，传统集中式架构难以支撑如此庞大的实时计算需求。在高压输电线路断裂等紧急情况下，系统需在毫秒级完成分析决策，这对算法效率提出极高要求。电力系统分布式特性与实时监控需求之间存在天然矛盾。地域分散的电力设备通常依赖无线传输网络，数据传输延迟和丢包问题常导致监控盲区。边远地区变电站网络条件有限，监测数据上传困难，而关键设备故障往往发生在恶劣环境中。预警阈值确定成为实时监控系统设计中的灰色地带。过于敏感的阈值设置导致频繁误报，降低施工人员响应积极性；阈值过高则可能错过早期故障征兆。电力设备状态参数存在季节性波动与负载相关性，静态阈值难以适应动态运行环境。电力企业亟需开发自适应阈值机制，平衡预警敏感性与准确性^[2]。

3 电力设备故障诊断与自动化维护的优化策略

3.1 引入先进的传感器和数据采集设备

在智能电网建设进程中，设备状态监测精度与深度决定故障诊断能力边界。新型传感技术为电力系统安全运行提供了坚实的基础，微机电系统（MEMS）传感器已成为变革性技术力量。当代 MEMS 加速度传感器具备超高灵敏度，可监测电力变压器轴承微小磨损产生的振动信号，频率响应范围达 0.5 Hz ~ 10 kHz，敏感度优于 0.1 mg。例如：某省级电力公司在 500 kV 主变压器上安装 MEMS 传感阵列后，成功捕捉到铁芯松动引起的低幅振动特征，提前两个月发现潜在故障，避免了因绝缘击穿导致的重大事故。这类传感器尺寸微小，功耗低至微瓦级，适合布置于 GIS 设备内部狭窄空间，监测触头机构运动轨迹，实现毫秒级时间分辨率记录。光纤传感技术在输电线路状态监测领域展现卓越性能。基于布里渊散射原理的分布式光纤测温系统实现了长距离温度场精确测量，单次扫描覆盖范围达 80 km，空间分辨率达 0.5 m，温度分辨率优于 0.1 °C。该技术打破了传统点式测温局限，呈现完整温度分布曲线，电缆接头异常发热等隐患无所遁形。

3.2 采用自适应滤波技术

针对水力发电机组振动信号干扰问题，自适应滤波技术结合多传感器数据融合方法显著提升了信号质量。例如：某大型水电站 500 MW 水轮发电机组应用小波分解算法处理机组振动信号，背景噪声影响降低 75.8%，导轴承微小故障特征提取准确率达 94.7%。该成果已被《水电能源科学》2023 年第 41 卷收录验证。水轮机轴系测点冗余部署与温漂自动校准系统集成实现了振动数据自动补偿功能，消除了大坝结构形变引起的位移误差，系统诊断精度提高 30.5%。此外，基于离散小波变换的特征提取算法在处理非平稳振动信号时展现出独特优势，特别适用于负荷波动频繁的抽水蓄能机组。水轮机导水机构配套振动在线监测系统采用多阶段降噪策略，将高频干扰源与机械特征频率有效分离，动态振动响应分析精度提升 42.3%，该技术已在西南地区多座大型水电站推广应用。声发射技术辅助水轮机叶片裂纹监测在国内多家水电厂落地应用，叶片应力集中区异常识别率达 95.3%，叶片微裂纹征兆发现时间提前 12 小时，相关研究成果发表于《中国电机工程学报》2024 年第 39 卷。

例如：某大型水电站 800 MW 机组采用分布式光纤传感系统监测引水隧洞压力钢管，防止渗漏引起的局部应力集中，减少非计划检修次数 1.8 次/年。水轮机运行稳定性受益于水头实时分析系统。该光纤传感

系统基于布里渊散射原理,采样间隔可达0.1 m,温度精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,应变精度 $\pm 2\text{ }\mu\epsilon$,建立了压力钢管全线应力分布数字映射模型。又如:某水电厂引入流量参数在线监测装置,结合导叶开度动态调整模型,实现水头波动与机组负荷匹配的精确控制。该系统投运后,水轮机效率波动幅度控制在 $\pm 0.55\%$,水轮机振动幅值稳定在 $23\text{ }\mu\text{m}$ 左右,负荷变化工况下的水击防护调控准确率提高15.6%。华中科技大学水电机组振动研究团队2022年发表的实验数据进一步证实了该技术的可靠性。基于深度学习构建的多参数相关性分析模型取代了传统单一阈值判据,如某流域梯级电站应用此技术监测发电机振动与水头、导叶开度、推力轴承温度等参数关联性,提升了复杂工况下的故障识别能力,机组故障预警提前率达82.7%。梯级电站群智能控制系统实现了跨厂级数据共享与分析,水轮机组运行参数全寿命周期特征库已囊括27种典型故障模式,为精准健康评估奠定基础,相关成果发表于《中国水利水电科学研究院学报》2023年第21卷^[3]。

3.3 实施多模型融合策略

电力设备故障诊断领域正经历方法论变革,单一模型难以应对复杂环境下的多类故障识别挑战,多模型融合策略应运而生。此方法立足于“集体智慧”理念,整合多种算法各自优势,构建更具鲁棒性的诊断框架,有效规避单一模型固有局限性。

异构模型融合在变压器故障诊断中表现卓越。统计学习模型如支持向量机在处理低维特征时表现出色,而深度神经网络则擅长提取高维非线性特征。在变压器油色谱分析中,随机森林算法对气体比例异常检测准确率高,卷积神经网络则对时序变化模式识别敏感。融合这两类模型输出结果,准确率较单一模型提升15%以上。多模型融合恰能将经验知识编码入系统。层级式融合架构适应电力设备复杂性。底层模型专注于特定传感器数据分析,如振动信号、温度分布、局部放电等;中层模型整合单一设备多维信息;顶层模型关注系统级相互影响。在GIS设备监测中,声学信号分析与UHF电磁信号分析各有盲区,声学模型在强噪声环境准确率下降,UHF模型对某些位置放电敏感度不足。两类模型互补融合后,故障定位精度提高40%,漏检率降至3%以下^[4]。

3.4 开发高效率的实时数据处理框架

随着感知终端数量呈指数级增长,传统数据处理架构面临吞吐量瓶颈与延迟挑战,创新的数据流处理范式应运而生。分布式流处理技术为电力大数据实时分析提供了理想解决方案。基于Apache Kafka与Flink构

建的流式计算框架能够实现毫秒级数据处理延迟,满足电力设备故障预警的时效性要求。该架构采用无状态微服务设计,水平扩展能力强,单集群可支持百万级传感器数据并行处理。变电站运行数据采用主题分区机制组织,确保关键设备数据优先处理,提升系统对紧急事件的响应速度。边缘计算模式重塑了电力监测数据流向。计算任务前移至数据源附近,大幅降低了数据传输量与中心节点负荷。在智能变电站中,边缘服务器承担数据预处理、特征提取与初步分析职责,仅将处理结果与异常数据上传至云平台。此模式降低了网络带宽依赖,即使在网络中断情况下仍能保持基本监测功能。电力企业可借此构建多层级数据处理体系,实现“边缘感知、分区计算、中心决策”的协同框架^[5]。

时序数据库优化提升了电力监测数据存取效率。针对电力设备监测特点设计的列式存储结构与压缩算法,将数据存储空间减少70%,查询性能提升5倍以上。时间分区与冷热数据分离机制使长期历史数据与实时数据管理各得其所,既保障了实时查询速度,又保存了完整历史记录供深度分析。自适应采样算法根据数据变化率动态调整存储精度,平衡了存储成本与数据价值。

4 结束语

电力设备故障诊断与自动化维护技术正处于深刻变革时期,传统经验驱动模式向数据驱动智能化范式转变已成必然趋势。本文系统探讨了从设备状态感知、数据处理、模型构建到决策支持的全链条优化策略,揭示了电力设备智能运维的发展路径与技术要点。高精度传感与先进算法的深度融合为故障诊断注入了新活力,多模型集成方法显著提升了诊断准确率与可靠性。实时数据处理框架解决了海量数据分析的效率问题,边缘计算与云端协同架构重塑了数据流处理模式。然而,技术创新并非一蹴而就,电力行业特有的高可靠性要求与保守应用环境构成了技术落地的现实挑战。

参考文献:

- [1] 王瑞达,刘士凯,黄景帅.电力工程中电力设备故障诊断技术的研究与应用[J].电气时代,2025(02):102-104.
- [2] 吴玉凯.电力设备故障诊断中的模式识别技术研究[J].家电维修,2025(02):137-139.
- [3] 樊慧文.深度学习在输变电设备故障状态检测中的应用研究[J].电工技术,2025(02):95-97,101.
- [4] 茹传红,樊建惠,赵洲,等.基于Kapur熵与改进蝴蝶优化算法的电力设备红外图像分割模型[J].计算机应用与软件,2025,42(01):167-176.
- [5] 杨万鹏.电力一次设备远程智能红外监控报警系统设计[J].自动化应用,2024,65(24):21-23,38.