

水电机组状态监测与智能诊断方法研究

傅佳美

广西水利电业集团新疆克州水利发电有限公司，新疆克州奥依塔克镇，845561；

摘要：在全球能源结构向清洁低碳转型的背景下，水力发电作为可再生能源的核心组成部分，其装备可靠性直接关系到能源供应安全与系统稳定。水电机组作为水电工程的核心设备，具有结构复杂、运行环境多变、故障关联性强等特点，传统维护模式已难以适应现代水电运维的精准化需求。本文基于多学科交叉视角，系统分析水电机组状态监测与智能诊断的技术现状与核心挑战，从监测体系优化、诊断方法创新、系统集成构建三个维度提出系统性策略，为推动水电装备运维从“定期维修”向“预测性维护”转型提供理论支撑与技术路径。

关键词：水电机组；状态监测；智能诊断；数据融合；预测性维护

DOI：10.69979/3060-8767.25.12.037

引言

在全球能源向清洁低碳转型的背景下，水力发电作为可再生能源核心，其装备可靠性直接影响能源供应安全。水电机组作为水电工程核心设备，因结构复杂、运行环境多变，转轮气蚀、轴承磨损等故障频发，传统“定期巡检+计划维修”模式已难以满足精准化运维需求，存在效率低、成本高、隐患难预判等问题。随着物联网、人工智能技术发展，状态监测与智能诊断成为突破瓶颈的关键。本文系统分析水电机组状态监测与智能诊断的技术现状及核心挑战，从监测体系、诊断方法、系统集成维度提出策略，为推动运维向“预测性维护”转型提供支撑。

1 水电机组状态监测与智能诊断的核心挑战

1.1 监测数据的多源异构与不确定性

水电机组状态监测涉及机械、电气、水力等多个专业领域，数据来源呈现显著的多源异构特征：从数据类型看，包括振动、温度等连续型传感数据，开关状态、报警信息等离散型数据，以及检修记录等文本数据；从数据维度看，涵盖时域、频域等不同维度特征；从数据质量看，受传感器干扰、传输延迟、环境噪声影响，数据常伴随缺失、异常等不确定性问题。如何实现多源异构数据的有效融合与降噪处理，是精准提取故障特征的前提，也是当前监测技术面临的首要挑战。

1.2 复杂故障的关联性与隐蔽性

水电机组故障具有显著的关联性与隐蔽性特征：一方面，故障成因与表现形式存在多对多关系，如振动异

常可能由机械不平衡、水力冲击或电气故障等多种因素引起，同一故障在不同工况下的表现也存在差异；另一方面，早期故障特征微弱，易被正常运行噪声掩盖，随着运行时间推移，故障逐步扩散蔓延，增加了诊断难度。传统诊断方法基于单一参数或简单规则，难以应对这种复杂故障机理，导致诊断准确率偏低^[1]。

1.3 系统集成与落地应用的瓶颈

智能诊断技术落地面临“技术-应用”衔接不畅的问题：一是不同厂家的监测设备通信协议不统一，数据接口各异，导致跨系统数据共享困难，形成“信息孤岛”；二是诊断模型与实际运维需求脱节，实验室环境下训练的模型在复杂工况中泛化能力不足；三是运维人员对智能诊断结果信任度不足，仍依赖传统经验决策，制约了技术价值发挥。

2 水电机组状态监测体系优化策略

2.1 多维度监测参数体系构建

科学的监测参数体系是精准感知设备状态的基础，需涵盖机械、电气、水力三类核心参数，实现全生命周期状态覆盖。机械参数方面，重点监测振动、摆度与温度：振动参数通过安装加速度传感器采集，分析时域（幅值、峰值）与频域（特征频率）特征，识别部件松动、不平衡等故障；摆度参数采用电涡流传感器在导轴承处测量，大型混流式机组导轴承摆度应控制在0.15mm-0.3mm范围内，轴流式机组可适当放宽标准；温度参数通过热敏电阻传感器监测定子绕组、轴承等关键部位，预防绝缘老化、润滑失效等问题^[2]。

电气参数需同步监测电压、电流、功率因数等稳态参数与绝缘电阻、局部放电等特征参数，其中定子绕组局部放电信号的幅值与频次变化，是判断绝缘老化程度的核心指标。水力参数重点采集蜗壳压力、尾水管真空度、流量等数据，通过压力脉动分析识别水力冲击、气蚀等故障，低频振动（10Hz-50Hz）通常是水力冲击的典型特征。三类参数需按 100Hz-1000Hz 的采样频率同步采集，确保数据的时间一致性。

2.2 监测点优化与传感技术升级

监测点布局应遵循“关键部位全覆盖、敏感区域加密布”的原则，结合机组结构特点制定科学方案：水轮机部分在转轮室、导水机构、主轴密封处设置监测点；发电机部分重点监测定子、转子、轴承系统；辅助系统覆盖调速器、冷却系统等关键环节。针对振动等关键参数，采用“固定传感器+移动监测”相结合的模式，弥补固定监测的空间局限性。

传感技术升级需聚焦精度提升与环境适配：机械参数监测采用 MEMS（微机电系统）加速度传感器，实现 ±100g 量程内 0.1% 精度的振动测量；电气参数采用光纤传感器，利用其抗电磁干扰优势，提高强电磁环境下的数据可靠性；水下部件监测采用防水耐压传感器，确保在深水环境下长期稳定工作。同时，引入无线传感网络技术，减少布线成本，提高监测系统的灵活性与扩展性。

2.3 数据预处理与质量管控策略

数据预处理是提升诊断准确性的关键环节，需建立“清洗-降噪-标准化”三级处理流程。数据清洗阶段，采用 3σ 准则识别异常值，通过线性插值法填补缺失数据，剔除传感器故障导致的无效数据；降噪处理针对不同信号特性采用专属算法：振动信号采用小波阈值降噪，滤除环境干扰噪声；温度信号采用滑动平均滤波，平滑随机波动；电气信号采用卡尔曼滤波，降低电磁干扰影响。

数据标准化采用 Z-score 归一化方法，将不同量纲的参数转换为统一尺度，消除量级差异对后续分析的影响。建立数据质量评价体系，从完整性（缺失率 ≤ 5%）、准确性（误差 ≤ 2%）、时效性（传输延迟 ≤ 1s）三个维度进行量化评估，对质量不达标数据启动二次采集或传感器校准程序，确保输入诊断模型的数据可靠有效。

3 水电机组智能诊断方法创新策略

3.1 多源数据融合诊断策略

多源数据融合可突破单一参数诊断的局限性，实现故障特征的全面提取。构建“数据层-特征层-决策层”三级融合架构：数据层采用分布式数据集成技术，通过统一数据接口（如 OPCUA 协议）对接不同来源数据，建立标准化数据库，解决“数据孤岛”问题；特征层采用卷积神经网络（CNN）提取振动、温度等信号的深层特征，结合自然语言处理（NLP）技术解析检修记录等文本数据，形成多维度特征向量；决策层基于 D-S 证据理论融合各特征向量的诊断结果，通过证据合成规则处理不确定性信息，提高诊断可信度^[3]。

针对水力、机械、电气故障的关联性，建立跨域数据关联分析模型：例如，将尾水管压力脉动与转轮振动数据进行交叉分析，识别水力不平衡引发的机械振动；通过定子温度与电流谐波数据的融合，判断绝缘老化与电气故障的耦合关系。通过多维度数据的互补验证，提升复杂故障的识别能力。

3.2 智能诊断算法优化策略

构建“传统算法+深度学习”的混合诊断模型，兼顾诊断精度与解释性。对于轴承磨损、转子不平衡等典型故障，采用支持向量机（SVM）、随机森林等传统机器学习算法，基于历史故障数据训练模型，实现快速识别，其优势在于模型简单、可解释性强；对于气蚀、绝缘老化等复杂故障，采用深度学习算法挖掘深层特征：利用长短期记忆网络（LSTM）处理振动时序数据，捕捉故障发展趋势；通过变分自编码器（VAE）实现无监督异常检测，识别未知故障模式。

引入集成学习技术提升模型泛化能力，采用 Bagging 算法构建多模型集成系统，通过投票机制融合不同算法的诊断结果，降低单一模型的误判风险。建立算法动态更新机制，定期纳入新的故障数据对模型进行再训练，结合迁移学习技术，将已有机组的诊断经验迁移到新投运机组，缩短模型训练周期。

3.3 故障预测与寿命评估策略

从“故障诊断”向“故障预测”延伸，构建基于健康指数的预测模型。首先，选取振动幅值、温度偏差、绝缘电阻等关键参数，采用层次分析法（AHP）确定权重，构建机组健康指数（HI），量化表征设备健康状态；其次，基于 LSTM 神经网络建立健康指数预测模型，输入历史健康指数序列，预测未来一段时间内的健康状态变

化趋势；最后，设定健康阈值（如 $HI \leq 0.6$ 为预警阈值， $HI \leq 0.3$ 为故障阈值），当预测值接近阈值时触发相应等级预警^[4]。

结合物理模型与数据驱动模型开展寿命评估：对于轴承、密封等易损部件，基于疲劳损伤理论建立物理寿命模型，结合运行负荷数据计算累积损伤；对于发电机定子等复杂部件，采用数据驱动模型，通过分析历史寿命数据与运行参数的相关性，预测剩余使用寿命。将寿命评估结果与运维计划相结合，为预防性维护提供精准依据。

4 智能诊断系统集成与落地策略

4.1 一体化系统架构设计

设计“感知层-网络层-平台层-应用层”四层架构的智能诊断系统。感知层由各类传感器、数据采集终端组成，实现运行参数的全面采集；网络层采用“5G+工业以太网”双网络架构，5G网络满足移动监测数据传输需求，工业以太网保障关键参数的实时传输，通过边缘计算节点实现数据预处理，降低传输压力；平台层构建云计算与大数据中心，集成数据存储、模型训练、可视化分析等功能，采用分布式数据库存储海量数据，通过GPU集群提供强大计算能力；应用层开发状态监测、故障诊断、维护决策等模块，为运维人员提供一站式服务。

引入数字化孪生技术提升系统效能，构建与物理机组精准映射的数字模型，实时同步运行数据，通过仿真模拟故障发生过程，验证诊断结果的准确性，同时可用于运维人员培训，降低实操风险^[5]。

4.2 标准化与互联互通策略

建立统一的数据通信与接口标准，采用OPCUA协议作为跨系统数据交互的统一标准，规范数据格式、传输速率等技术指标，实现不同厂家监测设备的互联互通。制定数据共享规范，明确数据权属、共享范围与安全要求，打破企业内部与企业之间的“数据壁垒”。

构建行业级诊断知识库，整合高校、企业、科研机构的故障案例与诊断经验，按“故障类型-特征参数-诊断方法-处理措施”结构化存储，采用知识图谱技术实现知识的可视化与关联查询。建立知识库动态更新机制，鼓励运维人员上传实际案例，通过专家审核后纳入知识库，形成共建共享的良性循环。

4.3 运维管理与人才培养策略

推动运维模式从“计划维修”向“预测性维护”转型，建立“监测-诊断-决策-执行”闭环管理流程：监测系统实时采集数据，平台层自动分析诊断，生成包含故障位置、原因、建议措施的诊断报告，运维人员根据报告制定维护计划，执行后将结果反馈至平台，实现经验积累与流程优化。

加强复合型人才培养，构建“高校-企业-科研机构”协同培养体系：高校开设物联网、人工智能与水电设备交叉课程，培养基础人才；企业开展在职培训，重点提升运维人员的数据解读与模型应用能力；科研机构举办技术研讨，分享前沿技术成果。同时，开发智能化运维培训平台，通过虚拟仿真场景提升实操能力，打造既懂水电设备又懂智能技术的专业队伍。

5 结论

本文针对水电机组状态监测与智能诊断的技术痛点，形成系统性优化策略：监测端构建多维度参数体系，结合传感升级与三级数据预处理，保障数据质量；诊断端通过三级数据融合、混合智能模型及健康指数预测，提升故障识别与预判能力；落地端依托四层系统架构、标准化方案及运维转型，打通技术应用链路。

参考文献

- [1] 徐勇刚, 冉懋鸽, 陆建宏, 等. 基于Mte11的水电站设备状态智能监测技术研究[J]. 水电站机电技术, 2025, 48(05): 45-48+52.
- [2] 王勇飞, 李晓飞, 孙雨欣, 等. 基于核主成分分析与长短时记忆网络的水电机组监测预警[J]. 振动与冲击, 2024, 43(24): 287-294.
- [3] 刘志辉, 刘德新, 姬升阳, 等. 基于开机过渡过程的水电机组电磁振动特征提取与状态评估[J]. 中国农村水利水电, 2025, (07): 127-134.
- [4] 李胜鑫. 水电机组精品检修管理系统设计与实现[J]. 中国高新科技, 2024, (20): 73-75.
- [5] 毛祥虎, 蒲德智, 陈涛, 等. 基于SVD的水电机组轴心轨迹降噪提纯方法研究[J]. 水电站机电技术, 2024, 47(10): 105-110.

作者简介：傅佳美；性别：女；民族：汉；出生日期：1992.09.13；籍贯：浙江省；职称：初级职称；学历：本科。