

Research on Fault Diagnosis and Early Warning Mechanism of Intelligent Monitoring System in Hydropower Plant

Rongxi Huang

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe Prefecture, Yunnan, 661100, China

Abstract

To enhance operational safety and intelligent capabilities in hydropower plants, this study develops a fault diagnosis and early warning mechanism for smart monitoring systems. Through systematic categorization of common equipment and system failures, we designed a diagnosis model integrating expert knowledge and data-driven approaches, while proposing a risk assessment-centric early warning algorithm. The system architecture integrates real-time sensor monitoring, data fusion analysis, and coordinated response controls to form a self-learning intelligent diagnostic platform. Case studies demonstrate that this mechanism significantly improves fault identification accuracy and early warning response efficiency. The research provides technical support for intelligent operation and maintenance systems in hydropower plants, playing a crucial role in advancing digital transformation of energy systems and intelligent equipment condition management.

Keywords

hydropower plant; intelligent monitoring; fault diagnosis; early warning mechanism; risk assessment

水电厂智能化监控系统故障诊断与预警机制研究

黄荣熙

红河广源水电开发有限公司, 中国 · 云南 红河州 661100

摘要

为提高水电厂运行的安全性与智能化水平, 研究构建了一套面向智能监控系统的故障诊断与预警机制。基于对水电厂常见设备与系统故障类型的系统归纳, 设计了结合专家知识与数据驱动的诊断模型, 并提出了以风险评估为核心的预警算法。在系统架构中, 整合实时传感监测、数据融合分析与联动响应控制, 形成具有自学习能力的智能诊断预警平台。应用实例显示, 该机制能够显著提升故障识别的准确性和预警响应效率。研究成果为水电厂智能运维体系提供了技术支撑, 对推动能源系统数字化转型与设备状态管理智能化具有重要意义。

关键词

水电厂; 智能监控; 故障诊断; 预警机制; 风险评估

1 引言

水电厂在能源体系中承担着关键调节和电力输出的任务, 其运行安全直接关系到区域供电的稳定性与经济性。随着智能化技术的发展, 传统监控手段已难以满足对故障快速识别和精准预警的要求。构建高效的故障诊断与预警机制, 能够提升水电厂对设备状态的感知能力和风险防控水平, 有助于减少突发事件造成的损失, 增强系统运行的智能化和自动化水平, 是实现水电厂数字化升级的核心环节。

2 故障诊断机制设计

2.1 故障类型识别

水电厂设备系统结构复杂, 运行工况多变, 易发生多

种类型的故障。故障类型主要包括水轮发电机组机械部件磨损、电气控制系统信号异常、测控装置数据漂移以及通信系统传输中断等。不同类型故障在表现形式、影响范围与演化规律上存在明显差异, 需结合实际运行工况与历史故障数据进行系统性分析。通过构建故障知识库, 将典型故障案例、关键特征参数和时序演变信息进行归纳整理, 有助于提高故障识别的准确性与全面性。结合人工巡检记录与设备运行数据的交叉比对, 可以在早期阶段判断潜在故障模式, 增强监控系统的感知能力^[1]。

2.2 诊断方法选择

故障诊断方法需兼顾实时性、准确性与适应性, 传统基于规则的诊断方法在应对复杂工况和新型故障类型方面存在一定局限, 单一模型难以全面反映设备运行状态变化趋势。为提升诊断效果, 可采用多方法融合策略, 将专家系统与数据驱动模型结合, 充分利用经验知识与数据特征。例如,

【作者简介】黄荣熙 (1985-), 男, 中国福建晋江人, 本科, 工程师, 从事电气工程及其自动化技术研究。

基于支持向量机与深度神经网络的混合模型可在识别非线性故障特征方面展现良好性能,结合模糊逻辑或贝叶斯网络增强系统在信息不确定环境下的判断能力。诊断方法应具备自学习与自适应能力,能够动态调整参数并优化决策路径,应对设备状态的长期变化与突发干扰^[2]。

2.3 实时监测接口

高效的故障诊断机制需依赖完善的实时监测系统,感知层的布设需覆盖关键设备节点并具备高频率、高精度数据采集能力。传感器类型涵盖振动信号、温度、电流、电压、压力与位移等多维参数,需具备强抗干扰能力和长周期稳定性。数据采集模块需支持边缘计算与本地预处理,减少异常数据对诊断结果的干扰。通信接口需兼容多种协议标准,确保各类设备与系统间的数据高效传输与共享。实时数据需在入库前经过清洗、对齐与压缩处理,并基于分布式数据库实现高可靠存储,为后续故障诊断与模型训练提供连续稳定的基础数据支撑。

3 预警机制优化

3.1 风险评估模型

风险评估模型是智能监控系统中实现精准预警的基础,需基于多维度指标构建全面的评估框架。水电厂运行环境复杂,各类设备在长期高负荷工况下易出现性能劣化与隐性故障。单一参数变化往往难以直接反映系统潜在风险,因此需从设备健康状态、运行负载、环境条件、历史故障频率与维护周期等多个角度构建综合评估指标体系。各指标间具有一定相关性 & 耦合性,需利用层次分析法或模糊综合评价方法分配权重,建立风险因子间的映射关系。模型设计应充分考虑指标之间的非线性影响关系,并引入动态权重调整机制,根据系统运行状态变化实时修正评估模型参数。评估模型不仅要具有较高的敏感性以捕捉潜在风险征兆,还需具备稳定性以避免短期波动引发误判。在评估过程中应注重数据连续性与完整性管理,采用滑动窗口与数据插值策略处理缺失数据,增强模型对实际运行工况的适应能力。风险评估结果需量化呈现,通过等级划分明确系统运行安全边界,为后续的预警决策与响应策略提供可靠依据^[3]。针对不同风险等级需匹配不同的响应优先级与处理措施,建立由数据驱动向策略联动的动态风险闭环管理机制。

3.2 预警算法应用

预警算法在风险评估结果的基础上实现故障趋势预测与异常状态判别,是智能监控系统实现前瞻性干预的核心技术环节。水电厂设备运行数据具有高维、非线性与时序性强等特点,常规统计方法难以有效提取潜在异常特征。为提升预警算法的适用性与鲁棒性,可结合多种智能算法构建复合型预测模型。基于深度学习的时间序列预测模型如 LSTM 或 GRU 网络具有较强的长期依赖建模能力,适用于捕捉设备参数变化趋势与临界状态演化路径。异常检测方面可引入

孤立森林、自动编码器或高斯混合模型等无监督学习方法,挖掘潜在偏离正常模式的隐性故障信号。针对不同设备或系统模块可构建分层预警模型,在局部特征分析与全局状态融合中实现互补增强。模型训练过程中应采用历史数据与人工标注信息构建样本库,并引入增量学习机制支持模型的持续优化与更新。预警判据应结合动态阈值调整机制,在保证响应灵敏度的前提下降低误报率与漏报率。预警输出不仅要给出故障发生的可能性,还应提供影响程度、演化趋势与建议干预措施,辅助运维人员进行精准决策。算法部署需具备边缘执行能力,结合本地计算资源实现快速响应,避免数据传输延迟影响预警时效性^[4]。

3.3 联动响应机制

预警信息的价值在于推动系统实现有效联动响应,构建由预警信号驱动的多层级协同控制机制是提升系统智能化水平的关键环节。响应机制设计需兼顾自动化执行效率与人工干预灵活性,确保系统在不同预警等级下采取最优控制策略。预警联动流程应包括信息确认、响应决策、控制指令下发与执行反馈等环节,各环节需具备标准化接口与清晰的权限控制机制。在系统结构层面可构建基于分布式控制的响应框架,各子系统在接收到预警信息后根据本地状态参数快速完成决策并执行相应控制动作。典型响应措施包括设备降载运行、系统切换控制、紧急断电保护或维持状态观测等操作方式,需结合历史处置经验与仿真分析结果优化响应策略。响应机制应支持与调度平台、维护系统及管理决策系统的联动,形成从故障预警到任务派发、资源协调与结果评估的全流程闭环体系。为提升响应系统的可靠性,可引入多通道冗余控制机制与状态监测反馈路径,在操作执行过程中持续采集数据并评估响应效果,形成以数据为核心的自适应优化循环。在人工干预部分,应设计清晰的操作指引与界面交互逻辑,辅助运维人员根据预警内容快速识别故障根因并采取适当应对措施。响应机制还需支持历史记录存档与可追溯性分析,为系统运维优化与模型评估提供基础数据支撑,进一步完善智能监控系统的运行安全保障体系^[5]。

4 系统验证与应用效果

4.1 工程实例分析

为验证所提出的水电厂智能化监控系统故障诊断与预警机制的实际可行性与应用价值,在某中型水电站进行了为期六个月的系统部署与运行测试。该水电站装机容量为 60 兆瓦,涵盖两台水轮发电机组与完整的自动化控制系统,监测点布设覆盖主变压器、励磁装置、水导轴承、冷却系统以及综合配电单元。系统安装完成后,建立了传感器数据采集通道与历史运行数据存储模块,并对模型参数进行了初步训练与优化。在运行期内,该系统成功识别出 3 次早期轴承振动异常状态与 1 次励磁电压波动引发的控制偏移趋势,在人工巡检介入前实现了精准预警与自动响应。振动信号变化趋

势经 LSTM 预测模型评估后在提前 28 小时发出预警，控制系统根据联动机制自动调整发电负荷，减小了进一步故障发生的概率。实际记录显示预警命中率达到 92.3%，有效降低了设备非计划停机事件的发生频率。系统稳定性测试表明，在复杂工况与不同水位调节条件下，监控系统具备较强的数据适应能力与模型收敛性，连续运行稳定周期超过 180 天未出现数据丢失或误判跳变。该工程实例展示出智能化监控系统在故障防控与响应效率方面的显著优势，并具备良好的扩展兼容能力，适用于多类型水电站环境下的智能运维场景。

4.2 性能评估指标

系统性能评估以采集到的实际运行数据为基础，结合专家标注与历史记录对诊断准确性、预警响应时效、误报率与系统稳定性进行了量化分析。采用混合数据集构建测试样本，其中包含运行期间产生的 8000 条传感器采样序列与人工标注的 42 个典型异常事件。模型训练阶段采用五折交叉验证法评估诊断效果，使用支持向量机与深度神经网络组成的混合诊断框架对每类故障进行识别，并基于风险等级设定不同的预警阈值。系统性能指标通过 MATLAB 与 Python 中的 Scikit-learn 与 Keras 工具包实现建模与评估，具体数据如表 1 所示。

表 1 系统故障诊断与预警性能评估结果

评估指标	数值	说明
故障诊断准确率	0.946	正确识别出的故障占总故障样本比
预警提前时间	27.3 小时	平均预测到故障发生的提前时间
误报率	0.038	错误预警次数占总预警次数比例
漏报率	0.051	未能识别的故障占总故障样本比例
系统稳定运行周期	181 天	无故障连续运行时间

从表 1 数据可以看出，该系统在故障诊断方面具有较高准确率，达到了 94.6%，能够有效识别大部分异常状态，且平均预警提前时间为 27.3 小时，满足实际运行中对提前干预的需求。在误报率与漏报率控制方面表现优异，分别为 3.8% 与 5.1%，显著低于同类型传统监控系统的平均水平。系统在连续运行 181 天的周期内未发生数据中断或模型失效

问题，表现出良好的稳定性与实用性。这些结果表明，智能化监控系统在数据识别、异常预测与风险预控方面已具备工程应用条件，可有效支撑水电厂实现高效运行与运维智能化转型。

5 结论

本研究围绕水电厂智能化监控系统的故障诊断与预警机制展开，构建了基于多源数据融合、智能算法驱动与联动响应控制的系统架构，并在实际工程中验证了其有效性与可靠性。系统在故障识别准确性、预警响应时效性和运行稳定性等方面表现出良好性能，展现出广阔的工程应用前景。研究成果可为水电厂智能运维体系建设提供理论依据与技术支持，有助于推动电力行业的数字化与智能化转型。

参考文献

[1] 莫宇. 水电厂自动化控制与智能监控系统融合技术研究[J].能源新观察,2025,(06):92-93.

[2] 毕晓为,袁林. 智能水电厂一体化管控平台关键技术研究[J].仪器仪表用户,2024,31(07):87-88+91.

[3] 陈伏高,万君,孟繁欣.基于智能水电厂架构的丰满水电站计算机监控系统的设计与实现[C]//中国水力发电工程学会自动化专业委员会.中国水力发电工程学会自动化专委会换届大会暨2023年全国水电厂智能化应用学术交流会论文集.南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司;松花江水力发电有限公司丰满大坝重建工程建设局,;2023:27-30.

[4] 马道荣,朱希华.智能巡检技术在小水电计算机监控系统运用的探析[C]//中国水力发电工程学会自动化专业委员会.中国水力发电工程学会自动化专委会2021年年会暨全国水电厂智能化应用学术交流会论文集.南瑞集团有限公司南京南瑞水利水电科技有限公司,;2021:415-417.

[5] 刘佳,陈龙,喻洋洋,等.某水电厂计算机监控系统网络安全防护与智能应用[C]//中国水力发电工程学会自动化专业委员会.中国水力发电工程学会自动化专委会2021年年会暨全国水电厂智能化应用学术交流会论文集.南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,;2021:421-424.