

Research on Intelligent Upgrade and Optimization Strategies for Pumped Storage Power Station Monitoring System

Yingqiang Wu Hao Ai Lei Cheng

Maintenance Branch of State Grid XinYuan Holding Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

With the advancement of energy structure transformation and the construction of new power systems, the monitoring system of pumped storage power stations is facing multiple challenges in terms of real-time performance, reliability, and intelligence level. The traditional architecture is difficult to meet the efficient operation requirements under complex working conditions. To enhance the early fault identification ability and operation and maintenance decision-making efficiency, an intelligent monitoring system based on a hierarchical distributed architecture has been established, integrating an integrated perception network of sky, air, and ground and a digital twin model. Through the edge-cloud collaborative mechanism, it achieves efficient processing and closed-loop analysis of multi-source data. Intelligent algorithms such as variational mode decomposition, gated recurrent units, and improved kernel extreme learning machines are introduced to enhance feature extraction and trend prediction accuracy. Micro-isolation and mimic defense technologies are integrated to ensure the security of the system throughout its life cycle. The results show that this framework significantly improves the sensitivity of state perception and the speed of diagnostic response, promoting the transformation of operation and maintenance forms from regular maintenance to predictive maintenance, and providing an expandable technical approach for the safe and efficient operation of pumped storage systems.

Keywords

Pumped storage power station; Intelligent monitoring system; Digital twin; Fault diagnosis; Predictive maintenance

抽水蓄能电站监控系统智能化升级与优化策略研究

吴英强 艾昊 程磊

国网新源控股有限公司检修分公司, 中国·北京 100000

摘要

伴随能源结构转型跟新型电力系统建设的推进, 抽水蓄能电站监控系统面对实时性、可靠性与智能化水平不足的多重考验, 传统架构比较难满足冗杂工况下的高效运行需求。为加强故障早期识别能力跟运维决策效能, 研究建立了依据分层分布式架构的智能化监控体系, 融合天空地一体化感知网络与数字孪生模型, 凭借边缘-云端协同机制实现多源数据的高效处理与闭环分析; 引入变分模态分解、门控循环单元及精进核极限学习机等智能算法, 强化特征提取跟趋势预测精度, 并融合微隔离跟拟态防御技术保障系统全生命周期安全。结果表明, 该框架显著增进了状态感知的灵敏度与诊断响应速度, 助推运维形式由定期检修向预测性维护转变, 为抽水蓄能系统安全高效运行给出了可扩展的技术途径。

关键词

抽水蓄能电站; 智能化监控系统; 数字孪生; 故障诊断; 预测性维护

1 引言

抽水蓄能电站监控系统在电力调峰与电网稳定中承担核心角色, 现有系统因数据质量低劣、故障预警迟滞及智能化水平不足等问题不容易满足高动态运行环境的需求, 智能化升级变成破解运维瓶颈的重点途径, 系统需具备对振动、温度等多维时序信号的实时感知跟自适应分析能力以捕捉机组早期异常特征, 深度学习与数字孪生技术的融合为状态预测和故障诊断给予了闭环解决方案, 边缘计算跟云平台协同架构支撑了毫秒级响应跟全生命周期管理需求, 智能算法驱动的诊断模型融合 KD-Tree 与 DBSCAN 清洗方针增强了数据可靠性与异常识别精度, 微隔离跟拟态防御机制嵌入监

控体系有效应对等保 2.0 下的网络安全考验, 运维流程借助数字孪生平台实现从被动检修向预测性维护的范式转移, 智能安防跟自适应调度模型共同推进电站向自主决策、无人化运行方向演进。

2 抽水蓄能电站监控系统现状与智能化需求分析

2.1 现有监控系统功能与局限性

现有监控系统普遍存在数据质量欠佳的问题, 监测数据的准确性与可靠性比较难得到充分保障, 系统在故障预警方面表现乏力, 不容易及时捕捉设备异常征兆并启动处理流程, 智能化水平的低下制约了自动化管理跟改良调度的实

现, 数据处理能力面对大规模实时数据流时显得捉襟见肘, 不同厂商设备间的兼容性障碍致使系统集成过程繁复且成本高昂, 网络安全防护薄弱使得系统易受攻击并面对数据泄露风险, 用户界面设计不够直观友好增加了操作人员的学习负担与误操作概率, 高昂的维护成本与专业支持需求持续加重电站的运营负担, 系统架构的扩展性不足不容易适应将来技术演进跟业务增长, 部门间的数据共享壁垒则严重阻碍了信息的顺畅流通与协同工作能力的增强。

2.2 智能化升级的驱动因素

传统监控形式依赖人工巡检, 其固有的滞后性跟高昂成本构成安全运行的潜在隐患, 智能化升级凭借实时状态感知与数据分析可以显著减少故障发生率并保障电站本质安全。行业数字化转型的浪潮助推着电站运行能力的全面加强, 改良后的系统架构与数据处理流程不只强化了管理效能, 更驱动水电行业向高效跟可持续方向演进。大数据与人工智能等新兴技术的深度融合, 为故障诊断跟早期预警给予了前所未有的技术支撑, 数字孪生等技术则延伸了设备全生命周期管理的智能化边界。国家层面对于智慧能源建设的政策带领与支持, 为升级改造创造了有利的宏观环境, 同时智能化运维带来的成本改良与效益增进, 也直接增强了电站在国内外市场的重点竞争实力。

2.3 典型运行场景对智能监控的需求

电站运行场景构成智能监控需求的直接来源, 频繁启停的工况要求系统具备快速准确的状态感知能力, 系统必须实时捕捉机组振动与温度等核心参数的细微变化, 电网负荷的剧烈波动场景则对监控系统的自适应调节能力提出更高要求, 系统需要预测电网需求并自主生成最优调度指令, 设备突发故障的应急处置场景迫切需要监控系统融合多源数据实现智能诊断, 系统应能定位故障根源并推荐隔离跟恢复方案, 上述繁复场景共同指向一个具备深度感知、自主决策与快速响应特征的智能化监控体系。

3 智能化监控系统架构设计

3.1 分层分布式系统架构

分层分布式架构建立抽水蓄能电站智能化监控系统的物理跟逻辑基础, 其设计重点在于融合天空地一体化感知网络跟数字孪生模型, 该架构借助部署于设备边缘的智能传感单元实现多维度数据采集, 这一些实时数据经由高速工业网络汇聚至站控层的数据中心, 数据中心的处理平台整合了机器学习算法与故障树推理机等智能分析模块, 继而对机组状态实行动态评估与趋势预警, 最终在平台层形成支持自适应决策的智能调度模型, 这样的层级化的设计不只保证了系统响应的实时性跟可靠性, 也为后续的设备健康管理及智能巡检等高级应用给出了可扩展的框架支撑。

3.2 数据采集与边缘计算节点布局

数据采集依赖于一个包含电站关键设备的物联网传感

器网络, 该网络自动采集囊括水位、压力、振动及温度在内的十二类核心运行参数, 上述实时数据构成了智能化监控的感知基础, 边缘计算节点的布局方案则着重考虑电站物理结构与数据流特征, 节点被部署在厂房、水道及开关站等重点区域, 它们对原始数据实行本地化预处理跟特征提取, 这一类分布式架构有效过滤了冗余信息并显著减少了向中心系统传输的数据量, 然后在源头实现了毫秒级响应并极大缓解了网络带宽压力, 为上层智能分析模型给予了高质量、低延迟的数据输入。

3.3 云端协同控制机制

云端协同控制机制建立了边缘计算与云计算深度融合的架构, 该架构借助嵌入式系统跟边缘计算网关实现现场数据的实时采集跟初步处理, 这一种边缘侧的计算能力有效分担了云端负荷并增强了系统响应速度, 物联网通信技术将处理后的核心数据传输至云端大数据平台, 云端平台使用机器学习算法对来水量与出力功率实行准确预测, 其预测模型支撑着防洪调度与电力改良调度等重点功能的智能决策, 数字孪生技术在此过程中同步建立电站虚拟模型, 该模型实现了对设备状态的实时监控跟安全应急管理, 依据改良 VMD 跟 GRU 神经网络的振动故障预警方法可以提取早期特征并发出趋势预警, 这一种机制最终达成了智能场景识别、主动防护与自动排障的无人化控制目标。

4 关键智能技术集成路径

4.1 基于深度学习的设备状态预测方法

深度学习技术为抽水蓄能电站设备状态预测给出了强大工具, 其应用途径表现为从原始监测数据到准确预测模型的系统性建立过程, 原始数据一般包含振动、温度、声音等多维时序信号, 此类信号经过变分模态分解或时移多尺度熵等预处理方法可以有效滤除噪声并提取早期微弱故障特征, 随后门控循环单元或精进的长短期记忆网络等模型对特征实行深度挖掘与学习, 这一些模型擅长捕捉设备状态演化的长期依赖关系跟非线性动态, 最终实现对将来运行趋势或潜在故障的准确预警, 整个技术集成途径建立了一个从数据到决策的闭环智能分析框架, 显著加强了状态预测的准确性、稳定性跟工程实用价值。

4.2 多源异构数据融合策略

针对抽水蓄能电站监控系统多源异构数据融合, 需建立分层的融合方略。数据层融合凭借改良 VMD、KD-Tree 与 DBSCAN 等方法, 对振动、状态监测等时序数据实行清洗、去噪与特征提取, 增进原始数据质量。特征层融合则利用时移多尺度熵、PCA 等技术, 从电网运行、设备状态及外部环境(如气象、地理)数据中提取核心特征, 实现跨域信息关联。决策层融合依据 GRU、随机森林等智能算法, 对融合后的高维特征实行故障预警跟诊断, 形成闭环的智能决策支持。多源异构数据融合策略分层实施框架如表 1 所示。

表1 多源异构数据融合策略分层实施框架

融合层级	核心数据源	关键技术方法	主要功能目标	典型应用案例
数据层融合	振动信号、SCADA时序数据、状态监测点	改进VMD去噪、KD-Tree与DBSCAN聚类清洗	数据质量提升、异常值检测、缺失值处理	水电机组振动数据清洗与预处理
特征层融合	电网运行参数、设备状态特征、气象/地理信息	时移多尺度散布熵、主成分分析(PCA)、空间分析(GIS)	关键特征提取、多源特征关联与降维	结合气象数据预测设备运行环境应力
决策层融合	融合后的高维特征向量、历史故障案例库	门控循环单元(GRU)、随机森林、改进核极限学习机	故障早期预警、精准诊断、状态评估与预测	水轮发电机组振动故障预警与智能诊断
应用验证	仿真平台数据、历史运行记录、实时监控流	交叉验证、在线学习、数字孪生仿真	策略有效性验证、模型迭代优化、系统闭环反馈	基于历史数据的融合模型精度测试与优化
系统集成	各层级融合输出、上级监控系统指令	标准化数据接口、微服务架构、知识图谱	策略工程化部署、与现有系统无缝集成、提供决策支持	集成至电站统一智能监控平台

5 系统优化策略与实施保障

5.1 实时性与可靠性的协同优化

监控系统的实时性跟可靠性构成一对周密耦合的重点性能指标，其协同改良需要引入先进的数据处理与智能诊断方法，一种依据KD-Tree与DBSCAN的数据清洗方法可以高效识别异常数据点，其识别正确率可达较高水平且处理耗时极短，这为后续分析给予了高质量的数据基础，同时融合时移多尺度波动散布熵跟改进核极限学习机的故障诊断方法，可以有效克服振动信号中的噪声干扰问题，然后显著增进对水电机组潜在故障的早期识别精度与诊断速度，智能电网技术的深度融合更深一步为系统给出了强大的通信跟计算支撑，助推监控体系向更智能、更高效的方向演进，最终建立一个响应迅速且运行稳定的智能化监控新范式。

5.2 网络安全与数据隐私防护机制

监控系统的智能化升级必然扩大网络攻击面，工控系统暴露的脆弱性可能引发严重后果，某电站曾因PLC漏洞遭受攻击致使电网频率异常波动并造成巨额经济损失，建立符合等保2.0标准的纵深防御体系变成核心举措，借助部署网络微隔离跟拟态防御技术可以有效收缩攻击暴露面并大幅增强系统生存能力，数据隐私防护同样面对严峻考验，水利云平台用户行为数据因匿名化处理不足而遭反向破解的实例突显了差分隐私等技术的必要性，使用区块链等新型可信技术建立数据流转与存证的基础服务网络，融合边缘计算实现敏感数据的本地化处理，可以从数据产生、传输到存储的全生命周期筑牢安全防线，满足实时性要求的时候保证隐私合规。

5.3 运维流程智能化重构

运维流程智能化重构要求监控系统整合自感知跟自学习能力，建立具备自决策与自执行特征的智慧运维管理体系，这样的体系需要融合数字孪生平台与智能安防系统，实现设备集成化跟运检一体化的目标，数字孪生技术凭借建立

机电设备的高保真虚拟模型，可以对设备运行状态实行实时感知与深度分析，进而完成故障的早期预测跟智能诊断，该技术应用大幅增进了设备运维的可靠性，为电站安全运行给出了坚实保障，依据大数据分析的自动化流程改良模型则驱动了运维决策的科学化跟精确化，使得传统依赖于人工经验的定期检修形式转向以数据为驱动的预测性维护形式。

6 结语

抽水蓄能电站监控系统智能化升级实质上重构了传统运行管理的底层逻辑，数据质量缺陷、故障预警滞后、网络安全脆弱与运维形式粗放等现实瓶颈被多维技术协同突破，依据KD-Tree跟DBSCAN的数据清洗方法显著加强原始信号信噪比，时移多尺度波动散布熵与改良核极限学习机组合实现毫秒级异常识别与早期故障定位，门控循环单元跟变分模态分解联合建模强化了振动、温度等时序参数中微弱退化特征的提取能力，数字孪生平台与边缘计算节点深度融合支撑起设备状态实时感知、趋势推演跟闭环决策，微隔离架构跟区块链存证机制共同构筑起包含数据采集、传输、存储、使用的全生命周期安全屏障，云边协同调度模型动态响应电网负荷波动并生成最优启停指令，预测性维护体系替代定期检修大幅减少非计划停机频次，系统整体可靠性、响应速度与自主决策水平跃升至工程实用新高度。

参考文献

- [1] 吴小锋,李刚,马圣恒,等.抽水蓄能电站监控系统国产化改造方案研究[J].中国农村水利水电,2022(6):182-187.
- [2] 李常钊,王秀毓,陶智宇,等.基于5G技术的电站智能巡检技术及故障诊断应用[J].水力发电学报,2024,43(9):70-81.
- [3] 王建辉,彭武平,谭天龙,等.抽水蓄能施工作业安全风险智能管控系统设计[J].管理科学与工程,2024,14(1):30-39.
- [4] 孟祥越,李胜强,胡圣,等.多能互补视角下抽水蓄能电站影响因素研究——以辽宁清原抽水蓄能电站为例[J].北京大学学报(自然科学版),2024,60(5):917-926.