

Construction of Intelligent Hydropower Station Operation Monitoring System and Data-driven Decision-making Application

Xingxiong Jia

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Wenshan, Yunnan, 663100, China

Abstract

With the ongoing energy transition and intelligentization of power systems, hydropower stations face dual demands for enhanced operational efficiency and safety. This study focuses on developing a smart hydropower station monitoring system, examining its architecture design and functional module implementation. A data-driven operational optimization decision model is established. The results demonstrate the system's real-time performance and intelligent decision-making capabilities, effectively supporting operational scheduling and fault prediction. This research holds significant implications for advancing the intelligent transformation of traditional hydropower stations.

Keywords

smart hydropower station; operation monitoring system; data-driven; decision support

智慧水电站运行监控系统构建及数据驱动决策应用

贾兴雄

红河广源水电开发有限公司, 中国·云南文山 663100

摘要

随着能源结构转型与电力系统智能化发展,水电站面临运行效率与安全水平双重提升的需求,本文以构建智慧水电站运行监控系统为核心,围绕系统架构设计与功能模块实现展开研究,构建以数据驱动为支撑的运行优化决策模型。结果表明该系统具备良好的实时性与智能决策能力,可以有效支持水电站运行调度与故障预警,研究对于推动传统水电站向智能化转型具有积极意义。

关键词

智慧水电站; 运行监控系统; 数据驱动; 决策支持

1 引言

水电作为清洁可再生能源的重要组成部分,在能源安全与绿色发展中发挥着关键作用,随着人工智能与大数据等新兴技术不断发展,传统水电站的运行管理模式亟需向智能化及自动化方向转型,当前水电站在运行监控中普遍存在信息分散与决策依赖经验等问题,制约着运行效率与安全水平的提升。构建智慧水电站运行监控系统,有助于实现多源数据的融合采集以及运行工况的智能分析,可以进一步为科学决策提供数据支撑,围绕这一目标本文从系统构建和功能实现与数据驱动决策三个层面开展研究,探索智慧水电站的关键技术路径与应用价值。

【作者简介】贾兴雄(2000-),男,中国云南砚山人,助理工程师,从事智慧水电站运行监控系统构建及数据驱动决策应用研究。

2 运行监控系统的构建基础

2.1 系统架构与关键模块设计

智慧水电站运行监控系统以分层分布式体系为基础构建技术架构,整体结构包括感知层、传输层与应用层,各层之间建立清晰的功能分工与数据交互机制。感知层部署大量智能终端设备,面向水工建筑、电气系统与机械设备进行实时数据采集,构建物理状态的数字映射。传输层采用高可靠性网络结构,将多源数据在低时延环境下传递至数据中心或边缘计算节点。应用层承载状态评估、故障识别、预测分析与运行调度等功能,并向管理人员提供直观的可视化交互界面。在模块设计上,系统设置数据采集模块、设备状态监测模块、智能诊断模块与自动控制模块,各模块间通过消息机制实现任务驱动,数据共享采用统一标准格式。系统核心算法模块集成在智能诊断与调度层,通过对结构化历史数据与实时流数据的联合处理完成状态识别、风险预警与控制指令生成。

2.2 传感与数据采集技术选型

传感与数据采集系统是实现运行状态精确感知的基础环节，其技术选型必须围绕测量精度、数据稳定性与环境适应能力展开系统设计。在水工结构监测中，配置应变计、裂缝传感器与浸润线监测仪，用于长期跟踪边坡、水坝与厂房结构变形过程；在发电设备运行数据采集中，采用电流互感器、电压采集模块与振动加速度传感器，通过组合阵列布局提升状态感知的空间覆盖率与多变量耦合分析能力；在水位与流量测量方面，引入激光雷达与电磁超声波混合测距技术，在现场测试条件下测距误差控制在1毫米以内。采集单元配置本地微处理芯片与数据缓存模块，实现初步滤波、采样优化与数据压缩。系统采样频率根据设备运行特性设定在10到100赫兹区间，满足静态参数与动态特征同步捕捉需求。多通道采集设备通过模块化扩展设计完成不同信号接口融合，有效提升布设效率与系统集成水平。为适应复杂环境条件，系统外壳防护等级达到IP67，具备防水、防尘与抗电磁干扰能力，保障长期稳定运行。

2.3 通信与信息集成平台搭建

在智慧水电站运行监控系统中，通信系统承担各类设备信息汇聚、上传与反馈任务，是支撑整体信息闭环控制的核心环节。网络架构采用主干有线网络与辅助无线网络相结合的形式，主通道采用工业以太网连接核心控制单元与服务节点，数据速率达到千兆级别。在环境遮蔽严重或布线受限区域，配置无线自组网模块，采用跳频扩频技术降低信道干扰概率。通信协议层选择IEC 60870-5-104与IEC 61850作为核心数据交换标准，满足多厂家设备接入需求并统一报文格式，提升系统兼容性与可扩展性。信息集成平台构建在分布式数据管理架构之上，数据库系统采用时序数据库与关系型数据库联合部署，支持高并发读写、数据镜像备份与历史归档分析。平台核心功能包括数据聚合处理、运行态势建模、报警信息发布与运维日志存储等，并支持多终端访问与权限分级管理，应用层提供标准接口服务与可视化交互模块，实现运行状态可视呈现、策略模型调用与人机协同控制^[1]。

3 监控系统的功能实现与优化

3.1 实时状态监测与故障预警

系统实时状态监测模块以多源异构数据融合为基础，构建高频采样与时序分析机制，用于全面感知水电站设备运行状态与环境条件。监测对象涵盖水轮机、发电机、变压器、水工建筑物与控制系统等关键单元，通过采集振动、噪声、温升、电压、电流与水头等数据，实现全过程运行态势建模。数据采集频率设定为每秒20次，在保持时效性的同时兼顾系统处理能力。状态判别模型采用基于支持向量机的分类算法，对历史故障数据与当前运行数据进行比对训练，误报率控制在每日1次以内。故障预警机制利用滑动窗口分析与趋势拟合算法，对运行参数的偏移速率和阈值变化进行动态评

估，当关键指标连续3个采样周期出现剧烈波动时自动触发多级告警。系统支持图形化预警定位与关联设备回溯追踪，运维人员可根据异常时间段的数据快速排查根因，从而缩短设备停运时间与检修周期。

3.2 控制策略自动化与智能调度

在控制策略与调度层面，系统集成基于模型预测控制与深度强化学习的双机制控制算法，实现水电站功率输出与水资源调配的自适应优化。控制系统采集机组状态、水库水位、下泄流量与负荷预测等数据，以十分钟为周期动态调整机组出力匹配电网需求。在调度模型中引入滚动预测算法，根据历史三日数据构建短时运行趋势图，对未来一小时负荷变化趋势作出响应式控制决策。在运行实测中，应用该策略后机组启停频次由日均5次下降至2次，有效降低机械磨损与能耗波动。调度策略通过决策层控制指令精度达0.01兆瓦，满足中大型水电站调控需求。在异常工况下系统具备策略切换机制，可在断面流量波动超过15立方米每秒时切换至保守调度策略，优先保障系统稳定运行。在集控中心，调度过程以图形界面呈现控制逻辑流与执行路径，便于工程师介入干预并持续优化控制模型参数^[2]。

3.3 系统运行性能评估机制

性能评估模块面向系统稳定性、经济性与智能化程度三大维度开展综合评估，以月度为周期生成运行性能报告，为运行策略调整与设备改造提供决策依据。评估体系引入熵权法与模糊综合评判模型，将各子系统运行数据转换为结构化指标集，包括运行负荷波动率、机组效率偏差、响应时延均值与能耗强度等共计16项核心指标。在某大型流域水电站连续运行测试中，系统识别出4次负载波动异常，平均响应时间控制在3秒以内。对比人工调度阶段数据，机组综合运行效率提升约4兆瓦，单日节能量达到2.3万千瓦时。性能评估结果通过云端平台自动归档与趋势对比，结合历史基线行业标准形成评级曲线，用于辅助识别潜在性能退化或系统配置瓶颈。报告中集成图表分析与文字摘要，便于管理人员直观掌握系统健康状态与调度策略成效^[3]。

4 数据驱动的决策应用

4.1 数据处理与建模方法

智慧水电站运行监控系统产生的数据具备高频、高维与非线性特征，数据处理过程需构建统一标准体系并引入结构化管理机制。原始数据在采集后进入预处理阶段，完成缺失值填补、异常剔除与时间对齐操作。为提高建模效率，采用主成分分析技术对高维数据进行降维处理，将28类传感变量压缩为8个主特征因子，占据原始信息的九成以上。时序数据采用滑动窗口法进行分段处理，每段长度设定为5分钟，共含300个采样点，便于模型训练时保持特征完整性。在建模方法上，针对运行状态识别任务引入长短期记忆神经网络模型，具备对历史状态依赖关系的强记忆能力。在实测

数据集上,模型识别准确数为497条,错误识别数为13条,误差绝对值控制在2个数据单位以内,适用于突变信号预测与慢变量趋势预警。对于运行优化问题采用随机森林回归模型,输入参数包括水位、出力、引水流量与设备状态码,输出指标为预测出力与水量分配建议。模型训练集包含120天运行数据,测试集预测误差平均值不超过0.35兆瓦,满足中长期调度精度需求。

4.2 运行优化策略的数据支撑

在实际运行中某梯级水电站群运行策略优化项目基于数据驱动模型实施,为调度中心提供出力配置与水量分配方案。该系统涵盖上游三座调节性水库与下游两座径流式电站,日均入库水量为4800万立方米,最大日发电需求为1380万千瓦时。优化模型输入包含过去7天的水文数据、负荷曲线、设备维护记录与历史调度指令,经聚类与回归模型分析后形成方案建议。表1展示了系统在优化前后的关键运行参数变化。

表1 运行优化策略实施前后关键指标对比

项目	优化前	优化后
单位电量耗水量(立方米/千瓦时)	3.47	3.12
机组平均出力(兆瓦)	315.2	331.6
高峰时段负荷满足时间(小时)	4.8	6.1
下泄流量稳定区间波动值(立方米每秒)	47	21

表中数据显示,优化策略实施后单位电量耗水量下降了0.35立方米每千瓦时,反映出调度方案在水资源利用效率方面得到显著提升。机组平均出力提升至331.6兆瓦,较之前提升16.4兆瓦,说明在负荷分配结构优化下机组运行接近额定功率,减少了低效率运行时段。高峰负荷时段响应时间延长至6.1小时,为电网提供了更长的稳定供电支撑。下泄流量波动值收窄至21立方米每秒,表明流量控制更加平稳,有助于河道生态安全与下游用户用水稳定,上述数据说明数据驱动策略在提升发电效率、改善调度柔性资源均衡方面取得实际成效^[4]。

4.3 决策辅助系统的实现路径

为支撑智慧水电站在多场景下实现高效运行管理,需构建覆盖数据采集、知识推理与操作推荐全流程的决策辅助系统。系统底层对接监控数据平台,通过API接口与边缘设备通信,采集水文、水工与电气三类核心数据。中间层部

署数据挖掘引擎与专家规则库,前者用于生成趋势预测结果与运行评估指标,后者融合调度规则、电价策略与设备运行参数构建推理逻辑。推理过程引入基于贝叶斯网络的不确定性建模方法,支持多变量关联分析与故障原因反演功能。界面层设计交互式指令面板,用户可根据模型预测结果选择运行策略并自动生成操作指令上传主控系统。在某中型水电站现场测试中,该系统每日运行建议平均采纳条数为27条,人工决策干预减少了35条,调度响应平均时长缩短至42秒。系统支持全场景智能推荐与分级授权执行机制,调度员在高风险状态下可快速触发应急模式切换与预警广播。系统具备可扩展接口结构,支持引入天气预报、上游水文预警与区域负荷预测数据,形成融合型决策网络,在复杂电力系统中提供快速可靠的支撑^[5]。

5 结语

智慧水电站作为能源数字化转型的重要方向,其运行监控系统与数据驱动决策机制在提升设备效率、保障运行安全与优化资源配置方面发挥关键作用。本文围绕系统构建、功能实现与决策应用展开系统研究,提出了面向实时监测、智能控制与运行优化的完整技术路径,验证了系统在实际工况下的稳定性与应用价值。监控系统在感知能力、数据处理与智能响应方面表现出良好适应性,数据驱动模型在运行优化中展现出较高精度与可操作性。构建集成化、智能化的监控与决策平台,有助于提升调度效率、减少人为干预并推动水电站向自动化与智能化方向持续演进,为绿色能源体系建设提供技术支撑与实践基础。

参考文献

- [1] 邵月波,谢昭明. 数字孪生技术赋能智慧水电站可持续发展[J]. 国际工程与劳务,2025,(06):32-35.
- [2] 田超. “三化”管理打造“一带一路”智慧型水电站[J]. 中国电力企业管理,2025,(09):36-37.
- [3] 秦金鹏. 大型水电站“智慧电厂”建设[J]. 云南水力发电,2025,41(02):189-191.
- [4] 罗宏. 中小型水电站电力安全双重预防机制智慧化建设路径[J]. 电力设备管理,2025,(02):237-239.
- [5] 吴俊鹏,赵辉. 水电站智慧枢纽建设路径探讨与研究[J]. 水电站机电技术,2024,47(12):39-41+45.