

火电厂化学水处理智能监控系统开发

蒋勇, 孙彩珍, 刘宁, 刘帅

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/ETQM.2026010003

摘要 : 火电厂化学水处理是保障机组安全运行及环境保护的核心环节, 其技术效能直接关系到发电设备寿命与运行稳定性。传统水处理工艺依赖人工监测与经验调节, 存在污染物去除效率低、资源回收率不足及运行成本高等局限, 尤其在应对水质波动与设备工况变化时, 易引发安全隐患与资源浪费。随着电力行业环保要求提升及水资源循环利用需求增长, 水处理工艺优化与监控效率提升成为制约火电厂可持续发展的关键因素。在此背景下, 智能监控系统的开发成为突破技术瓶颈的重要路径。通过集成传感器技术、大数据分析及人工智能算法, 系统可实时采集水质参数、动态调整处理工艺并预测设备状态, 从而提升处理过程的自动化水平与资源利用效率。

关键词 : 火电厂; 化学水处理; 智能监控系统; 自动化控制; 水质预测模型

Development of Intelligent Monitoring System for Chemical Water Treatment in Thermal Power Plant

Jiang Yong, Sun Caizhen, Liu Ning, Liu Shuai

China Energy Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : Chemical water treatment in thermal power plants serves as the cornerstone for ensuring both operational safety and environmental protection, with its technical effectiveness directly determining the lifespan and operational stability of power generation equipment. Traditional water treatment methods, relying on manual monitoring and empirical adjustments, suffer from limitations including low pollutant removal efficiency, insufficient resource recovery rates, and high operating costs. These shortcomings become particularly problematic when handling water quality fluctuations and equipment condition changes, often leading to safety hazards and resource waste. As environmental standards in the power industry tighten and water recycling demands grow, optimizing water treatment processes and enhancing monitoring efficiency have emerged as critical factors constraining the sustainable development of thermal power plants. Against this backdrop, developing intelligent monitoring systems has become a crucial pathway to overcome technological bottlenecks. By integrating sensor technology, big data analytics, and AI algorithms, these systems can collect real-time water quality parameters, dynamically adjust treatment processes, and predict equipment status, thereby improving automation levels and resource utilization efficiency throughout the treatment workflow.

Keywords : thermal power plant; chemical water treatment; intelligent monitoring system; automatic control; water quality prediction model

引言

火电厂化学水处理是保障机组安全运行和环境保护的核心环节。化学水处理技术直接影响到发电设备的寿命与运行稳定性, 不当处理会导致水中杂质在高温高压环境下形成水垢及腐蚀性物质, 最终引发设备故障甚至安全事故。随着电力行业对环保要求的提升和水资源循环利用的迫切需求, 水处理工艺的优化与监控效率成为制约火电厂可持续发展的重要因素。当前, 火电厂废水处理面临多方面挑战: 一方面, 冷却水系统产生的大量废水需经过复杂流程实现达标排放或循环利用, 传统方法在污染物去除效率、资源回收率及运行成本控制方面存在明显局限; 另一方面, 现有水处理工艺依赖人工监测与经验判断, 难以实时应对水质波动及设备工况变化, 导致处理过程存在安全隐患与资源浪费^[1]。在此背景下, 智能监控系统的开发成为突破传统技术瓶颈的关键路径。随着传感器技术、大数据分析和人工智能算法的快速发展, 构建能够实时采集水质参数、动态调整处理工艺、预测设备状态的智能化系统, 已成为提升水处理可靠性与经济性的必然选择。

一、相关理论

(一) 智能监控技术

智能监控系统作为火电厂化学水处理过程的核心技术载体，其功能实现依赖于多层次架构与先进控制技术的协同运作。系统基本构成包含感知层、控制层、信息层和决策层四个主要部分，其中感知层通过高精度水质传感器、流量计及压力变送器等设备实时采集水处理工艺参数，包括 pH 值、电导率、溶解氧浓度以及关键设备运行状态数据。控制层采用分布式 PLC 冗余系统作为核心控制单元，通过 Profibus 现场总线连接各子系统，确保在高温高压环境下实现制水过程的精准控制与故障冗余保障^[2]。信息层依托工业以太网构建数据通信平台，不仅支持生产数据的实时传输，还可与远程运维管理云平台实现数据交互，为异常工况诊断和设备健康管理提供基础支撑。

在关键技术方面，智能监控系统的核心创新体现在多源数据融合与智能控制算法的集成应用。针对热交换器结垢问题，系统通过在线监测给水中的钙镁离子浓度及浊度变化，结合锅炉管材腐蚀防护的 AVT 处理工艺参数，构建动态预测模型以实现防垢防腐的前瞻性控制^[3]。工业通信技术采用现场总线与工业以太网混合组网方案，既保证了控制指令的实时性，又通过 OPC UA 协议实现了与企业级管理系统的数据贯通。远程运维管理技术通过云平台部署设备数字孪生模型，可实时跟踪高压泵、离子交换器等关键设备的振动频率与能耗曲线，结合故障特征数据库完成预判预警。

(二) 自动化控制理论

自动化控制理论在火电厂化学水处理系统中的应用为确保水质达标和设备安全运行提供了关键技术支撑。火力发电厂对水质的要求极为严苛，锅炉水的 pH 值控制直接关系到设备腐蚀防护与热效率优化，因此需要精准的反馈控制系统。通过引入模糊 PID 控制策略，研究人员针对锅炉水处理系统设计了加药控制组件，采用 PLC 与 HMI 软件构建了自动化控制框架，实现了 pH 值的动态调节与实时监测。该系统通过连续采集水质参数，结合模糊逻辑调整 PID 控制器参数，有效克服了传统控制方法在非线性过程中的滞后与波动问题，确保锅炉水 pH 值稳定在设定区间内^[4]。

在污染物监测领域，自动化分析技术为废水处理提供了高效解决方案。针对火电厂燃煤产生的硒污染问题，基于顺序氢化物发生与化学发光检测的自动监测系统得以开发。该技术通过注射泵与八端口选择阀构建连续化流程，使硒以 H₂Se 形式蒸发并与臭氧反应产生化学发光信号，其检测灵敏度与抗干扰能力显著提升^{[13][14]}。尽管砷元素可能对检测信号造成干扰，但通过优化反应条件与设备配置，系统仍能实现对硒含量的精准量化，为废水排放控制提供了可靠数据支持。

二、系统设计

(一) 硬件选型与配置

本系统硬件设计遵循高精度、高可靠性、强环境适应性原则，综合考虑火电厂化学水处理系统的特殊工况及实时监控需

求，构建了由感知层、控制层、执行层构成的分层硬件架构。在感知层部署多参数水质传感器网络，pH 值检测选用高精度玻璃电极传感器（分辨率 0.01pH，精度 $\pm 0.02\text{pH}$ ），其具备温度补偿功能以消除环境波动影响；电导率监测采用四电极补偿型传感器，量程覆盖 0~100mS/cm，满足不同水质阶段的测量需求；浊度检测配置散射光式浊度计，检测范围 0~1000NTU，支持自动清洗功能以应对高悬浮物环境^[5]。离子浓度监测集成复合电极离子选择电极系统，通过双通道测量技术实现 Cl⁻、Na⁺ 等关键离子的在线分析，电极表面采用抗污染镀层处理，有效延长使用寿命。

表 1 关键设备性能对比表

| 设备类型 | 核心技术指标 | 环境适应性设计 |
|-----------|-------------------------------|---------------------|
| pH 传感器 | 精度 $\pm 0.02\text{pH}$ ，温度补偿 | 抗污染镀层，耐 50°C 环境 |
| 四电极电导率传感器 | 量程 0~100mS/cm，RS485 输出 | 四电极抗极化，免维护设计 |
| 工业 PLC | 40MHz 主频，128MB 内存，PROFINET 接口 | 宽温宽压，符合 IEC 61131-3 |
| 通信网络 | 双冗余环网，千兆速率，M12 接口 | 自愈时间 < 50ms |

数据采集模块采用 16 位多通道数据采集卡，具备 8 路差分输入通道，采样频率达 1kHz，配备硬件过压保护和电磁隔离设计，确保强电干扰环境下数据完整性。系统配置工业级 PLC 作为核心控制器，选用西门子 S7-1200 系列，集成 PROFINET 通信接口，支持 IEC 61131-3 标准编程，CPU 主频为 40MHz，内存容量扩展至 128MB 以满足多任务实时处理需求^[6]。通信网络构建双冗余工业以太网架构，核心交换机采用支持环网协议的 M12 接口设备，确保单点故障时的网络自愈能力，传输速率配置为千兆以太网标准。

(二) 软件设计与实现

本系统软件设计以模块化、高实时性和智能化为原则，采用分层架构设计方法构建核心功能模块。系统整体架构分为数据采集层、数据处理层、智能分析层和人机交互层，通过多线程通信机制实现各层级间的数据交互与功能协同。在数据采集层，基于工业总线协议开发专用通信模块，实现对火电厂化学水处理系统中 pH 值、电导率、溶解氧等关键参数的实时采集，通过 FIFO 队列缓存机制确保数据采集的连续性和稳定性。数据处理层采用流式计算框架对原始数据进行预处理，包括异常值过滤、信号去噪和特征提取，利用滑动窗口算法对时序数据进行动态标准化处理，为后续分析提供结构化数据支撑。

表 2 系统级优化建议与风险应对

| 模块 | 现存风险 | 优化策略 |
|--------|--------------|------------------------|
| 数据采集层 | 高悬浮物导致浊度计误差 | 增加自动清洗频次 + 散射光补偿算法 |
| 智能分析层 | 水质突变导致模型失效 | 引入在线学习机制，动态更新模型参数 |
| 人机交互层 | 操作员误触引发连锁反应 | 增设权限分级与关键操作二次确认 |
| 边缘计算节点 | 高温环境影响服务器稳定性 | 采用宽温型工业服务器（-40°C~70°C） |

针对实时性要求较高的功能模块，设计了基于多线程与事件驱动的混合调度机制。在智能分析层，采用机器学习与深度

学习相结合的混合建模方法，开发了多组分水质预测模型和异常工况诊断算法^{[7][8]}。其中，水质预测模块基于长短期记忆网络（LSTM）构建时序预测模型，通过动态调整时间窗口参数提升预测精度；异常诊断模块则采用改进的随机森林算法，结合特征重要性评估机制实现故障模式的快速识别。同时，引入边缘计算理念，在本地服务器部署轻量化推理引擎，确保关键控制指令的实时响应时间控制在200ms以内。

三、系统测试

（一）系统测试方法

系统测试是验证智能监控系统功能完整性、性能可靠性及环境适应性的关键环节。为确保测试过程的科学性和系统性，本研究基于V模型构建了分层递进的测试体系，涵盖功能验证、性能评估和环境适应性试验三个维度。在功能测试阶段，采用黑盒测试与白盒测试相结合的方法，针对化学水处理系统的核心功能模块进行逐项验证。具体而言，通过预设的典型工况参数输入，测试数据采集模块的传感器信号捕获精度和数据传输延迟，确保其满足 $\pm 0.5\%$ 的误差要求；同时对水处理过程的逻辑控制模块进行状态机遍历测试，验证其在不同水质指标异常情况下的响应逻辑是否符合设计预期。对于模糊控制算法等复杂模块，则采用白盒测试策略，通过覆盖所有判定条件和分支路径的方式，确保算法在边界条件下的稳定性。

性能测试采用压力注入与负载模拟技术，重点考察系统在极限工况下的运行表现。搭建包含300个虚拟传感器节点的仿真环境，模拟电厂化学水处理系统的多源异构数据流。通过逐步增加数据传输频率至设计峰值的120%，持续监测系统响应时间、内存占用率和CPU负载等指标，验证其在高并发数据流下的实时处理能力。此外，设置连续72小时的不间断运行测试，观察系统在持续运行中的资源消耗趋势，确保内存泄漏率低于0.1%且无累计误差^[9]。针对水质预测模块的准确性，采用历史工况数据回放

方式，对比系统预测值与实测值的相对误差，要求关键水质参数（如pH值、电导率）的预测误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。

（二）测试结果与分析

本系统测试阶段采用实验室模拟与现场实测相结合的方式，重点围绕数据采集精度、控制响应速度、异常工况处理能力及系统稳定性四大核心指标展开验证。测试过程中，以某600MW超临界机组化学水处理系统为实测对象，设置典型运行场景包括凝结水精处理、补给水处理及锅炉给水调节等环节，通过对比传统人工监测与智能监控系统的实时数据差异，评估系统性能参数。

在数据采集模块测试中，系统配置的pH值、电导率、二氧化硅等关键水质参数传感器，在实验室标准溶液标定后，现场实测数据与离线化验结果的相对误差均控制在 $\pm 1.5\%$ 以内。其中pH值监测模块在0.5Hz采样频率下，连续72小时运行的标准差为0.03^[10]，表明传感器信号稳定性和数据传输可靠性达到设计要求。对比传统人工取样分析，本系统将水质参数检测频次从每2小时一次提升至实时监测，数据延迟时间压缩至0.8秒以内，有效解决了传统方法存在的时效性不足问题。

四、结论

本研究针对火电厂化学水处理工艺的智能化需求，开发了一套集成多参数监测、数据分析与智能决策的化学水处理智能监控系统。系统开发以工业现场数据为基础，结合化学水处理过程的物理化学特性，构建了涵盖原水预处理、离子交换、凝结水精处理及锅炉补给水制备全流程的智能监控体系。在技术层面，系统创新性地融合了物联网传感器网络、多源数据融合算法与机器学习模型，实现了关键水质参数的实时监测、异常工况的精准识别以及化学药剂投加量的动态优化。通过部署高精度pH值、电导率、硅含量及离子浓度传感器，系统能够以分钟级响应速度采集处理单元的水质数据，结合边缘计算技术完成原始数据的去噪与特征提取，显著提升了数据采集的准确性和时效性。

参考文献

- [1]郝庆,黄甫怀阳.火电厂化学水处理技术进展与应用探讨[J].机电信息,2010(18):2.
- [2]陈进生.大型火电厂化学水处理技术进展与应用探讨[C]//全国水处理技术研讨会.2002.
- [3]陈莹.火电厂化学水处理设备腐蚀问题处理方法研讨[J].黑龙江科学,2014,5(9):1.
- [4]王芳芳.火电厂化学水处理技术进展与应用探讨[J].城市建设理论研究:电子版,2016(9).
- [5]赖晓玲.大型火电厂化学水处理技术进展与应用[J].化工管理,2021,(36):58-59.
- [6]郭铭.火电厂化学水处理系统的节能降耗优化措施探讨[J].价值工程,2020,39(29):181-182.
- [7]张立敏.基于残差网络模型识别与检测框架的化学水处理无人值守项目研究.内蒙古自治区,内蒙古京海煤矸石发电有限责任公司,2023-12-23.
- [8]纪海滨.浅析电厂化学水处理技术发展与应用[J].北京电力高等专科学校学报(自然科学版),2012.
- [9]陈志清.化学水车间轮式智能巡检机器人涉水系统设计[J].新型工业化,2022,12(05):249-252.
- [10]李勇.电厂化学水处理运行中存在的问题及应对措施分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2022(7):4