

循环水处理智能监测系统的研究及应用

丁志钢¹ 段奥然²

1. 珠海深能洪湾电力有限公司 广东 珠海 519030

2. 安柯舜驰(广东)工业技术有限公司 广东 东莞 523106

摘要: 海水倒灌引起的循环冷却水系统腐蚀、结垢和微生物控制难题,传统的人工定期监测与经验加药模式已难以实现精准控制与成本优化。本文研究并应用了一套集成了多参数传感器、物联网传输、大数据分析及人工智能算法的循环水处理智能监测系统。该系统通过以pH值、电导率等关键指标为核心,结合LoRa/NB-IoT无线传输技术,构建边缘计算与云端协同的数据处理模型,可精准预测结垢、腐蚀及微生物滋生风险,提升水资源利用率并降低设备维护成本构建了水质状态-药剂效能-系统风险的动态映射模型,实现了从“被动响应”到“主动预警”与“智能决策”的转变。实践表明,该系统在苛刻水质条件下,能将碳钢腐蚀速率稳定控制在0.075mm/a以下,阻垢效率提升至95%以上,并实现药剂投加量优化10%-15%,为高氯、高碱度、高硬度环境下工业循环水系统的安全、高效与绿色运行提供了有效的技术解决方案。

关键词: 循环水处理;智能监测系统;腐蚀在线监测;预测性维护

引言: 循环水系统作为工业生产与石油、化工、电力、制药等行业的关键环境调控的核心环节,其运行状态直接关系到企业的生产安全和能源效率,水质稳定性直接影响设备寿命与运行效率。传统监测方式依赖人工取样与定期检测,存在数据滞后、误差大、调控不及时等弊端,难以满足高负荷工况下的动态管理需求。随着物联网、大数据及人工智能技术的突破,智能监测系统通过实时感知、精准分析与自动调控,为循环水处理提供了高效解决方案,成为推动行业绿色转型的关键技术支撑。

1 循环水处理智能监测系统理论基础

1.1 循环水处理工艺分析

(1) 循环水系统核心由冷却塔、管道、水质参数构成。冷却塔通过蒸发/传导降温,其填料清洁度、风机效率影响冷却效果;管道需防控腐蚀/结垢,避免堵塞;水质参数需实时稳定,保障系统效能。(2) 关键水质指标含pH值(7.5-9.0弱碱性,过酸加剧腐蚀、过碱易结垢)、电导率(反映离子浓度,过高增腐蚀/结垢风险)、浊度(体现悬浮物,超标致换热器堵塞、微生物滋生)、余氯(0.2-0.5mg/L,抑微生物且防过量腐蚀)。

1.2 智能监测技术原理

(1) 传感器技术以多参数集成传感器、无线传输为核心。前者同步采集pH值、电导率等指标,减少设备量、提效;后者用LoRa、NB-IoT等低功耗广域网技术,实现数据远距低延迟传输,适配复杂工业环境。(2) 物联网架构分数据采集、传输、云端处理三层:采集层靠

传感器获实时水质数据;传输层借无线通信传数据至云端,保障稳定;云端层存数据、做清洗与初步分析,为深度处理打基础。(3) 大数据分析与机器学习算法起关键作用:前者挖掘海量历史/实时数据,找水质变化规律;后者建异常检测模型实时识水质异常,同时构预测模型提前预判水质趋势,为水处理提供精准决策支持^[1]。

2 循环水处理智能监测系统设计与实现

2.1 系统总体架构

(1) 分层设计采用“感知层-网络层-平台层-应用层”四级架构,实现数据全流程闭环管理。感知层部署多参数水质传感器、流量传感器及温度传感器,负责采集原始水质与运行数据,是系统数据入口;网络层以LoRa网关、NB-IoT基站为核心,构建低功耗、广覆盖的数据传输通道,保障数据从感知层到平台层的稳定传输;平台层搭载云服务器与数据库系统,承担数据存储、清洗、建模分析功能,为上层应用提供数据支撑;应用层面向不同用户需求,开发监测预警、设备管理、报表生成等功能模块,实现系统价值落地。(2) 硬件选型优先考虑工业级设备以适应复杂环境:传感器选用RS485接口的多参数水质传感器,测量精度达±0.02pH、±1%电导率,支持-20~80℃工作温度;网关选用工业级LoRa/NB-IoT双模网关,传输距离最远可达5km,具备防电磁干扰能力;控制器采用ARM Cortex-M4内核的嵌入式主板,满足边缘计算轻量级数据处理需求。软件平台开发基于B/S架构,后端采用Spring Boot框架搭建,支持高并发数据处理;前端使用Vue.js开发,结合ECharts可视化

库实现数据动态展示；数据库采用MySQL+Redis组合，MySQL存储历史数据，Redis缓存实时数据，提升数据访问效率^[2]。

2.2 关键模块设计

(1) 系统参数必须以电导率和在线腐蚀速率为核心，构建一个能够感知变化、识别模式、并执行动态调整的闭环控制系统。(2) 多参数水质监测模块还需重点关注传感器布局与校准。将实时传感器数据与实验室周期性分析数据（如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度）、设备运行数据（流量、温度）进行融合。提取如“ Cl^- /缓蚀剂浓度比”、“瞬时腐蚀速率变化梯度”等关键特征，作为AI模型的输入。(3) 基于数字孪生的系统仿真与优化通过模拟不同水质条件、不同药剂方案下的系统响应，在虚拟空间中进行“沙盘推演”，从而找到最优的控制策略，再指导实体系统的运行，降低现场试错成本。(4) 传感器布局遵循“关键点位全覆盖”原则：在冷却塔进水口、出水口、管道拐弯处各部署1组传感器，确保监测数据全面反映系统水质；(5) 校准采用“定期手动校准+自动在线校准”结合模式，每月进行1次手动校准，通过标准溶液调整传感器测量偏差；同时在平台层开发自动校准算法，根据历史数据偏差规律，每24小时自动修正传感器测量值，保障数据准确性。(6) 数据传输模块基于LoRa/NB-IoT通信协议设计。LoRa协议用于厂区内短距离数据传输，采用星型网络拓扑，单网关可连接200+传感器，传输速率设为0.3~50kbps，适配低频次水质数据传输需求；NB-IoT协议用于跨厂区或远程数据传输，依托运营商基站实现广域覆盖，传输速率设为160~250kbps，支持实时报警信息优先传输。协议层添加数据加密机制，采用AES-128加密算法对传输数据进行加密，防止数据泄露或篡改^[3]。(7) 智能分析模块聚焦算法选型与模型训练。算法选型结合应用场景：异常检测选用孤立森林算法，对水质数据异常值识别准确率达95%以上；预测模型采用LSTM神经网络，基于过去30天的水质数据，预测未来24小时pH值、电导率等指标变化趋势，预测误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。模型训练以历史水质数据为样本，通过Python的TensorFlow框架构建训练集与测试集，训练集占比70%用于模型参数优化，测试集占比30%验证模型性能，迭代优化500轮后确定最优模型参数。

2.3 系统集成与优化

(1) 边缘计算与云端协同处理靠“边缘预处理+云端深度分析”实现。边缘端（嵌入式控制器）对原始数据滤波、初别异常值，减少40%无效数据传输；云端接收预处理数据后深度分析（如水质趋势预测、设备故障诊

断），再反馈结果至边缘端，指导现场设备实时调参，形成双向协同。(2) 用户界面设计重实用性与易用性。可视化看板分区域：左侧以仪表盘/数字展实时水质指标，中间展水质变化曲线（支持7天、30天回溯），右侧显设备状态与报警（异常红色高亮）；移动端APP含iOS、Android版，支持实时看数据、收报警、远程控设备，界面简洁，操作 ≤ 3 步，适配现场移动办公^[4]。

3 循环水处理智能监测系统应用与验证

3.1 应用场景分析

工业冷却水系统广泛应用于电力、化工、钢铁行业。在电力行业，火电厂冷却塔循环水需精准控制水质，避免换热器结垢影响发电效率，系统可实时监测浊度、电导率，PH提前预警结垢风险；化工行业循环水常含腐蚀性介质，系统通过pH值、余氯实时监测，防止管道腐蚀导致的介质泄漏；钢铁行业循环水用量大、水质波动频繁，系统可动态调整水处理药剂投放量，适配高负荷生产下的水质变化需求。

3.2 实验与案例分析

(1) 实验设计采用“传统方法vs智能系统”对比模式。实验选取同一工厂两组相同规格的循环水系统，对照组采用人工定期取样检测（每日1次）+手动加药；实验组部署智能监测系统，实时监测+自动加药。实验周期30天，重点对比水质稳定性、药剂消耗量、设备运行参数等指标，验证系统优越性。(2) 实际案例为某燃机电力企业循环水系统改造。改造前系统依赖人工检测，水质超标事件每月平均3次，换热器清洗周期3个月1次；改造后部署智能系统，通过实时监测与自动调控，水质超标事件降至每月0次，换热器清洗周期延长至24个月，设备连续稳定运行时间提升50%，有效减少因水质问题导致的生产停机。(3) 性能指标表现优异：监测精度方面，pH值测量误差 $\leq \pm 0.03$ ，电导率误差 $\leq \pm 2\%$ ，优于传统人工检测（误差 $\pm 0.1/\pm 5\%$ ）；响应时间上，异常水质数据从采集到报警推送 ≤ 10 秒，较传统人工检测（响应滞后 ≥ 2 小时）大幅提升；节能效果显著，系统运行后循环水泵能耗降低8%，源于水质稳定减少的设备阻力损耗。

3.3 经济效益与环境效益评估

(1) 节水与药耗降低效果突出。通过精准控制补水与排水，系统实现节水率15%，某工厂改造后月均节水2000吨，年节水2.4万吨；药剂投放量基于实时水质数据动态调整，避免过量投放，缓蚀阻垢剂消耗量降低20%，杀菌药剂消耗量降低25%，年减少药剂采购成本约8万元。(2) 设备故障率与维护成本显著下降。因水质稳定，管道腐蚀、换热器结垢问题减少，循环水系统设备

故障率从改造前的12%降至3%；设备维护周期延长，维护次数减少，年维护成本降低30%，某案例中企业年节省维护费用15万元，同时减少设备更换频率，延长设备使用寿命，间接降低固定资产投入。

4 循环水处理智能监测系统的挑战与对策

4.1 技术挑战

(1) 传感器长期稳定性与抗干扰能力面临考验。循环水系统中，水体含有的杂质、腐蚀性物质会附着在传感器探头表面，长期使用易导致测量精度下降，如pH传感器使用3个月后误差可能扩大至 ± 0.08 ；同时，工业场景中的电磁干扰（如电机运转产生的电磁场）会影响传感器信号传输，导致数据波动，甚至出现误报，影响系统可靠性。(2) 复杂工况下的数据建模精度难以保障。不同行业循环水系统工况差异大，如电厂行业循环水温度波动范围可达20-50℃，钢铁行业水质离子浓度变化频繁，传统固定参数模型难以适配动态工况，导致预测结果偏差较大，例如在水质突变场景下，模型预测准确率可能从95%降至70%以下，无法有效指导水处理操作^[5]。

4.2 应用挑战

(1) 如某电厂循环水系统电导率在300~15000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ，Cl⁻浓度常年在150~6000mg/L，硬度在400~1800mg/L，对电导率和氯离子的在线监测的稳定性带来挑战。对传感器探头的灵敏性和测量精度适应难度较高，需要额外定制传感器保护配件且定期人工校正传感器探头。(2) 用户接受度与数据安全顾虑突出。部分企业工作人员习惯传统人工检测模式，对智能系统操作存在抵触心理，培训成本较高；同时，系统采集的水质、设备运行数据涉及企业生产机密，云端存储与传输过程中存在数据泄露风险，如未加密的数据可能被非法获取，影响企业生产安全^[6]。

4.3 解决方案与展望

(1) 融合AI的自适应优化算法可破技术难题。AI实

时分析传感器数据偏差，误差超阈值（如pH ± 0.05 ）自动触发校准；抗干扰算法滤电磁信号，异常识别准确率超92%；动态调整模型参数适配工况变量，预测误差 $\leq \pm 5\%$ 。(2) 标准化接口与模块化设计应对应用挑战。标准化硬件接口兼容多类传感器，模块化软件可快速增减功能（如电力结垢预警、建筑微生物防控），定制周期缩至1周内；区块链加密数据+权限分级保障安全。未来5G普及将提升响应速度，有望实现跨厂区协同监测管理。

结束语

循环水处理智能监测系统通过融合物联网、大数据与AI技术，实现了水质参数的实时感知、异常预警与智能调控，显著提升了系统运行效率与水资源利用率，降低了设备维护成本及环境风险。未来，随着5G通信、边缘计算及数字孪生技术的深化应用，系统将向更精准、更协同、更低碳的方向演进，为工业节水减排及“双碳”目标实现提供强有力的技术保障，助力循环经济可持续发展。

参考文献

- [1] 国家能源局. 工业循环冷却水处理设计规范: GB50050-2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [2] 袁闻. 循环冷却水处理智能监控系统的应用研究[J]. 硅谷, 2021, (08): 82-83.
- [3] 迟新利, 刘禹林, 韩希昌. 循环水处理控制系统设计与应用[J]. 东北电力技术, 2020, (10): 97-98.
- [4] 肖辉全, 于海召. 循环水处理控制系统设计与应用[J]. 工程技术, 2021, (05): 55-56.
- [5] 王磊, 李静. 在线腐蚀监测技术在工业循环水系统的应用进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(05): 1-5.
- [6] 覃汝高, 唐蓉. 循环水处理智能监测系统的应用[J]. 科技视界, 2022, (03): 36-37.