

电厂锅炉给水加药影响因素及控制策略设计分析

李江

华电阜康热电有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i2.20015

[摘要] 随着电力行业对机组运行安全性和经济性要求的不断提高,电厂锅炉给水处理技术则成为保障设备寿命与能效的关键。锅炉给水中的溶解氧、硬度离子以及杂质很容易导致锅炉受热面结垢、腐蚀,并进一步引发爆管等安全事故。基于此,针对传统给水加药中存在的问题,本文提出了基于多参数协同优化的加药控制策略,旨在有效抑制锅炉结垢,从而构建智能加药模型,以此实现药剂投加量的精准调节,为电厂节能降耗和安全运行提供理论支撑和技术保障。

[关键词] 电厂锅炉; 给水加药; 控制技术

中图分类号: U261.1 文献标识码: A

Analysis of Factors Affecting Chemical Dosing in Power Plant Boiler Feedwater and Design of Control Strategies

Jiang Li

Huadian Fukang Thermal Power Co., Ltd.

[Abstract] With the increasing demands for safe and economical operation of power units in the power industry, boiler feedwater treatment technology has become crucial for ensuring equipment lifespan and energy efficiency. Dissolved oxygen, hardness ions, and impurities in boiler feedwater can easily lead to scaling and corrosion on boiler heating surfaces, further causing safety accidents such as tube rupture. Therefore, addressing the problems of traditional feedwater chemical dosing, this paper proposes a dosing control strategy based on multi-parameter collaborative optimization. This strategy aims to effectively inhibit boiler scaling, thereby constructing an intelligent dosing model to achieve precise adjustment of chemical dosage, providing theoretical support and technical assurance for energy conservation, emission reduction, and safe operation of power plants.

[Key words] Power plant boilers; feedwater chemical dosing; control technology

引言

传统电厂锅炉给水加药依赖于人工经验或单参数阈值的调节,因此,很难适应复杂工况下的水质动态变化。而随着智能传感技术和大数据分析的发展,借助多参数融合的优化控制策略,以此建立水质指标与药剂投加量的动态映射模型,从而提出一种兼顾经济性和安全性的控制设计方案,这对提升电厂运行综合效益具有至关重要的作用。

1 电厂锅炉给水水质特性与影响因素分析

1.1 关键水质参数动态特性

电厂锅炉给水的水质特性直接关系到锅炉运行的安全性与经济性,其动态波动对设备使用寿命及热效率产生显著影响。在诸多水质参数中,pH值、溶解氧浓度与电导率构成影响锅炉安全运行的核心风险因素。pH值反映水体的酸碱平衡状态,对金属腐蚀行为呈现非线性作用特征,pH值维持在8.5以下时,碳钢表面无法形成完整的保护性氧化膜,氢离子参与阴极去极化过程,腐

蚀速率随酸度增加而急剧攀升。反之,pH值超出9.5后,尽管碱性条件可抑制酸性腐蚀,但过量的OH⁻会损害金属钝化层,诱发碱腐蚀现象,高温高压运行条件下,局部浓效应将进一步加速晶间腐蚀的发展^[1]。溶解氧是驱动氧化腐蚀的关键因素,其作用机理符合电化学腐蚀理论,在中性或弱碱性介质中,溶解氧充当阴极去极化剂,与阳极溶解产生的电子反应生成OH⁻,形成持续的腐蚀电池循环。溶解氧浓度突破50 μg/L阈值后,腐蚀速率与氧含量呈正比关系,给水系统的死角及涡流区域易产生氧浓差电池,导致局部腐蚀加剧。此外,电导率综合表征水中离子总量,其数值变化反映水质纯净程度,电导率每上升1 μS/cm,大致对应0.6mg/L溶解性固体的增加。高电导率给水在锅炉内受热浓缩后,钙、镁离子易超越溶度积而析出水垢,氯离子与硫酸根等侵蚀性离子则可穿透金属氧化膜,与前述因素协同作用,共同构成威胁锅炉安全运行的动态风险体系。

1.2 药剂作用机理与选型依据

在电厂锅炉给水处理过程中, 药剂的选择与作用机理应与水质特性及设备防护要求相匹配, 氨水和联氨作为调节pH值与去除溶解氧的主要药剂, 在功能上呈现互补特征。氨水经水解产生 NH_4^+ 与 OH^- , 可将给水pH值调控至8.8~9.3区间, 促进碳钢表面生成致密的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 钝化膜, 同时中和 CO_2 等酸性组分, 抑制电化学腐蚀过程。联氨作为还原性除氧剂, 在温度高于 150°C 条件下与溶解氧发生反应, 即: $\text{N}_2\text{H}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$, 使氧浓度降低至 $5\mu\text{g/L}$ 以下, 从而阻断氧化腐蚀的阴极去极化途径, 两种药剂配合使用, 可实现pH值与溶解氧的双重控制。而磷酸盐处理主要用于去除给水中的硬度离子, 通过投加 Na_3PO_4 , 在高温高压环境中生成水合磷酸盐沉淀, 其溶度积低于碳酸盐, 能够有效阻止钙镁离子在锅炉受热面形成水垢。并且, 磷酸盐可在金属表面形成吸附保护层, 降低氯离子等侵蚀性离子对钝化膜的破坏作用。此外, 缓蚀阻垢剂依靠多组分协同产生综合效果, 有机膦酸类物质中的膦酸基团能够与钙镁离子形成稳定的螯合结构, 降低离子活度并抑制晶体生长。聚羧酸类分散剂借助静电斥力使微晶保持悬浮状态, 防止聚集沉积。唑类化合物则可在铜合金表面形成化学吸附膜, 阻隔腐蚀介质与金属接触。这些组分复合应用, 能够提高阻垢率, 降低腐蚀速率的技术指标。

1.3 水质波动的主要诱因

电厂锅炉给水水质波动是制约系统稳定运行的重要因素, 其成因涵盖工况变动、水源条件及设备性能等多个维度^[2]。首先, 机组负荷变化对给水参数的影响较为突出, 负荷快速升降时, 锅炉蒸发量相应调整, 给水流量在额定值的50%~100%范围内动态变化。流量突变会干扰药剂分布的均匀性, 造成局部区域药剂浓度异常降低或富集, 给水温度随负荷上升而提高, 温度升高加速水中溶解气体的逸出, 导致加热器出口处溶解氧浓度出现短暂超标。其次, 补给水作为给水系统的主要补充来源, 其水质变化直接影响整体稳定性。原水含盐量受季节性降水或上游排污影响, 波动幅度可达20%~50%, 引起补给水电导率、碱度等指标的突变。若预处理系统未能及时响应, 进入锅炉的给水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等侵蚀性离子浓度将升高。最后, 药剂投加设备的性能局限进一步加剧了水质波动风险, 传统机械式加药泵的流量控制精度一般为 $\pm 5\%$, 响应时间需30~60秒, 难以适应水质参数的分钟级变化。而在线监测仪表存在采样延迟及数据传输滞后问题, 使控制系统获取的水质信号与实际工况产生偏差, 可能引发药剂过量投加或调节滞后, 形成水质波动的恶性循环。

2 电厂锅炉加药优化控制策略设计

2.1 多参数融合建模方法

电厂锅炉加药优化控制策略的关键在于建立多参数协同的智能决策模型, 其中多参数融合建模方法通过整合历史运行数据与实时监测信号实现精确控制。基于历史数据的模糊逻辑建模首先对锅炉长期运行资料进行分析, 包括不同负荷条件下pH值、溶解氧、电导率与药剂投加量之间的对应关系, 采用模糊聚类方法将连续变量划分为“低”“中”“高”等语言变量。借助专家经验或数据驱动方式建立模糊规则库, 如“pH值偏低且溶解

氧偏高时, 增加氨水与联氨投加量”。该模型利用隶属度函数量化参数间的非线性关联, 突破传统阈值控制的局限性, 对水质参数频繁波动的工况具有较好适应性。而实时水质参数的权重分配采用动态权重系数, 依据参数当前波动幅度及其对腐蚀或结垢的影响程度调整优先级。当溶解氧浓度由正常值突增至 $80\mu\text{g/L}$ 时, 其权重可由0.3提升至0.6, pH值权重相应降低, 使控制策略集中于关键风险参数^[3]。此外, 动态阈值调整机制通过建立参数间的耦合约束关系实现自适应控制, 以pH值与溶解氧的协同阈值设定为例。pH值低于8.5时, 溶解氧安全阈值由 $30\mu\text{g/L}$ 收紧至 $15\mu\text{g/L}$, 以补偿酸性条件下氧腐蚀的加速效应, 若溶解氧持续超标, 则自动将pH值上限放宽至9.5, 防止碱腐蚀发生, 此类双向约束机制可有效降低腐蚀风险。

2.2 智能加药系统架构

2.2.1 硬件层

针对电厂锅炉智能加药的硬件层而言, 硬件层构成系统感知与执行的基础架构。在线监测传感器选用工业级高精度型号, 涵盖pH电极、溶解氧探头及电导率仪等, 集成自动校准与温度补偿机制, 能够实时采集水质参数, 采集信号经4~20mA标准电流环传输至可编程逻辑控制器。智能加药泵配置变频驱动系统及流量计量单元, 实现0~100%范围内无级调速, 流量控制精度可达 $\pm 1\%$, 并依据PLC指令动态调节药剂投加速度。而可编程逻辑控制器作为核心处理单元, 采用冗余配置以保障系统高可用性。其高速计数模块支持同步处理20路传感器信号, 通过内置PID算法执行初步控制逻辑, 同时将运行数据上传至软件层进行深度分析。硬件层各设备经由工业以太网互联, 构建起完整的闭环控制网络。

2.2.2 软件层

软件层采用模块化架构, 旨在实现数据的高效流转与智能决策支持, 数据采集单元兼容ModbusTCP/RTU及OPCUA等多种通信协议, 实现了对PLC、传感器及DCS系统异构数据的同步采集, 采样频率上限为10Hz。此外, 引入滑动窗口滤波算法以剔除信号噪声, 保障数据质量。同时, 算法处理核心集成模糊PID控制与LSTM预测模型。模糊PID依据实时水质参数动态整定控制参数, 以应对系统的非线性与时变特性, LSTM模型则利用历史数据序列预测未来30分钟的水质演变趋势, 预先生成优化控制指令。执行反馈单元负责将算法输出转换为PLC可识别的控制信号, 同时记录实际投加量与水质响应数据。通过闭环反馈机制, 系统能够持续修正模型参数以减小偏差。在架构部署上, 软件层基于微服务设计, 支持容器化部署及弹性扩展, 以满足不同工况下的计算资源需求。

2.2.3 通信协议层

通信协议架构是实现系统互联互通的基础, 底层通信主要采用Modbus协议, 凭借其简洁高效的特性, 适用于传感器与PLC之间的数据交互^[4]。传感器经由ModbusRTU协议向PLC上传数据, PLC则通过ModbusTCP协议将汇总信息传输至软件层, 确保传输延迟低于50ms。针对跨系统数据交互需求, 选用OPCUA协议,

该协议基于服务导向架构,支持跨平台及跨语言通信,并通过加密传输机制保障数据安全。通信层集成边缘计算网关,负责原始数据预处理,包括数据聚合与异常检测,仅将关键信息上传至云端,以降低带宽占用。通过Modbus与OPCUA协议的协同应用,系统实现了从现场设备至管理层的全链路数据贯通,为智能加药控制提供了坚实的数据基础。

2.3 自适应控制算法实现

电厂锅炉加药优化控制策略中,自适应控制算法通过整合智能算法与实时反馈机制,可有效应对系统非线性、时变性及不确定性等问题。模糊PID控制算法针对传统PID在参数突变时易产生振荡的不足,实现模糊逻辑与PID控制的深度融合。该算法借助模糊推理动态调整比例(K_p)、积分(K_i)、微分(K_d)参数。水质参数(如pH值)偏差较大时,系统自动增大 K_p 以加快响应,同时减小 K_i 防止超调;接近设定值时,则通过模糊规则降低 K_p 并增大 K_d 以抑制振荡。这种参数自整定能力使系统在负荷频繁波动或药剂投加延迟等工况下仍能维持稳定控制。基于机器学习的LSTM神经网络预测模型利用长短期记忆结构捕捉水质参数的时序依赖特征。通过输入历史数据进行模型训练,可提前30分钟预测水质变化趋势。当预测到溶解氧浓度将超出安全阈值时,系统预先调整联氨投加量,实现前瞻性控制。而在异常工况下的应急控制策略针对极端场景设计快速响应机制,突增负荷时,系统通过优先级排序机制执行三步操作。首先,暂停非关键参数调节,

集中资源优先控制pH值与溶解氧。其次,调用预置的“负荷+药剂”映射表确定初始投加量。最后,启动高频采样模式实时修正控制输出,该策略可确保在1分钟内将水质参数恢复至安全范围,有效降低设备腐蚀风险。

3 结语

针对电厂锅炉给水加药优化的多参数技术,不但能实现药剂投加精准化和动态化,还能减少化学污染物的排放,为电厂绿色低碳转型提供了可行性的方案。同时,通过构建全流程水质预测和决策系统,还可推动锅炉水处理技术向着智能化、自适应化的方向发展,从而助力能源行业向着高质量的方向不断发展。

[参考文献]

- [1]郑凯,倪慧刚,赵军,等.火电厂循环水加药精准控制技术研究及应用[J].城市建筑空间,2022,29(S2):368-369.
- [2]包呼群,王芳兰,张彬,等.某电厂1000MW超超临界机组给水加氧异常原因分析[J].全面腐蚀控制,2024,38(04):97-100.
- [3]李娟,李瑞.基于S7-300的电厂化学加药程控系统研究[J].机电信息,2025,(18):50-55.
- [4]蔡越.热电厂制水系统化学加药装置故障分析及处理[J].能源与环境,2023,(03):31-33+65.

作者简介:

李江(1980-),男,汉族,山西人,大专,助理工程师,研究方向:水处理设备设施、给水、炉水研究。