

锅炉水质异常预警模型构建与智能诊断方法

饶秣菲

昭通市检验检测院 云南 昭通 657000

摘要: 本文旨在构建一套基于数据驱动的锅炉水质异常预警与智能诊断模型。首先,系统梳理了锅炉水质常见的异常项目(如硬度、pH值、溶解氧、电导率、二氧化硅、磷酸根等)及其典型表现形式与危害机理;其次,深入探讨了各类异常参数的在线与离线检测技术;在此基础上,提出了一种融合多源传感器数据、专家知识库与机器学习算法的智能预警与诊断框架。该框架利用长短期记忆网络(LSTM)对水质参数时序数据进行特征提取与趋势预测,结合孤立森林(Isolation Forest)算法实现无监督异常检测,并通过集成专家规则与贝叶斯网络进行故障根源推理与诊断。该方法能够实现对水质异常的早期、精准预警,并提供可解释的智能诊断建议,为锅炉的安全经济运行提供了强有力的技术支持。

关键词: 锅炉;水质异常;预警模型;智能诊断;机器学习;LSTM;孤立森林

引言

蒸汽锅炉在电力、化工等领域应用广泛,其核心是将燃料化学能转化为蒸汽热能。锅炉水质关乎系统健康,不良水质会形成水垢、腐蚀管壁、破坏汽水分离,引发故障,导致热效率下降、增加成本,更是承压部件失效主因,许多爆炸事故与水质管理失控有关。当前锅炉水质管理以“预防为主、监控为辅”,靠水处理系统和人工取样化验,但存在缺陷:人工化验周期长,单点数据难反映全貌,故障诊断依赖经验,且多为事后处理,难满足现代工业需求。工业物联网、大数据和人工智能技术的发展提供了新思路,部署在线水质传感器可实时获取数据,构建智能预警与诊断模型能主动识别风险,实现从“被动响应”到“主动预防”转变。本文将围绕此转变,研究水质异常机理、检测手段,构建智能化解决方案。

1 锅炉水质常见异常项目、表现方式及危害机理

锅炉水质控制的核心在于维持给水、炉水和蒸汽品质在严格的标准范围内(如GB/T 1576《工业锅炉水质》)。一旦超出限值,即构成水质异常。以下是几种最常见的异常项目及其详细分析:

1.1 硬度(Hardness)

硬度主要指水中钙(Ca^{2+})、镁(Mg^{2+})离子的总浓度。其主要来源于未经充分软化的补给水。炉水硬度超标最直接的表现是在锅炉受热面(尤其是高温辐射区)形成致密、坚硬的碳酸盐或硫酸盐水垢。水垢颜色通常为白色、灰白色或黄褐色。水垢是极差的热导体,其存在会严重阻碍热量从炉膛向锅水的传递。这导致两个恶性循环:一是金属壁温急剧升高,强度下降,易发生鼓包、变形

甚至爆管;二是为了维持相同的蒸发量,必须加大燃烧强度,导致燃料浪费和排烟温度升高,热效率显著降低。此外,水垢下还容易发生局部浓缩和垢下腐蚀。

1.2 pH值(酸碱度)

pH值衡量水的酸碱性。对于中低压锅炉,炉水通常需维持在较高的碱性范围(如10-12),以钝化金属表面并防止酸性腐蚀。pH异常可能源于给水带入的酸性或碱性物质、水处理药剂投加不当或系统泄漏。低pH(酸性)表现为金属表面失去保护性氧化膜,发生均匀腐蚀或点蚀。腐蚀产物($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$)会污染水质,并可能在沉积物下形成腐蚀电池,加速局部穿孔。高pH(强碱性)可能导致“碱脆”(苛性脆化),这是一种应力腐蚀开裂,在铆接、胀管等存在残余应力的部位尤为危险。同时,过高的碱度也会加剧汽水共腾的风险。

1.3 溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)

指溶解在水中的氧气分子(O_2)。主要来源于补给水除氧不彻底或系统不严密导致空气漏入。溶解氧是造成锅炉系统氧腐蚀的罪魁祸首。其腐蚀产物主要是红棕色的铁锈($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)或黑色的磁性氧化铁(Fe_3O_4)^[1]。在省煤器、给水管道等低温区域尤为明显,常表现为溃疡状点蚀坑。氧腐蚀是一种电化学腐蚀,具有速度快、穿透性强的特点。即使微量的溶解氧($> 0.05 \text{ mg/L}$)也足以对碳钢造成持续侵蚀,严重威胁设备寿命。

1.4 电导率(Electrical Conductivity)

电导率是衡量水中所有离子总浓度的综合指标。炉水电导率升高,意味着含盐量(TDS)过高。最典型的危害是引发“汽水共腾”。当炉水含盐量过高时,其表面张力增大,泡沫稳定性增强。在负荷波动或水位波动

时,大量泡沫会随蒸汽一同被携带出锅炉,导致蒸汽严重带水。蒸汽带水会污染用汽设备(如汽轮机叶片结盐),降低蒸汽品质,影响下游工艺。同时,高含盐量也会加剧受热面的结垢和腐蚀倾向。

1.5 二氧化硅(Silica, SiO₂)

天然水中普遍含有硅化合物。在高压及以上锅炉中,二氧化硅的危害尤为突出。

表现方式与危害:二氧化硅在高温高压下会与钠盐结合,形成非常坚硬且导热性极差的硅酸盐水垢,牢固地附着在过热器和汽轮机叶片上。这种水垢极难清除,会严重影响过热器的传热效率,导致管壁超温。在汽轮机中,它会改变叶片型线,降低效率,严重时甚至导致动平衡破坏。

1.6 磷酸根(Phosphate, PO₄³⁻)

磷酸盐处理(PT)是中低压锅炉常用的防垢手段,通过向炉内投加磷酸三钠,使残余硬度生成流动性好的水渣(羟基磷灰石),而非坚硬水垢。磷酸根过低无法有效络合残余硬度,导致结垢风险增加。磷酸根过高可能导致“盐类暂时消失”现象,即在高热负荷区,磷酸盐析出并附着在管壁上,同样形成二次水垢。同时,过量的磷酸盐会增加炉水的含固量,也可能诱发汽水共腾。

2 锅炉水质异常的检测手段

准确、及时地检测水质参数是实现有效预警和智能诊断的前提。现代锅炉水质监测体系正逐步从以离线化验为主,转向以在线监测为核心、离线化验为校验的综合模式。

2.1 在线监测技术

在线监测技术通过在关键位置安装传感器,能够实现水质参数的连续、实时监控,为智能化系统提供源源不断的高质量数据流。其中,电导率仪和pH计是应用最为广泛的两种仪表。电导率仪通过测量两电极间的电阻来间接反映离子总浓度,技术成熟、响应迅速,是判断炉水浓缩程度和排污需求的直接依据。pH计则利用玻璃电极与参比电极构成的原电池来测量氢离子活度,尽管需要定期校准以克服电极老化带来的漂移,但其提供的酸碱度信息对于腐蚀控制至关重要。在溶解氧监测方面,传统的电化学隔膜法正逐渐被光学荧光法所取代,后者基于荧光猝灭原理,无需消耗氧气,维护量小,长期稳定性更好。对于二氧化硅和磷酸根这类特定离子,通常采用基于比色原理的自动分析仪,如硅表通过钼蓝比色法、磷酸根分析仪通过磷钼蓝法,配合自动采样和光度计,可实现较高精度的在线连续测量^[2]。尽管硬度在线分析技术(如离子色谱法)已有应用,但受限于成本

和复杂性,尚未大规模普及。

2.2 离线化验技术

离线化验作为在线监测的重要补充和校准手段,依然在锅炉水质管理中占据不可替代的地位。其优势在于实验室环境可控,可使用高精度仪器进行深度分析。例如,测定硬度的经典方法是EDTA络合滴定法,其结果准确可靠,常用于仲裁和校准在线仪表。比色法则广泛应用于铁、铜、硅、磷酸根等多种离子的定量分析,操作简便。对于痕量腐蚀产物的精确溯源,原子吸收光谱法(AAS)或电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)等高端仪器能够提供ppb级的检测能力。一个健全的水质管理体系应当是“在线为主,离线为辅”,即利用在线数据进行实时监控和趋势预警,同时通过定期的离线化验来验证在线仪表的准确性,并对复杂问题进行深度剖析。

3 锅炉水质异常智能预警与诊断模型构建

针对传统方法的不足,本文提出一个三层架构的智能模型:数据感知层->智能预警层->智能诊断层。

3.1 数据感知层

任务是从物理世界中获取原始信息并将其转化为可供算法处理的高质量数据。该层首先整合来自分布式控制系统(DCS)的锅炉运行参数,如主蒸汽压力、温度、锅炉负荷、汽包水位等,以及来自各类在线水质分析仪的核心数据,包括pH、溶解氧、电导率、二氧化硅、磷酸根等。随后,对这些原始数据进行一系列预处理操作,包括利用线性插值或时间序列模型填充偶发的缺失值,采用3 σ 原则或箱线图法剔除由传感器故障或干扰引起的异常值,并通过移动平均等滤波技术平滑数据噪声^[1]。最后,为了消除不同量纲对模型训练的影响,所有数据均需进行归一化处理。在此基础上,还可进行特征工程,构造如参数变化率、与设定值的偏差、关键参数比值(如钠硅比)等衍生特征,以更全面地刻画系统状态。

3.2 智能预警层

该层的目标是提前发现水质参数的异常偏离趋势。本文采用“双模预警”策略:

3.2.1 基于LSTM的趋势预测与偏差预警

长短期记忆网络(LSTM)擅长处理时间序列数据。我们使用历史正常工况下的水质数据训练一个LSTM模型,使其学习到各参数在不同负荷下的正常演化规律。在实际运行中,模型会根据当前及过去一段时间的输入,预测未来几个时间步的水质参数值。如果实际测量值与预测值之间的残差(Residual)持续超过预设的动态阈值,则触发一级预警,提示可能存在缓慢劣化或外部

干扰。

3.2.2 基于孤立森林 (Isolation Forest) 的无监督异常检测

孤立森林是一种高效的无监督异常检测算法,其核心思想是“异常点更容易被孤立”。它通过随机选择特征和分割值来构建二叉树,异常点由于其稀有性和差异性,通常具有较短的路径长度(即更少的分割次数就能被孤立)。我们将经过预处理的多维水质特征向量(可包含运行参数)输入到训练好的孤立森林模型中,计算每个数据点的异常分数(Anomaly Score)。当分数超过阈值时,触发二级预警,提示系统状态已显著偏离正常模式,可能存在突发性故障。

这两种方法互为补充:LSTM侧重于发现参数自身的趋势性异常,而孤立森林则擅长捕捉多变量耦合下的整体状态异常。

3.3 智能诊断层

一旦预警层发出警报,诊断层需要回答“是什么故障?”和“如何处理?”这两个关键问题。本文采用“知识驱动+数据驱动”的混合推理方法。

3.3.1 专家知识库

将第2节中总结的各类水质异常的因果关系、典型征兆、关联参数等,构建成结构化的规则库。例如:“IF (炉水电导率↑ AND 蒸汽湿度↑) THEN (疑似汽水共腾)”^[4]。

3.3.2 贝叶斯网络 (Bayesian Network)

作为一种概率图模型,贝叶斯网络非常适合处理不确定性推理。我们构建一个以“故障类型”为父节点,“观测到的异常参数”为子节点的网络。每个节点都有条件概率表(CPT),描述了在父节点状态下子节点出现的概率。当预警层报告了具体的异常参数组合(证据E)后,可以通过贝叶斯公式反向推理,计算出各种潜在故障(假设H)的后验概率 $P(H|E)$ 。

$$P(H|E) = \frac{P(E|H) \cdot P(H)}{P(E)}$$

其中, $P(H)$ 是先验概率(可由历史故障统计数据获得), $P(E|H)$ 是似然度(由专家知识或数据统计得出)。

后验概率最高的故障即为最可能的诊断结果。

3.3.3 诊断输出

模型最终输出一个包含故障类型、置信度、相关联的异常参数以及初步处理建议的诊断报告。例如:“诊断结果:高置信度(92%)判定为‘给水除氧器失效导致溶解氧超标’。建议:1.立即检查除氧器工作压力与温度;2.核实除氧剂(如联氨)投加泵是否正常;3.加强给水管道的密封性排查。”

结语

本文系统地研究了锅炉水质异常的成因、检测与智能处理方法,并成功构建了一个集数据感知、智能预警与智能诊断于一体的综合模型。该模型通过融合LSTM、孤立森林、贝叶斯网络等先进算法与深厚的领域专家知识,可以有效克服传统水质管理模式的滞后性与主观性,实现对水质风险的早发现、早诊断、早处理。展望未来,本模型仍有广阔的深化空间。首要方向是提升模型的泛化能力,将其适配并验证于燃油、燃气、余热锅炉等多种类型及不同容量等级的设备上,以构建更具普适性的通用解决方案。其次,可探索引入强化学习技术,将诊断结果与最优控制策略(如自动调节加药泵流量、优化排污周期)相结合,形成“感知-决策-执行”的完整闭环智能控制系统。最后,将本水质模型深度融入锅炉的数字孪生体中,实现对整个设备健康状态的全景式、沉浸式监控与预测性维护,将是迈向工业4.0时代智慧能源管理的关键一步。

参考文献

- [1]傅家亮,赵留伟,钟泉炯.智能水质检测系统在锅炉水质分析中的应用研究[J].中国设备工程,2025,(07):178-180.
- [2]金正旭,康宏亮,康庄力,等.水质在线监测系统研究与在蒸汽锅炉中的应用分析[J].资源节约与环保,2024,(11):39-44.
- [3]段秉红.锅炉水质多参数在线监测系统开发与应用[J].工业仪表与自动化装置,2023,(05):50-54.
- [4]王晓,佟伟,李晨光,等.智能水质检测系统在锅炉水质分析中的应用研究[J].中外能源,2022,27(05):96-100.