

锅炉高温受热面壁温的实时监测与软测量方法研究

顾春阳

华电伊犁煤电有限公司, 新疆伊犁哈萨克自治州, 835000;

摘要: 锅炉高温受热面壁温的实时监测与软测量对保障锅炉安全运行、提升热效率至关重要。目前, 检测方法中红外光谱测量技术虽能非接触测温但受环境干扰, 热电偶直接测量精度高但安装维护难。软测量方法利用易测变量间接估算壁温, 最小二乘支持向量机、BP神经网络等模型在超临界锅炉应用中展现出优势。本文综述实时监测与软测量方法的研究进展, 提出结合两者的融合监测体系, 希望可以为锅炉壁温监测提供理论参考。

关键词: 锅炉高温受热面; 壁温实时监测; 软测量方法

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 09. 098

锅炉是实现各种能源转换的关键设备, 在我国的火电、石化、冶金等工业生产领域发挥了巨大的作用。其中, 锅炉的过热器、再热器、水冷壁等长期经受高温、高压、腐蚀性介质等恶劣条件, 导致金属材料的强度下降、蠕变增长, 引发受热面管壁超温变形、爆管等严重事故^[1]。过去锅炉受热面的高温壁温测量, 主要依靠热电偶等接触式测温传感器。而随着科技的进步, 非接触式的红外光谱测量、基于人工智能的锅炉软测量方法的出现, 为锅炉高温受热面壁温精确测量的新思路^[2]。

1 锅炉高温受热面壁温实时监测方法

1.1 传统接触式检测方法——热电偶测量

热电偶是常用的测温元件, 广泛应用于高温锅炉的测温。工作原理是利用热电效应即两种成分不同的导体和半导体构成回路后, 当两接合点温度不同时, 回路中会产生热电动势, 测温就是由热电动势的大小来确定温度的^[3]。热电偶具有灵敏度高、精确度高、速度快、结构简单、耐高温、耐腐蚀、抗干扰性能好等特点, 尤其是在高温环境下应用比较稳定^[4]。在热电偶的安装时, 首先需要选取锅炉待测蒸汽受热面, 将热电偶沿锅炉的宽度方向等间隔排列在锅炉受热面壁的待测位置点上, 并且需确保数量不低于6组, 对称等间距平行排列设置^[5]。通过熔敷金属将热电偶固定在锅炉待测蒸汽受热面壁, 熔敷金属应密实、贴合、无裂隙, 且有足够厚度减少传导环境的散热性。安装前对壁安装面处严格进行除锈除杂处理, 在对热电偶表安装面的打磨时, 使热电偶与锅炉待测蒸汽受热面壁契合安装。将热电偶的引出线引过锅炉顶部时设置有保护套管, 在保护套管内部设置保温棉, 在保温棉上设置有防火料, 可以起到保护引出线不受损坏的作用, 将热电偶的引线从锅炉顶直引出去,

并与记录装置连接获取锅炉受蒸汽热面待测点的温度, 将锅炉的壁温数据通过计算机进行监测分析, 并将壁温数据进行可视化。

但热电偶测量方式存在不足。例如, 热电偶需要接触被测对象, 因此在锅炉高温、高压、腐蚀性强的环境下, 热电偶容易损坏, 其使用寿命短。而且热电偶的安装位置和安装数量受到限制, 难以在整体受热面布置, 难以实现对受热面全部温度的测点, 只能测到有限的离散分布温度值, 难以保证能正确反映受热面温度分布特性。

1.2 非接触式监测方法——红外光谱测量

红外光谱测量技术是一种基于物体辐射红外信号的非接触式测温方法。根据普朗克黑体辐射定律, 物体表面温度与辐射能峰值波长存在确定关系, 不同温度的物体辐射的红外光谱特征不同。在锅炉内部高温环境下, 受热面金属材料辐射的2—14 μm波长红外光经特殊窗口透出, 多光谱探测器阵列采集离散波段辐射强度, 将光谱强度矩阵输入温度反演模型, 即可实现对受热面温度的实时监测^[6]。相比于单波长测温方法, 多光谱方法具备更广阔的应用前景, 可以有效规避表面氧化膜、介质吸收等方面的影响, 提升测温准确率。比如某单位在主蒸汽参数锅炉改造项目中, 引入8通道红外光谱, 实现过热器管屏温差监测分辨率达到1.2℃。红外光谱测量技术实现需搭建基于红外光栅型传感器的完备光学测量系统^[7]。针对受热面构造在炉墙上布置高分辨率的红外光栅传感器, 相邻传感测点距离设置<1/2管屏宽度。对于采用膜式水冷壁受热面结构, 需在管屏间间隙处设计聚焦式探杆, 并采用N2吹扫确保光学窗口的清洁。通过采用耐高温石英光纤, 并配合数字锁相放大器

消除炉内背景噪声,从而提升系统的抗干扰性和动态测量特性。在某超临界锅炉的示范装置上,该系统工作环境在 1200℃ 的烟气环境中长期稳定运行了 8000 小时,数据采集的频点最高达 20Hz,完全可以满足动态重构的温度场要求。然而,采用红外光谱测量技术,当受热面严重结焦,导致受热面表面发射率发生改变,对系统将带来一定的系统偏差。

1.3 实时监测方法对比分析

综合来看,热电偶测量具有精度高、响应快、结构简单、耐高温、耐腐蚀、抗干扰等优点,但接触式测量,易损坏,使用寿命短;安装位置和数量受限,难以全面监测温度场,适用于对测量精度要求高、温度变化较快的局部点温度监测。红外光谱测量属于非接触式测量,温度场可以实时测量较大面积范围;能够避免许多干扰因素,精度较好。但是成本较高;在特殊工作条件下测量稳定性降低,可用于需要全方位监控受热面温度场分布且对测量面积要求较大场合。

2 锅炉高温受热面壁温软测量方法

2.1 基于最小二乘支持向量机的软测量模型

最小二乘支持向量机(Least Squares Support Vector Machines, LS-SVM)是一种改进的支持向量机算法,它在标准支持向量机的基础上,将不等式约束转化为等式约束,将二次规划问题转化为线性方程组求解问题,大大提高了计算效率。该方法学习速度快,泛化能力强,比 GA-BP 的软测量建模具有更好的推广能力^[8]。该软测量模型可指导运行人员调整相关参数,有效地调节控制垂直水冷壁壁温,对提高超临界锅炉的安全运行具有一定指导意义。

2.2 基于 BP 神经网络的软测量模型

BP 神经网络是按误差逆传播算法进行学习和训练的多层前馈网络,是应用最多、最广泛的神经网络模型。它具有很强的非线性逼近功能和自学习、自适应能力,可以学习输入与输出的复杂非线性关系,实现主导变量的估计。BP 神经网络在锅炉高温受热面壁温软测量中可以充分发挥其优势,解决多因耦合作用下壁温与运行参数间的复杂关系问题。模型训练中利用反向传播算法反复更新神经网络的权重和偏置,将预测输出与实际壁温值的均方误差降至最小,经过若干次训练迭代,能够获得泛化能力较好的 BP 神经网络模型。应用结果表明,

该模型无论对于负荷工况大小的锅炉都能较好地预测壁温,预测误差值不超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$,较经验公式预测方法精度提高^[9]。

2.3 基于其他算法的软测量模型

最小二乘支持向量机、BP 神经网络之外,还有其他的算法应用于锅炉高温受热面壁温软测量中。如主元分析法(Principal Component Analysis, PCA)可对多维数据进行压缩,保留主要的数据特征信息,进而缩小软测量模型结构,锅炉的运行数据中所采集的各参量数据往往有一定的相关性,PCA 将相关变量压缩为较小的主元变量,以主元变量为输入变量,实现软测量模型的压缩,同时又将重要的信息保留下来^[10]。模糊逻辑算法能够实现不确定、模糊信息的处理,适用于锅炉过程中部分参数很难进行精确测量或具有一定模糊性的场合。依据模糊规则库将输入变量模糊集合映射到输出变量模糊集合,并经过解模糊化处理,得到具体的壁温估计值。例如,考虑锅炉负荷变化对壁温的影响情况,由于锅炉负荷的变化是一个渐变过程,不能通过准确的数值来表达,可以使用模糊逻辑算法对模糊信息进行处理,以增加软测量模型的泛化能力^[11]。

3 实时监测与软测量融合策略

3.1 融合必要性分析

热电偶测量和红外光谱测量实时获取壁温,但热电偶测点数量和位置限制,难以覆盖整个温度场。红外光谱测量设备造价高,因工况的恶劣而造成测量不稳定。软测量方法可以借助于易测变量间接估算壁温,获取整个温度场分布信息,但是易受所选辅助变量和建模数学模型的影响,预测精度欠佳。将实时监测方法和软测量方法相结合,可实现基于软测量方法的实时监测、基于实时监测的软测量模型校正,互相融合互益,可以使实时监测方法摆脱对测点位置和数量的限制,优化软测量建模的数学模型和辅助变量的选择,为锅炉安全稳定运行提供更充分的保障。

3.2 融合方法

建议从数据级融合、即实时监测获得的壁温数据与软测量模型得到的壁温数据进行数据融合的角度提出策略,利用加权平均法,赋予实时监测数据和软测量数据准确性和可靠性不同的权重,进行加权平均,得到最终的壁温估计值。例如,在实时监测数据准确可靠时,

加大该数据的权重；在软测量模型预测的结果误差较小时，增加该软测量数据的权重。此外，还可以从特征级进行融合，即分别获取实时监测数据和软测量模型的特征信息进行特征融合。例如，从实时监测数据中提取壁温的变化规律、变化区间等特征，从软测量模型中提取与壁温相关的各个参数之间存在联系的特征，对上述特征进行融合，建立更完整、准确的壁温预测模型。此外，还可以进行决策级融合，即分别对实时监测和软测量模型的结果作出独立决策，融合所得结论，做出最终的决策。例如，当实时监测数据表明壁温已经超过了安全警戒值时，对它进行报警处理；同时软测量模型预测结果表明，壁温在未来较长时间内的变化趋势仍是上升，并将这两个决策结果进行融合，对壁温控制施加更严厉的控制，如降低锅炉负荷、加大冷却水的供应量等。注意，上述融合方法的选择应该根据实际应用场景的特殊性、数据本身的特征、系统需求等进行一定的抉择。

4 结论

综上，热电偶温度监测法测量精度较高，测量响应速度较快，但受到测量点高温高压环境的影响，安装、更换较困难，同时在热电偶测量点较为密集的前提下，无法做到对整个受热面温度场全覆盖测量；红外光谱壁温测量监测采用非接触、无损坏、整体温度场实时分布特性等特点，但测量装置较为昂贵，并且在工况（严重结焦）变化特殊情况下容易发生测量精度不稳定的实际情况。软测量方法是利用一些较容易检测的过程变量（辅助变量），建立数学模型来间接估算难以直接检测的过程变量（主导变量）的一种方法。对于锅炉高温受热面壁温监测，软测量方法可以借助一些与壁温有关的可检测的其他参数（如锅炉的一些运行参数（压力、流量、蒸汽温度等）、烟气参数（烟气温度、烟气成分）等与壁温之间的关系，通过建立数学模型间接地估计出壁温。与传统的温度测量方法相比，软测量有着成本较低，覆盖范围较广等优点。基于此，本文建议提高融合度，从数据、特征、决策级融合，基于实时监测精准性和软测量完整性的融合重构锅炉温度场；实现多源异构信息融合，利用传感数据、运行数据和历史工况，提高数据

模型的动态自适应能力；加强人工智能及数字孪生技术的研究，研制高效精准、抗干扰能力强的智能监测器，进行锅炉壁温预测与在线控制，进一步为工业锅炉的可靠运行提供技术支撑。

参考文献

- [1] 柏海峥. 火力发电厂锅炉汽包水位测量偏差原因分析[J]. 电力设备管理, 2025, (16): 103-105.
- [2] 许宁, 刘孝鑫. 造纸行业锅炉汽包液位测量可靠性的研究与应用[J]. 中华纸业, 2025, 46 (05): 110-113.
- [3] 陈丽娟, 王彦军, 覃清钰, 等. 某锅炉混合减温器入口端 K 型热电偶失效断裂分析[J]. 材料保护, 2023, 56 (07): 188-193.
- [4] 尚明峰. 锅炉金属壁温热电偶安装技术[J]. 安装, 2021, (01): 47-49+53.
- [5] 朱小良, 张夕林. 热电偶测量锅炉烟气温度的动态补偿方法[J]. 传感技术学报, 2003, (03): 359-362.
- [6] 崔修强, 王玉敬, 李其浩, 等. 火电厂 1000MW 锅炉入炉煤分子模型构建及分析[J]. 能源与节能, 2020, (12): 114-116+182.
- [7] 王颖, 张静静, 金小培, 等. 燃煤电厂锅炉除尘器滤袋失效原因分析[J]. 纺织导报, 2018, (02): 68-70.
- [8] 王演铭, 张志远, 姚荣财. 软测量技术在锅炉故障诊断中的应用[J]. 电气技术与经济, 2025, (02): 157-159.
- [9] 丁知平, 刘超, 牛培峰. IGSA-LSSVM 软测量模型预测燃煤锅炉 NO_x 排放量[J]. 计量学报, 2018, 39 (03): 414-419.
- [10] 王钢, 宋旭尧, 赵云龙, 等. 基于直接法的 FTIR 红外光谱测量系统辐射源尺寸效应研究[J]. 计量学报, 2025, 46 (04): 594-599.
- [11] 王昌伟. 热电偶温度测量技术在能源行业中的应用与技术改进探析[J]. 仪器仪表用户, 2024, 31 (07): 58-60.

作者简介：顾春阳，1991.1，男，汉，山东沾化人，本科，工程师，研究方向：锅炉。