

Research on the Method for Improving the Measurement Accuracy of Gas-Solid Two-Phase Flow in the Powder-Laden Pipeline of CFB Boiler

Donglin Pang Wei Zhang Lilong Fu Shu Zhang Yu Gao

Inner Mongolia Jingneng Shuangxin Power Generation Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 016014, China

Abstract

The flow parameters of gas-solid two-phase flow in the powder-carrying pipeline of a circulating fluidized bed (CFB) boiler are the core data support for ensuring the combustion efficiency, operational stability and equipment safety of the boiler. Due to the characteristics of gas-solid two-phase flow such as high concentration, strong pulsation, non-uniform distribution and pipeline wear, traditional measurement methods are prone to problems such as response lag, weak anti-interference ability and large measurement deviation. This paper focuses on the complex working conditions of the powder-carrying pipes in CFB boilers. It systematically studies the improvement paths for the measurement accuracy of gas-solid two-phase flow from five dimensions: optimization of measurement principles, improvement of sensor technology, upgrade of signal processing algorithms, and improvement of flow field regulation and calibration systems. It analyzes the technical logic and application advantages of each method, providing theoretical references and practical directions for precise measurement in industrial scenarios.

Keywords

CFB boiler; Powder pipeline; Gas-solid two-phase flow; Flow measurement; Precision improvement

CFB 锅炉带粉管道内气固两相流流量测量精度提升方法研究

庞东林 张伟 付立龙 张枢 高宇

内蒙古京能双欣发电有限公司，中国·内蒙古鄂尔多斯 016014

摘要

循环流化床（CFB）锅炉带粉管道内气固两相流的流量参数，是保障锅炉燃烧效率、运行稳定性与设备安全的核心数据支撑。由于气固两相流具有高浓度、强脉动、非均匀分布及管道磨损等特性，传统测量方法易出现响应滞后、抗干扰能力弱、测量偏差大等问题。本文针对CFB锅炉带粉管道的复杂工况，从测量原理优化、传感器技术改进、信号处理算法升级、流场调控与标定体系完善五个维度，系统研究气固两相流流量测量精度的提升路径，分析各方法的技术逻辑与应用优势，为工业场景下的精准测量提供理论参考与实践方向。

关键词

CFB锅炉；带粉管道；气固两相流；流量测量；精度提升

1 引言

CFB 锅炉依靠脱硫效率高、燃料适应性广、负荷调节灵活等优势，已在电力、化工、冶金多个能源转化领域普遍采用。带粉管道作为锅炉气固循环系统的关键组成部分，承担着输送煤粉、回流循环灰的核心功能，内部气固两相流的流量参数直接掌控着燃料供应的速度、炉内燃烧工况的匹配状况和污染物排放的水平。精准测算气固两相流的固相质量流量与气相体积流量，是达成锅炉燃烧优化管理、降低能源消耗与减轻设备磨损的基础^[1]。然而，含粉管道内气固两

相流的流动状况极具复杂性，固相颗粒浓度在时空里分布失均、气相流速波动十分剧烈，颗粒与管道壁面、颗粒之间的摩擦碰撞不仅引发管道磨损，还会破坏测量信号的稳定性；高温与高尘的工况环境让测量难度进一步加剧。工业中目前常采用的差压式、电容式、微波式等测量方法，普遍呈现对流动不均态敏感、抗干扰效能不足、长期运行稳固性差等缺陷，测量结果偏差明显，不能契合精细化调控需求。鉴于 CFB 锅炉带粉管道的特殊工作情况，探索合理的流量测量精度提升途径，攻克气固两相流测量里的核心技术瓶颈，对促使 CFB 锅炉实现高效低碳运行拥有重要的工程价值与现实意义。

【作者简介】 庞东林（1993-），男，中国四川苍溪人，本科，工程师，从事燃煤电厂热工仪表及自动控制研究。

2 CFB 锅炉带粉管道气固两相流测量的核心技术瓶颈

2.1 流动特性导致的测量失真

带粉的气固两相流在管道内为典型非稳态流动，重力、气流曳力、颗粒间作用力等多重因素影响固相颗粒，很容易造成凝聚、累积或偏流情形，造成颗粒浓度在管道截面有“壁面富集”或“中心稀疏”的非均匀分布。基于“均匀流假设”的传统测量方法因这种分布特性难以获取真实整体流量信息，例如差压式测量依靠管道截面的流速均匀性，若出现偏流状况，取压点的局部参数不足以反映全截面流动状态，直接引起测量偏差。气固两相流特性的强脉动造成流量参数随时间剧烈起伏，常规测量设备的反应速度难以匹配信号变化节奏，使得测量失真情况进一步加重。

2.2 工况环境的干扰与设备损耗

CFB 锅炉带粉管道内通常呈现 300-500℃ 的高温环境，且固体颗粒大多是具有较高硬度的飞灰或煤粉，颗粒浓度可至 $10\text{-}50\text{kg/m}^3$ 。高温条件易引发传感器材材质老化、灵敏度下滑，以高速运动的颗粒冲刷磨损传感器探头，会损害测量元件的结构完整性，引起测量精度随运行时间渐渐变差^[2]。管道中粉尘的堆积或许覆盖传感器探测面，阻滞信号输送，而水蒸气、硫化物等气相成分有一定概率引发传感器腐蚀，进一步干扰测量稳定性。

2.3 测量原理的固有局限

现有测量方法原理局限性这一问题是制约精度提升的关键因素。差压式测量采用伯努利方程，对气固两相流相间作用分析欠缺，固相颗粒的存在会造成流体的密度、粘度等物理参数变化，造成差压信号与流量的线性关系失常；电容式测量凭借颗粒与气体的介电常数差异，若颗粒湿度改变或出现附着现象，介电常数的稳定性遭打乱，测量信号呈现明显漂移。微波式测量容易受颗粒粒度分布作用，若煤粉或循环灰的粒径呈现较大波动时，微波的衰减与散射规律出现变动，难以实现稳定的流量标定关系。这些原理固有属性的局限，造成单一测量方式难以契合复杂多变的工况。

2.4 标定体系的不完善

颗粒浓度、流速、粒径分布等实际工况的参数需被模拟以进行气固两相流的流量标定，而当前标定装置大多是小型实验台，难以达成 CFB 锅炉带粉管道的高浓度、高流速工况复现，造成工业实际应用和实验室标定结果出现较大偏差。标定过程缺少统一的标准物质与标定流程，多样测量设备的标定方法存在区别，导致测量结果的可比性与准确性难以维系。工业现场工况参数（如温度、压力、颗粒特性）依据运行负荷动态变化，而现有测量设备大多采用固定的标定系数，不能迅速贴合工况变化，造成测量精度进一步下滑。

3 气固两相流流量测量精度提升的关键方法

3.1 测量原理的优化与多方法融合

针对单一测量原理的局限性，经过原理改良与多方法融合，可以达成优势互补，增进测量适应性。就原理优化工作而言，对传统差压式测量实施改进，采用气固两相流的相间滑移系数，校正伯努利方程里的密度参数，构建考虑颗粒浓度影响的差压 - 流量数学模型，增强非均匀流工况下的测量精准度。电容式测量的双电极结构设计，通过检测管道截面处颗粒的分布梯度，校正浓度均匀性假定带来的误差。

在多方法融合方面，搭建复合测量体系是核心途径。融合反映整体流动阻力的差压式测量与反映颗粒浓度的微波式测量，借助数据融合算法设立流量与差压、微波衰减信号的多元回归模型，同步获取气相流速和固相浓度资料，完成气固两相流量的精准同步测定；把电容式测量（短期响应快）和射线式测量（长期稳定性好）结合，采用电容传感器抓取流量脉动信号，凭借射线传感器调整长期漂移，构建互补测量模式。多种方法融合凭借综合不同测量原理的长处，显著削弱了单一因素对测量结果造成的干扰。

3.2 传感器技术的改进与适配设计

传感器作为测量系统的核心组件，其选用材质与设计结构直接左右测量的精确性和稳定性。针对结构设计事项，应对颗粒偏流情况，采用多测点的阵列式传感器布局，在管道截面的各个别样位置安排探测单元，利用加权均值算法处理多测点信号，综合展现全截面的流动状态。调整传感器探头形状，采用流线型设计减轻流动场所受干扰，同时减少探头伸出的长度，减轻颗粒冲刷造成的磨损影响。

在材质与防护方面，采用耐高温、耐磨损的特种材料（如碳化硅、氧化锆陶瓷）打造传感器探头，保障其在高温、高尘环境下的使用寿命。采用等离子喷涂技术于探头表面构建耐磨涂层，加大抗冲刷能力^[3]。面对高温影响，在传感器内部添加温度补偿模块，通过不间断获取环境温度，优化传感器的灵敏度系数，弥补温度漂移造成的误差。设计非接触式传感器安装途径，把探测元件装到管道外部，远离气固两相流的直接接触，全面攻克磨损与污染问题。

3.3 信号处理算法的升级

颗粒碰撞噪声、环境电磁干扰等，让气固两相流的测量信号往往包含大量噪声，且呈现非平稳、非线性特性，经由完善信号处理算法，可精准提取有用的信号，增强测量精准度。针对噪声抑制领域，借助小波阈值去噪算法，对测量信号开展多尺度剖析，抑制并分离出噪声对应的高频分量，保存体现流量变化的有效信号；处理脉冲干扰，应用自适应中值滤波算法，按照信号的起伏特点动态调整滤波窗口，去除干扰的同时留存信号的突变特性。

在非线性校正方面，构建流量预测模型引入机器学习

算法是重大进展。采用支持向量机，采用实验数据作样本，确立流量、测量信号跟工况参数（温度、压力、颗粒浓度）之间的非线性映射关系，即时修正测量进程中的系统误差。采用在线学习算法，让模型可以实时接收工况变化数据，实时调整模型参数，应对负荷波动所造成的测量条件变化。选用卡尔曼滤波算法对多传感器测量数据实施融合操作，控制随机误差的影响，强化测量所得结果的稳定性与可靠性。

3.4 流场调控与测量环境优化

对管道内流场进行调控以优化流动状态，减轻测量受非均匀流的影响，对提升测量精度有辅助功效。在管道设计涉及结构方面，在传感器安装点的上游布置流场规整装置，通过校准气流方向、驱散颗粒团聚，令测量截面的气固两相流形成均匀分布的流动情形，保障测量顺利开展的流场环境^[4]。调整管道弯头设计，运用大曲率半径弯头减轻离心力造成的颗粒偏流，设置合适长度的直管段于弯头下游，促使流场在测量截面实现稳定。

在测量环境优化方面，搭建管道内粉尘清理机制，借助脉冲吹灰装置定期清除管道内壁和传感器探头堆积的粉尘，防止信号传输出现阻碍。应对高温工况，在传感器安装地带装设隔热保温结构，减轻温度梯度对测量造成的影响。优化管道的密封设计，防止外部空气渗入引发的流场扰动，同时防止管道内高温气体逸出对传感器造成损坏。实施流场调控与环境优化以改善测量基础条件，为精准测量奠定了基础支撑。引入在线监测装置实时评价流场均匀性与测量环境情形，借助智能诊断算法预先警示潜在干扰要素，并联合管控执行部件自动调控，能大幅提升测量系统的3.5标定体系的完善与动态校准。

完善的标定体系是达成测量精度的关键环节，得从标定装置、标定方法和动态校准三个方面采取行动。在标定装置建设方面，构建大型工业级气固两相流标定实验台，可实现对CFB锅炉带粉管道高浓度、高温、高流速运行状态的模拟，精准把握颗粒浓度、粒径分布、流速等各类参数，实现测量设备工业级别标定。采用容积法与标准称重法相搭配的标定办法，增强标定基准的精准度^[5]。

在标定方法优化方面，搭建多参数耦合标定模型，把温度、压力、颗粒粒径等全部工况参数融入标定流程，创建流量、测量信号和工况参数之间的多维标定关联，取代以往的单一参数标定方法。建立一致的标定流程与标准，管控标定工作中的数据采集、参数设置、设备安装等事宜，保障标定所得结果具备可比性。

在动态校准方面，创建在线自校准系统，采用锅炉运行阶段的稳定负荷工况，以既定的燃料供给量或者循环灰流量作为参照，实时调校测量设备的标定系数。借助定期离线标定跟在线自校准相结合，解决工况变化、设备老化造成的测量差错，维持长期运行过程中的测量精度。采用大数据分析系统，对过往标定数据、实时运转参数和测量成果开展深度剖析，构建动态误差预估模型，提早识别潜藏的测量偏差趋向，搭建云端共享标定数据仓库，达成多电厂、多设备间的标定信息互通与对照，构建行业统一的动态校准规范，借助这种多层次、智慧化的标定与校准系统，不仅可以明显增强CFB锅炉带粉管道内气固两相流流量测量的精准性和稳固性，而且能为设备全生命周期管控提供数据支持，减少维护费用，延长设备使用期限。

4 结语

带粉管道内CFB锅炉气固两相流的流量测量精度，直接关乎锅炉的运行效率与安全稳定性。面对流动特性繁杂、工况环境严苛、测量原理受限、标定体系不完备等关键难题，必须从传感器技术改良、测量原理革新、信号处理算法更新、流场调控与标定体系健全五个层面，采用综合性的提高精度办法。借助多途径融合弥补单一原理的欠缺，采用传感器改进和流场优化改善测量环境，采用先进算法抓取有效信号，利用完善的标定体系稳固测量准确性，可精准测量气固两相流的流量。在实际应用中，要结合具体工况挑选适宜的技术方法，看重系统集成与运营维护，保证精度提升方法的切实见效。未来，随着技术的不断进步，气固两相流流量测量将迈向智能化、自适应方向，为CFB锅炉实现高效低碳运行给予更坚实的技术保障，带动能源转化领域的绿色永续性发展。

参考文献

- [1] 李日照,郭岩,王芳修,等.基于SIFT算法的CFB锅炉浇注料表面销钉识别技术研究[J].黑龙江电力,2025,47(05):377-385.
- [2] 何松章,缪桥洪.CFB锅炉受热面磨损与一次风优化调整研究[J].设备管理与维修,2025,(18):59-62.
- [3] 刘岳松.CFB锅炉长周期运行问题及优化策略探讨[J].现代工程科技,2025,4(17):5-8.
- [4] 李彬,戴绍钧,吴天宏,等.CFB锅炉炉墙裂纹缺陷智能检测与软测量研究[J].洁净煤技术,2025,31(S1):308-314.
- [5] 康子为,陈玲红,武燕燕,等.基于粒子群算法的燃煤CFB锅炉一氧化碳与多污染物在线减排优化[J].热力发电,2025,54(07):23-32.