

# 火电厂脱硫脱硝系统 CEMS 仪表 智能校验技术研究

柳竹欣<sup>1</sup>, 李锋<sup>2</sup>, 林峰<sup>1</sup>, 赵响<sup>1</sup>

(1. 新疆重能电力开发有限公司, 新疆 哈密 839000;

2. 南方电网电力科技股份有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要:**针对火电厂烟气连续排放监测系统(CEMS)中脱硫脱硝仪表传统人工校验方式存在的效率低下、易引入人为误差等问题,该研究提出了融合物联网(IoT)技术、自动控制技术和数据驱动算法的智能校验解决方案:通过NB-IoT模块构建CEMS仪表-云平台数据传输链路,实现校验数据远程交互,结合煤耗-污染物排放工艺逻辑判断仪表误差,采用最小二乘法完成非线性偏差校正,实现火电厂脱硫脱硝系统CEMS仪表智能校验。实验结果显示:经所提技术智能校验后,火电厂脱硫脱硝系统CEMS仪表监测浓度数值偏置都控制在 $\pm 0.5$  ppm内,零点与跨度漂移最大值低于 $2.5\% \text{ F.S.} \cdot \text{d}^{-1}$ ,且NB-IoT通信链路可在极短时间内完成CEMS仪表数据同步,瞬时干扰下气体数据采集偏差 $\leq 0.2$  ppm,可实现校验过程的远程操控、自动执行与数据智能分析。

**关键词:**CEMS; 脱硫脱硝; 智能校验

中图分类号:TP391

文章编号:1000-0682(2026)02-0109-07

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.02.021

## Research on intelligent calibration technology for CEMS instruments in flue gas desulfurization and denitrification systems of thermal power plants

LIU Zhuxin<sup>1</sup>, LI Feng<sup>2</sup>, LIN Feng<sup>1</sup>, ZHAO Xiang<sup>1</sup>

(1. Xinjiang Chongneng Power Development Co., Ltd., Xinjiang Hami 839000, China;

2. South Power Grid Electric Power Technology Co., Ltd., Guangdong Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** To address the issues of low efficiency and susceptibility to human error in traditional manual calibration of instruments in flue gas desulfurization and denitrification systems within Continuous Emission Monitoring Systems (CEMS) of thermal power plants. By systematically analyzing the measurement principles and calibration requirements of key instruments such as sulfur dioxide ( $\text{SO}_2$ ) and nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) in CEMS, an intelligent calibration solution integrating Internet of Things (IoT) technology, automatic control technology, and data-driven algorithms is proposed. NB-IoT modules are used to establish a data transmission link between CEMS instruments and the cloud platform, enabling remote interaction of calibration data. Combined with coal consumption-pollutant emission process logic to assess instrument errors, nonlinear deviation correction is achieved using the least squares method, thereby realizing intelligent calibration of CEMS instruments in flue gas desulfurization and denitrification systems. Experimental results show that after intelligent calibration using the proposed technology, the monitoring concentration deviations of CEMS instruments are controlled within  $\pm 0.5$  ppm, with maximum zero and span drift below  $2.5\% \text{ F.S.} \cdot \text{d}^{-1}$ . The NB-IoT communication link enables rapid synchronization of CEMS instrument data, with a data acquisition deviation of  $\leq 0.2$  ppm under transient interference, achieving remote control, automatic execution, and intelligent analysis of the calibration process.

**Keywords:** CEMS; flue gas desulfurization and denitrification; intelligent calibration

收稿日期:2025-11-10

第一作者:柳竹欣(1978—),男,汉族,山东烟台人,工程师,硕士,研究方向为电厂热工自动化及仪表技术。E-mail:liuzhuxin2025@126.com

## 0 引言

烟气连续排放监测系统(CEMS)作为火电厂环保达标排放监测的核心设备,其仪表测量数据的准确性直接决定了环保监管判定的有效性,同时影响着脱硫脱硝系统的运维调节精度<sup>[1]</sup>,CEMS数据失真不仅可能增加污染物超标排放的风险,还可能导致脱硫脱硝药剂的过量投加,进而造成运维成本的浪费<sup>[2]</sup>。

为解决上述问题,行业亟需探索智能化的CEMS仪表校验技术。强振峰、王雪研究小组利用高斯分布扩散模型预测气体稳态扩散时间,并通过数学方法模拟气体在气室内的扩散过程,以高斯分布形式描述气体浓度空间分布随时间的变化规律,当模型计算出气体达到“稳态扩散”(即浓度分布不再随时间显著变化)时进行测量,可避免因扩散不均匀产生的误差,从而提高浓度测量精度<sup>[3]</sup>。但该研究未考虑实际工业环境中的复杂因素(如气室结构差异、气体流速波动、温湿度变化等),导致模型在真实工业场景下的有效性缺乏充分验证。

胡璞、刘利民采用小波变换降噪、坐标投影残差补偿、灰度重心与电荷耦合消斑技术,实现了多传感器测距误差的准确补偿<sup>[4]</sup>。然而,坐标投影的非线性变换与残差补偿的拟合参数之间可能存在耦合关系,这种关系类似于等距投影与畸变校正中的参数冗余现象,可能导致优化过程陷入局部极小值,进而影响误差修正的稳定性。

王奕杰、张心茹小组采用遗传算法优化的BP神经网络构建模型,关联探测器双通道输出值、气室温度与二氧化碳浓度,实现温度补偿,校正非线性误差<sup>[5]</sup>。然而,该研究未充分考虑工业环境中除温度外的其他干扰因素,例如湿度、气压波动以及气体交叉干扰等,这些因素可能在实际应用中增大误差。

吴文杰采用双半球形双通道气体吸收腔室使光线被气体充分吸收以减小损耗,通过差分计算单波长双通道热释电探测器输出电压获取CO<sub>2</sub>浓度,再利用广义高斯径向基函数神经网络分析形状参数与辅助形状参数,实现温度补偿校正误差<sup>[6]</sup>。然而,广义高斯径向基函数神经网络仅针对特定温度和浓度条件(如2%CO<sub>2</sub>)进行了测试,未涵盖宽温域和全浓度范围,因此其泛化能力尚需进一步验证。

该研究以火电厂脱硫脱硝系统CEMS仪表为核心对象,研究火电厂脱硫脱硝系统CEMS仪表智能

校验技术,用于提升CEMS仪表测量精度,为火电厂环保达标排放及脱硫脱硝系统智能运维提供技术支持。

## 1 火电厂脱硫脱硝系统CEMS结构

火电厂脱硫脱硝系统CEMS结构如图1所示,由多参数测量单元、数据采集与控制单元、数据处理与传输单元及监管终端组成,气态污染物分析仪、温度测量仪等多类传感器以4~20 mA标准电流信号,将监测数据传输至CEMS就地PLC<sup>[7-9]</sup>,该PLC通过RS-485/232总线与PC上位机通信以实现数据本地存储、分析及打印输出,同时经硬接线连接数采仪,数采仪借助4G路由器及WCDMA/TD-SCDMA网络将标准化监测数据远传至政府环保监管平台。

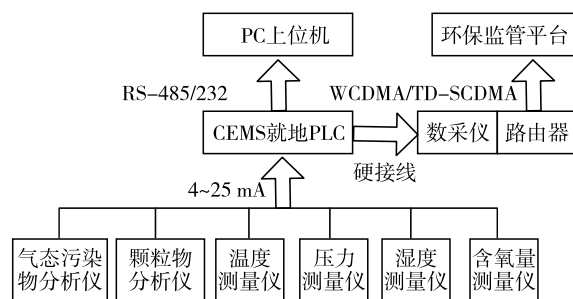


图1 火电厂脱硫脱硝系统CEMS结构图

其中气态污染物分析仪采用非分光红外气体传感器,采集SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>数据,图2是此传感器结构图。

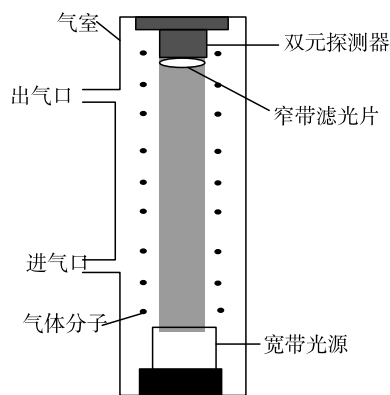


图2 非分光红外气体传感器结构图

如图2所示,在CEMS(烟气连续排放监测系统)中,针对二氧化硫(SO<sub>2</sub>)和氮氧化物(NO<sub>x</sub>)的浓度数据采集,所使用的仪表(非分光红外气体传感器)结构包括红外光源、气室以及红外探测器等组件。

基于朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律,气体对特定波长红外光的吸收遵循以下关系:

$$A(\beta) = -A_0(\beta) \exp(b(\beta) dZ) \quad (1)$$

其中： $A_0$ 、 $b$  依次代表入射光的强度与气体吸收系数； $A$ 、 $d$ 、 $Z$  依次代表透射光强度、气体体积分数、有效光程长度； $\beta$  代表波长。

正常情况下，火电厂脱硫脱硝系统 CEMS 仪表监测气体浓度与电学输出信号呈指数关系，最终可得：

$$F'_h = \frac{\ln\left(1 - \frac{\Delta u}{u_2}\right)}{bZ} \quad (2)$$

其中： $F'_h$  代表待测气体浓度，如 CEMS 中二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ ) 等气体浓度； $\Delta u$ 、 $u_2$  依次代表差分电压与参考电压。

火电厂脱硫脱硝系统 CEMS 运行环境复杂，易导致仪表监测数据出现误差，为此，该文研究融合物联网(IoT)技术的 CEMS 仪表智能校验技术实现仪表智能校验。气体浓度与差分压关系如图 3 所示。

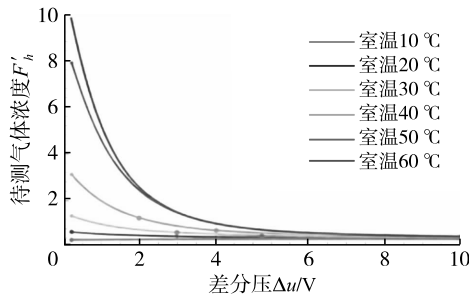


图 3 气体浓度与差分压关系图

图 3 展示了 CEMS 仪表中气体浓度与差分电压之间的非线性关系，该关系基于朗伯 - 比尔定律建立，是红外气体传感器的核心测量原理。在实际运行中，由于传感器老化、环境温湿度波动、光学元件衰减等因素，仪表输出易偏离理想曲线，导致测量偏差。图中曲线反映了未校正时仪表响应的非线性特征，是后续智能校验算法设计与偏差分析的基础依据，也为最小二乘法拟合提供了理论依据和优化目标。

## 2 融合物联网 (IoT) 技术的 CEMS 仪表智能校验技术

NB - IoT 是物联网 (IoT) 技术的核心应用<sup>[10]</sup>，该文研究融合物联网 (IoT) 技术的 CEMS 仪表智能校验技术，其技术架构如图 4 所示，所采集的 CEMS 仪表数据经采集装置以 Coap 模式传输至 NB - IoT 基站，再通过 VPDN 隧道上传至云平台，最终经 VPDN 隧道推送至接收终端，以此构建起全流程智能校验数据链路<sup>[11-13]</sup>。

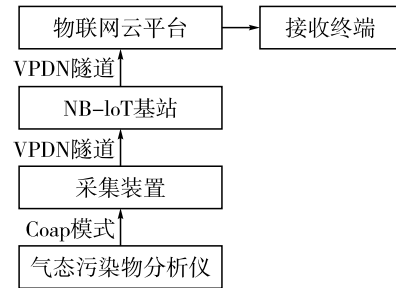


图 4 融合物联网 (IoT) 技术的 CEMS 仪表智能校验技术架构图

其中 NB - IoT 基站下的 NB - IoT 通信模块如图 5 所示。

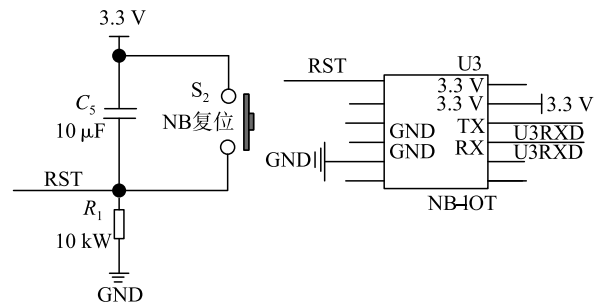


图 5 NB - IoT 通信模块图

如图 5 所示，NB - IoT 模块 U3 通过 3.3 V 供电、RST 复位及 TX/RX 串口完成数据收发，复位电路由按键  $S_2$ 、电容  $C_5$ 、电阻  $R_1$  组成以实现 NB 模块的手动复位操作，为物联网云平台数据交互提供硬件支撑。

## 3 基于数据驱动算法的 CEMS 智能校验方法

### 3.1 CEMS 仪表误差判断

基于火电厂“煤耗 - 污染物排放”的工艺逻辑，CEMS 智能校验主要为 CEMS 中用于监测二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ ) 等污染物的气态污染物分析仪进行误差校正。此仪表采集的二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ ) 数据后，通过多参数协同监测与物料平衡校验实现污染物浓度的精准监测。在监测原理上，测量火电厂脱硫脱硝系统烟气中排放的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  浓度：

$$F_{\text{SO}_2} = 2AG(R/100) \cdot (1 - (p \cdot \alpha_{\text{SO}_2})) \quad (3)$$

其中： $A$ 、 $G$  分别代表收到基耗煤量、煤燃烧时的可燃硫变成  $\text{SO}_2$  的比例； $R$ 、 $p$  分别代表燃烧用煤中硫元素的总质量占比、煤炭原本含有的热量未被充分利用而损失的比例； $\alpha_{\text{SO}_2}$  代表脱硫效率。

$$F_{\text{NO}_2} = 1.63 \cdot A \cdot (M \cdot \varepsilon + 0.0009318) \cdot (1 - \alpha_{\text{NO}_2}) \quad (4)$$

其中： $M$ 、 $\varepsilon$  分别代表煤中含氮量、 $\text{NO}_x$  转化率； $\alpha_{\text{NO}_2}$  代表脱硝效率。

CEMS 就地 PLC 计算的排放的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 浓度与 CEMS 实测的式(2) 浓度比对, 误差超 15% 则判定仪表缺陷, 需校正处理。

### 3.2 基于最小二乘法的 CEMS 仪表智能校正

最小二乘法是数据驱动算法的核心算法之一<sup>[14]</sup>, 基于最小二乘法的 CEMS 仪表智能校正方法中, 定义残差是  $\varphi_j$ :

$$\varphi_j = \gamma(y_j) - x_j \quad (5)$$

其中:  $\gamma(y_j)$  代表 CEMS 仪表校正后拟合值;  $x_j = F'_h$  代表标准源实际值, 在误差智能校正中,  $\varphi_j$  需要达最小值, 实现偏差平方和最小化:

$$\sum_{j=1}^n \varphi_j^2 = \sum_{j=1}^n [\gamma(y) (y_j) - x_j]^2 \quad (6)$$

即通过最小化偏差平方和实现 CEMS 仪表测量值与真实值的最优拟合。

针对 CEMS 仪表因硬件特性或环境干扰导致的非线性偏差<sup>[15]</sup>, 先将  $m$  个仪表测量值与标准值的非线性关系  $F_c = g(F_1, F_2, \dots, F_h, o_1, o_2, \dots, o_m)$ , 代入偏差方程,  $F_c$  代表校正后浓度,  $F_h$  代表仪表测量参数,  $o_m$  代表校正参数,  $g$  代表非线性映射关系。再在某个参考点附近, 用多项式去近似替代复杂的非线性函数, 并忽略高次项, 化简为线性形式。比如选择 4 个 SO<sub>2</sub> 标准浓度点和 1 个空白点, 表示 CEMS 仪表非线性读数  $\{F_{1SO_2}, F_{2SO_2}, \dots, F_{5SO_2}\}$ , 校正后浓度参数是  $\{F_{c1SO_2}, F_{c2SO_2}, \dots, F_{c5SO_2}\}$ 。

将初始校正参数设成  $o_{qSO_2}^0$ , 插值为  $o_j = o_{qSO_2} - o_{qSO_2}^0$  (量化校正前后的浓度变化), 设置  $y_{ij} = \frac{\partial g_j}{\partial o_{qSO_2}}$  ( $y_{ij}$  反映  $o_{qSO_2}$  变化时  $g_j$  的变化值),  $x_j = g_j - g_j^0$ ,  $\partial$ 、 $g_j^0$  表示求导与初始校正参数的非线性映射值。那么非线性关系变换成线性关系式:

$$x = y_{j1}o_1 + y_{j2}o_2 + \dots + y_{j5}o_5 = y_{ij}o_j \quad (7)$$

结合多元线性拟合公式  $x = o_0 + \sum_{i=1}^m y_{ij}o_i$ ,  $o_0$  表示初始插值。假如 CEMS 仪表第  $j$  次测量的变量值是  $y_{ij}$ , 校正后函数是  $x$ , 那么偏差平方和是:

$$r(o_i) = \sum_{i=1}^m (x_{ij} - x)^2 \quad (8)$$

求  $r(o_i)$  偏导并令其为 0, 根据线性关系式能够获取 CEMS 仪表校正参数  $o_i$ , 以此能获取校正后浓度:

$$F_c = \sum_{i=1}^m \left( \sum_{i=1}^m (y_{ij}y_{ih}) \right) o_i \quad (9)$$

其中:  $y_{ih}$  表示与  $y_{ij}$  不同批次的  $g_j$  变化值。

经多次迭代逼近, 可满足 CEMS 仪表校正精度要求, 实现测量偏差的智能优化。CEMS 仪表校正浓度迭代优化如图 6 所示。

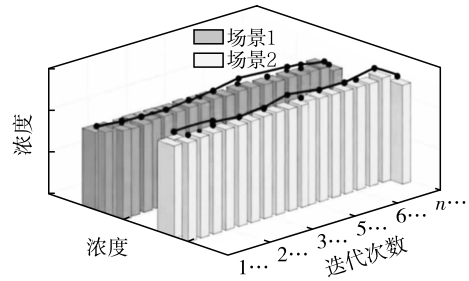


图 6 CEMS 仪表校正浓度迭代优化图

图 6 展示了基于最小二乘法的 CEMS 仪表浓度迭代优化过程, 反映了智能校验算法在多次迭代中对测量偏差的逐步修正效果。图 6 中曲线表明, 随着迭代次数增加, 仪表输出浓度逐渐逼近标准值, 残差不断减小, 最终收敛于高精度范围内。该过程体现了数据驱动算法对非线性系统的自适应拟合能力, 有效克服了传统人工校验中难以处理的复杂误差源, 为实现 CEMS 仪表长期稳定运行与无人化校验提供了关键技术支持。

## 4 实验分析

### 4.1 实验设计

选取装机容量为 600 MW 的燃煤发电厂 3 号机组脱硫脱硝系统中的 CEMS 监测点作为实验对象, 该监测点所配置的 CEMS 仪表需定期对 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 浓度开展监测与校验工作。为验证该文所提智能校验技术的有效性, 实验针对火电厂脱硫脱硝系统 CEMS 仪表展开。如图 7 所示, 将该文技术应用于 CEMS 仪表数据采集汇总分析端。将具有标准浓度的模拟烟气通入恒温恒湿气体试验箱, 调控箱内温湿度以模拟实际工况, 利用非分光红外气体传感器实时采集气体成分数据, 并传输至仪表数据采集装置; 随后通过 NB-IoT 网络将采集数据上传至 CEMS 仪表数据采集汇总分析端, 应用该文技术对数据进行智能校验与分析; 期间同步记录数据, 以系统验证该文技术的有效性。

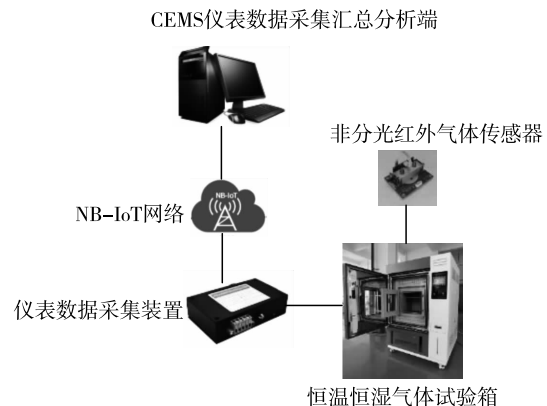


图 7 实验场景拓扑图

实验研究的非分光红外气体传感器(CEMS 仪表)为 Gasboard-3000plus 型,该仪表配备物联网通信模块,可借助 NB-LoT 网络与云端平台进行数据交互,其参数信息见表 1。

表 1 Gasboard-3000 plus 传感器参数信息

参数类型	详情
测量成分	SO <sub>2</sub> 、NO、NO <sub>2</sub> 、CO、CO <sub>2</sub> 、O <sub>2</sub>
测量技术	SO <sub>2</sub> 、NO、CO:微流红外(Micro-flow NDIR); NO <sub>2</sub> :紫外差分吸收光谱(NDUV);CO <sub>2</sub> :红外(NDIR);O <sub>2</sub> :电化学(ECD)
测量范围	SO <sub>2</sub> 、NO、CO:0-200~9999 ppm; NO <sub>2</sub> :0-200~500 ppm; CO <sub>2</sub> 、O <sub>2</sub> :0-25%
精度	≤±2.5% F. S.
分辨率	SO <sub>2</sub> 、NO、NO <sub>2</sub> :1 ppm; CO <sub>2</sub> 、O <sub>2</sub> :0.01%

#### 4.2 该文技术使用效果分析

选取 9 组不同浓度梯度的 SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 混合标准气体(浓度范围分别 50 ppm~450 ppm、80 ppm~250 ppm),依次通入恒温恒湿气体试验箱。利用该文技术驱动 CEMS 就地 PLC 功能,自动记录每组标准气体对应的校正前、后浓度,并生成如图 8 所示的智能校验界面数据记录表。经该文技术使用后,CEMS 仪表智能校验时的界面如图 8 所示。

校正记录编号	校正日期	标准浓度	校正前浓度(SO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> )	校正后浓度(SO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> )
JL-SO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> -001	2025-01-10	50ppm/80ppm	48.2ppm/77.5ppm	50.1ppm/79.8ppm
JL-SO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> -002	2025-01-10	100ppm/60ppm	97.8ppm/58.3ppm	99.9ppm/60.2ppm
JL-SO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> -003	2025-01-10	150ppm/120ppm	146.5ppm/117.2ppm	150.2ppm/119.9ppm
JL-SO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> -004	2025-01-10	200ppm/100ppm	195.7ppm/96.8ppm	199.8ppm/100.1ppm
JL-SO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> -005	2025-01-10	250ppm/150ppm	247.1ppm/147.5ppm	250.3ppm/149.8ppm
JL-SO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> -006	2025-01-10	300ppm/180ppm	296.3ppm/176.9ppm	299.9ppm/180.2ppm
JL-SO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> -007	2025-01-10	350ppm/200ppm	345.8ppm/197.3ppm	350.1ppm/199.7ppm
JL-SO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> -008	2025-01-10	400ppm/220ppm	396.5ppm/216.7ppm	399.8ppm/220.1ppm
JL-SO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> -009	2025-01-10	450ppm/250ppm	445.2ppm/246.9ppm	450.2ppm/249.9ppm

图 8 CEMS 仪表智能校验界面

从图 8 的 9 组校验数据可见,SO<sub>2</sub>校正后浓度与标准浓度的最大偏差范围为 -0.2 ppm~+0.3 ppm,NO<sub>x</sub> 最大偏差范围为 -0.3 ppm~+0.3 ppm,均处于 ±0.5 ppm 的工业级高精度要求内。以“JL-SO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub>-001”组为例,SO<sub>2</sub>标准浓度 50 ppm,校正后达 50.1 ppm,偏差仅 +0.1 ppm;NO<sub>x</sub> 标准浓度 80 ppm,校正后 79.8 ppm,偏差 -0.2 ppm,充分体现了该文技术对微量浓度偏差的精准校正能力。该文技术通过驱动 CEMS 就地 PLC 实现自动校验,规避了人工操作的误差引入,体现了技术的自动化与智能性;同时,校正前浓度与标准浓度的偏差(如 SO<sub>2</sub>校正前平均偏差 -2.1 ppm,NO<sub>x</sub> -3.2

ppm)经技术校正后大幅收敛,证明其有效解决了 CEMS 仪表的长期运行误差问题,该技术在火电厂的应用可实现 CEMS 仪表校验的无人化、标准化、高精度化。

实验中,利用该文技术搭建“CEMS 仪表-物联网云平台”通信链路,模拟火电厂实际工况下的 SO<sub>2</sub>浓度监测场景,连续采集 18 s 内的监测数据,并同时记录本地数据与云端接收数据的实时变化。实验过程中,重点观察两个关键节点:一是在 3 s 左右“与服务器通信成功”时,仪表监测数据实现同步传输;二是在 4 s 左右,当接收数据出现延迟时,分析仪监测数据传输的稳定性与延迟恢复能力,评估该文技术在物联网通信场景下 CEMS 仪表智能校验的数据传输效能。实验数据变化如图 9 所示。

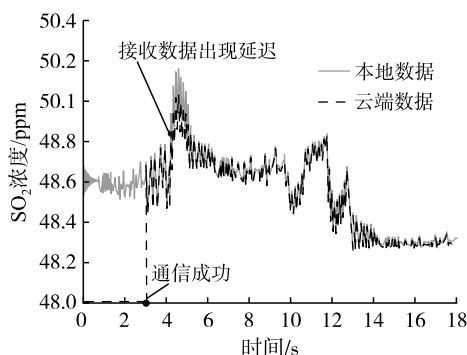


图 9 CEMS 仪表智能校验数据传输效能

分析图 9,在 3 s 左右“通信成功”节点,本地与云端数据曲线实现快速拟合。传统人工校验需在现场完成设备连接与通信调试,而该文技术借助 NB-LoT 模块的轻量化通信协议,能在 3 s 内完成“CEMS 仪表-物联网云平台”的链路注册与数据同步,将校验准备阶段的通信建立时间压缩至秒级,为远程操控的即时启动提供了关键支撑,大幅降低了现场等待成本。在 4 s 左右“云端接收数据出现延迟”的情况下,数据传输虽有瞬时波动,但云端接收数据与本地数据之间的浓度偏差 ≤0.2 ppm,且随后迅速恢复曲线拟合。火电厂厂区存在高压设备电磁干扰、多设备通信负载等复杂工况,该文技术在瞬时干扰下仍能保持数据有效性,验证了物联网链路的抗干扰能力。这一特性确保远程校验过程中,即使面临工业环境干扰,也能维持数据传输的稳定性,避免因通信波动导致校验中断或数据失真。

最后实验测试该文技术使用后,CEMS 仪表在智能校验处理后的性能,测试内容分别是零点漂移、跨度漂移(标准漂移 ≤2.5% F. S. · d<sup>-1</sup>)。测试结果如图 10 所示。

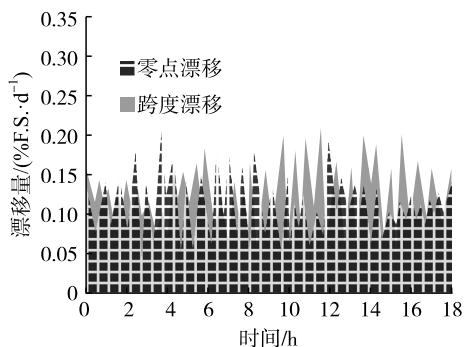


图10 零点漂移、跨度漂移测试结果

分析图10,两种漂移量的最大值均低于 $2.5\% \text{ F.S.} \cdot \text{d}^{-1}$ ,且其峰值仅约为 $0.2\% \text{ F.S.} \cdot \text{d}^{-1}$ ,远低于标准限值。由此可知,该文技术对CEMS仪表进行智能校验后,CEMS仪表的漂移性能可以得到有效控制。观察18h内的漂移曲线,整体呈现低波动特征,虽存在小幅峰值但迅速回落,这表明仪表零点在智能校验后具有良好的时间稳定性。仪表不会因环境温湿度、设备老化等因素而出现持续性、剧烈的漂移现象。测试数据的波动曲线虽存在动态变化,但处于可控范围。此外,零点与跨度漂移的变化趋势未呈现明显同步性,由此推测,该文技术可能在一定程度上分离了二者的漂移诱因,实现了针对性的精度优化。

## 5 结论

该文针对火电厂脱硫脱硝系统,开展了CEMS仪表智能校验技术研究。经实验验证与分析,其技术价值与应用成效可归纳如下:

(1)从技术落地层面看,研究搭建的NB-IoT+云平台数据传输体系,成功打破传统校验的空间限制。在600MW火电厂3号机组的实验场景中,该体系仅需3s即可完成CEMS仪表与云端的通信对接及数据同步;即便面对干扰,数据传输瞬时偏差仍能控制在0.2ppm以内,充分证明该通信架构在工业场景中的稳定性与抗干扰能力,CEMS仪表远程校验提供了可靠的硬件支撑。

(2)在数据校正效能上,研究提出的“工艺逻辑判错+最小二乘法校正”组合方案,展现出精准的误差修正能力。通过煤耗-污染物排放物料平衡公式计算理论浓度,与CEMS实测数据比对(误差超15%判定缺陷),可快速定位仪表异常;再借助最小二乘法对非线性偏差进行拟合优化,对50ppm~450ppm $\text{SO}_2$ 、80ppm~250ppm的 $\text{NO}_x$ 标准气体校验时,校正后浓度与标准值的偏差均控制在 $-0.3$

ppm~+0.3ppm区间,远优于 $\pm 0.5$ ppm的工业高精度标准,有效解决了仪表因硬件老化、温湿度波动导致的测量偏差问题。

(3)从长期运行保障角度分析,智能校验技术显著提升了CEMS仪表的稳定性。18h持续监测数据显示,仪表零点与跨度漂移峰值在 $0.2\% \text{ F.S.} \cdot \text{d}^{-1}$ 以内,该技术不仅能实现瞬时误差校正,更能通过算法优化分离零点、跨度漂移的影响因素,避免仪表因长期运行出现持续性精度下降,减少人工重复校准的频次与成本。

在实际应用价值上,该技术为火电厂环保运维开辟了“降本增效”的新路径。一方面,借助PLC自动执行校验流程,规避了人工操作带来的误差,让校验过程更加标准化且具备可追溯性,进而为环保监管平台提供真实可靠的监测数据。

### 参考文献:

- [1] 李明原,廖亚龙,葛伟童,等.处理废气脱硝脱硫的活性碳改性技术研究进展[J].化学工程,2023,51(9):1-6+13.
- [2] 张鑫,张烁,张金成.湿法脱硫烧结烟气的特点及其治理技术开发与应用[J].烧结球团,2024,49(6):155-162+170.
- [3] 强振峰,王雪,张效天.非色散红外气体传感器稳态扩散高斯分布浓度校正方法[J].仪器仪表学报,2023,44(2):138-145.
- [4] 胡璞,刘利民.基于拟合优化的多传感器测距误差残差补偿修正算法设计[J].传感技术学报,2023,36(11):1783-1787.
- [5] 王奕杰,张心茹,张磊,等.具有长光程气室的小型化NDIR气体传感器设计[J].红外与激光工程,2025,54(6):270-280.
- [6] 吴文杰.非色散红外 $\text{CO}_2$ 传感器温度补偿研究[J].激光与红外,2024,54(6):935-942.
- [7] 刘鹏举.高硫烧结烟气超低排放工艺技术选择及应用[J].烧结球团,2023,48(1):31-35.
- [8] 段钰锋,李海洋,汤红健,等.Hg-CEMS烟气预处理关键问题研究与进展[J].煤炭学报,2024,49(2):1037-1051.
- [9] 曲立涛,齐晓辉,王德鑫,等.基于CEMS数据的超低排放燃煤机组大气污染物排放特性分析[J].中国电力,2023,56(2):171-178.
- [10] 赵庆,牟怿.基于高斯混合模型的物联网通信链路异常检测[J].计算机仿真,2024,41(10):405-408+433.
- [11] 施伟国,王世峻.基于泛在物联网的电力能源工程数据智能分析处理算法[J].电子设计工程,2024,32(14):77-81.

- [12] 朱茂盛, 王宝晗, 康曼聪, 等. 智能物联网技术赋能算网一体数据库的效能优化[J]. 计算机研究与发展, 2024, 61(11): 2835 - 2845.
- [13] Deepti S, Rakesh N T, Sachin K, et al. An improved gain antenna array for telehealth monitoring on the Internet of Things platform[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(3): 3055 - 3066.
- [14] 白云飞, 罗海燕, 李志伟, 等. 基于改进的自适应迭代重加权惩罚最小二乘的空间外差拉曼光谱基线校正方法[J]. 光学学报, 2024, 44(7): 243 - 251.
- [15] 宋彧, 李卫华, 薛同站, 等. 短程硝化过程的光谱特征波段选择与间隔偏最小二乘法建模[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(8): 2224 - 2232.

## 2026 年主题征文活动通知

### 一、征文主题

智能传感器/工业自动化系统/智能测控技术/仪器仪表与系统设计应用/人工智能

### 二、征文要求

1. 稿件选题应符合上述 5 项主题, 力求新颖、有创新或独特视角, 应具学术性、前瞻性、实用性和指导性。
2. 稿件请用 Word 排版。论文模板参考本刊官网提供的投稿模板。
3. 投稿方式: 请登陆本刊刊官网 <http://yb-zdh.shaangu-group.com>, 在“作者在线投稿”中进行注册并投稿。

### 三、征文展示

1. 稿件经审核, 符合要求的论文将发表在本刊。
2. 征文活动结束后, 将评选优质论文, 获奖论文的作者将被邀请参加本刊相关活动, 并进行表彰宣传。

### 四、联系方式

联系地址: 陕西省西安市高新区沣惠南路 8 号

邮政编码: 710075

联系电话: 029 - 81871277

E-mail: [gyybbjb@126.com](mailto:gyybbjb@126.com)

《工业仪表与自动化装置》编辑部

# 欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎刊登广告!

国内邮发代号: 52 - 49 国际发行代号: BM529 定价: 18.00 元/期 108.00 元/年

地址: 西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编: 710075 电话: 029 - 81871277

网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱: [gyybbjb@126.com](mailto:gyybbjb@126.com)