

# 非色散红外 CO<sub>2</sub> 传感器温度补偿方法研究

潘甫钱<sup>1</sup>, 胡斌<sup>2</sup>, 梁晓瑜<sup>1</sup>, 俞跃<sup>2</sup>

(1. 中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029)

**摘要:**针对非色散红外 CO<sub>2</sub> 传感器受温度影响导致测量精度低的问题, 设计了单光路双通道的非色散红外 CO<sub>2</sub> 传感器, 提出一种 BP 神经网络补偿气室温度的新方法。本文分析了温度对传感器的光源、探测器以及对气体吸收系数的影响, 并将 BP 神经网络补偿气室温度方法与其他补偿方法进行了实验对比。实验结果表明, BP 神经网络补偿气室温度方法优于其他补偿方法, 在测量 10% ~ 20% 浓度范围内的 CO<sub>2</sub> 时, 最大相对误差为 2.98%, 重复性实验显示 RSD 为 1.22%, 为非色散红外 CO<sub>2</sub> 传感器补偿温度提供借鉴意义。

**关键词:**CO<sub>2</sub> 浓度; 气室温度补偿; BP 神经网络; 非色散红外

**中图分类号:**TH744; TP212 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.012

## Research on temperature compensation method of non-dispersive infrared CO<sub>2</sub> sensor

PAN Fu-qian<sup>1</sup>, HU Bin<sup>2</sup>, LIANG Xiao-yu<sup>1</sup>, YU Yue<sup>2</sup>

(1. School of Measurement and Testing Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low measurement accuracy of non-dispersive infrared CO<sub>2</sub> sensor affected by temperature, a non-dispersive infrared CO<sub>2</sub> sensor with single optical path and two channels is designed, and a new method of BP neural network compensation for gas chamber temperature is proposed. In this paper, the influence of temperature on the light source, detector and gas absorption coefficient of the sensor is analyzed, and the BP neural network compensation method for gas chamber temperature is compared experimentally with other compensation methods. The experimental results show that the BP neural network compensation method for gas chamber temperature is superior to other compensation methods. When measuring CO<sub>2</sub> in the concentration range of 10% - 20%, the maximum relative error is 2.98%, and the repeatability experiment shows an RSD of 1.22%, which provides a reference for the compensation of temperature by non-dispersive infrared CO<sub>2</sub> sensor.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> concentration; air chamber temperature compensation; BP neural network; non-dispersive infrared

### 1 引言

我国碳排放交易市场已于 2021 年 7 月份开始运营。美国规定大功率燃煤电厂必须使用在线监测法<sup>[1]</sup>, 欧盟也鼓励在大型电厂使用在线监测法。国内大部分电厂已经安装了大气污染物排放在线监

测系统, 但没有对 CO<sub>2</sub> 浓度进行监测分析, 主要采用排放因子法来计算 CO<sub>2</sub> 的排放量, 其误差较大, 成本较高<sup>[2]</sup>。

在碳排放监测中, CO<sub>2</sub> 浓度测量十分重要。CO<sub>2</sub> 浓度测量常用方法有电化学法、化学吸收法、气

**基金项目:**国家重点研发计划项目(No. 2022YFC3004504); 中国特检院青年基金项目(No. 2021 青年 09)资助。

**作者简介:**潘甫钱(1998 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为气体浓度监测。E-mail: 785389344@qq.com

**通讯作者:**俞跃, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能检测监测。E-mail: uyue@csei.org.cn

**收稿日期:**2022-08-30; **修订日期:**2022-10-10

象色谱法和光学法等,光学法中的非色散红外法(NDIR)具有成本低、响应速度快,稳定性好和精度高优点<sup>[3]</sup>,但 NDIR 传感器测量精度会受温度影响,对传感器的温度补偿至关重要。

20 世纪 70 年代,德国研制出了第一台基于红外理论的 CO 传感器<sup>[4]</sup>。由于温度会影响 NDIR 传感器的测量精度,2006 年,英国 DYNAMENT 公司研制了一款具有温度补偿功能的 CH<sub>4</sub> 传感器。近些年来,学者们纷纷开始对 NDIR 传感器的温度进行补偿,李军<sup>[5]</sup>提出了一种基于数值迭代的高温测量 CO<sub>2</sub> 浓度的气体温度补偿方法。孙亚飞等<sup>[6]</sup>采用遗传小波神经网络算法,对环境温度进行了补偿。Kim 等<sup>[7]</sup>从 NDIR 检测原理出发,对环境温度进行了补偿。Zhang 等<sup>[8]</sup>运用最小二乘法对温度进行了补偿。Xue 等<sup>[9]</sup>设计了一款非色散红外 SF<sub>6</sub> 传感器,并使用 RBF 神经网络对温度进行了补偿。Prokopiuk 等<sup>[10]</sup>通过实验数据推出校正系数,对温度和压力进行了补偿。

上述学者分析了温度对传感器的光源、探测器以及对气体吸收系数的影响,将温度作为变量,对环境温度或气体温度的影响进行了补偿,但并未开展温度对传感器性能影响的理论研究,由于现实测量中气体温度和环境温度是有所区别的,并且从上述文献实验结果可发现传感器测量值大小随温度变化趋势不一致的现象。本文系统地分析了温度对传感器性能的影响,设计了补偿耦合气体温度和环境温度的气室温度的实验方案,对比了补偿环境温度的效果和气室温度的效果,结果表明,补偿气室温度测量误差小于补偿环境温度测量误差,BP 神经网络补偿气室温度方法优于其他补偿方法。

## 2 非色散红外检测原理

不同的气体分子对光具有不同的吸收峰,气体对红外光谱的吸收遵循比尔-郎博定律(Beer-Lambert)<sup>[11]</sup>,表达式为:

$$I = I_0 \times e^{-kcl} \quad (1)$$

式中,  $I_0$  为入射光强;  $I$  为出射光强;  $l$  为光路长度;  $k$  为待测气体吸收系数;  $c$  为待测气体浓度。

由于热释电传感器输出电压信号与接收到的光信号一一相关,则可得热释电器的测量通道和输出通道输出电压分别为:

$$U_1 = K_1 \times I_0 \times e^{-kcl} \quad (2)$$

$$U_2 = K_2 \times I_0 \quad (3)$$

式中,  $K_1$ 、 $K_2$  均为比例系数;  $U_1$  为测量通道输出电压;  $U_2$  为参考通道输出电压。

根据式(2)、式(3)可以推出浓度反演公式:

$$c = \frac{\ln(K_1/K_2) - \ln(U_1/U_2)}{kl} \quad (4)$$

温度的变化会影响式(4)中  $K_1/K_2$  和  $k$  的值,从而影响传感器的反演气体浓度值。

## 3 温度的影响

### 3.1 温度对红外光源的影响

红外黑体光源的工作原理是辐射体通电后的自加热效应,使光源的辐射层发出红外光,温度会影响光源发出不同波段的光谱<sup>[12]</sup>,根据普朗克辐射定律,光源辐射能力与温度和波长的关系如式(5):

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (5)$$

式中,  $I$  为光谱透射率;  $T$  为绝对温度;  $h$  为普朗克常数;  $\lambda$  为辐射波长;  $c$  为光速;  $k_B$  为玻尔兹曼常数。

根据斯特藩-玻尔兹曼定律,一个单位面积的黑体表面在单位时间内发出的总能量为:

$$W = \int_0^\infty w_\lambda d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = \delta T^4 \quad (6)$$

式中,  $\delta$  为斯特藩-玻尔兹曼常数。

综合式(5)和式(6)可知,温度的改变会影响红外光源输出的中心波长,也会影响红外光源输出的光强,随着温度的升高,红外光源发出的光强强度变大。

### 3.2 温度对热释电器的影响

热释电效应是指温度的改变使材料两端出现电力或产生电流的现象,热释电器的噪声主要来自:温度噪声、热噪声、电压噪声和电流噪声,因为本文探究温度对热释电探测器的影响,所以只考虑温度噪声和热噪声的影响。

温度噪声电压  $\Delta V_i$  可以表示为:

$$\Delta V_i = a_v \frac{2t}{\eta} \sqrt{k_B G \Delta f} \quad (7)$$

式中,  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $a_v$  为电压响应率;  $\Delta f$  为放大器带宽;  $G$  为总热导;  $t$  为器件绝对温度;  $\eta$  为器件表面吸收率。

热噪声电压  $\Delta V_j$  可以表示为:

$$\Delta V_j = \sqrt{\frac{4k_B t \Delta f}{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad (8)$$

式中,  $R$  为总电阻;  $C$  为总电容;  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $\Delta f$  为放大器带宽;  $t$  为器件绝对温度。

从式(7)和式(8)分析, 绝对温度  $t$  的升高, 会使热释电器的热噪声和温度噪声增大, 从而影响热释电探测器的输出信号。

### 3.3 温度对气体吸收系数的影响

温度会影响气体对光的吸收程度, 温度越高, 气体对光的吸收能力越弱, 气体吸收系数  $k$  降低。

同一浓度的气体, 在不同温度下测量, 对光的吸收率不一致, 在温度高时, 气体吸收能力下降, 导致热释电器参考通道电压变大, 从而导致传感器测量值变小。

### 3.4 对以往学者所作温度补偿实验分析

从 NDIR 测量原理分析, 温度对光源和探测器的影响主要归源于影响式(4)中  $K_1/K_2$ , 温度对气体吸收系数的影响主要归源于影响式(4)中  $k$ 。根据牛萍娟<sup>[13]</sup>所作的实验情况, 温度上升会使  $K_1/K_2$  减小; 从 HITRAN 数据库可以得到气体吸收系数  $k$  与温度的关系: 随着温度的上升, 吸收系数  $k$  会减小。根据控制变量法可知, 这两种因素最终会影响传感器测得的浓度数据趋势不一致。孙亚飞<sup>[6]</sup>、牛萍娟<sup>[13]</sup>等人的实验补偿的温度主要影响光源和探测器即影响  $K_1/K_2$ , 李军<sup>[5]</sup>、Prokopiuk<sup>[10]</sup>等人的实验补偿温度主要影响气体吸收系数  $k$ , 所以出现传感器测量数据随温度变化趋势不一致的情况。

## 4 检测系统设计与实验

结合上述温度对传感器影响因素的分析, 及以往学者只考虑补偿环境温度或者气体温度的情况, 本文设计了传感器, 提出了补偿气室温度的实验方案。

### 4.1 传感器设计

本文设计了一款基于 NDIR 原理的 CO<sub>2</sub> 单光路双通道传感器, 结构如图 1 所示。由于 CO<sub>2</sub> 的吸收峰在 4.26 μm 附近, 选取 JSIR 350-4 黑体光源, 该光源出射的光的红外波长区域涵盖 4.26 μm, 热释电探测器选取 PYS3228, 该探测器的测量通道采用 4.26 μm 红外滤光片, 由于在 4 μm 波长附近, 没有气体的吸收峰, 参考通道选用 4 μm 红外滤光片, 使用 DS18B20 数字温度传感器测量气室内部温度。

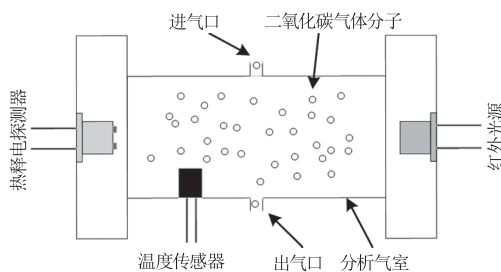


图 1 NDIR 传感器结构图

Fig. 1 NDIR sensor structure

### 4.2 硬件系统设计

图 2 为检测系统硬件框图, 其中 STM32 单片机输出的频率为 2 Hz, 占空比为 50 % 的方波经过光源驱动电路功率放大后给 NDIR 传感器的光源供电, NDIR 传感器的输出电压信号经放大滤波电路后传输给 STM32 单片机, NDIR 传感器将温度信息直接传输给 STM32 单片机。

### 4.3 温度补偿实验

考虑补偿气室内部的温度, 该温度补偿方法既耦合了温度对传感器光源和探测器的影响, 又耦合了温度对气体吸收系数的影响。电厂尾部烟道排烟温度在 60 °C 左右<sup>[14]</sup>, 所以实验方案如下: 将传感器和翅片管置于恒温箱中, 设定温度范围为 0 ~ 70 °C, 步长为 10 °C, 待温度达到设定值之后, 继续等待 30 分钟, 使翅片管和传感器充分受热。每次测量待测气体浓度之前, 先通入氮气 1 min, 去除传感器和翅片管内的杂余气体, 之后通入待测气体 5 min, 记录数据。

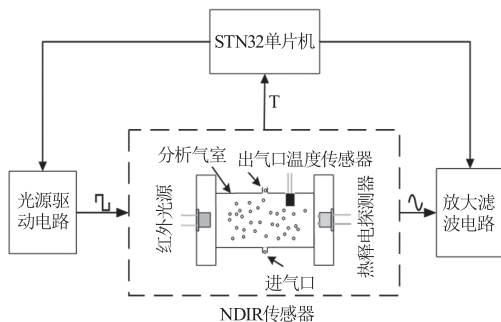


图 2 检测系统硬件框图

Fig. 2 Hardware block diagram of detection system

## 5 实验数据分析与处理

实验数据分析与处理流程如图 3 所示, 先将原始数据使用小波变化降噪, 再分别采用最小二乘法、BP 神经网络和 RBF 神经网络对温度进行补偿, 对比补偿效果后选择最合适的补偿方法。

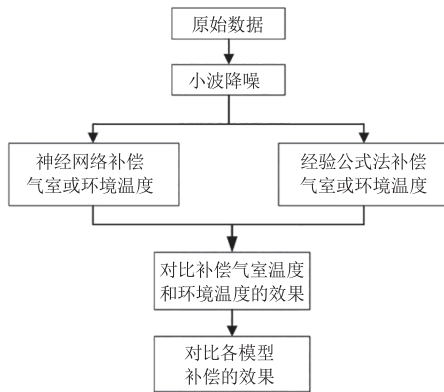


图 3 实验数据分析流程图

Fig. 3 Flow chart of experimental data analysis

### 5.1 小波变化

小波变化是一种可变分辨率的分析方法,通过伸缩和平移运算能对信号进行细化分析<sup>[15]</sup>。小波变化的核心在于构建一系列的小波框架,用于对震动信号进行滤波处理,从而实现对频谱的调幅-调频成分提取,并对提取的信号进行重构后得到滤波后的信号<sup>[16]</sup>。

本文使用 MATLAB 自带的多尺度一维小波变化,重构信号情况如图 4 所示,可以明显看到,使用小波变化后滤去了正弦波的毛刺信号,从而提高传感器测量精度。

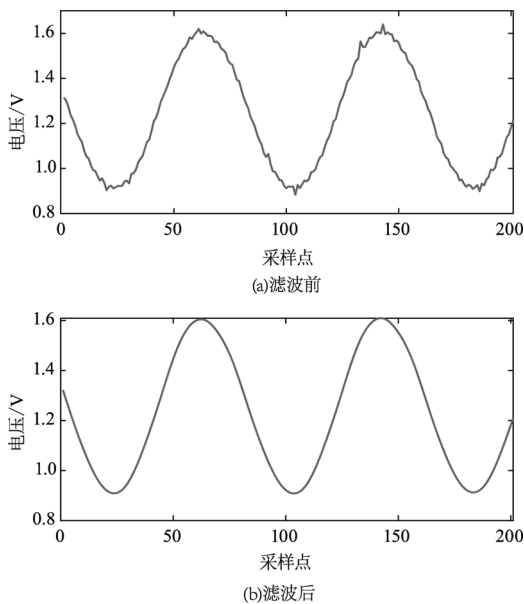


图 4 小波变化信号处理图

Fig. 4 Wavelet change signal processing diagram

### 5.2 温度补偿

根据气室内部温度 39.25 °C (环境温度 40 °C) 拟合曲线为基准,反演出各温度的输出情况如图 5 所示,随着气室温度的升高,同一浓度的气体的传感器测量值也升高。

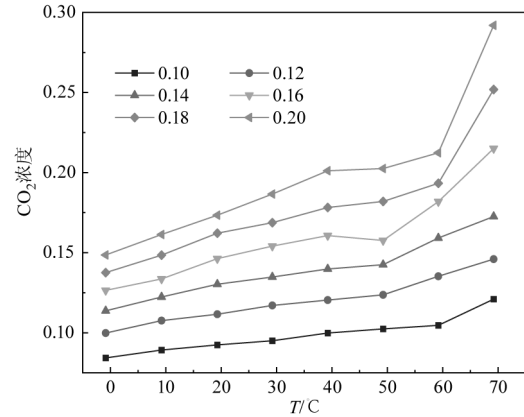


图 5 各个温度反演图

Fig. 5 Inversion diagram of each temperature

由第二章分析可知,温度对传感器测量的精度影响因素错综复杂,以往学者仅仅补偿环境温度或者气体温度的一种情况是不够的,在实际测量时,温度又是波动的,并且环境温度和气体自身温度可能不一致,简单的公式补偿或者校正因子补偿不能达到效果,需要神经网络补偿,增加系统的鲁棒性。本文使用 BP 神经网络分别对传感器测量数据进行环境温度补偿和气室温度补偿并与 Zhou 等<sup>[17]</sup>使用的最小二乘法和 Xue 等<sup>[9]</sup>使用的 RBF 神经网络补偿上述两种温度作对比。

BP 神经网络是一种信号正向传播,误差反向传播的前馈型神经网络算法<sup>[18]</sup>,利用梯度下降法对网络的权值进行调整,最后使网络模型中的每一组数据都能达到理想输出的情况。BP 神经网络主要包含输入层,隐含层和输出层,如图 6 所示。

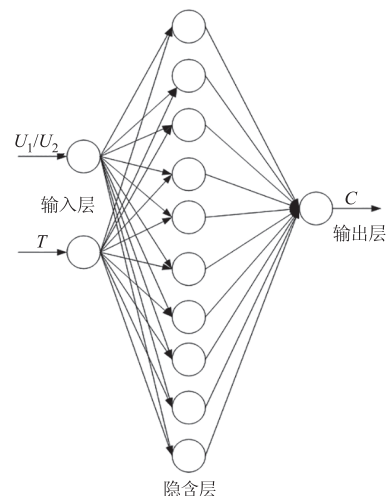


图 6 神经网络结构图

Fig. 6 Neural network structure diagram

使用神经网络进行补偿的具体步骤如下:

- 1) 导入训练数据,以测量通道电压与参考通道

的电压比值  $U_1/U_2$  和温度  $T$  为输入层的数据, CO<sub>2</sub> 浓度  $C$  为输出层的数据。

2) 构建 BP 神经网络模型, 输入层个数为  $x$ , 输出层为  $y$ ,  $a$  为 1 至 10 之间的常数, 隐含层神经元个数  $b$  可通过如下公式计算:

$$b = \sqrt{x + y} + a \quad (9)$$

传递函数为  $\text{tansig}()$  函数, 训练函数为  $\text{trainbr}$ , 设置学习效率为 0.001, 其余参数均为默认值。

3) 用样本数据对神经网络进行训练。

4) 对不同隐含层神经元个数进行测试, 选取最佳神经网络模型。

以补偿环境温度数据为例, 经过反复训练和测试, 当隐含层节点个数为 10 时, 平均绝对误差, 均方根误差和补偿后数据的相对误差最小。设定隐含层节点数为 10, 其余参数均一致, 分别对环境温度补偿数据和气室温度补偿数据进行训练, 记录每次训练之后的平均绝对误差 (MAE), 均方根误差 (RMSE) 和相关系数 ( $R^2$ ), 总计 10 次。训练后的每个神经网络的 MAE, RMSE 和  $R^2$  情况如图 7 所示, 在这 10 次中有 7 次补偿环境温度的 MAE 大于补偿气室温度的平均绝对误差, 9 次补偿环境温度的 RMSE 大于补偿气室的均方根误差, 9 次补偿环境温度的  $R^2$  小于或等于补偿气室温度的相关系数。

综合 MAE、RMSE 和  $R^2$  考虑, 分别选择最好的 BP 神经网络气室温度补偿模型、BP 神经网络环境温度补偿模型、RBF 神经网络气室温度补偿模型、RBF 神经网络环境温度补偿模型 (RBF 神经网络的训练过程不再赘述, 当径向基函数的扩展速度为 1, 其余均为默认值为本文最好模型) 最小二乘法补偿气室温度模型和最小二乘法补偿环境温度模型, 对环境温度为 60 °C, 气室温度为 59.22 °C, 的测量数据进行预测 (电厂尾部烟道排烟温度在 60 °C 左右<sup>[14]</sup>), 预测结果如图 8 所示, 上述各方法和未补偿情况的 MAE 如图 9 所示, 从左往右看, 第一个点代表未补偿情况; 第二个点代表 BP 神经网络气室温度补偿模型; 第三个点代表 BP 神经网络环境补偿模型; 第四个点代表 RBF 补偿气室温度模型; 第五个点代表 RBF 补偿环境温度模型; 第六个点代表最小二乘法补偿气室温度模型; 第七个点代表最小二乘法补偿环境温度模型。综合图 7、图 8 和

图 9 分析可知, BP 神经网络补偿、RBF 神经网络补偿和最小二乘法补偿在一定程度上都能减小温度对测量造成的误差; 任意一种补偿方法的气室温度补偿模型效果要好于环境温度补偿模型; 在本文所使用的模型中, BP 神经网络补偿气室温度是最佳补偿模型, 在该模型下, 补偿数据最大的相对误差为 2.14 %。

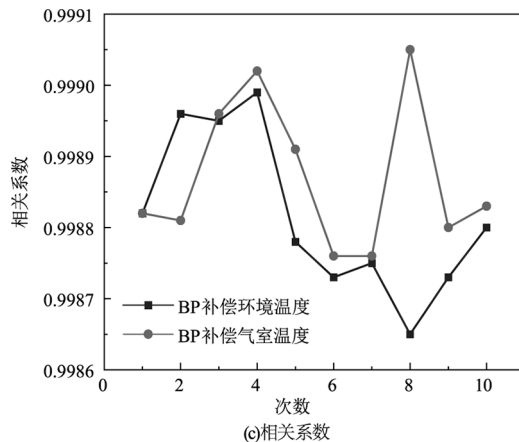
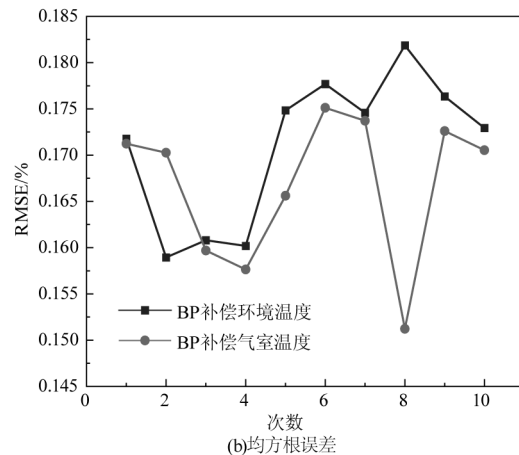
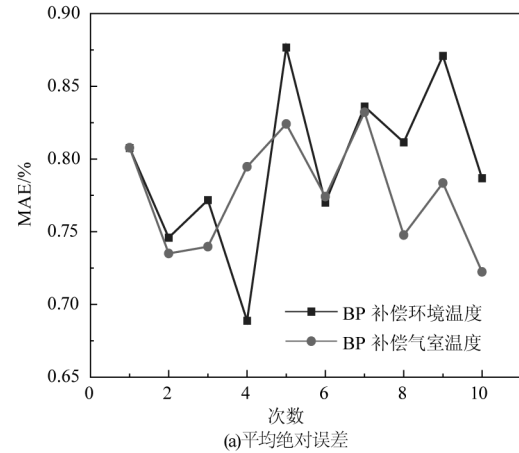


图 7 BP 神经网络补偿环境和气室温度各参数对比图  
Fig. 7 Comparison diagram of parameters of BP neural network compensation environment and air chamber temperature

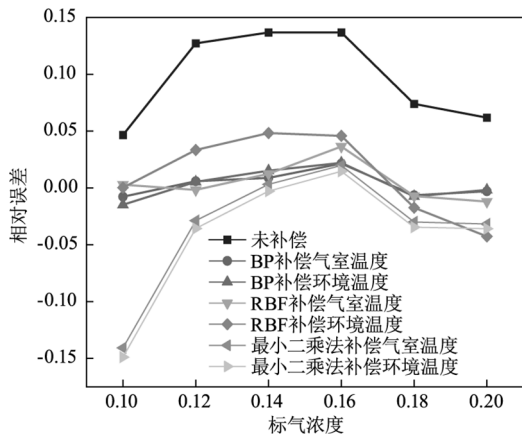


图 8 环境温度 60 °C (气室温度 59.22 °C) 时测量数据不同模型预测图

Fig. 8 Prediction diagram of different models for measured data at ambient temperature of 60 °C (air chamber temperature of 59.22 °C)

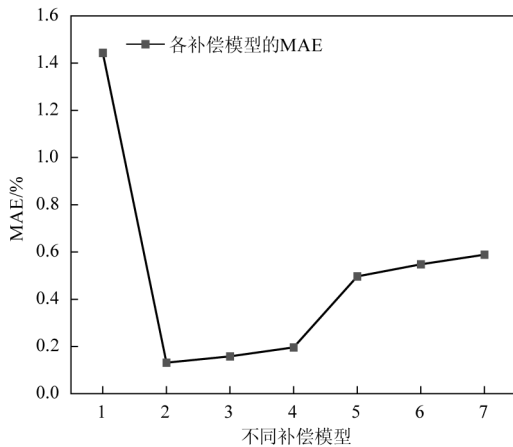


图 9 不同模型 MAE 对比图

Fig. 9 Mae comparison diagram of average absolute error of different models

选取最优的补偿模型后,对测试集中数据(即图 5 中的数据)进行补偿,补偿结果如图 10,与图 5

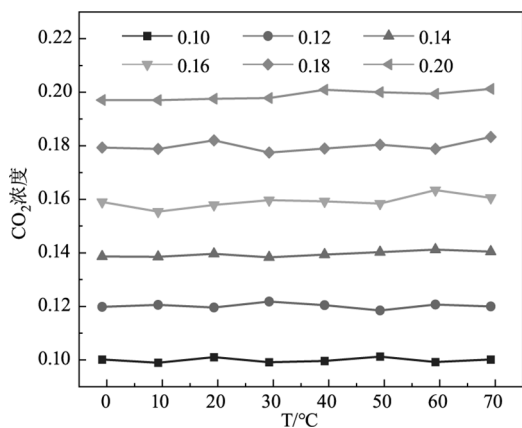


图 10 BP 神经网络补偿气室温度后的情况

Fig. 10 BP neural network compensates the temperature of air chamber

相比,该模型有效的对气室温度进行了补偿,测试集补偿的最大相对误差为 2.87 %,补偿误差曲线如图 11 所示。

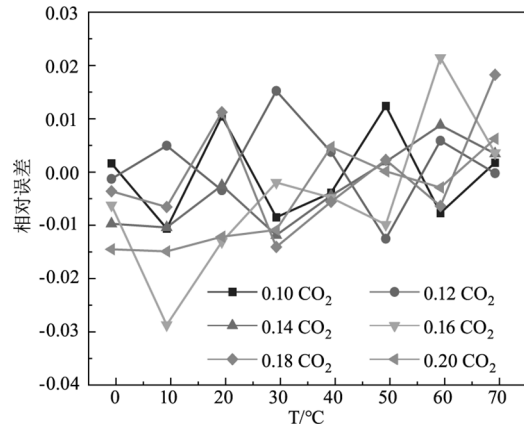


图 11 BP 神经网络补偿气室温度后误差图

Fig. 11 Error diagram of air chamber temperature compensated by BP neural network

并使用 BP 神经网络补偿气室温度模型对气室温度为 25.38 °C,浓度为 16 % 的 CO<sub>2</sub> 测量数据进行预测,预测结果如图 12 所示,经计算未补偿数据的最大相对误差为 -4.38 %,而补偿后的最大相对误差为 2.98 %,说明该补偿模型具有一定的鲁棒性,并能提高传感器的测量精度。

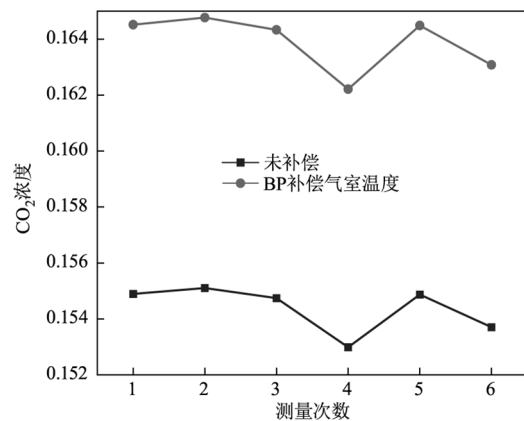


图 12 环境温度 25 °C (气室温度 25.38 °C) 时测量浓度为 0.16 的 BP 神经网络补偿气室温度模型预测图

Fig. 12 Prediction diagram of BP neural network compensated air chamber temperature model with a measured concentration of 0.16 at ambient temperature of 25 °C (Air Chamber Temperature of 25.38 °C)

### 5.3 重复性

根据目标传感器的测量范围,通入测量气体满量程 60 % 的气体<sup>[19]</sup>,即标准气体 16 % 的 CO<sub>2</sub>,以气室温度 39.25 °C 为例,重复测量 5 次,重复性以单次测量的相对标准偏差表示,见式 (10):

$$RSD = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - c)^2}{n - 1}} \times 100 \% \quad (10)$$

式中,  $c$  为测量平均值;  $c_i$  为第  $i$  次测量的值;  $n$  为测量次数;  $RSD$  计算结果见表 1,  $RSD = 1.22\%$ , 小于  $3\%$ , 表明重复性良好。

表 1 RSD 计算结果

Tab.1 RSD calculation results

检测次数	传感器测量值/%
1	16.09
2	16.06
3	16.19
4	15.74
5	16.24
平均浓度	16.06
RSD	1.22

本文设计的 NDIR 传感器经过 BP 神经网络补偿气室温度后, 在  $10 \sim 20\%$  的 CO<sub>2</sub> 浓度范围内, 最大相对误差为  $2.98\%$ , 重复性实验显示  $RSD$  为  $1.22\%$ 。

## 6 结 论

本文分析了温度对非色散红外传感器的红外光源、热释电探测器以及对气体吸收系数的影响, 分析了前人所作温度补偿实验传感器测得值随温度变化趋势不一致的现象的原因, 提出了气室温度补偿实验方案。利用 BP 神经网络、RBF 神经网络和最小二乘法分别对环境温度和传感器气室温度进行补偿, 结果表明补偿气室温度效果要好于补偿环境温度, BP 神经网络补偿气室温度是最佳补偿模型, 经 BP 神经网络气室温度补偿后, 传感器测量最大误差为  $2.98\%$ , 重复性实验显示  $RSD$  为  $1.22\%$ , 提高了 NDIR 传感器的测量精度, 为非色散红外 CO<sub>2</sub> 传感器补偿温度提供借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] Plain English Guide to the Part75 Rule[C]//U. S. Environmental Protection Agency Clear Air Markets Division, 2009.
- [2] Wang Muhan, Zhu Lin, Zhang Jingjie, et al. Practice of quality assurance system of carbon dioxide emission online monitoring system in the european union[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 154 - 158, 176. (in Chinese)
- [3] Zhang Ning, Zhang Zihe, Kang Lei, et al. A review on the methods for the detection of CO<sub>2</sub> emission from stationary sources[J]. Journal of EMCC, 2016, 26(6): 60 - 62, 85. (in Chinese)
- [4] 张宁, 张紫禾, 康磊, 等. 固定排放源 CO<sub>2</sub> 排放检测方法综述[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2016, 26(6): 60 - 62, 85.
- [5] Smith E. Non-dispersive infrared gas analysis has benefited from technical development in recent years[J]. Laboratory Practice, 1992, 41(12): 15 - 16.
- [6] Li Jun. High-temperature compensation method for non-dispersive infrared carbon dioxide based on numerical iteration[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017, (4): 104 - 106. (in Chinese)
- [7] 李军. 基于数值迭代的非色散红外二氧化碳高温补偿方法[J]. 仪表技术与传感器, 2017, (4): 104 - 106.
- [8] Sun Yafei, Gu Fang, Huang Yalei, et al. Research on infrared CO<sub>2</sub> gas sensor system with temperature compensation based on GA - WNN[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(10): 1613 - 1620. (in Chinese)
- [9] 孙亚飞, 顾芳, 黄亚磊, 等. 基于 GA - WNN 温度补偿的红外 CO<sub>2</sub> 气体传感器系统研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(10): 1613 - 1620.
- [10] Kim J, Lee K, Yi S. NDIR ethanol gas sensor with two elliptical optical structures [J]. Procedia Engineering, 2016, 168: 359 - 362.
- [11] Zhang Y, Jiang P, Cao W, et al. High-sensitivity ethylene gas sensor based on NDIR and dual-channel lock-in amplifier[J]. Optik, 2020, 223: 165630.
- [12] Xue Yu, Chang Jianhua, Xu Xi. Non-dispersive infrared SF<sub>6</sub> gas sensor based on RBF neural network [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7): 176 - 181. (in Chinese)
- [13] 薛宇, 常建华, 徐曦. 基于 RBF 神经网络的非色散红外 SF<sub>6</sub> 气体传感器 [J]. 光子学报, 2016, 45(7): 176 - 181.
- [14] Prokopiuk A, Bielecki Z, Wojtas J. Improving the accuracy of the NDIR based CO<sub>2</sub> sensor for breath analysis [J]. Metrol. Meas. Syst., 2021, 28(4): 10.
- [15] Wang H, Wang J, Ma X, et al. Note: a NDIR instrument for multicomponent gas detection using the galvanometer modulation [J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(11): 116103.

- [12] Yang Jing, Li Xiaofei, Li Zhongzhou, et al. A new design of MEMS infrared source for CO<sub>2</sub> gas sensor[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(5): 635 - 640. (in Chinese)  
杨靖, 李小飞, 李中洲, 等. 一种用于 CO<sub>2</sub> 气体传感器的新型 MEMS 红外光源[J]. *半导体光电*, 2021, 42(5): 635 - 640.
- [13] Niu Pingjuan, Cheng Zheng, Tian Haitao, et al. Research on temperature compensation model of non-dispersive infrared CO<sub>2</sub> sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019, (8): 17 - 20. (in Chinese)  
牛萍娟, 程峥, 田海涛, 等. 非色散红外 CO<sub>2</sub> 传感器温度补偿模型研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2019, (8): 17 - 20.
- [14] Li Zhenghui, Yao Shunchun, Lu Weiye, et al. Study on temperature correction method of CO<sub>2</sub> measurement by TDLAS[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(7): 2048 - 2053. (in Chinese)  
李峥辉, 姚顺春, 卢伟业, 等. TDLAS 测量 CO<sub>2</sub> 的温度影响修正方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7): 2048 - 2053.
- [15] Liu Haitao. Ordering analysis of non-stationary exhaust noise signals based on wavelet transform[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(22): 29 - 35, 51. (in Chinese)  
刘海涛. 基于小波变换的非平稳排气噪声信号阶次分析方法[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(22): 29 - 35, 51.
- [16] Liu Shiming, Guo Shiwei. Analysis on fault signal of rolling bearings based on FK adaptive boundary segmentation empirical wavelet transform[J]. *Bearing*, 2021(11): 59 - 64. (in Chinese)  
刘士铭, 郭世伟. 基于 FK 自适应边界分割经验小波变换的滚动轴承故障信号分析[J]. *轴承*, 2021(11): 59 - 64.
- [17] Zhou L, He Y, Zhang Q, et al. Carbon dioxide sensor module based on NDIR technology[J]. *Micromachines*, 2021, 12(7): 845.
- [18] Yuan Jianhua, Xie Binbin, He Baolin, et al. Short term forecasting method of photovoltaic output based on DTW-VMD-PSO-BP[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2022, 43(8): 58 - 66. (in Chinese)  
袁建华, 谢斌斌, 何宝林, 等. 基于 DTW-VMD-PSO-BP 的光伏出力短期预测方法[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(8): 58 - 66.
- [19] Zhang Shiling, Li Jingwei. Research on CF<sub>4</sub> gas detection method in GIS gas chamber based on NDIR technology[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(7): 158 - 164. (in Chinese)  
张施令, 李京伟. 基于 NDIR 技术的高压组合电器中 CF<sub>4</sub> 气体检测方法研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(7): 158 - 164.