

Fast Calibration Algorithm for NDIR Single-Channel CO₂ Gas Sensor Based on Surface Fitting*

CHEN Kaiyan¹, ZHU Bincheng², MAO Keji^{2*}

(1. School of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310023, China;

2. School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310023, China)

Abstract: In order to improve the calibration efficiency of non-dispersion infrared (Non-Dispersion Infrared, NDIR) carbon dioxide (CO₂) gas sensor, an efficient and fast calibration algorithm for NDIR single-channel CO₂ gas sensor is proposed. First, we collect the corresponding voltage values of m sensor nodes at different temperatures and different concentrations. Then for each node, we perform surface fitting on its data points (temperature, concentration, output voltage), and use the fitted surface as a candidate surface. At last, we measure the 6 output voltage data points of the sensor to be calibrated at different temperatures and different concentrations, and select a curved surface that best matches these 6 data points as the calibration surface of the sensor to be calibrated. The experimental results show that the calibration accuracy and reliability of the algorithm are high. The pass rate of the algorithm calibration reaches 99% according to the accuracy of $5\%+50\times 10^{-6}$.

Key words: CO₂; gas sensor; NDIR; calibration algorithm; surface fitting

EEACC: 7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2021.01.016

基于曲面拟合的 NDIR 单通道 CO₂ 气体传感器快速标定算法*

陈凯彦¹, 朱斌成², 毛科技^{2*}

(1. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 为了提高非色散红外 (NDIR, Non-Dispersion Infrared) 二氧化碳 (CO₂) 气体传感器的标定效率, 提出一种针对 NDIR 单通道 CO₂ 气体传感器的高效快速标定算法。首先采集 m 个传感器节点在不同温度、不同浓度下对应的电压值; 然后对于每个节点, 将它的节点 (温度, 浓度, 输出电压) 进行曲面拟合, 拟合后的曲面作为候选曲面; 测量待标定传感器的 6 个在不同温度、不同浓度下对应的输出电压数据点, 选择一个与这 6 个数据点最优匹配的曲面, 以此作为待标定传感器的标定曲面。实验结果表明, 算法标定准确性和可靠性高, 按照 $5\%+50\times 10^{-6}$ 的精度, 算法标定的数据合格率达到 99%。

关键词: CO₂; 气体传感器; NDIR; 标定算法; 曲面拟合

中图分类号: TH744

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2021)01-0103-06

二氧化碳 (CO₂) 是环境大气以及燃烧废气的主要成分, 同时也是重要的化工原料, 在农业、工业、环境监测、卫生防疫及宇航生保等领域都需要对 CO₂ 气体浓度进行高灵敏度检测^[1]。二氧化碳浓度检测主要使用 CO₂ 气体传感器。随着环境保护、卫生防疫、国防科研、能源化工、医疗诊断等领域科技的高速发展, 传统的 CO₂ 气体传感器检测方法已经无法满足前沿领域对 CO₂ 浓度检测的需求^[2]。如何在降低检测成本的同时, 提高 CO₂ 气体传感器的测量精确度, 无

疑具有相当重要的研究意义和应用价值。

检测 CO₂ 气体的传感器有气相色谱分析仪传感器、固态电解质传感器、电化学式传感器、催化燃烧式传感器、半导体传感器等^[3], 相较于这些气体传感器, 红外吸收光谱式传感器优点较为明显, 具有测量范围大、选择性好、响应灵敏度高、抗干扰能力强、准确性高等特点^[4]。红外吸收光谱式传感器需要先分离出特定波长的红外光, 分光方法可分为滤光片法和棱镜法。其中棱镜法由于需要机械转动,

项目来源: 国家自然科学基金项目 (61872322); 浙江省公益性技术应用研究计划项目 (LGG18F020018, LGG18F030012)

收稿日期: 2020-12-30 修改日期: 2021-01-26

并不适用于便携式或现场式仪器,因此这些场合滤光片法是首选。滤光片法不能将红外光波长分为单波长,因此也称为非色散红外检测法,即 NDIR (Non-Dispersion Infrared)^[5]。基于 NDIR 技术的 CO₂ 气体传感器具有设计简单,便携性好,维护成本低,使用寿命长等优点,在 CO₂ 的气体浓度检测中得到了广泛应用。根据红外探测器通道数,非色散红外 CO₂ 气体传感器可分为单通道和双通道两种,单通道传感器设计简单,成本低,应用场景比较广。本文主要针对 NDIR 单通道 CO₂ 气体传感器提出一种准确性和可靠性高的快速标定算法。

CO₂ 气体传感器在使用之前需要进行传感器的标定。传感器的标定是指通过传感器的测量试验,建立传感器输出电压与气体浓度之间的关系式。然而,除了 CO₂ 气体浓度本身,温度,压强,以及传感器的制作材料、工艺等都会对传感器的输出电压有影响,导致传感器测量的浓度值与真实值存在一定的偏差^[6]。对传感器进行标定,以保证测量的准确性,对于 CO₂ 气体浓度的准确检测来说十分重要。但是,传感器标定的高准确性往往需要较复杂的算法和较高的时间成本和人力物力成本。因此,如何既高效又准确地对气体传感器进行标定具有非常现实的意义。文献[7]利用红外吸收原理研制了测量 CO₂ 浓度的测试仪,对固定浓度的 CO₂ 气体(标气瓶)进行检测,并对测得的数据进行函数关系拟合,由此得到 CO₂ 浓度与探测信号之间的关系式。但由于过少的数据难以保证拟合曲线的连续性,而为得到大量数据不仅费时,且需要采购大量标准浓度的气体,花费的成本较大。文献[8]采用参考标定法,利用一个现有的气体传感器来对设计的气体传感器进行标定,但由于所参考的气体传感器本身存在误差,影响了标定的精度。文献[9]针对 NDIR 分析仪测量 CO₂ 浓度,考虑到气体间交叉干扰,压强和温度对测量结果的影响,介绍了一种修正这些影响的方法,该方法虽然减小了测量误差,但该方法标定效率较低。文献[10]针对温度变化对红外 CO₂ 气体传感器测量的影响,提出了一种基于 L-M 贝叶斯正则化 BP 神经网络进行温度补偿的方法,该方法算法复杂,过程繁琐。

总体来说,国内红外 CO₂ 气体传感器技术虽然有了一定的发展,但由于研究起步较晚,与国外红外 CO₂ 气体传感器领域还有较大的差距^[11-12]。目前的传感器标定算法普遍存在着标定算法复杂,标定效率低,精度不高等问题^[13]。采用高效准确的标定算法是确保红外 CO₂ 传感器测量成效的关键一步,

为此针对 NDIR 单通道 CO₂ 气体传感器提出了一种基于曲面拟合的快速标定算法。实验表明,该算法在保证精度的情况下,具有标定速度快,简单便捷,高效低成本的特点。

1 红外气体传感原理

红外气体传感原理是基于不同气体分子的红外光谱选择吸收特性,利用气体浓度与吸收强度关系来确定气体的浓度。红外吸收式传感器结构如图 1 所示,主要包括红外光源,吸收池,滤光片等。

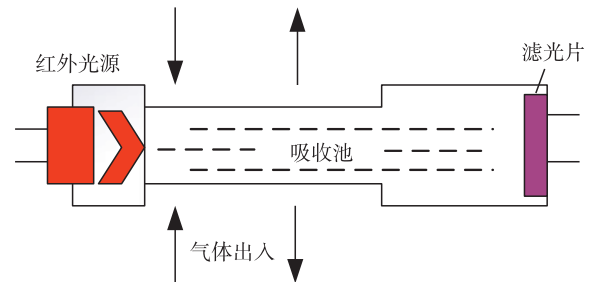


图 1 红外吸收式传感器结构示意图

红外光子的能量与辐射频率具有对应关系,如式(1):

$$E = h\nu \quad (1)$$

式中: E 为红外光子能量, h 为普朗克常量, ν 为频率。

分子结构内部的运动状态决定着分子的能量^[14]。气体分子在接受红外光照射时,吸收红外光辐射能量,引发分子结构内部的振动和转动,从而改变分子运动状态。分子的能级相应地发生变化,产生分子光谱。当红外光子的能量与气体能级差相一致时,引发强烈的吸收,如式(2)所示:

$$E_1 - E_2 = h\nu \quad (2)$$

式中: E_1 和 E_2 为跃迁前后的能级能量。

不同的分子吸收不同波长的红外光进行能级的跃迁,不同能级之间的跃迁吸收的能量不同。某种气体只能吸收一定波长的光。朗伯-比尔定律是光吸收的基本定律,是气体传感技术的理论依据^[15]。红外光照射于吸收介质,在通过一定厚度的介质后,介质吸收了一部分光能,红外光的强度减弱。吸收介质的浓度越大,介质的厚度越大,光强度的减弱就越显著。朗伯-比尔定律示意图如图 2 所示。

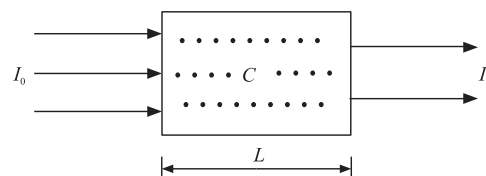


图 2 朗伯-比尔定律示意图

其公式表述如下:

$$I = I_0 e^{-KCL} \quad (3)$$

式中: I_0 为红外辐射的初始能量; I 为红外辐射通过被测气体后的光强; C 为被测气体的浓度; L 为红外辐射通过气体层的厚度; K 为吸收系数,该系数取决于被测气体的吸收谱线。

从理论上来说,通过测量获取红外辐射的初始能量 I_0 和红外辐射被气体吸收后的能量 I ,就能检测出气体浓度 C 。实际应用中,由于光源的发射强度的峰值所处的波段会变化, I_0 较难精确测定,气体吸收系数 K 也与滤光片的中心波长相关;同时,传感器的性能也会受到气体压强和环境温度的影响。因此,将朗伯-比尔定律直接应用到实际的测试中并不现实,需要采取一定的方法来消除这些不可控因素。

在实际操作中,利用数据反演理论,对朗伯-比尔定律进行修正。测试数据采集中,采集到的信号是与光强信号呈一定比例关系的电压信号。利用采集的电压值,计算出电压信号与光强信号的比值,由此获取吸光度。根据数据反演理论,对多组标准气体进行传感器标定,拟合出反映 CO₂ 气体浓度和吸光度关系的多项式函数。然后,利用所获取的气体吸光度,再根据函数反演理论,推算出被测 CO₂ 气体的浓度值。

2 快速标定算法的设计

在实际应用中,基于 NDIR 的 CO₂ 传感器测量的精度受到温度、压力、气体交叉干扰等影响^[16],其中,受温度因素干扰的影响程度最大。因此,针对不同温度条件进行 CO₂ 传感器标定十分重要。

标定算法的总体思路如下:对传感器施加一定浓度的气体,通过 A/D 转换使每个测量值以不同的电压值输出;对传感器输出的电压值数据处理后,将测量气体的标定浓度与其对应的温度及输出电压进行曲面拟合,得到拟合系数,从而确定 CO₂ 气体传感器输出与输入的关系。

主要步骤如下:

步骤 1 取 N 个没有经过校准的传感器节点,对其中每个节点,采集 m 个不同环境温度、不同 CO₂ 浓度下的传感节点输出电压值, N 的取值越大可得到越多的候选拟合曲面, m 取值越大可得到越精确的拟合曲面。同时,这两个参数越大,也会消耗越多的采集时间与成本。

步骤 2 对上述获得每个传感器的 m 个传感节点电压值进行归一化处理,归一化的公式为式(4),经过归一化处理后的数据范围属于 $[0, 1]$;

$$X^* = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

式中: X^* 为经过归一化处理后的数据, X 为传感节点的某个环境温度、某个 CO₂ 浓度下的输出电压, X_{\max} 为 m 个传感节点的所有输出电压中的最大值, X_{\min} 为 m 个传感节点的所有输出电压中的最小值,归一化处理是为了数据被限定在一定范围内,消除奇异样本数据的影响。

步骤 3 对每个传感器节点,使用其 m 个数据点,进行曲面拟合,曲面拟合函数为式(5)。

$$C = f(U, T) \quad (5)$$

式中: U 表示节点输出电压值的归一化值, T 表示环境温度, C 表示二氧化碳浓度。

步骤 4 对一个新生产的待标定的传感器节点,针对 3 个温度,测量每个温度下 2 个 CO₂ 浓度点所对应的节点输出电压,共得到 6 个数据点。

步骤 5 对 N 个上述的拟合曲面(即拟合函数中的每一个),分别进行如下操作:将每个数据点的温度和输出电压的归一化值作为模型的输入值,得到模型输出值,计算该输出值与该数据点 CO₂ 浓度的差值,最终根据这 6 个差值计算得到它们的绝对值之和。

步骤 6 在 N 个上述的拟合曲面中,挑选出绝对值之和最小的那个拟合曲面,作为该节点的 CO₂ 浓度估计模型。

3 标定试验与标定结果分析

3.1 标定试验与结果

浓度标定的目的是获得不同温度 T ,不同浓度 C 下的模组输出的电压 AD 值 U ,即获得 (T, C, U) 组。为了得到不同温度条件下的实验数据,需要使用能够对温度进行定量调节和控制的实验设备。本实验采用气体温度标定箱进行温度标定,利用 CO₂ 气体标气瓶,瓶中的混合气为氮气,采用性能良好的 CO₂ 气体传感器样品进行测试实验。实验采用了 400×10^{-6} , 450×10^{-6} , 500×10^{-6} , $1\ 000 \times 10^{-6}$, $1\ 500 \times 10^{-6}$, $2\ 000 \times 10^{-6}$ 浓度的标准 CO₂ 气体,在气体温度标定箱内做测试实验,温度控制在 $0\ ^\circ\text{C} \sim 48\ ^\circ\text{C}$ 范围内,每隔一定温度作为测试点,采集测试节点在不同温度和不同浓度下传感器模组输出 AD 值的变化,利用采集的数据采用曲面拟合的方法来进行浓度值预测。标定步骤如下:

①设定温度。首先将传感器样机放入气体温度标定箱内,将气体温度标定箱温度设定为一个温度值后,等待温度环境恒定 1 h。

②添加气体。打开 CO₂ 标气瓶,通入气体,等待 3 min,直至气室内充满标准浓度的气体。

③记录下装置测量通道的 AD 值,腔内温度值 T 。

④重复以上步骤,改变温度箱设置,在 0 °C ~ 48 °C 范围内每隔一定温度作为测试点,并记录实验结果。

⑤改变气体浓度,重复 1 至 4 步的过程,测试并记录实验结果。

⑥整理试验数据,计算拟合系数矩阵,分析性能指标,确定标定算法的精度。

实验共采集了 67 个待标定的传感器节点在不同温度,不同浓度下对应的 AD 值,每个待标定的传感器分别测得 184 个 AD 值。将采集到的不同温度,不同浓度下的 AD 值整理成 Excel 数据表格,如表 1 所示(表 1 中只列了浓度 400×10^{-6} 时部分数据)。由于输出电压只与腔内温度有关,表中温度采用的是传感器的腔内温度。每个传感器对应一张 Excel 数据表。

表 1 拟合数据

序号	浓度/(10^{-6})	腔内温度/°C	AD 值
1	400	3.8	40 985
2	400	4.7	41 069
3	400	5.8	41 170
4	400	6.9	41 250
5	400	7.9	41 332
6	400	9.0	41 404
7	400	10.0	41 470
...

实验使用 MATLAB 进行加权最小二乘法曲面拟合,所使用参数如下表 2 所示,采用双 5 次系数 (poly55) 拟合曲面:

表 2 拟合参数

```
[ xData, yData, zData ] = prepareSurfaceData( AD, T, C );
% Set up fitype and options.
ft = fitype( 'poly55' );
opts = fitoptions( 'Method', 'LinearLeastSquares' );
opts.Normalize = 'on';
opts.Robust = 'Bisquare'; % 加权最小二乘法
% Fit model to data.
[ fitresult, gof ] = fit( [ xData, yData ], zData, ft, opts );
```

由于标准曲面所涉及的浓度范围一般较宽,而样品测试的绝对误差往往又随浓度的增大而增大,如果以普通最小二乘法加以拟合,则会导致标准曲面在高浓度区域内精确度较高,而在低浓度区域内准确性明显下降。标准曲面侧重的是相对误差而不是绝对误

差,不同浓度区域内的相对误差和绝对误差通常情况下不成比例,比如浓度在 100×10^{-6} 时, 1×10^{-6} 的误差仅使其相对误差达到 1%,而当浓度为 1×10^{-6} ,相对误差则达到了 100%。因此,为了保证曲面精度,需要在拟合时对低浓度数据给予较高的权重。

拟合后的系数存于表格中,每行代表一个平面的方程系数。另外,每行数据也保存了拟合的均方根 (Rmse), 确定系数 (Rsquare) 等评价价值。每行系数确定了一个如图 3 所示的拟合曲面。

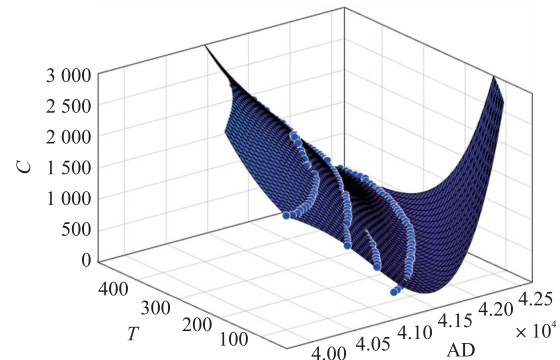


图 3 拟合后的曲面示意图

67 行拟合系数对应 67 个曲面,将这些拟合曲面作为候选曲面。实验中,对一个新生产的待标定的传感器节点,针对 3 个箱内温度(试验中采用了 5 °C, 20 °C, 35 °C),测量每个温度下 2 个二氧化碳浓度点(试验采用了 400×10^{-6} 和 $2 000 \times 10^{-6}$)所对应的节点输出 AD 值,共得到 6 个数据点;根据这 6 个数据点的值,从 67 个候选曲面中选取一个曲面作为该传感器的特征曲面。选取方法为:读取候选曲面的系数,获取曲面方程,进行循环计算,求得各个传感器节点的浓度预测值,从中挑选最小均方误差所对应的曲面方程作为该传感器的特征曲面。

实验选取了 240 个传感器节点作为测试,在得到上述 67 个候选曲面后,通过前述方法对 240 个传感器进行标定,为每个传感器选定一个特征曲面。在完成了 240 个传感器的标定后,实验随后选取了 15 °C, 25 °C 两个温度下不同浓度(分别为 400×10^{-6} 、 $1 000 \times 10^{-6}$ 、 $1 500 \times 10^{-6}$ 、 $2 000 \times 10^{-6}$ 、 $4 000 \times 10^{-6}$)的 10 个测试点,得到每个传感器的测试值和真实浓度的对比值,如表 3 所示。根据拟合系数获得的 CO₂ 气体浓度与实际浓度之间存在一定程度上的偏差,其偏差大小代表了传感器测量精度的高低。以表 3 中第一行数据为例,测试浓度为 410×10^{-6} ,真实浓度为 400×10^{-6} ,偏差为 10×10^{-6} ,偏差率为 2.5%。综合各行数据,若以偏差率是否在 5% + 50×10^{-6} 的精度内来衡量标定是否合格,实验统计结果表明,算法标定的合格率为 99%。

表 3 浓度测试值和真实浓度的对比

序号	AD 值	腔内温度 /℃	箱内温度 /℃	真实浓度 /10 ⁻⁶	测试浓度 /10 ⁻⁶	偏差率
1	28 979	18.6	15	400	410	2.5%
2	28 452	18.6	15	1 000	1 035	3.5%
3	28 117	18.6	15	1 500	1 549	3.3%
4	27 833	18.6	15	2 000	2 070	3.5%
5	27 045	18.6	15	4 000	4 104	2.6%
6	29 301	28.9	25	400	403	0.8%
7	28 769	29.0	25	1 000	982	1.8%
8	28 439	29.0	25	1 500	1 466	2.3%
9	28 152	29.0	25	2 000	1 967	1.7%
10	27 363	28.9	25	4 000	3 886	2.9%

3.2 不同次数拟合函数比较

实验中,利用 MATLAB 进行曲面拟合时,分别采用双 5 次 (poly55), 或一个 5 次一个 4 次 (poly54), 或双 4 次 (poly44) 多项式, 所拟合曲面的确定系数与均方根误差如表 4 所示。

表 4 确定系数与均方根误差对比表

poly55		poly54		poly44	
确定系数 rsquare	均方根误差 rmse	确定系数 rsquare	均方根误差 rmse	确定系数 rsquare	均方根误差 rmse
0.983 6	79.517 2	0.983 69	79.214 4	0.987 032	69.599 79
0.997 6	30.113 8	0.997 65	30.022 7	0.997 321	31.635 77
0.999 2	17.298 1	0.999 08	18.789 7	0.998 895	20.320 79
0.998 3	25.564 3	0.998 15	26.643 0	0.997 960	27.606 90
0.986 4	72.438 9	0.986 72	71.477 8	0.987 369	68.690 16
0.994 5	45.853 5	0.994 52	45.929 8	0.994 387	45.788 93
0.998 5	23.818 9	0.998 43	24.540 3	0.998 387	24.549 42
...
Ave=	Ave=	Ave=	Ave=	Ave=	Ave=
0.996 13	31.68 8	0.996 1	31.912	0.995 7	33.99

表中最后一行为平均值。随着系数的降低, 确定系数平均值下降, 均方根误差平均值增加, 表明系数较高时拟合程度较好, 但过高次多项式的拟合可能会产生过拟合和时间运行上的效率问题。MATLAB 最高的拟合次数为双 5 次, 即 poly55。从实测效果上看, 双 5 次拟合并没有出现过拟合的状况。在时间运行效率上, 双 5 次拟合速度也较快, 因此选择 poly55 是较合理的。

3.3 与线性插值方案的对比分析

针对测得待标定传感器 6 个数据点, 即 3 个箱内温度 (5 ℃, 20 ℃, 35 ℃), 2 个 CO₂ 浓度点 (试验采用了 400×10⁻⁶ 和 2 000×10⁻⁶) 时所对应的节点输出 AD 值, 本节评估线性插值法该较为简单直观的基准方案的性能, 线性插值法生成三个不同温度下的浓度相对应于 AD 值的变化直线 (见图 4), 以此

为基础, 使用线性插值法拟合出其他温度时的变化直线。图 4 中三条实线为 6 个数据点所生成的直线, 从下到上分别对 5 ℃, 20 ℃, 35 ℃ 时的浓度相对应于 AD 值的关系。两条虚线为使用线性插值法所得的 5 ℃, 25 ℃ 时的变化关系。利用线性插值法所得拟合结果, 计算出每个测试传感器的均方根误差, 最后计算出平均的均方根误差为 338.07。

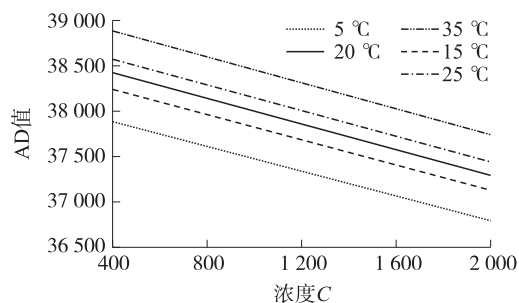


图 4 线性插值拟合结果

从计算结果可以看出, 采用曲面拟合的标定明显好于直接利用 6 个点进行线性标定的结果。由此可见, 采用快速曲面拟合相较于线性插值的标定结果更为精确, 在实际测量中可以获得更好的测量精度。

3.4 算法的主要特点及效果

基于曲面拟合快速标定算法的特点及效果主要有以下几点: ① 对一个新生产的待标定的传感器节点, 只需针对 3 个温度, 测量每个温度下 2 个 CO₂ 浓度点所对应的节点输出电压, 共得到 6 个数据点; 标定的效率高, 成本低。② 算法具有较高的精度。由于在曲面拟合的时候采用了大量的数据, 使得这个曲面非常可靠, 对于新测量的 AD 值和腔内温度 T, 都能得到准确的浓度值。③ 通过采用标准气体校准的方式大大提高了红外气体传感器的准确性和一致性。

5 总结

针对 NDIR 单通道 CO₂ 传感器提出了基于曲面拟合的快速标定算法。首先通过对温度、电压、浓度 (T, U, C) 数据的采集, 进行数据分析, 得到 N 个 CO₂ 气体传感器特征拟合曲面, 将这些曲面作为候选曲面; 对新的待标定的 CO₂ 传感器, 通过测定 6 个数据点, 代入上述的候选曲面中, 挑选出均方差最小的那个拟合曲面, 作为该节点的 CO₂ 浓度估计模型, 从而可以快速对 CO₂ 传感器进行标定。试验结果表明该算法有较高的准确性, 按照 5%+50×10⁻⁶ 的精度来看, 标定合格率达 99%。另外, 利用不同拟合次数拟合时的浓度估算误差结果表明, 较高

阶曲面拟合标定算法的计算精度高于较低阶的标定算法。最后,将该曲面拟合算法与作为基准的通过6个点作线性插值法进行了比较,曲面拟合算法具有较高的优越性。

参考文献:

- [1] 郑玲娇,牛新涛,王嘉宁,等. 中红外二氧化碳传感器的研制及在农业中的应用[J]. 光子学报,2017,46(8):156-163.
- [2] 武红鹏,彭赛男,赵晋彪,董磊,贾锁堂. 基于功率增强型QEPAS技术的二氧化碳气体高灵敏检测研究[J]. 光谱学与光谱分析,2019,39(3):840-844.
- [3] 李亚飞,刘志伟,张天羽,郑传涛,王一丁. 近红外激光二氧化碳传感系统的研制及应用[J]. 光学学报,2020,40(5):144-150.
- [4] 闫玲,姚毅,昌学年,等. 红外吸收法测定烟气中CO₂浓度的研究[J]. 仪器仪表与分析监测,2009(4):27-29.
- [5] 应亚宏. 红外CO₂气体浓度传感器系统的研制[D]. 杭州:中国计量学院,2015.
- [6] 王博,刘鹏,杨兴,等. 用于压力传感器的高精度自动标定系统[J]. 仪表技术与传感器,2020(9):85-88,92.
- [7] 李静. 红外二氧化碳浓度测量仪的研制[D]. 西安:西安理工大学,2009.
- [8] 王莉. 基于红外传感的二氧化碳测量装置[D]. 苏州:苏州大学,2011.
- [9] 张坤,王煜,赵欣,等. 基于NDIR开放光路CO₂浓度测量的标定方法研究[J]. 仪表技术与传感器,2020(3):100-104,117.
- [10] 赵久强,王震洲. L-M贝叶斯正则化BP神经网络在红外CO₂传感器的应用[J]. 河北工业科技,2018,35(4):273-277.
- [11] 袁博. 基于NDIR原理的CO₂浓度传感器的制备与研究[D]. 成都:电子科技大学,2019.
- [12] 孙亚飞. 基于神经网络算法补偿的红外CO₂气体传感器系统研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2018.
- [13] 王志军,刘朋,谷向飞,等. 基于曲线拟合的正交并联六维力传感器静态标定[J]. 机械设计与研究,2020,36(4):33-37.
- [14] 方丽丽. 基于NDIR的CO₂气体浓度监测的飞机火警探测关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.
- [15] Hodgkinson, Jane, Tatam, et al. Non-Dispersive Infra-Red (NDIR) Measurement of Carbon Dioxide at 4.2 μm in a Compact and Optically Efficient Sensor [J]. Sensors and Actuators B Chemical, 2013, 186:580-588.
- [16] 孙亚飞,顾芳,黄亚磊,等. 基于GA-WNN温度补偿的红外CO₂气体传感器系统研究[J]. 传感技术学报,2018,31(10):1613-1620.



陈凯彦(2001—),男,汉族,浙江杭州人,浙江工业大学土木工程学院本科生,主要研究方向为物联网技术;



毛科技(1979—),男,汉族,浙江诸暨人,浙江工业大学计算机科学与技术学院副教授,博士,硕士生导师,中共党员,主要研究方向为物联网技术、大数据分析,maokeji@zjut.edu.cn。