

双通道非分光红外 CO₂ 气体传感器设计与测试董和磊^{1,2}, 刘灿^{1,2}, 靳长明^{1,2}, 张磊^{1,2}, 张雅楠^{1,2}, 谭秋林^{1,2*}¹中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;²中北大学电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 针对目前非分光红外(NDIR)CO₂传感器灵敏度差、量程小的问题,设计并实现了一种微型双通道 NDIR CO₂ 气体传感器。该红外传感器主要由双通道热释电探测器、信号读出与处理电路、温度传感器与光路气室构成。建立了温度、CO₂浓度与探测器输出值之间的关系模型,实现了传感器的温度补偿功能。测试结果表明,所设计传感器能够在 0~40 °C 温度范围内,0%~5% 气体浓度的测量,且在 0%~2% 浓度下测量误差值小于 0.1%,在 2%~5% 浓度下测量误差值小于 0.25%。

关键词 传感器; 非分光红外气体传感器; 双通道热释电探测器; 浓度标定; 温度补偿

中图分类号 TN219 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL220955

1 引言

随着国民经济的发展和人民生活水平的提高,人们越来越重视自身健康,对生存环境的要求也越来越高^[1]。CO₂具有无色无味和不易察觉的特性,悄无声息地威胁着人们的健康。有研究表明:当环境中 CO₂ 浓度(摩尔分数)超过 1% 时,会导致人头昏;当环境中 CO₂ 浓度达到 4% 时,会导致人气喘头晕;当环境中 CO₂ 浓度达到 10% 时,会导致人体机能混乱,甚至死亡^[2]。因此,监测环境中 CO₂ 浓度是健康生活和安全生产的必要保障^[3-5]。

基于红外吸收原理的气体传感器具有选择性高的突出优势^[6],但面临集成度不高、尺寸大、精度低以及核心部件依赖进口等问题。剑桥大学利用中红外吸收光谱与微机电系统(MEMS)技术设计了一款低成本、低功耗的集成红外气体传感器^[7]。2021年,华沙军事技术大学利用校正系数法降低了双参数对传感器的影响^[8]。2017年,吉林大学开发了一种基于单个宽带光源和三个热释电探测器的多气体红外传感器,实现了 CO、CO₂、CH₄ 多种气体检测^[9]。2020年,华中科技大学与山东大学联合研制了一种窄带宽红外探测器阵列式的多路非分光红外(NDIR)气体传感器系统^[10]。2021年,吉林大学王俊博等^[11]提出了基于红外 CO₂ 检测的农业火灾预警系统,分析了机械振动对系统的影响。国内 CO₂ 浓度监测目前普遍采用进口传感器,或者购入半成品二次加工。近年来,在各大研究机构与

高校的努力下,国内在自主设计红外传感器方面正在高速发展,但仍存在传感器灵敏度差、量程小的问题。

本文采用双波段单气路设计,提出了一种基于红外热释电效应的微型化非分光红外 CO₂ 传感器。采用标定法,探究了温度补偿方法,测量了不同浓度、不同温度下探测器的输出值,建立了温度、CO₂ 浓度与探测器输出值之间的关系模型,实现了传感器的温度补偿。该传感器能够在不同温度与不同浓度的环境下进行精确测量。

2 传感器基本原理与设计

2.1 基于热释电效应的红外传感器工作原理

由红外吸收光谱理论可知,多种气体分子都具有可以吸收电磁波中的某波长红外辐射的特性。红外光照射到气体分子上时,当红外波长与分子的固有频率或共振频率相匹配时,分子中振动的原子会吸收该红外波长的能量,导致振动的原子能量状态发生离散变化^[12]。气体浓度越高,所吸收的特定波长的红外辐射越强,从而导致该波长的红外辐射能量越低^[13]。气体浓度与所吸收的红外辐射能量满足比尔-朗伯吸收关系:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \times \exp(-kCl), \quad (1)$$

式中: $I_0(\lambda)$ 为入射红外辐射强度; $I(\lambda)$ 为透射红外辐射强度; k 为气体吸收系数; C 为待测气体浓度; l 为红外辐射在待测气体中的光程。

查阅红外吸收光谱可知,CO₂ 主要吸收 4.26 μm

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-07-07; 录用日期: 2022-07-27; 网络首发日期: 2022-08-07

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2009100)、国家自然科学基金面上项目(52175525)、中国博士后科学基金特别资助项目(2019T120198)

通信作者: *tanqiulin@nuc.edu.cn

左右波段的红外辐射,而对 3.9 μm 左右波段的红外辐射几乎不吸收。

气体传感器检测环境中的气体浓度时,需要一直保持与外界环境接触,因此环境中的干扰对传感器测量结果影响较大。为了消除外界干扰、减少测量误差,本文提出采用双波长差分检测方法。其原理是:将红

外光源发出的红外辐射分为两束,其中一束为待测气体吸收的特征波长,用作工作波长,另一束为任何气体均不吸收的波长,用作参考波长。同一环境下,工作波长与参考波长共同受环境影响,可以抑制共模信号,凸显差模信号,降低环境干扰的影响,提高测量精度。双波长差分检测原理如图 1 所示。



图 1 双波长差分检测方法原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle of dual-wavelength differential detection method

图 1 中, $I_{\text{in(Act)}}$ 与 $I_{\text{in(Ref)}}$ 分别表示射入的工作波长光光强和参考波长光光强, $I_{\text{out(Act)}}$ 、 $I_{\text{out(Ref)}}$ 分别表示射出的工作波长光光强和参考波长光光强。将环境干扰考虑进朗伯-比尔定律中,干扰分为两类,即与波长有关和与波长无关的干扰^[14]。两个通道的输出光强分别如下:

$$I_{\text{out(Act)}} = I_{\text{in(Act)}} \times \exp(-k_{\text{Act}} C_{\text{Act}} l + \beta_{\text{Act}} + \delta), \quad (2)$$

$$I_{\text{out(Ref)}} = I_{\text{in(Ref)}} \times \exp(-k_{\text{Ref}} C_{\text{Ref}} l + \beta_{\text{Ref}} + \delta), \quad (3)$$

式中: β 表示与波长有关的干扰; δ 表示与波长无关的干扰。

由于两波长的环境相同,故 $C_{\text{Act}} = C_{\text{Ref}} = C$; 由于工作波长与参考波长相距较近,所以 $\beta_{\text{Act}} = \beta_{\text{Ref}}$; 且两个波长的入射光强相等, $I_{\text{in(Act)}} = I_{\text{in(Ref)}}$ 。将式(2)与式(3)相比得

$$C = \frac{1}{l(k_{\text{Ref}} - k_{\text{Act}})} \times \ln \frac{I_{\text{out(Act)}}}{I_{\text{out(Ref)}}}, \quad (4)$$

或

$$C = \frac{1}{l(k_{\text{Ref}} - k_{\text{Act}})} \times (\ln I_{\text{out(Act)}} - \ln I_{\text{out(Ref)}}). \quad (5)$$

红外探测器采用具有热释电效应的压电材料晶片作为敏感元,产生的电流信号与光照强度的关系为

$$i = D \times I, \quad (6)$$

式中: D 表示热释电效应转换系数。

于是,式(4)可以改写为

$$C = \frac{1}{l(k_{\text{Ref}} - k_{\text{Act}})} \times \ln \frac{i_{\text{Act}}}{i_{\text{Ref}}}. \quad (7)$$

因此,可以通过检测两通道的电流信号之比表征出气体浓度。

同时,产生的电流信号约为皮安级,满足泰勒公式的展开要求,将式(5)通过泰勒公式展开可得

$$C = \frac{1}{k_{\text{Ref}} - k_{\text{Act}}} \times (\ln i_{\text{Act}} - \ln i_{\text{Ref}}). \quad (8)$$

在设计中考虑到气室的线性刻度原则与探测器输出电流微弱的特性,因此可通过检测两个通道的差值表征出气体浓度,不需要再求取对数。

当红外辐射照射热释电材料晶片时,晶片上下表面会产生电信号,将红外辐射能量转换为电信号。红外辐射强度越强,产生的电信号越强。所以,气体浓度

越高,吸收的红外辐射越强,产生的电信号越弱。所用探测器内部已带有电流转电压电路,探测器输出为电压信号。因此,模-数转换器(ADC)采集的是两个信号通道的峰峰值 U_{Ref} 和 U_{Act} 。根据双通道检测方法, CO_2 气体浓度和两通道的差值有着密切的关系。 CO_2 气体浓度越低,差值越大; CO_2 气体浓度越高,差值越小。因此,在正确的采样之后,通过标定在各个浓度点的两通道差值,得到浓度与差值拟合曲线,即可根据采样的峰峰值差值计算出 CO_2 实时浓度。

2.2 红外 CO_2 传感器总体设计

本文设计的红外 CO_2 传感器由红外光源、气室、红外探测器、主电路系统四个主体部分组成,如图 2 所示。

光学气室很大程度上决定了红外 CO_2 传感器的尺寸大小和性能优劣。常见的气室类型有直射型、椭球型与反射型。直射型气室的长度等于光程长度,不适合小型化设计。椭球型气室特性决定了其更加适合点光源与单通道设计,不利于双通道设计。反射型气室结构简单,设计容易,可以在较小体积内实现较大光程。此外,反射型气室能够限制光强的射散,有利于提高气室聚光性,提高系统灵敏度。综合不同类型红外光学传感器气室结构特点,为了实现传感器微型化并保持高性能,本文设计了 C 型多反射式气室结构,增加光程,保证光与气体作用长度,并通过将光源发射、光传播及吸收、光电信号转换及信号处理等模块进行集成设计,得到高为 8 mm、直径为 18 mm 的微型化气室,最大程度地缩小了传感器的体积。最终获得了直径为 23 mm、高为 10 mm 的微型红外 CO_2 气体传感器。

红外光源选用 HSL5-115,其能够提供所需的红外波段的波长。红外探测器采用 PYS3228 探测器,其包含两路通道,一路通道前放置 4.26 μm 波段滤光片作为吸收 4.26 μm 附近波段的工作窗口,另一路通道前放置 3.9 μm 波段滤光片作为吸收 3.9 μm 附近波段的参考窗口。

采用单光路双波长差分设计思想,可以有效消除气室和光源以及杂质等的干扰,降低环境温度、粉尘、

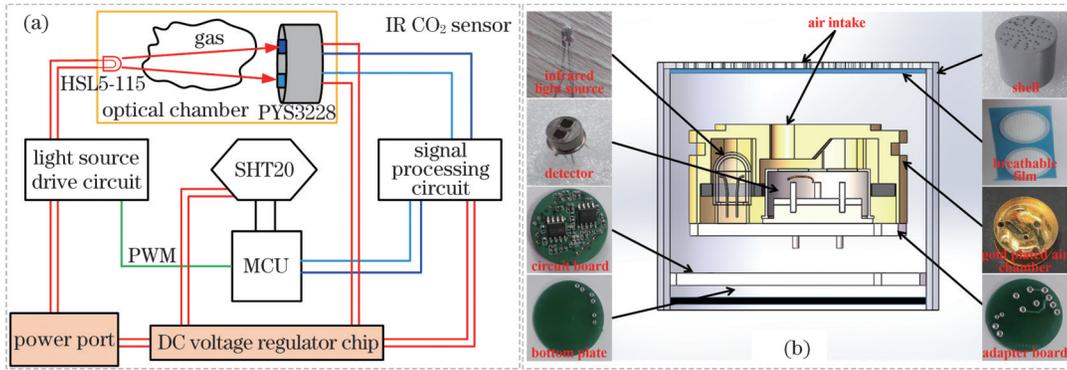


图2 红外CO₂传感器整体设计。(a)传感器结构原理图;(b)传感器截面图

Fig. 2 Overall design of infrared CO₂ sensor. (a) Schematic diagram; (b) cross-sectional view

水分等干扰因素对系统的影响,从而减小测量误差,提高系统测量精度^[15-16]。系统工作流程为:首先单片机(MCU)输出恰当频率的脉宽调制(PWM)光源驱动信号点亮红外光源HSL5-115,红外光源发出的红外辐射经过气室内气体吸收后,透过PYS3228探测器前端滤光片的4.26 μm波段和3.9 μm波段的红外辐射照射到敏感元产生电信号,电信号经过信号处理与滤波后,输入单片机内ADC采集并结合温度信息加以处理,最终计算并输出气室内CO₂气体浓度。

2.3 硬件电路与软件程序设计

红外CO₂传感器硬件电路与软件程序均采用模块化设计,以降低系统耦合性。硬件主要由光源驱动电

路、信号处理电路等组成。软件部分主要包括光源驱动程序、温湿度采集程序和数据处理程序等。另外,编写了上位机相关程序以实时显示气体含量信息与环境温度信息。

HSL5-115光源的工作由STM32F100单片机输出矩形波驱动,通过调节矩形波脉宽调制控制光源亮灭时间。光源两端采用3.3 V电压供电,可以降低系统功耗并延长光源寿命。由于光源内阻相对较小,在开启与关闭光源的瞬间电流相对较大。为了防止光源开断瞬间对主电路系统产生较大干扰,需要将光源回路与主系统回路隔离开,采用独立的电源模块与返回路径,如图3所示。

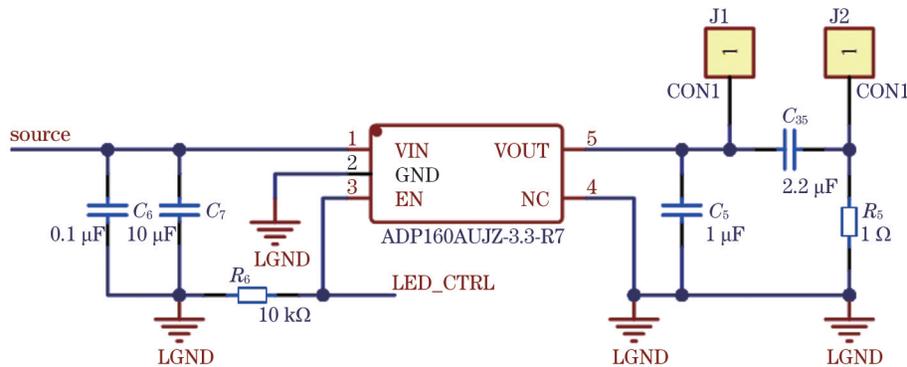


图3 光源驱动电路

Fig. 3 Light source drive circuit

信号处理电路的主要作用是将热释电探测器PYS3228输出的微弱信号放大,并滤除其他干扰信号。本文采用窄带通放大电路,如图4所示。热释电探测器PYS3228输出信号具有0.2~1.5 V之间的直流偏置电压,信号处理电路将该偏置电压抵消,并重新耦合1.65 V的直流偏置电压。

在系统设计中用1 Hz脉冲方波对光源进行了调制,探测器输出的电信号频率应该也是1 Hz,设计时应主要考虑防止工频(50 Hz)干扰。因此在信号处理中需要设计带通滤波电路滤除干扰,该滤波电路的中心频率应为1 Hz,上截止频率应小于50 Hz,抑制其他频率。如果带宽太窄,滤波器Q值较高,将对电路中的

电阻、电容的容差过于敏感。如果带宽太宽,滤波后的信号含有太多噪声,滤波无法达到理想效果。所以窄带通滤波电路是很好的设计参考。采用两块MS8629放大器分别处理参考信号与工作信号,通过R₁、R₂与R₅、R₆确定两级放大电路的放大倍数;接入的反馈电阻与反馈电容滤除高频杂波;C₄与C₁过滤掉信号内的直流成分。

环境温度对气体浓度测量具有较大影响^[15]。使用温度补偿能够确保系统测量结果的准确性。环境温度采集电路采用的是温湿度芯片SHT20,以单片机作为主机通过集成电路总线(IIC)通信读取温湿度传感器采集的温度值,并在单片机内部通过软件进行温度补

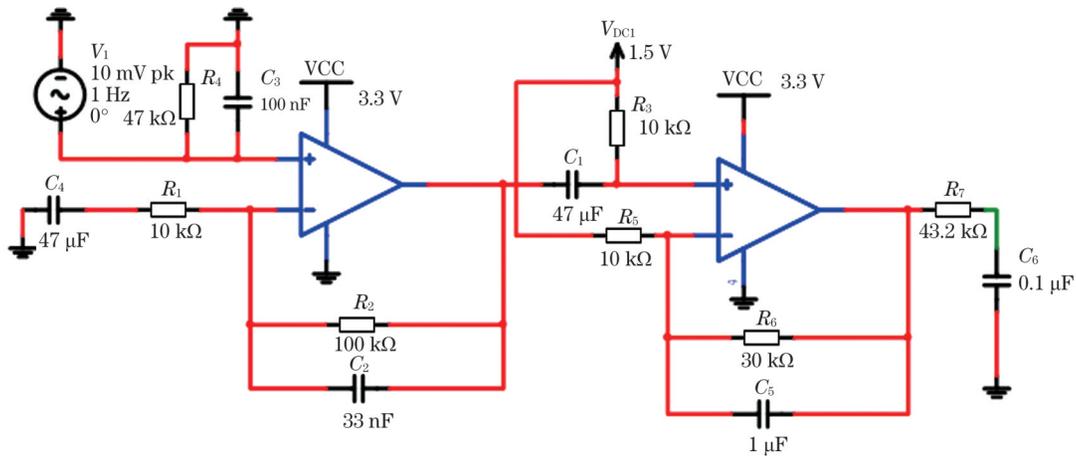


图 4 信号处理电路

Fig. 4 Signal processing circuit

偿。在单片机软件程序处理方面主要实现的功能有：矩形波输出，IIC 读取温度值，数模转换程序，温度补偿与浓度拟合处理，串口数据上传上位机。软件运行流

程如图 5 所示。由于 HSL5-115 红外光源属于热辐射光源，在第一次断电后上电需要延时一段时间，等待光源稳定。

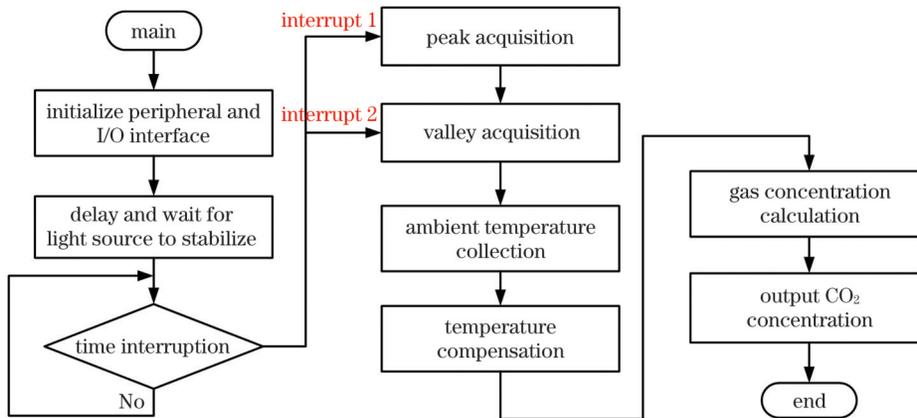


图 5 软件运行流程图

Fig. 5 Flowchart of software operation

3 传感器测试标定与分析

为了保证传感器的精度与检测范围，采用标准气

体浓度标定传感器。搭建传感器标定实验平台，如图 6 所示，主要由高低温潮湿试验箱、标准气体源、传感器工装等组成。

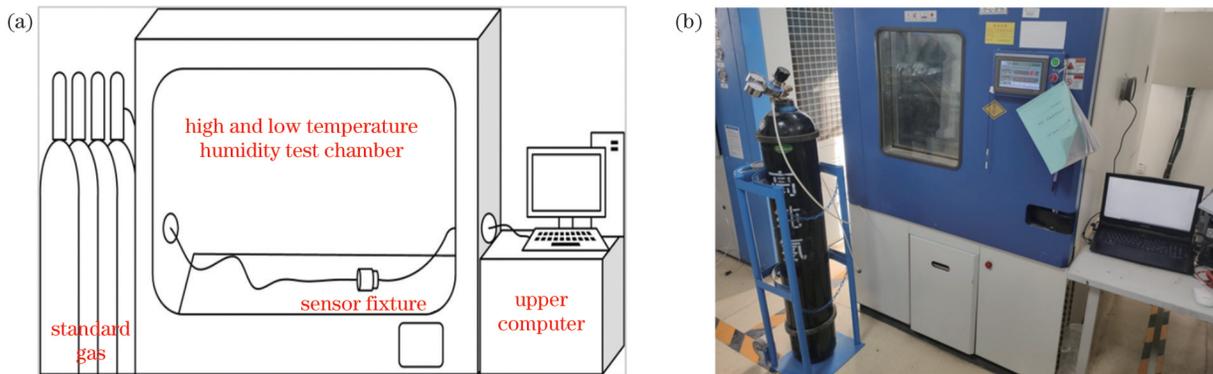


图 6 传感器标定实验平台。(a) 结构组成；(b) 实物图

Fig. 6 Sensor calibration experimental platform. (a) Platform structure; (b) picture

传感器的标定是在高低温潮湿试验箱中进行的，将试验箱设置为固定温度。标定过程中，首先将温度

设置为 0℃，将传感器放入，待高低温潮湿试验箱显示为 0℃后，保持一段时间，观察传感器传输回来的数

值,直到传感器数值稳定后,开始通入纯氮气,可以认为纯氮气时二氧化碳浓度为 0%,即零点。通气 5 min 后,将单片机采集的电压值保存,用于数据拟合。同时需要注意,每次通入标准气体标定后,在下次标准浓度标定前都需要使用 0% 浓度的标准气体通出软管内上次的标准气体。氮气通完后,依次通入 0.2%、

0.5%、0.8%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%、3.5%、4%、5% 的二氧化碳。0℃ 标定完成后,将高低温潮湿试验箱中的环境温度设置分别为 5、10、15、20、25、30、35、40℃,用同样的方式完成标定。分温度、分浓度记录两个通道的峰峰值、温度值与浓度值,结果如图 7 所示。

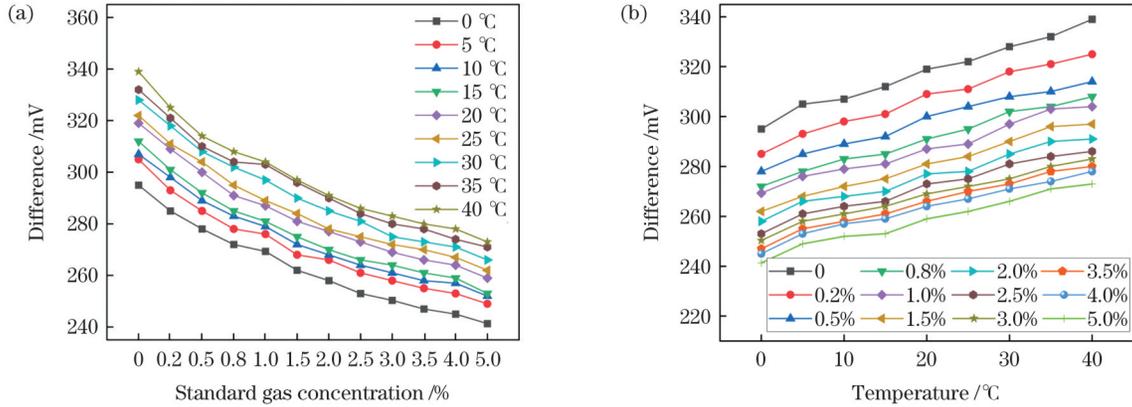


图 7 不同温度和不同浓度下标准气体的标定数据。(a)不同温度下峰峰值差值与浓度的关系;(b)不同浓度下峰峰值差值与温度的关系

Fig. 7 Calibration data of standard gas at different temperatures and concentrations. (a) Relationship between peak-to-peak value difference and concentration at different temperatures; (b) relationship between peak-to-peak value difference and temperature at different concentrations

由图 7 可见,温度影响峰峰值的差值,进而影响输出的气体浓度,且温度对峰峰值差值的影响近似为线性。将温度 T 与峰峰值差值 d_1 拟合,可以得到用于计算补偿后的差值 d 与 T 及 d_1 的关系式:

$$d(d_1, T) = d_1 - (-22.28 + 0.01339 \times d_1 + 0.878 \times T), \quad (9)$$

并得到 d 与标准气体浓度 C 之间的关系曲线,如图 8 所示。

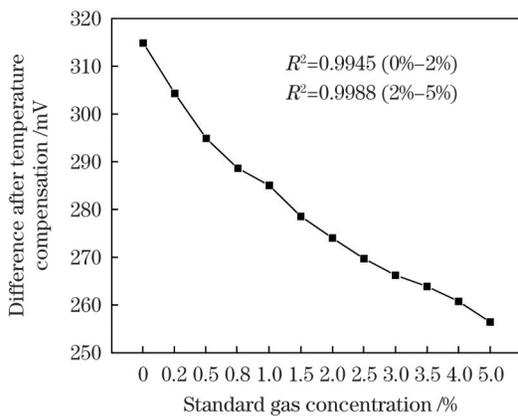


图 8 温度补偿后的峰峰值差值与气体浓度关系

Fig. 8 Relationship between peak-to-peak value difference after temperature compensation and gas concentration

将图 8 中的数据重新拟合后得到具有温度补偿的 CO₂ 浓度拟合曲线:

$$C(d) = 11.27 \times d^2 - 7149 \times d + 1134000, \quad 0\% \leq C \leq 2\%; \quad (10)$$

$$C(d) = 45.58 \times d^2 - 26130 \times d + 3759000, \quad 2\% \leq C \leq 5\%. \quad (11)$$

为了验证该曲线表征 CO₂ 浓度的准确性,进行了不同温度、不同浓度下的复测,所得数据如表 1 所示。在 0%~2% 浓度下误差值小于 0.1%, 2%~5% 浓度下误差值小于 0.25%。根据表 1 测试数据可知,具有温度补偿的 CO₂ 浓度拟合曲线能够很好地表征 CO₂ 浓度。

表 1 不同温度和不同浓度下的复测结果
Table 1 Retest results at different temperatures and concentrations

Gas concentration C	Retest results at different temperatures			
	12 °C	18 °C	23 °C	25 °C
0.50	0.47	0.48	0.49	0.51
2.50	2.36	2.39	2.40	2.53
5.00	4.79	4.85	4.90	5.15

4 结 论

CO₂ 传感器在工业生产、生活与医疗诊断中有着非常重要的作用。本文根据红外吸收光谱原理,采用单气路双波长差分方法,设计并实现了一种基于红外热释电效应的微型非分光红外 CO₂ 传感器。采用标准气体浓度标定传感器的方法,实现了传感器的温度补偿,能够在不同温度和不同浓度的条件下进行精确测量。该传感器实现了直径为 23 mm、高为 10 mm 的微型设计,0%~2% 浓度下测量误差值小于 0.1%, 2%~

5% 浓度下测量误差值小于 0.25%。该传感器可为我国工业制造和生产生活环境中的 CO₂ 浓度监测提供核心器件及技术支持,对保障安全生产及人体健康具有积极的现实意义。

参 考 文 献

- [1] Kim J H, Yi S H. Effects of temperature and humidity on NDIR CO₂ gas sensor[J]. *Journal of Sensor Science and Technology*, 2017, 26(3): 179-185.
- [2] 吴娜, 郝凤桐. 急性窒息性气体中毒的临床特点及治疗研究现状[J]. *职业与健康*, 2013, 29(21): 2859-2861.
Wu N, Hao F T. Clinical features and treatment principles of acute asphyxiating gas poisoning[J]. *Occupation and Health*, 2013, 29(21): 2859-2861.
- [3] Akram M M, Nikfarjam A, Hajghassem H, et al. Low cost and miniaturized NDIR system for CO₂ detection applications[J]. *Sensor Review*, 2020, 40(6): 637-646.
- [4] 季红程, 谢品华, 徐晋, 等. 基于可调谐法布里-珀罗干涉仪的大气二氧化碳测量方法研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1812004.
Ji H C, Xie P H, Xu J, et al. Measuring method of atmospheric carbon dioxide based on tunable Fabry-Perot interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1812004.
- [5] 张倩倩, 吴涛, 孙城林, 等. 基于中空波导光纤的 CO₂ 气体传感器稳定性的研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1528001.
Zhang Q Q, Wu T, Sun C L, et al. Stability of CO₂ gas sensor based on hollow waveguide fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1528001.
- [6] 闫格, 张磊, 于玲, 等. 面向天然气泄漏检测的中红外甲烷传感系统与应用[J]. *中国激光*, 2022, 49(18): 1810001.
Yan G, Zhang L, Yu L, et al. Mid infrared methane sensing system and application for natural gas leakage detection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 1810001.
- [7] Popa D, Udrea F. Towards integrated mid-infrared gas sensors[J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2076.
- [8] Prokopiuk A, Bielecki Z, Wojtas J. Improving the accuracy of the NDIR-based CO₂ sensor for breath analysis[J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2021, 28(4): 803-812.
- [9] Dong M, Zheng C T, Miao S Z, et al. Development and measurements of a mid-infrared multi-gas sensor system for CO₂ and CH₄ detection[J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2221.
- [10] Tan X C, Zhang H, Li J Y, et al. Non-dispersive infrared multi-gas sensing via nanoantenna integrated narrowband detectors[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5245.
- [11] 王俊博, 马卓, 李亚飞, 等. 机械振动对光学火灾预警系统的影响与改进措施[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(23): 2330002.
Wang J B, Ma Z, Li Y F, et al. Influence of mechanical vibration on optical fire alarm system and its improvement measures[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(23): 2330002.
- [12] 刘恒, 任洪亮. 非分散红外二氧化碳检测仪研制[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(6): 854-857.
Liu H, Ren H L. Carbon dioxide detector based on non-dispersed infrared principle[J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2017, 38(6): 854-857.
- [13] 龚益民, 何成平. 红外光谱吸收式 SF₆ 浓度传感器的温湿度误差及补偿[J]. *电子测试*, 2014(4): 41-42.
Gong Y M, He C P. The temperature and humidity error and compensation of SF₆ concentration sensor based on infrared spectrum absorption[J]. *Electronic Test*, 2014(4): 41-42.
- [14] 吕玉祥, 董肖节, 郭峰. 基于红外差分检测的甲烷气体传感器[J]. *应用光学*, 2012, 33(4): 747-751.
Lü Y X, Dong X J, Guo F. Methane gas sensor based on infrared difference detection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(4): 747-751.
- [15] Yi S. Temperature compensation methods of nondispersive infrared CO₂ gas sensor with dual ellipsoidal optical waveguide[J]. *Sensors and Materials*, 2017, 29(3): 243-252.
- [16] 周宇航, 倪雨琛, 郭亚, 等. 三椭圆结构多组分光学传感器性能提高研究[J/OL]. *激光与光电子学进展*: 1-14 [2022-02-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220714.1159.071.html>.
Zhou Y H, Ni Y C, Guo Y, et al. A study on improving the performance of three-ellipsoid multicomponent optical sensors[J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*: 1-14 [2022-02-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220714.1159.071.html>.

Design and Test of Dual-Channel Non-Dispersive Infrared CO₂ Gas Sensor

Dong Helei^{1,2}, Liu Can^{1,2}, Jin Changming^{1,2}, Zhang Lei^{1,2}, Zhang Yanan^{1,2}, Tan Qiulin^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

²Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China

Abstract

Objective CO₂ gas sensor is a key device in industrial control, medicine and health protection. Gas sensor based on infrared absorption principle has the outstanding advantage of high selectivity, but it faces the problems of low integration, large size, and low precision. In recent years, with the efforts of major research institutions and universities, the design of infrared sensors is developing rapidly, but it is urgent to solve the limitations of poor sensitivity and small detection range of the sensors. In this paper, a miniaturized non-dispersive infrared CO₂ sensor with the design of dual-band single-gas-channel structure is proposed, which is based on the infrared pyroelectric effect. The temperature compensation technology of the sensor is explored by the standard gas calibration method. The output values of the detector at different concentrations and temperatures are measured, and the relationship among the temperature, CO₂ concentration and output value of the detector is established. Software algorithm is used to realize the temperature compensation function, so as to realize the accurate measurement of gas concentration in different environments.

Methods The infrared CO₂ sensor is composed of four main parts: infrared light source, air chamber, dual-channel pyroelectric detector, and main circuit system, as shown in Fig. 2. In order to realize the miniaturization of the sensor while maintaining high performance, a C-type multi-reflection air chamber structure is designed to increase the optical path and ensure the length of the interaction between light and gas. Through modular integrated design, a miniaturized air chamber with a height of 8 mm and a

diameter of 18 mm is obtained, which minimizes the volume of the sensor. Finally, a miniature infrared CO₂ gas sensor with a diameter of 23 mm and a height of 10 mm is realized. The single-optical-path dual-wavelength differential design concept can effectively eliminate the interference of the air chamber, the light source and impurities, and reduce the influences of environmental temperature, dust, moisture and other factors on the system, thereby reducing the measurement error and improving the measurement accuracy of the system. Both hardware circuits and software programs adopt modular design to reduce system coupling. In order to ensure the accuracy and detection range of the sensor, the method of calibrating the sensor by standard gas concentration is used to build a sensor calibration experimental platform, as shown in Fig. 6, which mainly consists of a high and low temperature humidity test chamber, a standard gas source, and a sensor fixture. During the calibration process, the temperature is first set at 0 °C, and pure nitrogen is introduced after the sensor output is stable. It can be considered that the concentration of carbon dioxide in pure nitrogen is 0%, that is, the zero point. After 5 min of ventilation, the voltage values collected by the microcontroller are saved for data fitting. Then, carbon dioxide with concentrations of 0.2%, 0.5%, 0.8%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, 3%, 3.5%, 4%, and 5% is introduced in sequence. After the calibration is completed at 0 °C, the ambient temperature in the high and low temperature humidity test chamber is set to 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C, and 40 °C, respectively, and the calibration is completed in the same way. The peak-to-peak values, temperatures and concentrations of the two channels are recorded.

Results and Discussions The calibration results of the sensor under different temperatures and different concentrations of standard gas are shown in Fig. 7. It can be observed that the temperature affects the peak-to-peak value difference d_1 , which in turn affects the gas concentration value of the sensor. And it can be noted that the temperature affects the peak-to-peak value difference approximately linearly. By fitting the temperature and the peak-to-peak value difference d_1 , the formula for calculating the compensated difference d can be obtained, as shown by Eq. (9). The relationship between the compensated difference d and standard gas concentration C can then be obtained, as shown in Fig. 8. The fitting curve of CO₂ concentration with temperature compensation is obtained by refitting the data. In order to verify the accuracy of the fitting curve, retest is carried out at different temperatures and different concentrations. The data are shown in Table 1. The retest results show that the sensor can measure the gas concentration of 0%–5% in the temperature range of 0–40 °C, and the error is less than 0.1% for the concentration of 0%–2%, and less than 0.25% for the concentration of 2%–5%.

Conclusions In this paper, a miniature non-dispersive infrared CO₂ sensor based on infrared pyroelectric effect is designed and implemented. The temperature compensation of the sensor is realized by calibrating the sensor with standard gas concentration, and the sensor can perform accurate measurement at different temperatures and different concentrations. The sensor achieves a miniaturized design with a diameter of 23 mm and a height of 10 mm, and can realize accurate measurement with the error less than 0.1% at 0%–2% concentration and less than 0.25% at 2%–5% concentration. It can provide core devices and technical support for CO₂ concentration monitoring in industrial manufacturing, production and living environments, and has important practical significance for ensuring safe production and human health.

Key words sensors; non-dispersive infrared CO₂ gas sensor; dual-channel pyroelectric detector; concentration calibration; temperature compensation