

## 具有温度补偿的非分光红外 CO<sub>2</sub> 传感器设计

刘 灿<sup>1,2</sup>, 靳长明<sup>1,2</sup>, 谭秋林<sup>1,2</sup>, 张 磊<sup>1,2</sup>, 张雅楠<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 近年来, 温室效应愈发明显, 环境二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 浓度增加带来的副作用严重影响了人们的生产生活。目前, 商业化的 CO<sub>2</sub> 传感器体积较大, 便携化、高精度、模块化等方面不尽人意, 设计了一种基于热释电的非分光红外法 (NDIR) CO<sub>2</sub> 浓度测量系统, 主要分为气室结构设计、信号电路设计、软件控制设计与数据处理四个部分。气室结构设计方面采用单通道结构设计, 并对气室进行了光学仿真, 最终确定了气室的尺寸, 有效提高了系统的测量精度。信号电路设计方面设计了一种基于差分方式的小信号放大电路, 将有效信号从噪声中提取并放大, 提高分辨率。软件控制设计方面应用数字滤波算法, 滤除干扰与杂波, 提取数据中的有效值, 提高信噪比。数据处理方面, 搭建 CO<sub>2</sub> 气体测试平台, 通过温湿度与峰峰值补偿公式补偿温度对峰峰值产生的影响, 再使用 25 °C 下曲线拟合法计算气体浓度值, 最终通过串口输出。经过测试, 该系统测量范围为 5%, 相对误差值在 1500 ppm 以内, 能够满足防火报警、矿下监测等场合的安全测试需求。

**关键词:** 非分光红外 (NDIR); 气室光学仿真; 信号处理电路; 温度补偿浓度算法

**中图分类号:** TP216<sup>+</sup>.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210746

## Design of non-dispersive infrared CO<sub>2</sub> sensor with temperature compensation

Liu Can<sup>1,2</sup>, Jin Changming<sup>1,2</sup>, Tan Qiulin<sup>1,2</sup>, Zhang Lei<sup>1,2</sup>, Zhang Yanan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North University of China, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China;

2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Tai Yuan 030051, China)

**Abstract:** In recent years, the greenhouse effect has become more and more obvious. The side effects brought by increasing of CO<sub>2</sub> concentration have seriously affected people's production and life, and are even closely related to everyone's healthy. In defect of the large size, portability, high precision, and modularity of CO<sub>2</sub> commercial sensors currently, a pyroelectric-based non-dispersive infrared (NDIR) method measuring CO<sub>2</sub> concentration system was designed. The system design was mainly divided into four parts: air chamber structure design, signal circuit design, software control design and data processing. The air chamber structure design adopted a single-channel structure design, which was optically simulated. Finally, the size of the air chamber was determined,

收稿日期: 2021-10-11; 修订日期: 2021-11-29

基金项目: 科技部重点研发计划 (2019YFB2005704); 山西省留学人员科技活动择优资助项目 (20210011); 国家自然科学基金创新研究群体项目 (51821003); 山西省应用基础研究计划青年项目 (20210302124274); 山西省“1331”重点学科建设项目

作者简介: 刘灿, 男, 硕士生, 主要从事微纳技术与仪器及光学气体传感器方面的研究。

导师简介: 谭秋林, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学气体传感器与无线无源微纳传感器方面的研究。

which effectively improved the measurement accuracy of the system. In terms of signal circuit design, a small signal amplifying circuit based on the differential method was designed to extract and amplify the effective signal from the noise to increase resolution. The software control design employed digital filtering algorithm to filter out interference and clutter, extract the effective value in the data, and improve the signal-to-noise ratio. In view of data processing, a gas test platform was built, and the temperature and humidity and peak-to-peak compensation formulas were used to compensate for the influence of temperature on the peak-to-peak value. Then, the gas concentration value was calculated using the curve fitting method at 25 °C, and finally output through the serial port. After testing, the measurement range of the system is 5%, and the relative error is within 1500 ppm, which can meet the safety requirements of fire alarm, underground and other occasions monitoring.

**Key words:** non-dispersive infrared(NDIR); optical simulation of air chamber; signal processing circuit; temperature compensation concentration algorithm

## 0 引言

近年来,随着人们的生活水平不断提高以及工业技术的不断发展,CO<sub>2</sub>的排放量逐年增多,大气中的CO<sub>2</sub>含量也逐渐增加,各种生态问题会随之出现,环境问题已经成为人类所面临的重大问题<sup>[1-2]</sup>。大气中的CO<sub>2</sub>平均值已经上升到400 ppm (1 ppm=10<sup>-6</sup>)以上,增多的CO<sub>2</sub>导致全球气候变暖、极端天气频现等一系列问题,如2019年意大利威尼斯遭受60年以来最大洪水侵袭<sup>[3]</sup>。同时,CO<sub>2</sub>具有无色无味无毒特性,当其浓度达到一定量时,会导致人头痛甚至死亡。因此,CO<sub>2</sub>浓度检测成为了当今人们生活生产的安全保障要求之一,具有良好的应用前景。2017年,Hodgkinson J设计了一款圆柱形CO<sub>2</sub>传感器,直径20 mm,高16.5 mm,实现了最低1 ppm的检测<sup>[4]</sup>。2019年德黑兰大学采用聚类(甲基丙烯酸甲酯)PMMA基通道和PDMS聚合物研制出超低功耗的CO<sub>2</sub>传感器<sup>[5]</sup>。国内相比国外虽起步较晚,但各大高校与研究所积极支持和发展各类传感器,现已实现较大进步。2015年,中北大学设计了一款三气体传感器,实现了对CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、CO的检测<sup>[6]</sup>。

文中对非分光法检测CO<sub>2</sub>浓度进行了研究,设计了一款体积小、便携的CO<sub>2</sub>检测系统。系统利用STM32单片机作为控制核心,通过信号处理电路将传感器信号经过处理之后,利用ADC采集输出信号的峰峰值,并根据浓度拟合公式和温度补偿公式转换为气体浓度数据。测试结果表明,该系统的测量范围为0~50000 ppm,最大相对误差值为1500 ppm,能够满足防火报警、矿下监测等场合的安全需求。

## 1 基于热释电的红外CO<sub>2</sub>传感器工作原理

许多气体分子都具有吸收光谱中某一特定频率的红外辐射的特性。其原理为当红外辐射入射在气体分子上时,当红外线的波长与分子的自然频率或共振相匹配时,会引起分子振动能级间跃迁<sup>[7]</sup>。非分光红外检测气体是根据所检测气体的原子振动频率及其跃迁能量的唯一性,即当一束具有连续波长的红外光透过待测气体时,气体会吸收相应波段的红外光,从而衰减了此波段的红外光能量,根据进出气室的红外光强不同进一步推出环境中气体分子的浓度。该吸收关系符合朗伯-比尔定律<sup>[1,8-9]</sup>,如公式(1)所示:

$$I = I_0 \times \exp(-\varepsilon CL) \quad (1)$$

式中: $C$ 为气室内待测气体浓度; $\varepsilon$ 为气体的吸收系数,根据波长不同而改变; $L$ 为红外光透过待测介质的距离; $I_0$ 和 $I$ 分别为吸收目标气体前和后的红外光强。然而该定律只针对于单色光成立。从理论上讲,所测CO<sub>2</sub>的浓度与红外光的衰减程度遵循朗伯比尔定律,但在实际的测试中,如果直接使用该定律进行计算,由于环境温湿度对其吸收系数影响较大,所得出的CO<sub>2</sub>浓度将不准确<sup>[10]</sup>。因此,文中采取用标准CO<sub>2</sub>气体标定的方法,建立气体浓度值与电压峰峰值的关系,通过函数拟合得到气体浓度与电压值的函数。鉴于任何函数都可以通过泰勒展开为高阶多项式,在数据处理时,应该优先选择多项式拟合。

## 2 气室设计与仿真

光学气室是其中很重要的一环,设计合适的光学气室对检测系统的性能具有非常大的影响。从理论

上讲, 光学气室的光程越长, 待测气体对辐射的吸收就越充分, 但在实际应用中, 如果气室的光程过长, 就会导致红外辐射的损耗变多, 这将会导致测量结果精度的降低, 因此气室的光程不应过长<sup>[11-12]</sup>。所提设计利用 SolidWorks 建立气室的三维模型, 然后将整个模型导入 TracePro 中, 对气室进行仿真。

文中设计使用的气室结构为椭球形, 椭球形具有和椭圆相似的光学特性, 即由一个焦点射出的光线经过椭球壁反射后必定经过另一个焦点。所建立的气

室及光线效果, 如图 1 所示, 气室具有体积小、光程适中的特点, 通过对其内壁进行镀金处理, 在一定程度上减小了光线传播过程中的损耗, 总体直径为 22 mm, 椭球气室长半轴为 10 mm, 光程为 16 mm。在仿真中, 设置波长为 4.26  $\mu\text{m}$ , 气室内表面反射率设置为 95%, 以及探测器 38.9°内可吸收光。之后设置光源辐射总功率为 1 W, 光线设置为 10000 条, 且每条光线能量均分。采用此结构能够实现光线充分利用, 合理增加光程, 实现检测范围和精度提高。

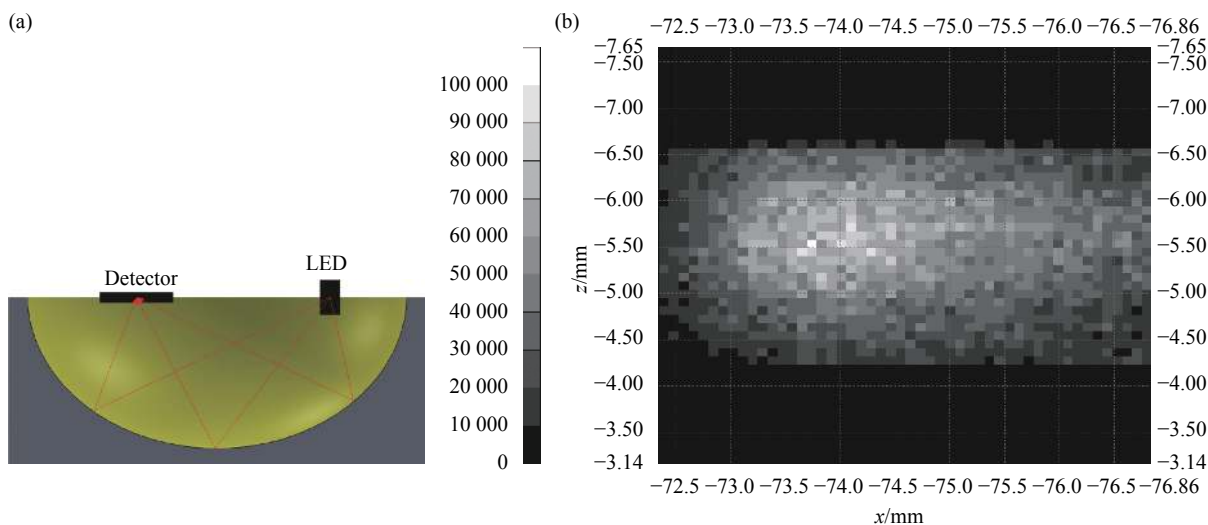


图 1 (a) 气室结构图; (b) 光学气室仿真

Fig.1 (a) Diagram of air chamber structure; (b) Simulation of optical chamber

### 3 红外 CO<sub>2</sub> 传感器硬件与软件设计

#### 3.1 系统设计

一个好的系统不只是能够在满足基本设计需求, 还应具有良好的可用性和稳定性、可扩展性以及模块间的低耦合性。红外 CO<sub>2</sub> 传感器系统设计框图如图 2 所示。该设计采用模块化设计方式。各个模块之间的工作流程为: 首先单片机发出方波驱动信号输入给光源驱动模块, 光源发出红外辐射; 红外 CO<sub>2</sub> 传感器捕捉到含有气体浓度信息的红外辐射后, 产生感应电流, 通过前端放大器的放大之后, 由信号调理模块放大滤波处理; 同时采集温湿度信息, 用于单片机处理信号与计算浓度值时进行温湿度补偿; 单片机内部 ADC 对信号调理模块处理后的信号进行采样、分析与处理, 最终得出气体浓度信息。

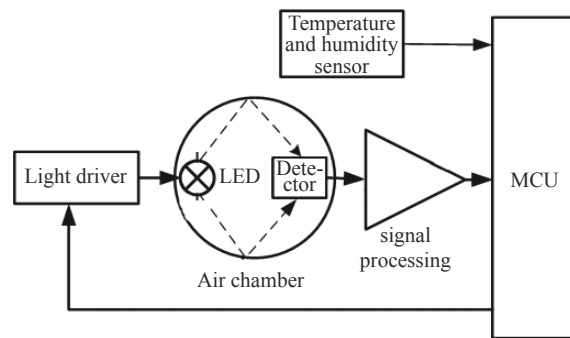


图 2 系统设计框图

Fig.2 Block diagram of system design

#### 3.2 电源模块设计

文中系统的电源设计采用兼容 5 V 与 3.3 V 的双电压输入方式, 电源输出为稳定的 3.0 V。电源芯片是 TC1185, 低压差, 低功耗运行, 小型化, 输出电压精度高, 输出电流可达到 150 mA, 可以为整个系统供电。电源部分设计电路如图 3 所示。

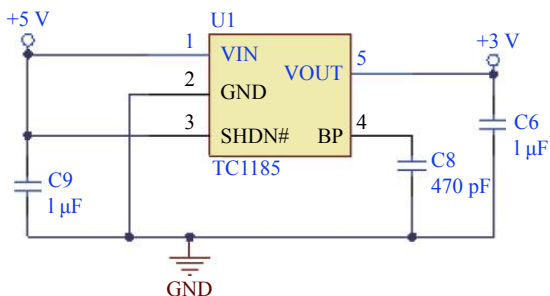


图 3 电源模块设计

Fig.3 Power module design

### 3.3 光源驱动设计

光源驱动电路上承 STM32, 下启光源, 作为系统的主要驱动电路。如图 4 所示, 将 STM32 发出的 2 Hz 的方波调制信号, 经过三极管与晶体管后, 控制光源的亮灭, 实现光源调制。当 LED\_CTRL 为高电平的时, 三极管和晶体管导通, 光源发光; 当 LED\_CTRL 为低电平的时, 三极管和晶体管断开, 光源关闭。由于光源开启与关闭时对系统电源影响较大, 从而影响系统其他部件的正常工作, 采用较大容值的钽电容降低该影响。

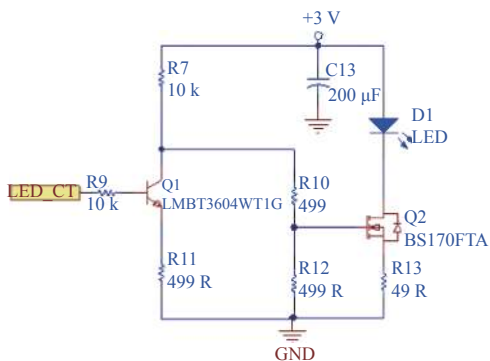


图 4 光源驱动设计

Fig.4 Design of light source drive

### 3.4 控制模块设计

控制模块是系统进行控制输出、处理输入、信号处理与数据计算的核心部件。核心控制芯片采用 STM32 F100 C8 T6 B, 此型号为 ST 公司设计的一款低功耗的单片机, 具有丰富的片上外设且设置系统工作频率为 8 MHz, 采用二线制下载程序。同时, 芯片内部时钟相对较稳定, 可以不需要外部时钟电路, 简化了外围电路, 有利于系统的集成化和小型化。

控制模块电路如图 5 所示, 应在每一个单片机的

电源引脚上均放置一个 0.1 μF 的高频去耦电容, 此电容可有效防止高频噪声对 MCU 的影响, 同时, 也可以有效滤除电源引脚对外围电路的影响。控制模块电路主要作用是采集与处理 ADC 采集的信号, 与温湿度传感器通讯, 并驱动光源。

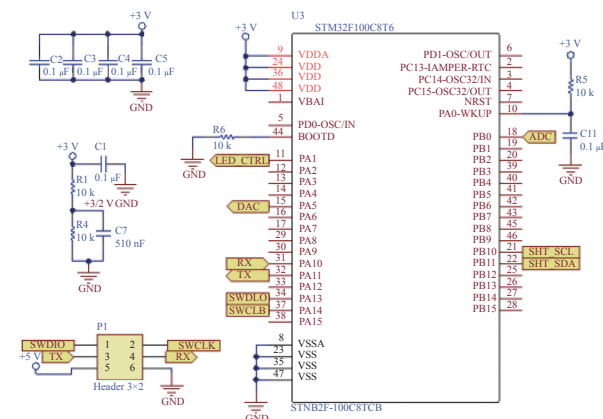


图 5 主控制模块设计

Fig.5 Module design of main control

### 3.5 温度采集模块设计

环境中的温湿度对气体传感器的影响非常大, 所以利用温湿度传感器设计温度采集电路 (图 6) 采集环境温湿度信息。采集温度信息旨在单片机计算和处理浓度信号时, 对气体浓度进行补偿, 以减少误差。采集湿度信息目的在于限制系统工作环境, 湿度在高于设定环境时, 系统自动停止运行。设计选用高精度、高稳定性和低功耗的 SHT20 温湿度传感器, 其能够通过 IIC 协议输出数字信号的温度与湿度信息。

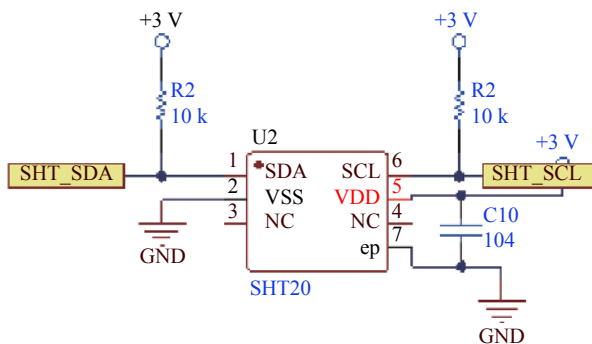


图 6 温湿度采集模块设计

Fig.6 Module design of temperature and humidity collection

### 3.6 信号调理设计

红外探测器输出信号是十分微弱的电流信号, 仅

为皮安级别。探测器信号处理电路如图 7 所示,使用放大器芯片分别为 GS8331 与 RS6332。前置放大电路采用的是差分放大电路,将探测器输出的信号与一定的基准电压进行差分,差分放大电路的优点在于抗干扰能力强,如果环境周围有噪声干扰时,可以几乎

同时被耦合到差分的两个通道上,同时能够有效地抑制电磁干扰。同时通过该电路实现低通滤波器滤除高频信号。所设计信号放大电路采用单电源供电,所以需要给原始信号一个合理的偏置电压调节信号范围,使输出信号能够完整复现波形。

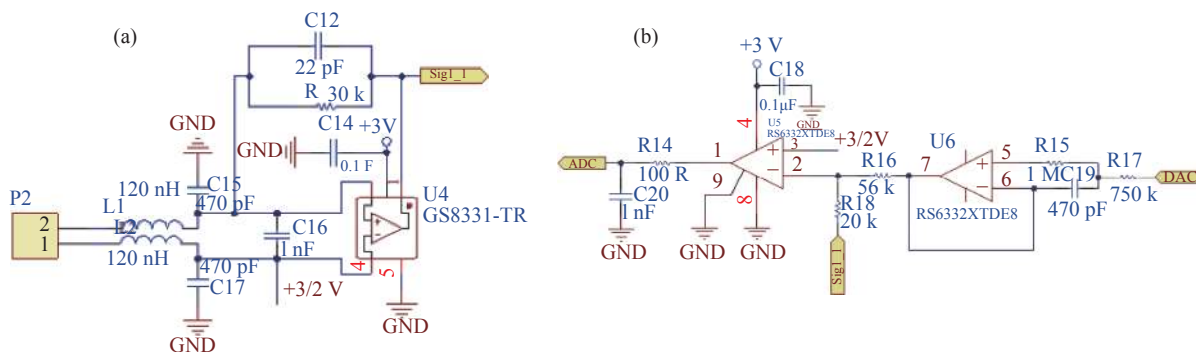


图 7 (a) 前置放大电路; (b) 后级放大电路

Fig.7 (a) Preamplifier circuit; (b) Post-amplification circuit

### 3.7 软件系统设计

高精度应变测量系统不仅仅需要具有高精度、性能稳定的硬件系统,还需要相对应的软件系统。整个测量系统的软件部分如图 8 所示,包含对系统的初始化设置、对采集数据的采集、拟合计算以及对串口通信的配置,为了提高整个系统的精度,还需要采取一

定的数字处理,系统采用的是数字滤波,提取滤波后的波形峰峰值,可以有效地提高信噪比。为了平衡传感器的精度与响应时间,此处的数字滤波器是特定应用<sup>[6,11]</sup>,该设计采用平均值滤波与扩展卡尔曼滤波。

### 4 实验数据与处理

搭建红外 CO<sub>2</sub> 传感器测试平台对所设计传感器系统进行测试,经过对多种情况下的多组测量数据的分析得出红外 CO<sub>2</sub> 传感器的精度与误差,并优化拟合系数,从而提高传感器系统的测量精度<sup>[13-15]</sup>。

搭建测试平台,将传感器放置到密闭气室内,标定实验在标准大气压和 25 °C 环境下进行。为了达到测试的准确性,第一,保证密闭气室的密闭性良好;第二,确保测试环境稳定,浓度标定实验的环境稳定性是整组实验数据拟合的根本所在;第三,当气体浓度达到设定值时,等待 1 min 后再测量通道的峰峰值,并记录它们对应的浓度值。

#### 4.1 稳定性实验

首先,在测试平台的环境下检测传感器性能的稳定性好坏。在密闭气室内充入浓度为 10000 ppm 的标准 CO<sub>2</sub> 气体,传感器接入上位机,持续工作 12 h,每隔 30 min 保存一次数据,观测传感器采集峰峰值的波动情况,如图 9 所示。

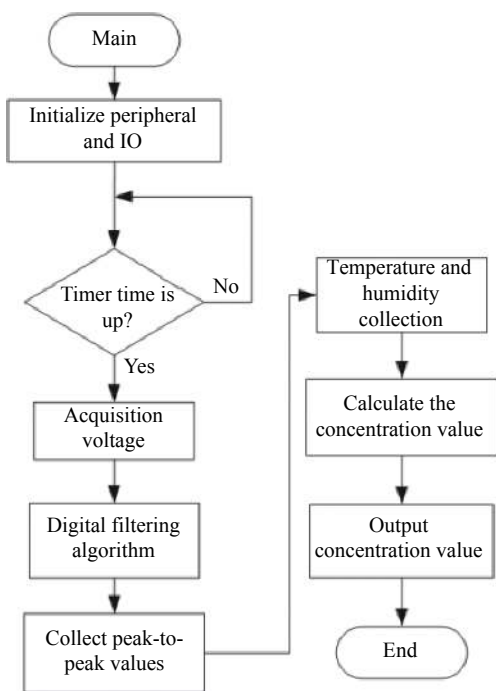


图 8 主程序流程模块

Fig.8 Main program flow module



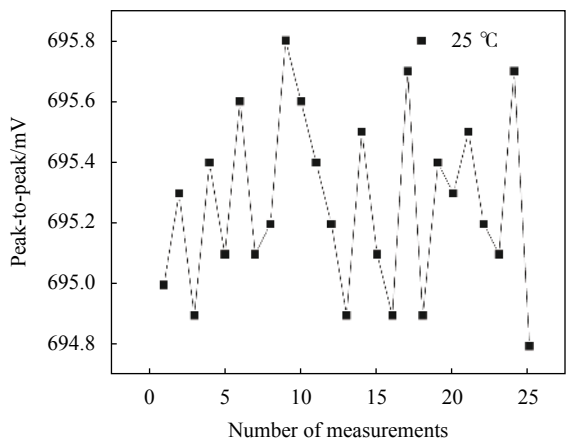


图 9 稳定性波动图

Fig.9 Chart of stability fluctuation

### 4.2 25 °C 浓度标定实验

在实验开始之前,首先进行零点标定,利用真空泵将传感器内的气体抽出,密闭气室的注入气体通道接入纯氮气进行零点标定。然后将标气瓶中的浓度 98% 的标准气体经过气体分析仪器配置成标准的不同浓度的 CO<sub>2</sub> 气体,并依序分次注入密闭气室中。之后利用 CO<sub>2</sub> 传感器采集的峰峰值与注入的 CO<sub>2</sub> 浓度值之间的对应关系图,如图 10 所示,通过数据拟合得到 25 °C 浓度拟合方程,如公式 (2) 所示。

方程为:

$$C(V_{T25}) = 0.0072 \times V_{T25}^2 - 105.2 \times V_{T25} + 384\ 500 \quad (2)$$

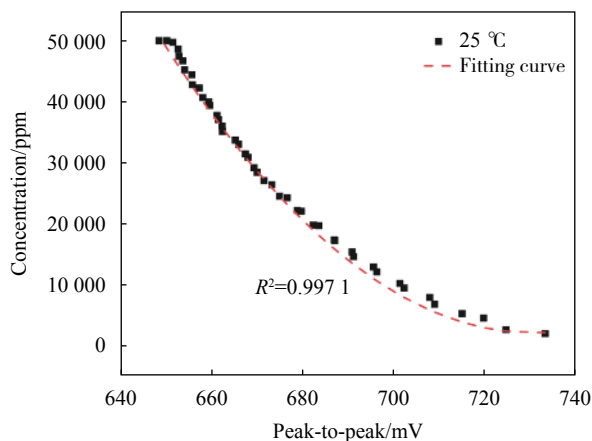


图 10 25 °C 下,浓度与峰峰值关系图

Fig.10 Graph of relationship between concentration and peak-to-peak value at 25 °C

### 4.3 温度补偿实验

实验温湿度箱中的环境温度设置为可调温度分别为 0、5、10、15、20、25、30 °C,将标气瓶中的纯度

0%、1%、2%、4%、5% 的标准 CO<sub>2</sub> 气体注入密闭气室中。由于温湿度箱内空气流通较大,导致箱内不同位置的温度并不完全相同,所以温度值以温湿度传感器的输出值为准。采集温度传感器输出的温度值与 CO<sub>2</sub> 传感器的峰峰值,从而得到不同温度下的浓度值与峰峰值之间的关系,如图 11 所示。

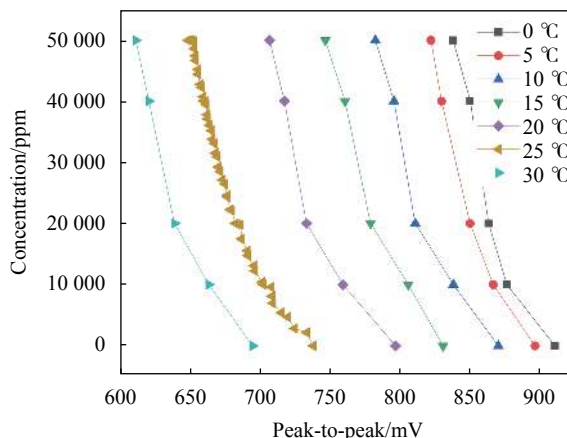


图 11 不同温度下,浓度值与峰峰值的关系图

Fig.11 Relationship between the concentration value and the peak-to-peak value at different temperatures

由上图可知,温度主要影响 CO<sub>2</sub> 的吸收率,进而影响峰峰值大小,当温度上升时,峰峰值降低,未补偿的情况下测量浓度值偏大。以 25 °C 为标准,找寻同一浓度下的峰峰值差值与温度差值的关系,如图 12 所示。

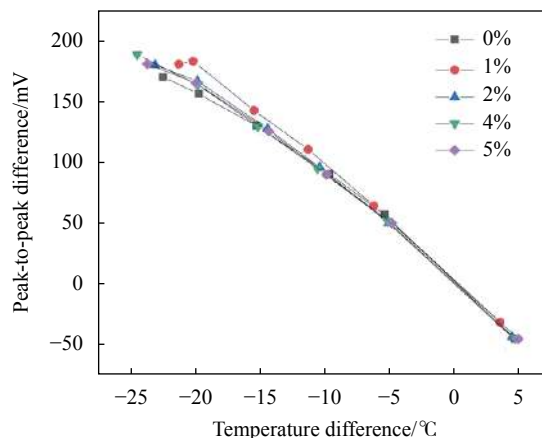


图 12 温度差值与电压差值的关系

Fig.12 Relationship between temperature difference and voltage difference

可以注意到,各个浓度下的峰峰值差值和温度差值近似为一条曲线,符合温度对 CO<sub>2</sub> 吸收系数的影响关系与探测器对红外辐射的吸收率的影响关

系<sup>[6,9,13]</sup>。故将图 10 所示曲线拟合为一条曲线,其方程(3)为:

$$V_T - V_{T25} = -0.1009 \times \Delta T^2 - 10.2 \times \Delta T + 0.7521 \quad (3)$$

将方程(3)代入方程(2)中,可以得到带有温度补偿功能的浓度计算方程。最终,将带有温度补偿功能的方程编写入 STM32 的程序中,再次测量,测量结果如表 1 所示。

表 1 重复测试结果

Tab.1 Duplicated testing results

Sample gas concentration/ppm	Detection of concentration/ppm	Absolute error/ppm	Relative error
1800	1773	-27	1.5%
12000	11873	-127	1.05%
24000	24269	269	1.12%
30000	30725	725	2.4%
35000	36326	1326	3.7%

## 5 结 论

在矿产开采、地下施工、日常生活安全等领域,CO<sub>2</sub> 传感器是不可或缺的环境检测设备<sup>[1,7,16]</sup>。该系统实现了对 CO<sub>2</sub> 浓度的高精度和大量程检测,解决了以往检测设备较大、不易携带的问题。系统上电,等待系统时钟稳定后,系统首先使驱动红外模块发出红外光,气室内发生气体光学效应并产生带有气体浓度信息的信号;针对该信号进行处理与采集,将模拟信号转换为数字信号;再根据信号调理模型对信号分离,并解调出所携带的浓度信息,并根据温度补偿算法校准并计算浓度值,最终将浓度信息通过信号传输的方式输出。该传感器实现采集范围为 5%,相对误差值小于 1500 ppm,能够满足上述领域对 CO<sub>2</sub> 气体的监测需求。

### 参考文献:

[1] Wang W. Research on non-dispersive infrared detector for CO<sub>2</sub> concentration [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015. (in Chinese)

[2] Zhou L, He Y, Zhang Q, et al. Carbon dioxide sensor module based on NDIR technology [J]. *Micromachines*, 2021, 12(7): 845.

[3] Wang J, Wang X R, Liang Y. Design and implementation of non-dispersive infrared CO<sub>2</sub> digital sensor [J]. *Chinese Journal*

*of Electron Devices*, 2021, 44(4): 767-772. (in Chinese)

[4] Hussain H, Kim J H, Yi S H. Characteristics and temperature compensation of non-dispersive infrared (NDIR) alcohol gas sensors according to incident light intensity [J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2911.

[5] Akram M M, Nikfarjam A, Hajghassem H, et al. Low cost and miniaturized NDIR system for CO<sub>2</sub> detection applications [J]. *Sensor Review*, 2020, 40(6): 637-646.

[6] Tan Q, Tang L, Yang M, et al. Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 74: 103-108.

[7] Wang T. Research on methane concentration detection system based on infrared absorption spectroscopy technique [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019. (in Chinese)

[8] Ye G, Zhang J, Chen J. Design and implementation of multi-component gas online monitoring system based on NDIR [J]. *Computer Applications and Software*, 2019, 36(8): 115-119. (in Chinese)

[9] Gong Y, He C. The temperature and humidity error and compensation of SF<sub>6</sub> concentration sensor based on infrared spectrum absorption [J]. *Electronic Test*, 2014(4): 41-42. (in Chinese)

[10] Akhter F, Alahi M E E, Siddiquei H R, et al. Graphene oxide (GO) coated impedimetric gas sensor for selective detection of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) with temperature and humidity compensation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(4): 4241-4249.

[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] Dong M, Zheng C, Miao S, et al. Development and measurements of a mid-infrared multi-gas sensor system for CO, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> detection [J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2221.

[13] Yi S. Temperature compensation methods of nondispersive infrared CO<sub>2</sub> gas sensor with dual ellipsoidal optical waveguide [J]. *Sens Mater*, 2017, 29: 243-252.

[14] Ortiz Perez A, Bierer B, Scholz L, et al. A wireless gas sensor network to monitor indoor environmental quality in schools [J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4345.

[15] Tan X, Zhang H, Li J, et al. Non-dispersive infrared multi-gas sensing via nanoantenna integrated narrowband detectors [J]. *Nature communications*, 2020, 11(1): 1-9.

[16] Sun S L. Research on carbon dioxide sensor based on nondispersive infrared technology [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2021(4): 1-3. (in Chinese)