Research on High-Dynamic MEMS Infrared $CO_2/CH_4/CO$ Gas Integrated Sensor

YAN Shangquan, SHEN Jiayi, MO Luyao, XU Sihan, YUAN Xiaojiao, LI Bo, ZHANG Zhiqiang*
(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: A detection system for measuring concentrations of CO_2, CH_4 and CO based on infrared spectrum absorption principles is presented. The system utilizes non-dispersive infrared and differential detection technology within its optical setup, featuring a direct air chamber paired with an infrared light source and a multi-channel thermopile sensor. In the section pertaining to sensor and its hardware circuits, a multi-channel thermopile sensor, light source driving circuit, and signal conditioning circuit are designed. Additionally, the microcontroller controls the activation and deactivation of the infrared light source, as well as the acquisition of voltage by the AD converter, and calculates the concentration. Furthermore, a comprehensive gas test platform is constructed to evaluate system performance under varying concentrations. Experimental results demonstrate the system's capability to concurrently detect CO_2, CH_4, and CO within concentration ranges of 0-9 150×10^{-6}, 0-3 460×10^{-6}, and 0-5 036×10^{-6}, respectively, achieving accuracies of 2.30, 3.64 and 3.85%F.S.

Key words: high-dynamic; infrared; $CO_2/CH_4/CO$ gas; integration sensor
EEACC: 7230L **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.03.019

高动态 MEMS 红外 $CO_2/CH_4/CO$ 气体集成传感器研究*

燕尚泉, 沈佳怡, 莫橹尧, 徐思涵, 袁小娇, 李 波, 张志强*
(东南大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 提出了一种基于红外光谱吸收原理的高动态 MEMS 气体集成传感器, 实现了同时检测 CO_2、CH_4 和 CO 三种气体浓度。在传感器的光学系统部分, 采用了非分光红外与差分检测技术, 开发了一种直射型气室, 协同设计了红外光源与多通道传感器。在传感器及其硬件电路部分, 设计了多通道热电堆传感器、光源驱动电路与信号调理电路。此外, 通过单片机控制红外光源亮灭与 AD 采集电压, 记录浓度。最后, 搭建气体测试平台, 测量出在不同气体浓度下传感器的输出电压。经实验, 该传感器实现了对 CO_2、CH_4 和 CO 三种气体分别在 0~9 150×10^{-6}、0~3 460×10^{-6}和 0~5 036×10^{-6}浓度范围内测量, 其精度分别为 2.30%F.S、3.64%F.S 和 3.85%F.S。

关键词: 高动态; 红外; $CO_2/CH_4/CO$ 气体; 集成传感器
中图分类号: TP212.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)03-0612-07

随着物联网技术发展, 在矿井、工业系统监控、空气质量检测等众多生产生活场景中需要对多种气体的浓度进行实时的检测。常见的气体传感器中, 电化学传感器精度高, 但电极或电解液易消耗, 因此寿命短、维护成本高[1]; 催化燃烧式传感器响应快、成本低、寿命较长, 但选择性、可靠性差[2-3]; 半导体金属氧化物传感器成本低、精度高, 纳米结构提高了金属氧化物的表面积体积比, 使其具有更高的响应速度[4-5], 但受其工作原理的限制, 仍需进一步研发同时满足低温、高灵敏度和优良选择性的金属氧化物半导体材料[6]; 而因为不同气体吸收红外光的波段不同, 红外传感器具有更好的选择性, 同时具有更长的寿命。

常见的红外气体检测传感器是单一传感器检测单一气体[7-10], 如电子科技大学研制的非分散红外 CO_2 呼吸气体传感器[10], 实现了对人体呼吸 CO_2 的检测, 但功能单一, 集成度低。或使用多个单通道热电堆传感器检测不同气体, 如中北大学研制的 CO_2/

项目来源: 南京市重大科技专项项目(202405027); 2023 年江苏省大学生创新训练计划项目(202310286301Y)
收稿日期: 2024-04-15 **修改日期**: 2024-05-14

CH_4/CO 气体传感器[11]，通过精巧的气室设计同时实现了多种气体检测与小型化，但该传感器结构比较复杂。与多个单通道热电堆传感器相比，多通道热电堆传感器的使用有利于集成度进一步提高。因此，本传感器利用多通道热电堆传感器同时检测三种气体，提高了传感器的集成度，简化了气室设计。

1　传感器工作原理与基本结构

1.1　红外光谱吸收理论

红外光谱吸收法主要利用的是不同气体分子可以吸收不同波段的红外光。与原子中电子的能级跃迁类似，分子中原子的振动、分子自身的转动同样可以吸收特定波长的光，而这部分光主要集中在中红外区。需要注意的是，原子的振动或者分子的转动必须引起分子电偶极矩的变化，分子才能吸收红外光。如 CH_4 分子 C-H 键的剪式振动，CO_2、CO 分子中原子的振动均可以吸收红外光，不同的转动或振动形式对应不同波段的吸收峰。其中，CO_2、CH_4 和 CO 分别在 4.26 μm、3.30 μm 和 4.64 μm 附近具有较强的吸收峰，因此可以使用相应波段的光探测这三种气体。而 H_2 分子作为一种中心对称的双原子分子，其 H 原子的振动不能改变分子的电偶极矩，不能吸收红外光。因此，红外传感器不能检测氢气。

1.2　朗伯—比尔定律

由上述原理可知，当红外光通过气体时，不同气体会吸收对应波长的光，相应波长的光的能量会衰减。红外光能量的衰减量与待检测气体浓度 c、气体的吸收光程 L 和该气体吸收系数 k 有关，其关系服从朗伯—比尔(Lambert-Beer)定律。

假设入射光强为 I，出射光强为 I_0：

$$I(\lambda)=I_0(\lambda)\mathrm{e}^{-k(\lambda)Lc} \tag{1}$$

多通道检测方法利用滤光片将红外光分成多个通道。其中，中心波长为气体吸收波长的通道为气体通道，中心波长为其他波长(通常为 3.91 μm)的通道为参考通道：

$$U_{\mathrm{gas}}=IR_{\mathrm{gas}}C_{\mathrm{gas}} \tag{2}$$

$$U_{\mathrm{ref}}=I_0R_{\mathrm{ref}}C_{\mathrm{ref}} \tag{3}$$

式中：U_{gas}、U_{ref}分别为气体通道与参考通道的输出电压，R_{gas}、R_{ref}分别为气体通道与参考通道的透射率，C_{gas}、C_{ref}分别为气体通道与参考通道的热电堆光电转化的响应度。

当 $kLc\ll1$ 时，可以将式(1)转化为：

$$I(\lambda)=I_0(\lambda)[1-k(\lambda)Lc] \tag{4}$$

结合式(1)~式(4)可得：

$$c=\frac{R_{\mathrm{gas}}C_{\mathrm{gas}}I_0-R_{\mathrm{ref}}C_{\mathrm{ref}}I_0+U}{R_{\mathrm{gas}}C_{\mathrm{gas}}kLI_0} \tag{5}$$

式中：$U=U_{\mathrm{ref}}-U_{\mathrm{gas}}$，即在浓度较低时，气体浓度与参考通道和测量通道的电势差之间存在线性正相关关系：

$$c=a+b\cdot U(b>0) \tag{6}$$

1.3　传感器结构

根据上述原理，气体浓度与出射光强大小有关。而热电堆传感器利用塞贝克(Seebeck)效应将光强信息转化为电压信号，因此热电堆传感器输出的电压大小即可反映浓度高低。热电堆传感器输出的模拟小信号经调理、转换后传输给单片机进行计算，即可得到气体浓度。

因此，本传感器包括红外光源、气室、MEMS 红外热电堆传感器、调理电路和单片机几部分。图 1 是红外 $CO_2/CH_4/CO$ 集成气体传感器结构框图。

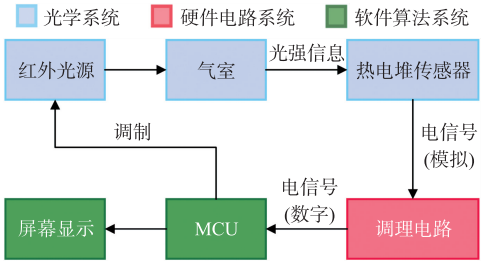


图 1　红外 $CO_2/CH_4/CO$ 气体集成传感器结构框图

2　传感器设计

根据图 1 可知，该传感器主要包括光学系统设计、硬件电路设计和软件算法系统三部分。下面依次开展设计。

2.1　传感器光学系统设计

传感器光学系统一般设计为非分光型红外探测器，即利用热电堆前的滤光片选择含有气体浓度信息的光波段。相比于利用激光器输出窄波段红外光的分光型红外探测器，其在成本、体积与可维护性等方面更具有优势。此外，对于多通道、非分光红外设计可以使各通道共用一个气室。图 2 为高动态 MEMS 红外 $CO_2/CH_4/CO$ 集成气体传感器的光学系统设计图。该传感器的光学系统主要包括红外光源、气室、MEMS 红外热电堆传感器。

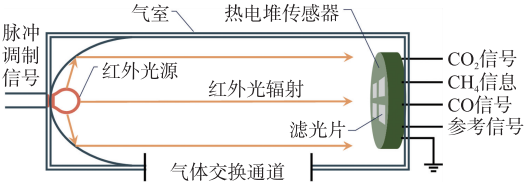


图 2　红外 $CO_2/CH_4/CO$ 气体集成传感器光学系统设计

2.1.1 红外光源

本设计需要保证红外光源发出的光谱包括待测气体的吸收波段。图 3 为广谱红外光源 IRL715EN-PR 的辐射能量与波长关系图,其辐射波长涵盖了 CO_2、CH_4 和 CO 三种气体的吸收波段,适合用来检测这三种气体。其自带的反射器使出射光具有很好的平行性,便于与直通气室配合,因此,本传感器选用该光源。

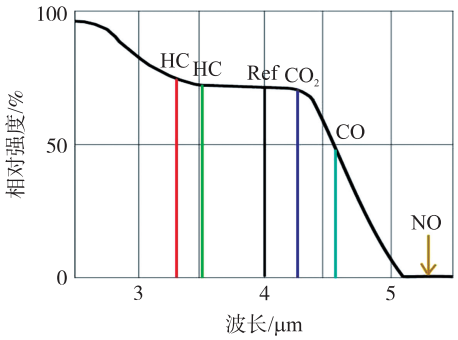


图 3 红外光源辐射能量与波长关系

为了提高光源的使用寿命,避免热电堆持续积累热量,需要单片机输出方波对其进行调制。由于其功率比较大,采用 5 V 电压驱动时需要 115 mA 的电流,单片机很难达到相应的电流输出,所以需要设计相应的驱动电路。

2.1.2 MEMS 红外热电堆传感器

热电堆传感器采用 TO-39 封装,集成了四个窄带滤光片、热电堆和一个热敏电阻。四个滤光片中心波长分别为 3.3 μm、3.91 μm、4.26 μm 和 4.64 μm,与四个热电堆分别组成 CH_4 通道、参考通道、CO_2 通道和 CO 通道。热电堆由多个热电偶串联而成。热电偶是基于塞贝克效应的一种红外检测器件。当其冷结端与热结端存在温度差时,冷结端的两端即会产生电势差。热电偶具有测量范围广、测量精度高、动态响应好、工作稳定和结构简单等优点,被广泛应用于红外检测领域[12]。芯片共 6 个引脚,除了共地引脚外,4 个热电堆与 1 个热敏电阻各引出一个引脚。

本设计中的热电堆传感器包括四个独立的通道,其中一个通道作为参考通道,另三个通道分别检测 CO_2、CH_4 和 CO 气体。

2.1.3 气室

为了保证热电堆传感器的四个通道接受的辐射均匀,减少光损耗,本文设计了一种适用于该传感器的直射型气室。图 4 为直射型气室结构图,通过 3D 打印方式制作,实际使用中应配套防尘透气膜。图中 1 为放置热电堆传感器的位置;2 为气室底座,通过通孔与印制电路板配合固定;3 为固定红外光源位置,4 为气室的红外光程,本文设计为 40 mm。

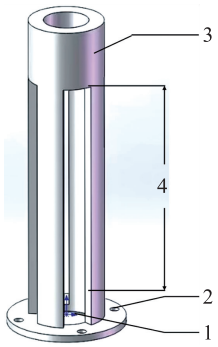


图 4 红外 CO_2/CH_4/CO 气体集成传感器的直射型气室结构

2.2 传感器硬件电路设计

硬件电路设计包括光源驱动电路(图 5)和传感器输出信号调理电路(图 6)两部分。

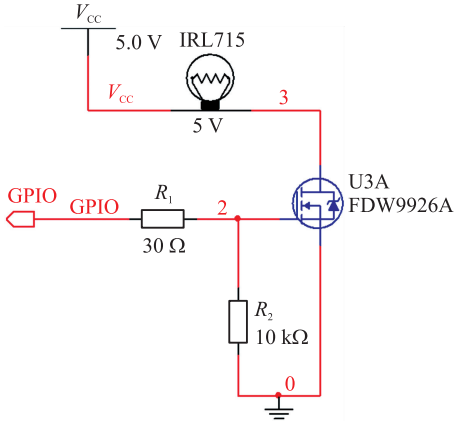


图 5 红外 CO_2/CH_4/CO 气体集成传感器的光源驱动电路

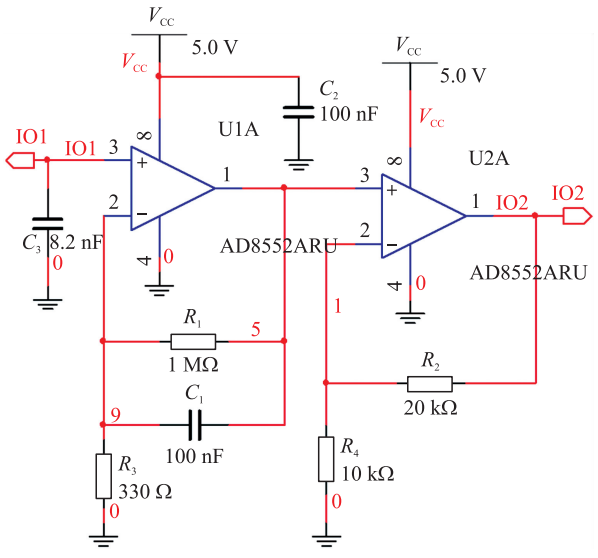


图 6 红外 CO_2/CH_4/CO 气体集成传感器的信号调理电路

2.2.1　光源驱动电路

红外光源的工作电流为 115 mA,远大于单片机 GPIO 的带负载能力。本设计中选用 FDW9926A 芯片。该芯片中含有两个 N 沟道增强型 MOS 管,利用其开关特性控制电路。该开关电路带负载能力强,最大电流为 4.5 A,最大电压为 20 V,适合该设计。当 GPIO 为高电平时,MOS 导通,红外光源亮起;GPIO 为低电平时,MOS 截止,红外光源熄灭;当 GPIO 输出为高阻态时,下拉电阻 R_2 使栅极默认为低电平,使 MOS 管处于截止状态,避免被不确定的电平干扰。

此外,R_2 还能保证当 MOS 管由导通到截止时,栅电容中存储的电荷能通过 R_2 放电,而非回流到单片机中。R_1 的作用则是限制 MOS 管从截止到导通时阶跃信号对栅电容充电的电流。

2.2.2　信号调理电路

由于传感器容易受到外界干扰,应当采用低噪声运放;由于两个通道的待测电压需要超过 1 000 倍增益的放大,既要求小的输入失调电压,也要求大的开环增益[13];由于待测量为参考通道与气体通道的差值,所以最好选用双通道的运算放大器,可以保证两个通道尽量对称;由于待测量为低频信号,而 MOSFET 有 1/f 噪声,需要选择带有斩波或自稳零技术的运放。

综合上述考虑,选用运算放大器 AD8552。它是一款零漂移、低噪声双路高精密度放大器,2.7 V~5.0 V 单电源工作,1 μV 失调电压,0.005 μV/C 失调电压漂移,具有高共模抑制比、高增益、高电源抑制比等特性。该运算放大器在直流电压和交流频率 0.2 Hz 下电压噪声密度分别约为 100 nV/$\sqrt{\text{Hz}}$ 和 40 nV/$\sqrt{\text{Hz}}$。

为了在不影响滤波效果的前提下,灵活调整放大倍数,调理电路采用两级放大。由于输入信号小,热电堆内阻大,故选择输入阻抗大的同相输入。前置放大倍数设置为 3 333 倍,反馈电阻上并联电容。当高频信号通过时,该电容视为短路,放大电路构成电压跟随器;当直流信号通过时,该电容视为断路,放大电路构成 3 333 倍的同相放大。从而实现滤波放大的效果。由于 STM32F103 内嵌的 AD 允许输入的最大电压为 3.3 V,所以应当根据实际情况调整第二级放大倍数,使最大输出电压不超过 3.3 V,可以在输出端并联 3.3 V 稳压管以保护单片机。图 6 是其中一个通道的调理电路设计图。四个通道的调理电路除第二级放大倍数外完全一致。

2.3　传感器软件算法系统

软件算法系统基于 STM32F103 单片机,实现了 PWM 输出、控制 AD 采样、计算浓度、屏幕显示和与上位机通信功能。图 7 是软件算法系统流程图。

软件算法系统主要包括 PWM 输出和采样计算两个部分。PWM 输出是利用通用定时器计数,与比较寄存器比较,输出方波。修改通用定时器的分频系数与计数最大值可以改变频率,修改比较寄存器值可以改变占空比。本系统周期设置为 6 s,占空比设置为 16%。AD 采样由基本定时器控制,每 10 ms 执行一次采样,每次实际采样 10 个数据取平均值进行均值滤波以进一步抑制噪声。完成 600 次采样(即 6 s)后,MCU 根据 600 个数据中的最大值计算浓度,最后在屏幕上显示浓度信息。

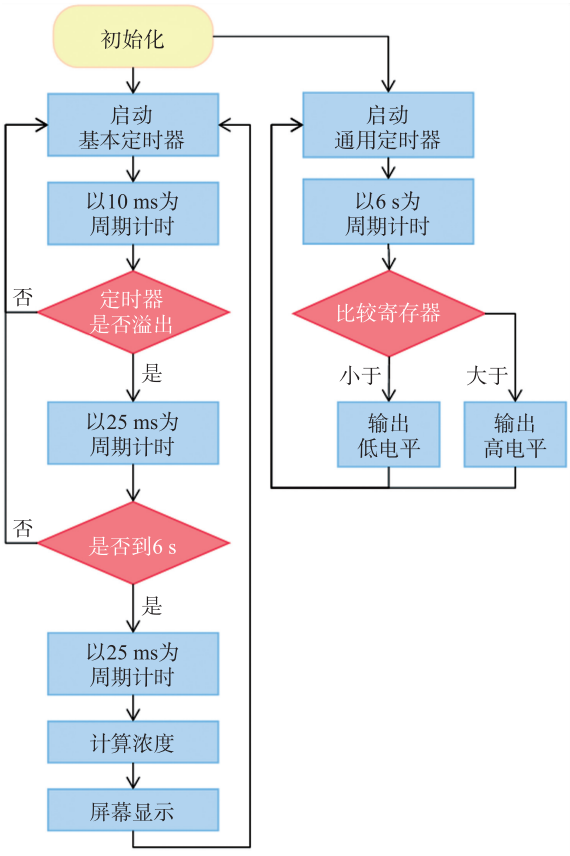
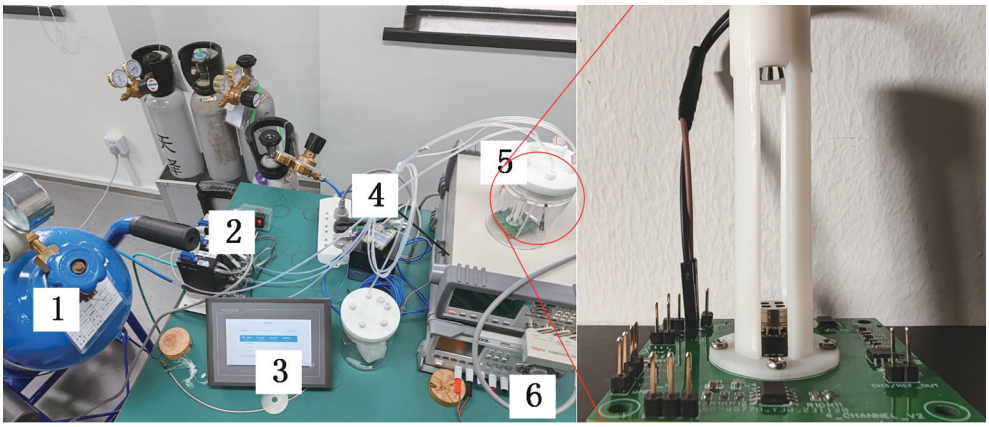


图 7　红外 $CO_2/CH_4/CO$ 气体集成传感器的软件算法流程图

3　传感器标定与测试

3.1　标定实验

图 8 所示是气体标定实验所用的测试平台。不同气瓶分别装有平衡气(N_2:80%、O_2:20%)与待测气体。气瓶通过流量计与测试腔室连接。气体浓度控制屏通过断路器控制气体流量,进而控制待测气体浓度。传感器电路连接到单片机,单片机采集并



1.气瓶; 2.流量计; 3.气体浓度控制屏; 4.断路器; 5.测试腔室; 6.稳压源

图 8 红外 CO_2/CH_4/CO 气体集成传感器的实物和测试平台

计算参考通道与气体通道的电压差,并将数据通过串口传输至上位机。

图 9 所示是 CO_2、CH_4 和 CO 传感器的电压差和浓度之间的关系曲线,可见三种气体传感器分别在

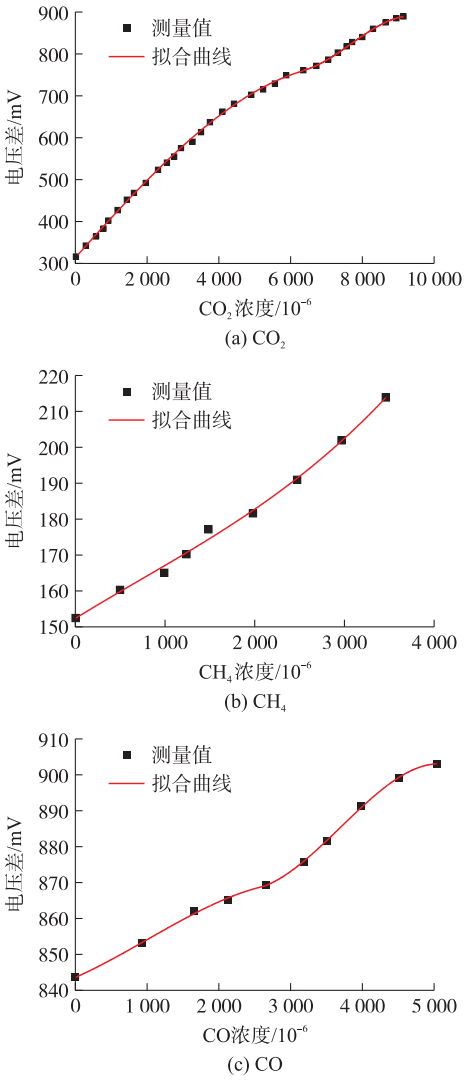


图 9 集成传感器参考通道与 CO_2、CH_4 和 CO 通道的电压差与相应气体浓度关系曲线

0~9 150×10^{-6}、0~3 460×10^{-6}和 0~5 036×10^{-6}的浓度范围内存在近似线性的正相关关系。如 CO_2 在浓度为 0×10^{-6}时,参考通道与 CO_2 气体通道的电压差为 317 mV;在 5 560×10^{-6}时,电压差为 730 mV;在 9 150×10^{-6}时,电压差为 890 mV。计算每个测量间隔的电压差变化值与浓度变化值之比取平均值,得到平均灵敏度为 72.6 μV/ppm。同理计算出 CH_4、CO 的平均灵敏度分别为 18.631 μV/ppm,12.243 μV/ppm。

其中,CO_2 的灵敏度最大,而 CH_4、CO 的灵敏度较小。主要原因是 CO_2 在其吸收波段的吸收系数较大,而 CO、CH_4 的吸收系数较小。此外,根据图 3,光源辐射的能量中,CO 吸收波段的能量较小,同样影响了检测灵敏度与精度。

3.2 传感器精度

为了测量传感器的精度,用不同浓度的气体对传感器进行测试。记录测试中传感器测量浓度与实际浓度,图 10 是分别以传感器测量浓度与实际浓度为横纵坐标,画出的测试点的散点图,各测试点到代表理想情况虚线的纵向距离即为误差。

经测算,本传感器测量 CO_2、CH_4 和 CO 的最大相对误差分别是 4.9%、6.5%和 4.6%,利用最大绝对

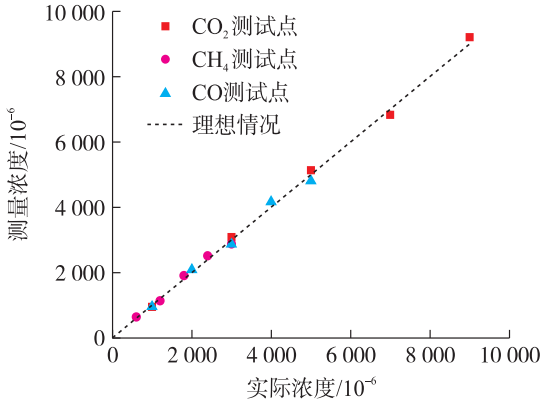


图 10 传感器测量浓度与实际浓度比较

误差除以全量程大小,得到传感器测量精度分别是 2.3%F.S、3.64%F.S 和 3.85%F.S。本文测量气体的量程与精度与其他工作对比如表 1 所示,可见本文在集成三种气体、保证精度的同时实现了更大的动态范围。

表 1　本文提出的集成传感器与其他已报道的工作比较

文献	气体	量程/10^{-6}	精度/%F.S
[7]	CH_4	2 000	2.00
[9]	CO_2	3 000	4.07
[10]	CO_2	80 000	6.25
本文	CO_2	9 150	2.30
	CH_4	3 460	3.64
	CO	5 036	3.85

4　总结

本文研究了一种高动态 MEMS 红外 CO_2/CH_4/CO 气体集成传感器。在传感器芯片设计方面,利用多通道热电堆传感器实现了三种气体的集成测量。在传感器调理电路方面,利用高增益低通滤波器实现了对传感器输出信号的调理,以提高传感器的精度。本传感器具有集成度高、精度高、动态范围大的特点,可以应用于煤矿、工业系统监控和人体健康检测等多种场景。

参考文献:

[1] 陈子豪,廖志远,吴雨驰,等. 基于 Ni@ Pt 燃料电池型甲醛电化学传感器的研究[J]. 有色金属材料,2024,45(1):26-33.

[2] 穆晶. 可燃气体检测报警器(催化燃烧型)的几点认识[J]. 中国计量,2020(6):121-122.

[3] 刘妮,舒震,隋然,等. 基于 MEMS 技术的甲烷催化燃烧传感器研究进展[J]. 煤炭与化工,2022,45(11):131-135,147.

[4] Krishna K G,Parne s,Pothukanuri N,et al. Nanostructured Metal Oxide Semiconductor-Based Gas Sensors:A Comprehensive Review[J]. Sensors and Actuators:A. Physical,2022,341:113578.

[5] 涂建鑫,邹杰,孙靖远,等. 基于钯纳米颗粒导电沟道的室温型氢气传感器的研究[J]. 传感技术学报,2024,37(1):16-21.

[6] 陈享享,刘天豪,欧阳云飞,等. 基于金属氧化物半导体的瓦斯气体传感器研究现状及进展[J]. 金属矿山,2023(11):34-44.

[7] 沈婉. 非分光红外甲烷气体检测系统的设计[D]. 南京:南京信息工程大学,2019.

[8] 张雅楠,谭秋林,张磊,等. 双通道红外 CO_2 气体传感器设计与实现[J]. 舰船电子工程,2023,43(5):212-216.

[9] 裴昱,张加宏,李敏,等. 恒温 NDIR 二氧化碳气体传感器研究[J]. 激光与红外,2021,51(2):189-195.

[10] 袁博,袁宇鹏,张祖伟,等. 基于差分吸收检测技术的非分散红外 CO_2 呼吸气体传感器[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2021,33(1):118-125.

[11] Tan Q, Tang L, Yang M, et al. Three-Gas Detection System with IR Optical Sensor Based on NDIR Technology [J]. Optics & Lasers in Engineering,2015,74:103-108.

[12] 吴正骁,任超群,张育铜,等. 基于 MEMS 红外热电堆传感器阵列的智能手势识别系统[J]. 电子器件,2023,46(3):668-672.

[13] 屈翠香,李刚. 零漂移,单电源的轨对轨输入/输出运算放大器 AD8551/AD8552/AD8554[J]. 国外电子元器件,2002(9):46-47.

燕尚泉(2003—),男,本科生,专业方向为电子科学与技术;

沈佳怡(2003—),女,本科生,专业方向为电子科学与技术;

莫橹尧(2001—),男,本科生,专业方向为电子科学与技术;

徐思涵(2001—),女,本科生,专业方向为电子科学与技术;

袁小娇(2002—),女,本科生,专业方向为电子科学与技术;

李　波(1999—),硕士研究生,主要研究方向为 MEMS 传感器与集成微系统;

张志强(1983—),男,副教授,研究生导师,主要研究方向为 MEMS 传感器与集成微系统,zqzhang@ seu.edu.cn。