

适用于工贸有限空间的NDIR气体监测装置集成

刘 杰

广东省安全生产和应急管理科学技术研究院 广东广州 510060

摘 要: 工贸企业有限空间有毒有害气体种类复杂,发现不及时造成群死群伤事故,为解决有限空间气体在线监测问题,基于NDIR高灵敏度、选择性好等优点,研制适用于多气体检测的装置。然而,传统NDIR技术在复杂环境补偿、多组分分离及动态响应方面存在局限。本文设计了多算法融合架构的NDIR气体监测装置,在传感器前端集成光子晶体谐振腔增强特定波长吸收,通过获取不同气体组分样本在不同气体环境下、不同波长下的光强度变化信号基础上,引入高分辨率傅里叶变换光谱(FTS),提升光谱覆盖范围与分辨率,构建包含工贸企业典型有毒有害气体的气体数据库,定期生成校正因子推送至终端设备,确保终端设备的长期可靠和准确。实验结果表明,装置对6种气体的体测量精度可达到ppm,重复性良好,能满足低浓度多组分危险气体的在线监测需求。

关键词: 非分散红外(NDIR);光子晶体谐振腔增强;傅里叶变换光谱;有限空间

引言

非分散红外技术(Non-Dispersive InfraRed, NDIR)技术凭借其高灵敏度、选择性好等优点被广泛应用于多气体检测。然而,传统NDIR技术在复杂环境补偿、多组分分离及动态响应方面存在局限。2006年,德国泰科电子采用双光源设计,实现了光源的内部自校准功能^[1]。瑞典森尔公司设计了一款用于检测亚ppm浓度气体的低成本传感器,实现对CO₂、CH₄等气体的高灵敏度与高稳定性检测^[2]。2020年,Mostafa M等人使采用嵌入式抛物面反射器光源聚焦光束,实现了在400ppm至2200ppm浓度范围内对CO₂气体的高精度与高重复性测量^[3]。中北大学杜彬彬等人在缩小装置体积的同时提高了气体检测系统的精度和灵敏度^[4]。南京信息工程大学赵勇毅等人设计了能够准确检测0~2000ppm范围内的CH₄、CO₂气体浓度检测装置^[5,6]。哈尔滨理工大学刘合欢等学者研发可以有效、准确地同时检测一氧化碳、二氧化碳、甲烷、甲醛、氨和一氧化氮的浓度^[7]。中北大学董和磊等人设计了一种微型双通道CO₂气体传感器,最大程度缩小了传感器的体积,实现了传感器微型化并

保持高性能^[8]。在综合国内外红外气体传感器研究现状与实际应用需求的基础上,本文设计了一款可以有效、准确地检测CO、CO₂、CH₄、H₂S、NO、NO₂六种气体的浓度的在线NDIR检测装置。

一、光学系统设计

在光路设计中选择了单光源、单探测器的对射式方式。探测器的光路由红外光源、准直透镜、发射视窗、气室接收视窗、接收透镜及四合一热电堆探测器组成。红外光源发出的红外光经过准直透镜得到与气室平行的光线,红外光通过气室中,气室中的气体对红外光进行吸收,在接收端,通过接收透镜使光聚集成为一个光斑,在光斑打在热电堆探测器上之前,需经过对应吸收峰的滤光片,由此,通过探测器可以观察到两个信号的大小。

1. 红外光源选型

选择红外光源时遵循稳定的光强输出、稳定性、便携特性。本次设计选用德国Axetris公司生产的EMIRS200作为红外光源。该光源是一种电调制技术的热辐射红外光源,具有黑体辐射特性,采用5.7V驱动电压,输入电流80mA,工作功率450mW,适用于-20~85℃工作环境,波长范围为2~14μm,可以很好的覆盖所检测气体的特征光谱范围,输出光源稳定。

2. 探测器选型

选用高性能红外探测器对保障测量系统的准确性与

课题: 广东省工贸企业有限空间监测预警关键技术研究(2025YJKJ003)

作者简介: 刘杰(1978.6--)男,汉族,山东淄博人,本科,高级工程师,主要研究方向:安全生产和应急管理工矿商贸监测预警。

可靠性至关重要。基于对气体红外吸收特征、响应时间、成本及外形尺寸等因素的综合考量，本测量系统选定PbSe热电堆探测器。与传统的红外热释电探测器相比，PbSe热电堆探测器具有灵敏度更高、响应速度更快、温漂极小等显著优势，可有效提升系统的探测下限和测量精度。

3. 气室选型

本次设计采用直射型结构的气室，其结构如图1所示。

整个气室形似一个柱状体，红外光源和热电堆探测器分别置于气室两侧。准直透镜使进入气室的光成为平行光，排除由于光路对测量造成的影响。在气室两端安装了视窗，接收透镜可以把打过来的平行光聚集成为一个光斑打在探测器上，这时要求探测器在透镜的中心轴上，探测器放置的位置在透镜的焦点附近得到最大的光强，同时在透镜和探测器中间放置一个宽带滤波片，滤除可见光对探测结果造成的影响。

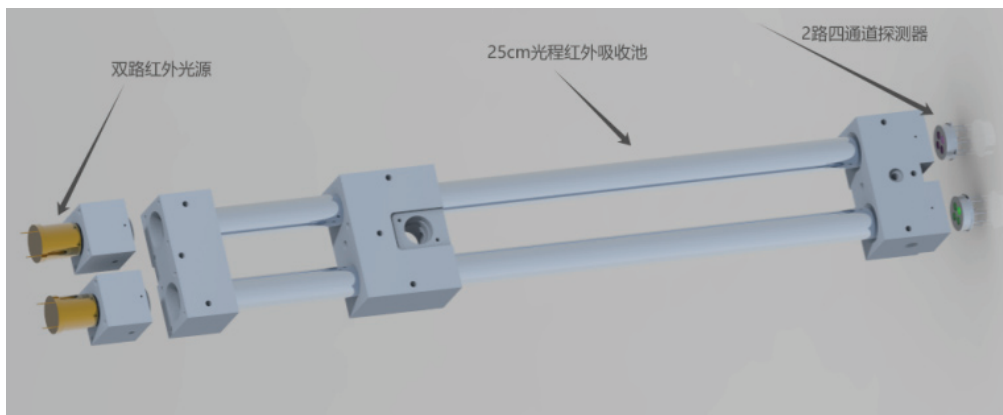


图1 气室三维图

4. 光子晶体的设计

本设计采用硅基材料作为光子晶体基底，采用层叠结构设计，将光子晶体谐振腔应直接制备在传感器探测单元前端，先制作红外光源，然后集成光子晶体带通滤波器，最后是光子晶体谐振腔和探测器单元。这种紧凑型设计最大限度地减少光路损耗，同时确保只有目标波长的光能够到达探测器。为避免熔接的高损耗，设计基于部分反射弯月透镜的耦合模块，通过优化曲率半径与膜系，将耦合损耗控制在0.3 dB以下。

二、硬件电路设计

本电路使用运算放大器AD8629放大热电堆传感器输出信号。热电堆输出电压相对较小（从几百微伏到几毫伏），需要高增益和极低的失调与漂移，以避免直流误差。电路的斩波频率范围为0.1Hz至5Hz，可通过软件选择。低压差稳压器ADP7105生成稳定的5V输出电压以驱动红外光源，并由ADuCM360控制开关。（见图2）

三、实验数据与分析

以10℃为步长，在-10~40℃的六个温度点下，收集CO、CO₂、NO、NO₂、CH₄、H₂S六种气体的数据，每个测试点收集了40组稳定后的数据，绘制“吸收强度-温度”关系曲线，验证其正相关关系。

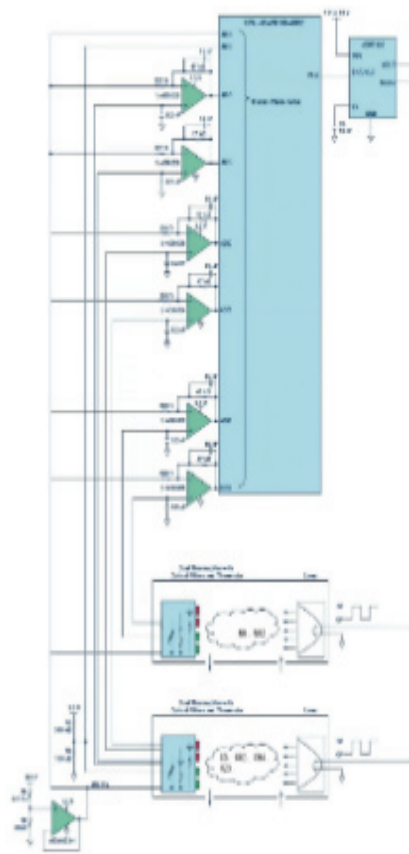


图2 NDIR气体检测电路

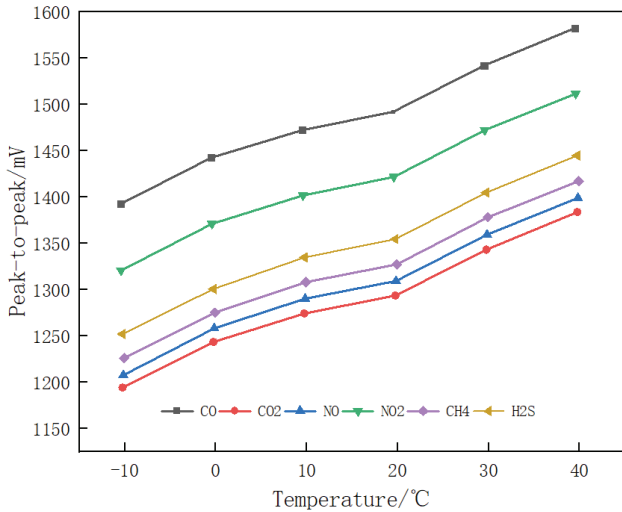


图3 输出电压随温度变化图

从图3可以看出，输出电压随温度升高呈现上升，气体的红外吸收强度会随温度升高而显著增强。

表1 多组分气体测试实验结果

Tab 1. Multi-component gas test experiment results

Gas components	Standard concentration (ppm)	Measurements (ppm)	Full-scale error (%)
CO	9.9	9.71	-0.19
CO ₂	500	505.22	5.22
CH ₄	9.9	9.52	-0.38
H ₂ S	9.8	9.73	-0.07
NO	10.2	10.62	0.42
NO ₂	10.1	10.69	0.59

表1实验结果表明，所有气体的测量误差均小于满量程10%，满足仪器精度需求。

结语

本研究基于NDIR技术开发的多组分气体传感器及

在线监测系统，用于监测有限空间作业产生的危险气体（CO、CO₂、CH₄、H₂S、NO、NO₂），可以实时监测气体浓度，及时发现和预警潜在的危险，防止中毒、窒息等事故的发生，保障工作人员的安全，为工贸有限空间的安全监控提供技术支持。

参考文献

[1]Frodl R, Tille T, A high-precision NDIR CO₂ gas sensor for automotive applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(6):1697-1705.

[2]Hummelgård C, Bryntse I, Bryzgalov M, et al. Low-cost NDIR based sensor platform for sub-ppm gas detection[J]. Urban Climate, 2015, 14(3):342-350.

[3]Vafaei M, Amini A, Siadatan A. Breakthrough in CO₂ measurement with a chamberless NDIR optical gas sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(5):2258-2268.

[4]杜彬彬, 张鹏, 高文宏, 等. 基于微机电系统红外光源的长光程气体检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(04): 977-981.

[5]赵勇毅, 常建华, 沈婉, 等. 矿井内CH₄与CO₂双组分NDIR传感器的设计与实现[J]. 红外技术, 2019, 41(08): 778-785.

[6]赵勇毅. 基于NDIR技术的双组分气体传感系统的设计与实现[D]. 江苏: 南京信息工程大学, 2020.

[7]Liu H, Shi Y, Wang T. Design of a six-gas NDIR gas sensor using an integrated optical gas chamber[J]. Optics express, 2020, 28(8):11451-11462.