

引用格式: MA Zhuo, LI Yafei, LU Yang, et al. Infrared Carbon Monoxide Sensor System for Early Fire Detection[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(5):0530002

马卓,李亚飞,卢洋,等.用于早期火灾探测的红外一氧化碳传感系统[J].光子学报,2022,51(5):0530002

用于早期火灾探测的红外一氧化碳传感系统

马卓^{1,2},李亚飞^{1,2},卢洋^{1,2},宋芳^{1,2},郑传涛^{1,2},王一丁^{1,2}

(1 吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 长春 130012)

(2 吉林省红外气体传感技术工程研究中心, 长春 130012)

摘 要:基于非分散红外吸收光谱技术,利用 CO 气体分子在 4.6 μm 处的基频吸收带,采用宽带红外热光源和双通道热释电探测器,研制了一种用于早期火灾探测的红外 CO 传感系统。根据系统检测原理,对 CO 分子在红外波段的吸收谱线进行了选择;推导了光学矩阵理论,设计并优化了气室结构,优化后气室的吸收光程达到 180 cm。对研制的锁相放大器进行标定, 1σ 检测下限为 0.15 μV ,背景噪声为 38.89~43.23 μV 。对传感系统的性能进行了实验测试。结果显示,CO 的检测分辨率优于 2.00×10^{-5} ,响应时间为 35~38 s。对纯氮气(N_2)样品进行了长达 80 min 的监测,其浓度波动范围为 $-1.42 \times 10^{-5} \sim 1.51 \times 10^{-5}$,当积分时间为 0.25 s 时,系统的检测下限为 1.54×10^{-6} ;当积分时间为 300 s 时,系统的理论检测下限可达 3.50×10^{-7} 。引入卡尔曼滤波算法来提高系统的稳定性,对纯氮气进行长达 80 min 的探测,引入该算法后系统的检测下限降低到原来的 23%,同时,当积分时间为 0.25 s 时,检测下限降低到 3.60×10^{-7} 。利用该传感系统,开展了棉花、纸张和木材的火灾阴燃实验,研究了 CO 浓度随阴燃时间的变化关系,验证了可通过 CO 浓度的变化来探测火灾发生的方法,证实了该传感系统呈现出良好的早期火灾探测能力。

关键词:传感系统;红外吸收光谱;矩阵光学;气体检测;火灾探测

中图分类号:TN21

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225105.0530002

0 引言

中国是一个农业大国,也是世界上受农业灾害最严重的国家之一,在众多农业灾害中,火灾对人类和环境的威胁最为突出。在农业生产中,虽然火灾事故出现的概率较低,但是一旦发生,不仅会使国家财产和人民利益受到巨大损失,更有可能威胁到农业生产者的生命安全^[1-3],及早发现火灾有助于避免更大的损失,挽救人民的生命财产安全。碳(C)是农作物的基本组成元素之一,当农作物燃烧出现明火时,会产生大量的二氧化碳(CO_2)。而在明火产生前会存在一段时间的阴燃,可燃物在阴燃阶段由于氧气不足,燃烧极其不充分,会产生少量的一氧化碳(CO),且在一段时间内浓度相对稳定,因此可以通过检测 CO 气体来判断早期火灾的发生^[4-5]。

目前常用的火灾检测方法有光散射烟雾检测法、视频图像识别法、感温检测法等。市场上大多数的火灾探测器都是基于光散射技术来探测烟雾气溶胶,这种传感器易受到灰尘和水汽等因素的影响,存在误报率高和无烟火失效的缺点,并且这种探测器一般都会集成一个温度传感器,只有在燃烧所释放的热量达到温度报警阈值时才会触发报警^[6],显然,这种报警器的响应时间过长。2018年杨松等研发了基于 4G 网络的多传感器农业火灾报警系统,将烟雾传感器和图像传感器等搭载到无人机上,通过 4G 网络实时将信息传输

基金项目: 国家重点研发计划(No. 20213201903), 国家自然科学基金(Nos. 61960206004, 62175087), 吉林省科技发展计划(No. 20200401059GX), 吉林省教育厅科技发展规划项目(No. JJKH20211088KJ), 长春市重点研发项目(No. 21ZGN24), 吉林大学科技创新团队项目(Nos. JLUSTIRT, 2021TD-39)

第一作者: 马卓(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为非分散红外光谱技术及应用。Email: MaZhuo19@mails.jlu.edu.cn

导师(通讯作者): 郑传涛(1982—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为红外激光光谱学与传感系统。Email: zhengchuantao@jlu.edu.cn

收稿日期: 2021-11-30; **录用日期:** 2022-01-12

<http://www.photon.ac.cn>

到服务器进行运算并判断是否出现火情,实现了农田火灾的实时监测^[7]。2020年南京邮电大学何爱龙、陈美娟等利用改进火灾颜色模型提取出疑似火灾区域,再从该区域内提取4个火焰特征和3个烟雾特征,然后将得到的特征向量制成训练集,用36个火灾视频对系统进行训练,最后使用18个视频进行测试,火灾检测准确率高达96.79%,响应时间为190 s^[8]。2011年中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室蒋亚龙等设计了基于可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术原理的火灾探测系统,该系统使用100 m光程的怀特(White)气室,利用波长调制光谱(Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)技术和锁相放大器(Lock-in Amplifier)来降低检测下限,通过实验得出检测下限为 2×10^{-6} ^[9]。2012年GUTMACHER D将非分散红外(Non-Dispersive Infrared, NDIR)吸收光谱技术与气体敏感场效应晶体管阵列、金属氧化物传感器和电化学电池相结合用于检测火灾场景中的气体,实验结果表明,CO气体的响应时间比烟雾早4 min,完全可以起到提前预警的作用^[10],该传感器也进一步证实NDIR技术将在火灾检测领域发挥越来越重要的作用。

本文利用CO气体分子在4.6 μm 处的基频吸收带,采用宽带红外热光源和双通道热释电探测器,研制了一种用于早期火灾检测的红外CO传感系统,这种单光源双波长的检测方法不仅可以抑制光源波动,还能避免环境变化对光路的干扰。设计并优化了光路结构,对自制的锁相放大器进行了标定,对传感器性能进行了测试,引入卡尔曼滤波算法提高了系统的稳定性,开展了火灾阴燃实验研究了火灾检测方法。

1 系统检测原理

根据朗伯-比尔定律,当光强为 $I_0(\lambda)$ 的红外光通过待测气体时,如果红外光的波长 λ 处于气体吸收谱带范围内,在波长 λ 处,光强会产生衰减,可表示为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-k(\lambda)cL] \quad (1)$$

式中, $I(\lambda)$ 为波长为 λ 的光束经气体吸收后的光强, $I_0(\lambda)$ 为初始光强, $k(\lambda)$ 为气体分子在波长 λ 处的吸收系数, c 为气体浓度, L 为光束通过气体的光程。本系统使用的是双波长单光路检测结构,定义 $G(\lambda_1)$ 和 $G(\lambda_2)$ 分别为探测器在波长 λ_1 和 λ_2 处的光电转换系数, $I_0(\lambda_1)$ 和 $I_0(\lambda_2)$ 为光源在波长 λ_1 和 λ_2 的初始光强,则探测器的输出电压信号可分别表示为

$$U(\lambda_1) = G(\lambda_1)I_0(\lambda_1) \exp[-k(\lambda_1)cL] \quad (2)$$

$$U(\lambda_2) = G(\lambda_2)I_0(\lambda_2) \quad (3)$$

将式(2)和(3)作比可得

$$\frac{U(\lambda_1)}{U(\lambda_2)} = \frac{G(\lambda_1)I_0(\lambda_1)}{G(\lambda_2)I_0(\lambda_2)} \exp[-k(\lambda_1)cL] \quad (4)$$

令 $H = \frac{G(\lambda_2)}{G(\lambda_1)}$,则浓度 c 可表示为

$$c = -\frac{1}{k(\lambda_1)L} \ln \left[H \times \frac{I_0(\lambda_2)}{I_0(\lambda_1)} \times \frac{U(\lambda_1)}{U(\lambda_2)} \right] \quad (5)$$

式中,光电转换系数之比 H 为常数, $G(\lambda_1)$ 和 $G(\lambda_2)$ 在探测器温度漂移方面具有相同的变化趋势, $I_0(\lambda_1)$ 和 $I_0(\lambda_2)$ 在光源波动方面的影响也是一致的,所以可以消除光源波动带来的影响。在实际应用时,根据该标定关系和测得的电压比信号计算浓度信息。

2 CO吸收线的选择

如图1(a)所示,CO气体分子在红外光谱区域总共有3个组合频率吸收带,其中4.6 μm 处的基频吸收带线强约为 $4.556 \times 10^{-19} \text{ cm} \cdot \text{mol}^{-1}$,2.3 μm 处的倍频吸收带线强约为 $3.471 \times 10^{-21} \text{ cm} \cdot \text{mol}^{-1}$,1.56 μm 处的泛频吸收带线强约为 $2.165 \times 10^{-23} \text{ cm} \cdot \text{mol}^{-1}$,三个吸收带的峰值强度之比大约为25 800:192:1。在火灾发生初期,即阴燃阶段,产生的CO浓度很小,因此传感器系统应具有较低检测下限。通常情况下,较强的吸收峰会在一定程度上降低气体检测的难度,因此基频吸收带通常为气体检测的首选频段。

除了考虑吸收线的强度以外,还要考虑吸收谱线附近是否存在其他气体分子的吸收干扰。在火灾发生

初期不仅会产生CO,还会有少量的H₂O,CO₂和微量的NO生成^[11]。图1(b)为温度为296 K,压力为1 atm (1 atm=101 325 Pa),光程为180 cm的条件下,6×10⁻⁵ CO,6×10⁻⁴ CO₂,1% H₂O和4×10⁻⁶ NO在4.48~4.84 μm波长范围内基于高分辨率透射(High-Resolution Transmission, HITRAN)分子吸收数据库仿真得到的吸收光谱。由图1(b)可以看出,在这个光谱范围内4×10⁻⁶ NO和6×10⁻⁴ CO₂的吸光度很小,对CO的影响可忽略不计。1% H₂O虽然有一定的影响,但在实际检测中可以通过对待测的气体进行干燥处理,减小水汽的影响。综上所述,考虑到气体检测的灵敏度和其他气体的干扰,最终选择4.6 μm处的基频吸收带作为气体吸收线。

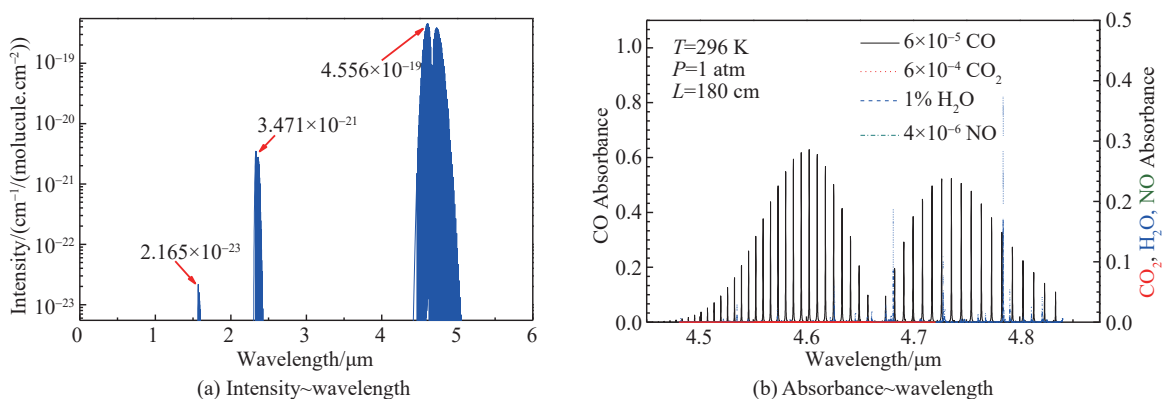


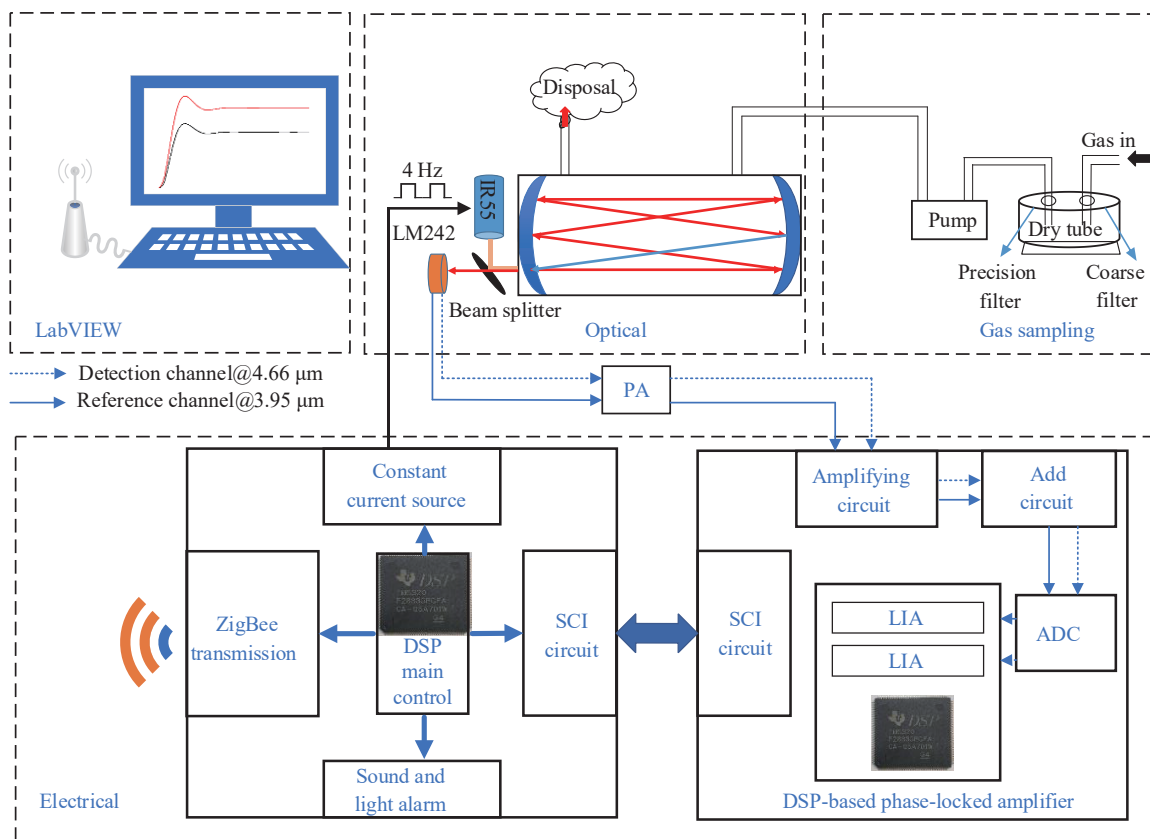
图1 CO与干扰气体在红外波段的模拟吸收谱线

Fig. 1 Simulated absorption spectra of CO and interference gas in infrared band

3 传感系统的设计与优化

3.1 系统结构

该红外CO传感系统主要由气体预处理部分、光学部分、电学部分和上位机监测部分组成。系统结构原理图如图2所示。气体预处理部分主要包括真空泵、粗滤器(孔径为10 μm)、细滤器(孔径为2 μm)填充无水氯化钙的干燥管。在进行气体检测时,真空泵抽取的外界气体首先通过粗滤器和细滤器滤除颗粒杂质,防止气室中的反射镜被杂质污染对光强造成损耗,再通过充满无水氯化钙的干燥管对气体进行干燥处理,以防止水汽对气体吸收的干扰。光学部分主要包括基于微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)技术研制的宽带红外热光源(型号:IR55, Hawkeye Technology)、双通道热释电探测器(型号:LM242, InfraTec,探测通道中心波长为4.66 μm,半峰全宽为180 nm,参考通道中心波长为3.95 μm,半峰全宽为90 nm)、分束器(型号:BSW510, Thorlabs)和球面反射镜(直径φ=75 mm,焦距F=300 mm)。使用傅里叶光谱仪(型号:Thermo Scientific Nicolet iS50)测量光源的光谱信息,当光源驱动电流为131 mA时,测试结果如图3所示,光源在4~11 μm范围内存在较强红外辐射,在4.66 μm(CO基频吸收带)处光源相对发光强度为0.6,由于测试环境为空气环境,存在较高的H₂O,由图中可以看到在5.2~7.2 μm处由于H₂O吸收存在较大凹陷。电学部分主要包括:主控电路、压控恒流源电路、前置放大电路(PA)、同相放大电路、加法电路、模数转换(Analog to Digital Conversion, ADC)电路、基于数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP,型号:TMS320F28335, Texas Instrument)的正交锁相放大电路(LIA)、声光报警电路和无线传输电路。主控电路输出4 Hz方波信号,通过压控恒流源电路为光源提供调制电流。光源发射出15°发散角的光束,通过分束器反射后汇聚到气室的入光口。入射光在两个球面反射镜之间反射六次,形成180 cm的有效光程,最后由入光口出射,经过分束器透射后最终被双通道热释电探测器所捕获。热释电探测器输出的两路微弱电流信号经过前置放大电路转换为电压信号,再由同向放大电路、加法电路调理到ADC芯片(型号:AD7903, Analog Devices)的输入量程内。两个电压信号的幅值经模数转换电路采样后由正交锁相放大器计算得出,并通过串口电路(SCI Circuit)传输给主控电路,最后主控电路使用预先标定好的电压浓度曲线计算浓度信息并通过无线传输电路传输给基于LabVIEW的上位机监测平台。当浓度超过预设报警值时,系统启动声光报警,同时基于LabVIEW的上位机监测平台进行语音报警。



PA: Preamplifier; SCI: Serial Communication Interface; ADC: Analog to Digital Converter; LIA: Lock-in Amplifier

图2 红外CO传感系统的原理框图。

Fig. 2 Schematic diagram of infrared CO sensor system.

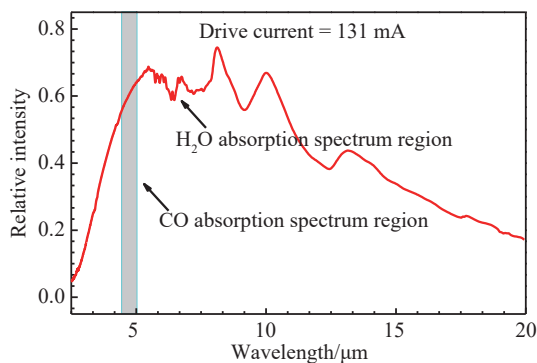


图3 光源红外发光光谱

Fig. 3 Infrared emission spectra of the used light source

3.2 气室结构与仿真

为了避免光斑重叠造成的干涉影响,长光程赫里奥特(Herriott)气室对光源的准直性要求比较高。怀特(White)气室光路一般由三个曲率相同的球面反射镜组成,调节过程较复杂,镜面利用率比较低。本系统使用的宽带热光源具有 15° 的发散角,所以以上两种气室均不适用本系统。

光学变换矩阵是傍轴光线通过光学元件后,描述其传播特性参数发生变化的矩阵表达式。假设光线入射点与光轴距离为 r ,与光轴夹角为 θ ,定义夹角 θ 在光轴上方为正,在光轴下方为负。如图4(a)所示,入射点A与光轴的距离为 r ,入射光线由入射点A沿光轴以夹角 θ 直线传输到点B,其点B的位置和角度可用矩阵表示为

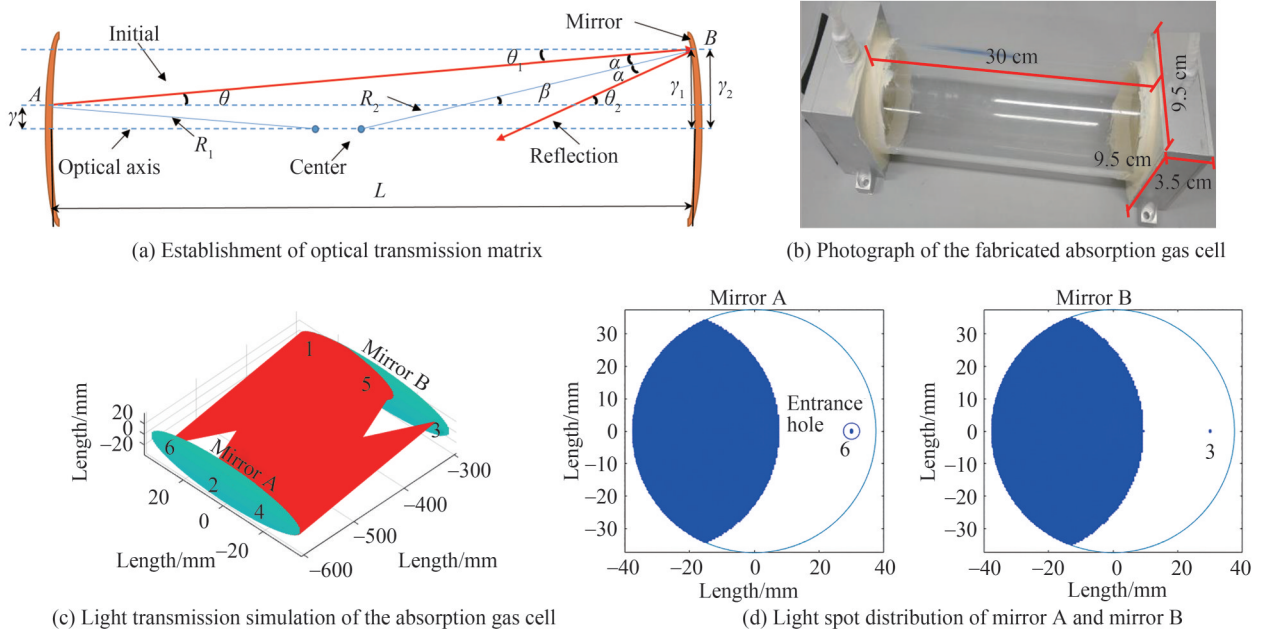


图4 气室结构设计仿真

Fig. 4 Structure and simulation of the absorption cell

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

光线经球面反射镜反射后,可知光线到光轴距离不变,角度发生变化。球面反射镜在长焦距条件下,近似认为两个球面反射镜的间距为光线传播距离。傍轴入射时,入射角 θ 很小,可近似认为入射角与其正切值相等。则通过几何关系可得入射光线经过一次反射后其位置和角度可由矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r' \\ \theta' \end{bmatrix} \quad (7)$$

当光线在A和B两个镜面之间经过一次直线传输-反射-直线传输-反射后其位置和角度可由矩阵表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} r_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{2L}{R_2} & 2L(1 - \frac{L}{R_2}) \\ -\left[\frac{2}{R_1} + \frac{2}{R_2}\left(1 - \frac{2L}{R_1}\right)\right] & -\left[\frac{2L}{R_1} - \left(1 - \frac{2L}{R_1}\right)\left(1 - \frac{2L}{R_2}\right)\right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, R_1 为镜面A的曲率半径, R_2 为镜面B的曲率半径, L 为镜面间的距离, f 为平面反射镜的焦距。当 $R_1=R_2=2L=2f$ 时,往返矩阵可简化为

$$\begin{bmatrix} r_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & f \\ -\frac{1}{f} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

当光线在镜面A和镜面B之间传输往返三次后,可得传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} r_6 \\ \theta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & f \\ -\frac{1}{f} & -1 \end{bmatrix}^3 \begin{bmatrix} r_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

即入射光线经过第六次反射后,光线传输到入光口位置。

利用MATLAB设计仿真程序对上述矩阵光学进行仿真实验,仿真中使用的条件为气室长度30 cm,反射镜的直径为7.5 cm,焦距为30 cm,仿真结果如图4(c)、4(d)所示。考虑到宽带红外光源具有15°发散角,使用软件仿真了具有15°发散角的入射光在镜面A与镜面B之间的传输路径,从仿真结果可以看出,光束从镜面A的entrance hole入射,由于入射光的发散角度和球面镜尺寸的限制,光束无法全部被反射镜反射,导致损失了一部分光强,这就要求入射光的反射次数不能过多,经过三次反射后,光线汇聚到了镜面B标号3的位置,经过六次反射后,光线又重新汇聚到了镜面A标号6的entrance hole初始位置,验证了传输矩阵的正确性,说明光线的出射位置与光线的入射角度无关。聚光型气室的结构如图4(b)所示,气室两端是自主设计的铝制零件,零件长为9.5 cm,宽为3.5 cm,高为9.5 cm,中间部分是一根30 cm长的亚克力管,进气口与出气口均在顶部。铝制零件主要由密封盖、窗口片、镜架组成。镜架用来固定两个球面反射镜,其中一个反射镜上开有通光孔,窗口片用来密封通光孔。在通光孔与窗口片之间、窗口片与密封盖之间放置硅胶材质的密封圈,通过挤压作用达到密封效果,在亚克力管和铝制零件的连接处使用密封胶进行密封,保证了气室的密封性和实验的可靠性。

3.3 锁相放大器

正交锁相放大器是利用三角函数的正交性来提取特定频率信号的峰值。当输入信号 $S(t)$ 为

$$S(t) = a \sin(\omega_1 t + \phi_1) \quad (11)$$

利用DSP生成同频正交参考信号 $R_{\perp}(t)$ 与同频同相参考信号 $R_{\parallel}(t)$

$$R_{\perp}(t) = b \cos(\omega_1 t + \phi_2) \quad (12)$$

$$R_{\parallel}(t) = b \sin(\omega_1 t + \phi_2) \quad (13)$$

输入信号分别与同频正交信号 $R_{\perp}(t)$ 和同频参考信号 $R_{\parallel}(t)$ 相乘,得到两个乘积信号

$$U_{\perp}(t) = \frac{ab}{2} [\sin(\phi_1 - \phi_2) + \sin(2\omega_1 t + \phi_1 + \phi_2)] \quad (14)$$

$$U_{\parallel}(t) = \frac{ab}{2} [\cos(\phi_1 - \phi_2) - \cos(2\omega_1 t + \phi_1 + \phi_2)] \quad (15)$$

经过低通滤波器后得到正交谐波幅值 Q 和同相谐波幅值 I 分别为

$$Q = \frac{ab}{2} \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (16)$$

$$I = \frac{ab}{2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (17)$$

并由正交锁相算法提取出与信号幅值成正比的一次谐波幅值($\text{Amp}(1f)$)为

$$\text{Amp}(1f) = \sqrt{Q^2 + I^2} = \frac{ab}{2} \quad (18)$$

基于DSP的数字正交锁相放大器的照片如图5(a)所示。输入信号经放大电路和加法电路调理后达到ADC的量程范围,目的是降低ADC芯片(型号:AD7903, Analogue Devices)的量化误差。信号由ADC芯片采样,可由按键实现对程序的启停控制,并可将谐波信号经串口发送至上位机。

为了验证所研制的锁相放大器的功能。将放大电路的放大倍数调为60倍,采用信号发生器(型号:AFG-2225, GWinstek)生成频率为4 Hz、幅值为1.7 mV至10 mV的正弦波信号,输入到锁相放大器中,结果如图5(b)所示,一次谐波信号的数字量输出($\text{Output}(1f)$)与输入正弦信号的幅值 Sin_amplitude 呈线性关系,对其进行线性拟合,拟合关系式为

$$\text{Output}(1f) = 798.94371 \times \text{Sin_amplitude} + 36.60409 \quad (19)$$

为了探究该锁相放大器的检测下限,将锁相放大器的信号输入端与地连接测量该锁相放大器的背景噪声,如图5(c)所示,背景噪声电压波动最大值为43.23 μV ,最小值为38.89 μV 。计算其Allan方差,如图5(d)所示,当积分时间为0.25 s时,该锁相放大器的检测下限为0.15 μV 。

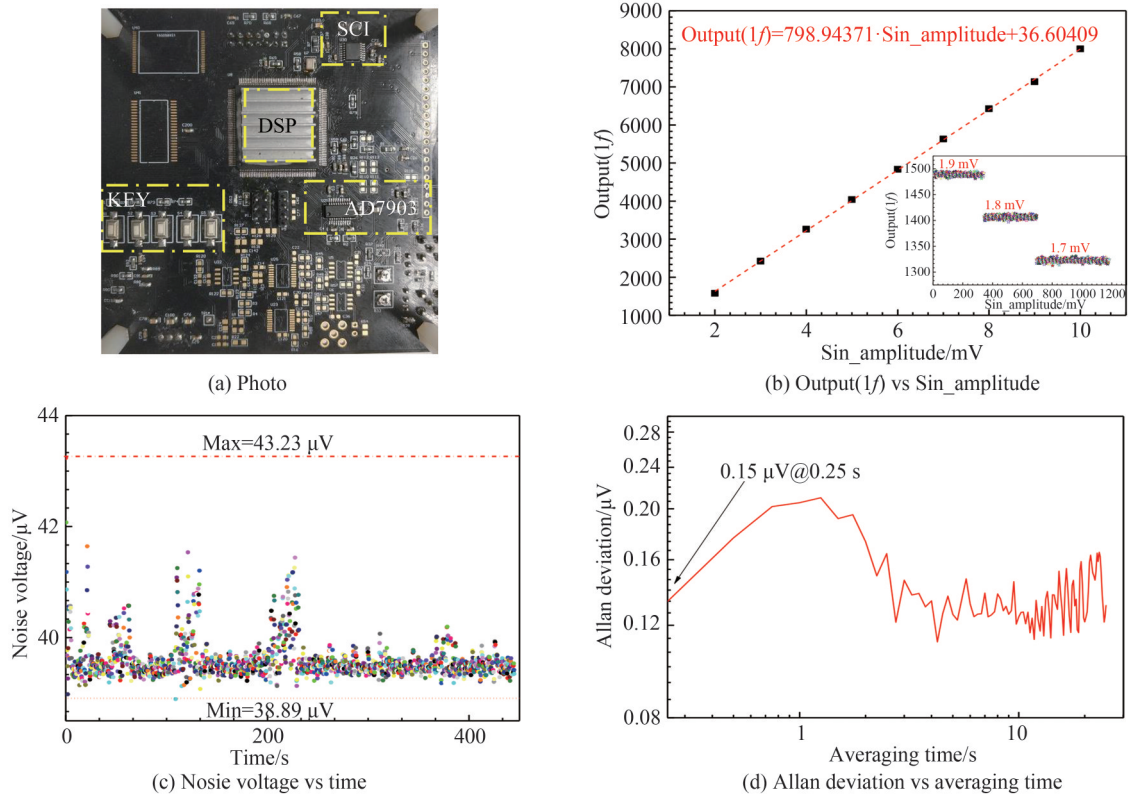


图5 数字正交锁相放大器实物图和测试结果
Fig. 5 Photo of the digital orthogonal lock-in amplifier and test result

4 传感系统的性能测试

4.1 气体标定与灵敏度分析

利用EnviroNics公司的Series4000配气系统在体积分数为 $0\sim 1\times 10^{-4}$ 的浓度范围内配备6组CO样品,分别为 $0, 2\times 10^{-5}, 4\times 10^{-5}, 6\times 10^{-5}, 8\times 10^{-5}$ 和 1×10^{-4} ,将其依次通入气室中。利用正交锁相放大技术分别提取出吸收通道与参考通道的电压峰值,并求出电压之比 $U(\lambda_1)/U(\lambda_2)$,每种浓度的气体分别测试5 min,并对每种浓度下的 $U(\lambda_1)/U(\lambda_2)$ 取平均值,然后拟合出电压比信号 $U(\lambda_1)/U(\lambda_2)$ 与气体浓度 c 之间的关系,如图6(a)所示,拟合曲线方程为

$$\frac{U(\lambda_1)}{U(\lambda_2)} = -1.8557 \times 10^{-4} \times c + 1.07214 \quad (20)$$

拟合曲线表明 $U(\lambda_1)/U(\lambda_2)$ 与浓度 c 之间具有良好的线性关系,拟合优度为99.507%。

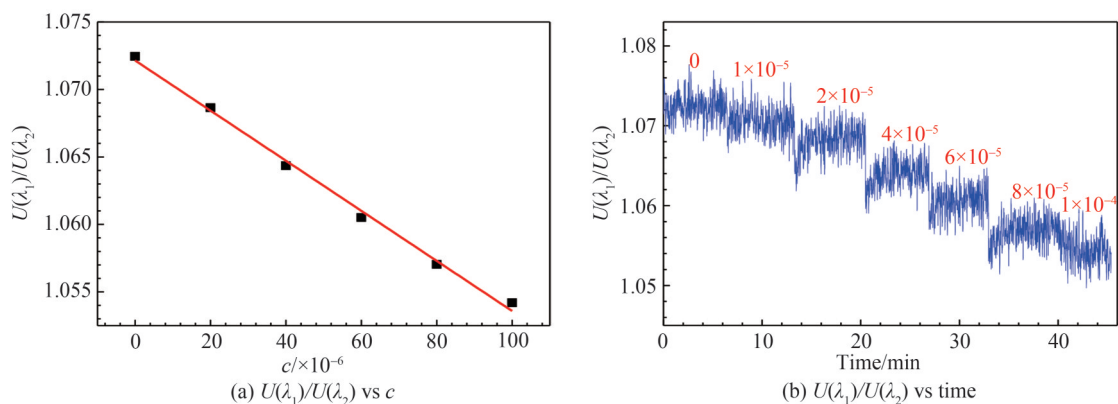


图6 传感器系统标定
Fig. 6 Calibration of the sensor system

如图6(b)所示,以 2×10^{-5} 为梯度,依次通入体积分数为 $0 \sim 1 \times 10^{-4}$ 的CO气体,从图中可以看出电压比信号 $U(\lambda_1)/U(\lambda_2)$ 的变化可清晰分辨。当向体积分数为 0×10^{-6} 气室中通入 1×10^{-5} 的CO气体时,电压比信号 $U(\lambda_1)/U(\lambda_2)$ 的变化在未经过算法优化的条件下已经很难区分,所以该仪器的分辨率应优于 2×10^{-5} 。

4.2 响应时间测试

响应时间一般定义为从测量值的10%变化到90%所用的时间^[12],该时间主要取决于气室结构,气体流速和系统处理数据的能力^[13]。为了测试该传感系统的响应时间,分别准备一瓶高纯氮气和一瓶浓度为 1×10^{-4} 的CO标准气,选择带有两个入口和一个出口的“Y”型连接器连接气瓶与气室,使用两个开关阀在两种气瓶之间切换。测试结果如图7所示,当气体流速设置为1000 mL/min时,气体浓度从 1×10^{-5} 上升到 9×10^{-5} 的时间约为35 s。当该传感系统示数稳定一段时间后,通入纯氮气进行洗气,气体浓度从 9×10^{-5} 下降到 1×10^{-5} 所需时间约为38 s。

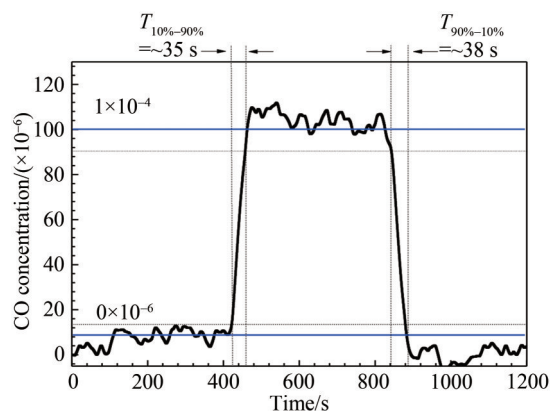


图7 系统的响应时间测试

Fig. 7 Dynamic response time test of the sensor system

4.3 稳定性及检测下限

系统采用的差分检测结构能够消除一部分由光学波动、光线传输和零点漂移引入的噪声,但是并不能完全消除信号的波动^[14]。稳定性反应了传感器在一段时间内保持稳定的能力。为了测试传感器系统的稳定性,使用配气系统向气室中通入浓度为 0×10^{-6} 的CO气体(即纯 N_2),连续测量80 min。如图8(a)所示,当CO浓度为 0×10^{-6} 时,浓度波动范围为 $-1.42 \times 10^{-5} \sim 1.51 \times 10^{-5}$ 。

为了进一步分析系统的稳定性,确定系统的检测下限,引入了Allan方差。如图8(b)所示,在积分时间为0.25 s时,系统的检测下限约为 1.54×10^{-6} ,继续增加积分时间,系统的稳定性更好,当积分时间达到300 s时,理论上系统的检测下限能达到 3.50×10^{-7} 。

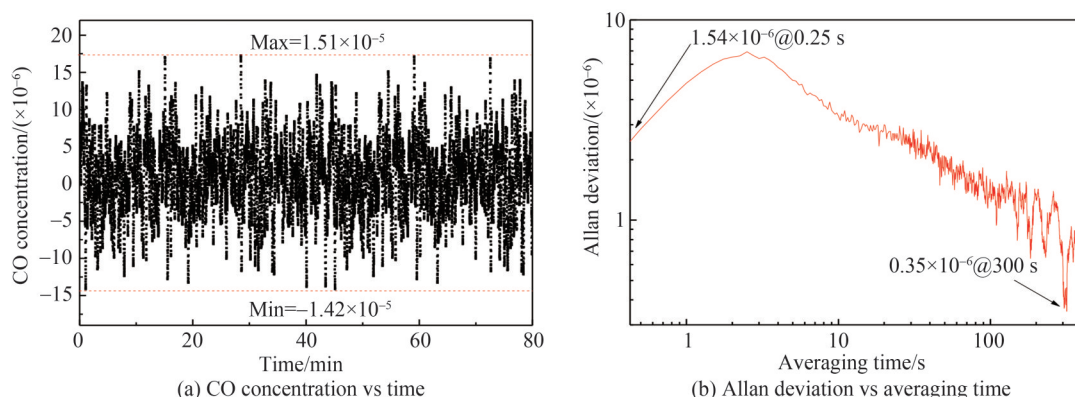


图8 系统对体积分数为 0×10^{-6} CO样品的稳定性测试结果和系统的Allan标准差曲线

Fig. 8 System stability measurement results on volume fraction 0×10^{-6} CO gas sample and Allan deviation curve

4.4 系统稳定性的提高

当对低浓度的CO气体进行在线检测时,吸收信号中会夹杂着大量噪声,传统的数字锁相放大器难以将其高效滤出,导致该方法在进行低浓度的气体检测时精度较低,稳定性较差^[15-16]。为了进一步降低噪声干扰,提高对低浓度气体的检测精度,提出了使用正交锁相放大器结合卡尔曼滤波算法的信号降噪方法。卡尔曼滤波是一种时间域的递归估计,计算过程是一个不断“预测-修正”的过程,每一时刻的输出值 X_k (即最优估计)都是由前一时刻的最优估计 X_{k-1} 和当前时刻观测值 Z_k 相乘得到的概率最大值。经典的卡尔曼滤波器要求估计的对象是线性系统,且系统误差近似服从高斯分布时才能有良好的滤波效果^[17]。在数据采集过程中影响信号质量的因素主要包括电路的热效应和背景杂散光的干扰。印刷电路板在长时间的工作下,会产生一定的热量,造成电子元器件的温度漂移,进而对信号质量产生影响。背景杂散光噪声由外光路引入,该噪声均匀分布在整个时间域内。在随机过程相关理论中,这两种噪声都独立服从于期望为0的高斯分布^[18]。系统噪声协方差为 Q ,观测噪声协方差为 R ,当系统预测量 X_{k-1} 、观测值 Z_k 满足预测方程时, K 时刻的估计值 \hat{X}_k 可以由式(23)得出

$$\hat{X}_{\bar{k}} = A\hat{X}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (21)$$

$$P_{\bar{k}} = AP_{k-1}A^T + Q \quad (22)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{\bar{k}} + K_k(Z_k - H\hat{X}_{\bar{k}}) \quad (23)$$

$$P_k = (I - K_kH)P_{\bar{k}} \quad (24)$$

$$K_k = \frac{P_{\bar{k}}H^T}{HP_{\bar{k}}H^T + R} \quad (25)$$

其中,式(21)~(23)为预测方程,式(24)、(25)为更新方程。 A 、 B 表示状态转移矩阵和输入转换矩阵, I 为单位矩阵, H 为线性转换矩阵; P_k 是 K 时刻的先验协方差, $P_{\bar{k}}$ 是 K 时刻的后验协方差; K_k 是卡尔曼增益。

系统的初始状态一般是难以精确确定的,若初始值与实际测量值差值过大,则需较长的稳定时间。本系统将采集信号的前10个数据的平均值设置为算法初始值,降低算法的延迟性。在理论分析的基础上,使用MATLAB软件设计卡尔曼滤波算法并将其嵌入基于LabVIEW的上位机监测平台,通入体积分数为0的CO气体(即纯 N_2),连续测量80 min,观察系统的稳定性。如图9(a)所示,测试得到的浓度波动为 $-7.38 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$,与滤波前相比波动降低了约40.56%。图9(b)为经过卡尔曼滤波后的Allan标准差曲线,当积分时间为0.25 s时,系统的检测下限为 3.60×10^{-7} ,系统的检测下限降低到原来的23%。

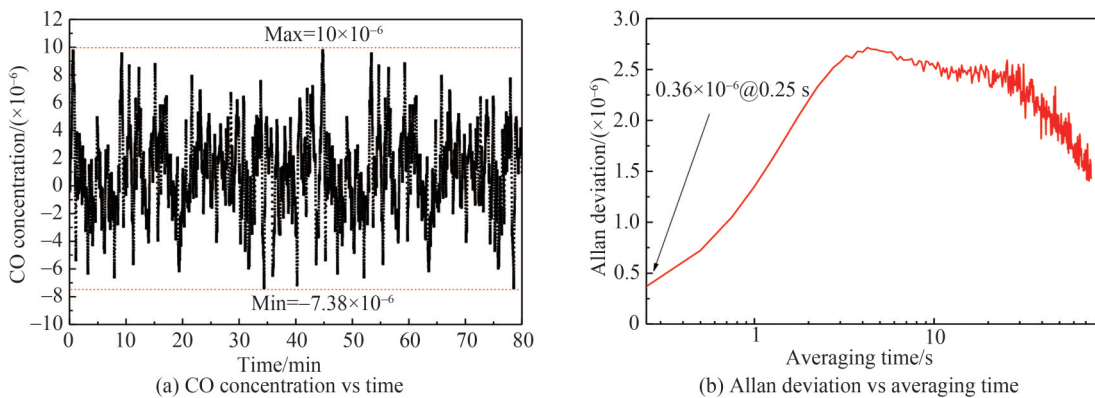


图9 引入卡尔曼滤波算法后,系统对体积分数为 0×10^{-6} CO样品长时间的监测结果及Allan标准差曲线
Fig. 9 Long-term monitoring result on the CO sample with a volume fraction of 0×10^{-6} and Allan standard deviation curve after Kalman filter

4.5 火灾检测应用

为了验证所研制的CO传感系统对早期火灾的检测能力,对纸张,棉花以及木材三种可燃物在阴燃阶段所产生的CO浓度进行了测量。如图10(a)所示,分别取0.1 g的纸张、棉花以及木材放置在加热台(heater)上进行加热,产生的CO气体首先经过气体预处理装置(gas processing platform)中的过滤器(filter)和干燥管

(dry tube)滤除掉杂质和水汽,然后利用真空泵(pump)以 12 L/min 的流速把气体抽入到气室中。实验过程中可燃物全程并未出现明火,一直处于阴燃状态。实验结果如图 10(b)所示,在 200 s 时开始加热,三种材料产生的 CO 气体能被探测到的时间分别为 214 s、249 s 和 270 s。此外,从图中可以看出相同质量的纸张,棉花,木材在阴燃时产生的 CO 气体浓度的峰值分别为 1.51×10^{-4} 、 2.18×10^{-4} 、 2.59×10^{-4} 。因此可以通过 CO 的浓度变化来探测火灾的发生。此外,与棉花和纸张相比,木材所产生的 CO 持续时间更长,这是由于木材的碳化效应所致^[18]。

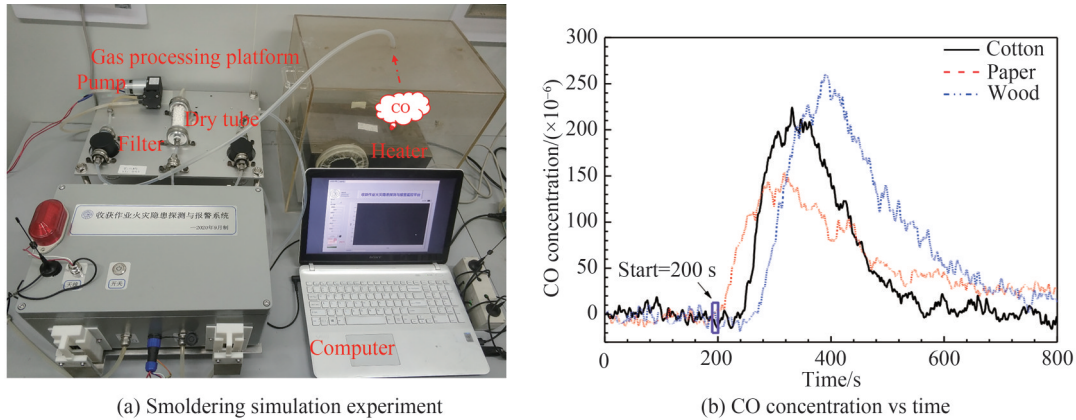


图 10 棉花、纸和木材阴燃实验和 CO 浓度的探测结果

Fig. 10 Cotton, paper and wood smoldering experiments and CO concentration measurement results

5 结论

根据 CO 气体分子在红外波段的吸收特性,设计了一种用于火灾检测的红外 CO 传感系统,通过实验对该传感系统的性能进行测试了评价。其中自制的锁相放大器背景噪声波动范围为 $38.890 \sim 43.23 \mu\text{V}$,最低检测下限为 $0.15 \mu\text{V}$ 。在温度为 298 K,大气压强为 1 atm,光程为 180 cm 时,系统的分辨率优于 2×10^{-5} ,响应时间为 35~38 s。对体积分数为 0×10^{-6} 的 CO 样品进行长期监测,其波动范围为 $-1.42 \times 10^{-5} \sim 1.51 \times 10^{-5}$,当积分时间为 0.25 s 时,系统检测下限为 1.54×10^{-6} ,当积分时间为 300 s 时,理论上系统的检测下限能达到 3.50×10^{-7} 。引入卡尔曼滤波算法来提高系统的稳定性,结果表明经过卡尔曼滤波后系统的波动降低了 40.56%,当积分时间为 0.25 s 时,检测下限达到 3.60×10^{-7} 。开展了棉花、纸张、木材的阴燃实验,三种物品在阴燃时产生的 CO 气体浓度的峰值分别为 1.51×10^{-4} 、 2.18×10^{-4} 和 2.59×10^{-4} 。实验结果表明,所研制的传感系统具有较高的检测灵敏度、实用性强,在早期火灾检测中有着较好的应用前景。

参考文献

- [1] IACOVO A D, VENETTACCI C, COLACE L, et al. PbS colloidal quantum dot visible-blind photodetector for early indoor fire detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(14): 4454-4459.
- [2] ZHOU Xiaolin, YU Faxin, WEN Yuchun, et al. Early fire detection based on flame contours in video[J]. Information Technology Journal, 2010, 9(5): 899-908.
- [3] SEEBAMRUNGSAT J, PRAISING S, RIYAMONGKOL P. Fire detection in the buildings using image processing[C]. Student Project Conference, IEEE, 2014, 3: 95-98.
- [4] WANG Jinjun, ZENG Yi, YUAN Wei, et al. Study on smoldering fire characteristics of cotton stack in early stage and active aspirated compound detection of cotton warehouse[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(2): 205-208.
王进军, 曾怡, 袁伟, 等. 棉垛早期阴燃火灾特性及棉花仓库主动吸气式复合探测研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(2): 205-208.
- [5] XIA Enliang, LIU Shenyong, CHENG Xudong, et al. Comparative study on smoldering and open fire combustion characteristics of cotton[J]. Fire Science, 2013, 2(2): 70-76.
夏恩亮, 刘申友, 程旭东, 等. 棉花阴燃和明火燃烧特性的对比研究[J]. 火灾科学, 2013, 2(2): 70-76.
- [6] COURBAT J, PASCU M, GUTMACHER D, et al. A colorimetric CO sensor for fire detection [J]. Procedia Engineering, 2011, 12(25): 1329-1332.
- [7] YANG Song, ZHANG Shaowei, SUN Peizhuang, et al. Agricultural fire alarm system based on 4G network and multi-sensor [J]. Internet of Things Technology, 2018, 8(9): 89-95.

- 杨颂, 张少伟, 孙培壮, 等. 基于4G网络和多传感器的农业火灾报警系统[J]. 物联网技术, 2018, 8(9): 89-95.
- [8] HE Ailong, CHEN Meijuan, Video fire detection based on multi-feature fusion [J]. Software Tribune, 2020, 19(7): 198-203.
何爱龙, 陈美娟. 基于多特征融合的视频火灾检测方法[J]. 软件导刊, 2020, 19(7): 198-203.
- [9] JIANG Yalong, ZHU Yuquan, WANG Jinjun. Application of tunable semiconductor laser absorption spectroscopy in fire detection [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(1): 56-61.
蒋亚龙, 祝玉泉, 王进军. 可调谐半导体激光吸收光谱技术用于火灾探测初步试验[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(1): 56-61.
- [10] GUTMACHER D, HOEFER U, WOELLENSTEIN J. Gas sensor technologies for fire detection [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2012, 11(175): 40-45.
- [11] WANG J, WANG H. Tunable fiber laser based photoacoustic gas sensor for early fire detection [J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 7(65): 1-4.
- [12] PI Mingquan, ZHENG Chuantao, BI Ran, et al. Design of a mid-infrared suspended chalcogenide/silica-on-silicon slot-waveguide spectroscopic gas sensor with enhanced light-gas interaction effect [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2019, 10(297): 126732-126732.
- [13] LI Yafei, LIU Zhiwei, ZHANG Tianyu, et al. Development and application of near infrared laser carbon dioxide sensing system [J]. Optical Journal, 2020, 40(5): 144-150.
李亚飞, 刘志伟, 张天羽, 等. 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.
- [14] LI Guolin, JI Wenhai, WANG Yiding. Design and experiment of mid-infrared differential CO detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 40(4): 105-110.
李国林, 季文海, 王一丁. 中红外差分式CO检测仪的设计与实验 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 105-110.
- [15] WU Tiezhou, LI Yan, QI Jun, et al. Kalman filter combined with digital phase-locked amplifier for low light acoustic signal denoising method [J]. Instrument Technology and Sensors, 2020, 453(10): 102-106.
吴铁洲, 李炎, 祁军等. 卡尔曼滤波结合数字锁相放大器的弱光声信号降噪方法研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2020, 453(10): 102-106.
- [16] CHENG Li, ZHANG Chao, XIAO Daolin, et al. Optimization analysis of LSDYNA impact curve based on Kalman filter method [J]. Mechanical and Electronic Information, 2021, 1(2): 4-5.
程丽, 张超, 肖道林, 等. 基于卡尔曼滤波法的LSDYNA冲击曲线优化分析 [J]. 机电信息, 2021, 1(2): 4-5.
- [17] LU Wu, HE Weiji, WU Miao, et al. Time-dependent Kalman depth estimation for photon counting lidar [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3): 0311001.
陆侯, 何伟基, 邬淼, 等. 光子计数激光雷达的时间相关卡尔曼深度估计 [J]. 光子学报, 2021, 50(3): 0311001.
- [18] DANG Jingmin, YU Haiye, SONG Fang, et al. Application of CO sensor in early fire detection [J]. Optical Precision Engineering, 2018, 26(8): 1876-1881.
党敬民, 于海业, 宋芳, 等. 应用于早期火灾探测的CO传感器 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1876-1881.

Infrared Carbon Monoxide Sensor System for Early Fire Detection

MA Zhuo^{1,2}, LI Yafei^{1,2}, LU Yang^{1,2}, SONG Fang^{1,2}, ZHENG Chuantao^{1,2}, WANG Yiding^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, China)

(2 Jilin Provincial Engineering Research Center of Infrared Gas Sensing Technique, Changchun 130012, China)

Abstract: China is not only a large agricultural country, but also one of the countries suffering from the most serious agricultural disasters in the world. Early fire detection can help to avoid greater losses. Crops have a period of smoldering before the open flame. Due to lack of oxygen, the combustion is extremely insufficient, and a small amount of carbon monoxide (CO) with a relatively stable concentration will be produced. Therefore, the occurrence of early fire can be judged by detecting gas-phase CO. Non-Dispersive Infrared (NDIR) absorption spectroscopy was used in this paper. Based on the absorption band of CO gas molecules at 4.6 μm , a differential infrared CO sensor system for early fire detection was developed by using a broadband infrared thermal light source and a dual-channel pyroelectric detector. This sensor system is mainly composed of a gas pretreatment part, an optical part, an electrical part and an upper computer monitoring part. Firstly, the detection principle of the sensor system was introduced, and

then the absorption band of CO in the infrared region was selected by comparing the strength of absorption lines in different absorption bands and excluding the absorption interference of other gas molecules. Through the derivation of the optical matrix, the structure of the gas cell was designed and optimized, and the optical path of gas absorption reached 180 cm. The background noise fluctuation range of the phase-locked amplifier is $38.89 \mu\text{V} \sim 43.23 \mu\text{V}$, and the lowest detection limit is $0.15 \mu\text{V}$. Finally, the performance of the sensor system was tested through related experiments. The results show that the measurement resolution is less than 2×10^{-5} and the response time is 35~38 s. The concentration level of the 0×10^{-6} CO standard gas sample was dynamically monitored for 80 minutes, and its concentration fluctuation range is $-1.42 \times 10^{-5} \sim 1.51 \times 10^{-5}$. When the integration time is 0.25 s, the detection limit of the system is 1.54×10^{-6} , and when the integration time is 300 s, the detection limit of the system can reach 3.50×10^{-7} . Kalman filtering algorithm was used to improve the stability of the system. Similarly, the 0×10^{-6} CO standard gas sample was dynamically monitored for 80 minutes. The results show that the relative error is reduced by 40.56 %, and when the integration time is 0.25 s, the detection limit is reduced to 3.60×10^{-7} . Finally, fire smoldering experiments of cotton, paper and wood were carried out to study the relationship between CO concentration and smoldering time. It is proved that the change of CO concentration can be used to detect the occurrence of fire. The experimental results show that the CO sensor system has a good early fire detection capability and wide application prospects.

Key words: Sensor system; Infrared absorption spectrum; Matrix optics; Gas detection; Fire detection

OCIS Codes: 300.6340; 280.1740; 070.2590; 070.4790

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (No. 20213201903), National Natural Science Foundation of China (Nos. 61960206004, 62175087), Science and Technology Development Program of Jilin Province, China (No. 20200401059GX), Science and Technology Research Program of Department of Education, Jilin Province, China (No. JJKH20211088KJ), Key Research and Development Program of Changchun City, China (No. 21ZGN24), Program for JLU Science and Technology Innovative Research Team (Nos. JLU-STIRT, 2021TD-39)