

中红外甲烷二氧化碳双气体传感系统的研制

赵庆川^{1,2*}

¹中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039;

²瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400039

摘要 为了实现对甲烷和二氧化碳双气体一体化测量,设计了以两个窄带中红外发光二极管(LED)作为甲烷和二氧化碳测量光源、以两个光电二极管(PD)作为探测器敏感元件的双 LED-PD 光学测量结构,研制了中红外甲烷二氧化碳双气体传感系统。对谱线及光学器件的选择、双 LED 光源脉冲电流调制、温度补偿算法进行了研究。根据甲烷和二氧化碳气体的红外线吸收光谱特征进行光学测量结构的设计,利用 LED 器件高速响应特性完成双光源脉冲电流调制时序算法,即采用窄脉冲模式进行电流驱动。在温度实验分析的基础上,采用中值归一数据预处理得到温度影响因子,然后对温度影响因子进行线性拟合得出温度补偿算法。实验结果表明:传感系统的平均功耗低至 38.3 mW;甲烷测量误差最小为 0.06%(体积分数),二氧化碳测量误差最小为 0.05%(体积分数),可满足煤矿中甲烷和二氧化碳双气体浓度低功耗、稳定可靠实时测量的要求。

关键词 光谱学; 红外光谱; 中红外光源; 热电致冷; 窄脉冲; 甲烷检测; 二氧化碳检测

中图分类号 TN219

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2330001

Development of a Mid-Infrared Methane and Carbon Dioxide Dual-Gas Sensor System

Zhao Qingchuan^{1,2*}

¹China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China;

²State Key Laboratory of the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400039, China

Abstract A mid-infrared methane and carbon dioxide dual-gas sensor system is developed herein to realize the integrated measurement of methane and carbon dioxide. A dual LED-PD(light-emitting diode-photodiode) optical-measurement structure with two narrow-band mid-infrared light-emitting diodes as the light source for methane and carbon dioxide measurements and two photodiodes as the detector sensing elements are designed. Furthermore, the selection of spectral lines and optical devices, pulse current modulation of double LED light source, and the temperature compensation algorithm are studied. The optical measurement structure is designed based on the infrared absorption spectrum characteristics of methane and carbon dioxide gas, and the pulse current modulation timing algorithm of double light sources is completed by using the high-speed response characteristics of LED devices, that is, the current is driven by narrow pulse mode. Based on the analysis of temperature experiment, the temperature influence factors are obtained through the data preprocessing of median normalization, and then the temperature compensation algorithm is obtained by linear fitting. Experimental results indicate that the average power consumption of the sensor system is as low as 38.3 mW; the minimum measurement error of methane is 0.06% (volume fraction), and the minimum measurement error of carbon dioxide is 0.05% (volume fraction). The system can satisfy the requirements of low power consumption and stable and reliable real-time measurement of methane and carbon dioxide concentrations in coal mine.

Key words spectroscopy; infrared spectrum; mid-infrared light source; thermoelectric refrigeration; narrow pulse; methane detection; carbon dioxide detection

OCIS codes 300.6340; 230.5160; 220.4830

收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2020-08-05; 录用日期: 2020-08-26

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项重点项目(2019-TD-ZD007)、重庆市安全生产(煤炭发展)专项资金项目(2020B182[5985]20015492)、重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(cstc2019jscx-msxm0347, cstc2019jscx-msxm0436)

* E-mail: zhaqiqich@163.com

1 引 言

在煤矿开采活动中,矿井中会涌出多种有毒有害气体,其中使人窒息的气体是甲烷与二氧化碳;此外,甲烷气体具有爆炸性,爆炸后矿井存在瓦斯(二氧化碳)喷出危险,是矿工生命安全的主要威胁^[1-2]。甲烷、二氧化碳亦是主要的温室效应气体,实时检测甲烷、二氧化碳气体浓度对煤矿瓦斯突出防治工作、监测温室气体排放等具有重要意义^[3-4]。甲烷、二氧化碳气体检测技术发展得较快,目前采用的主要是非色散红外(NDIR)光谱技术或可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术,这两种技术的检测精度及稳定性均较高^[5-7]。

TDLAS 技术具有灵敏度高、响应时间短、无气体交叉干扰、分辨率高的优点^[8-10],并且长期工作稳定性较好^[11-12];但是为了获得良好的检测性能,激光器需要进行温度控制,故检测设备结构复杂、功耗高,不易实现小型化、低功耗应用。NDIR 技术具有检测精度高、量程大、选择性强、响应速度快等优点^[13-15],但 NDIR 设备采用的是热辐射光源,存在监测结果受水汽干扰、功耗高的问题,从而限制了 NDIR 技术的推广应用。

吴涛等^[16]采用波长调制光谱技术搭建了基于 2.73 μm 分布反馈式激光器的可以同时测量二氧化碳和水汽的装置;叶玮琳等^[17]使用单一中红外激光器光源和单一探测器,建立了一个甲烷、乙烷双组分气体同步测量系统;李明星等^[18]研制了基于 TDLAS 的开放式长光程一氧化碳和甲烷实时检测系统;李春光等^[19]研制了基于不同结构传感光学核的两个小型 TDLAS 传感系统,这两个系统可以实现甲烷和甲醛的探测;季文海等^[20]采用 TDLAS 分析平台对一氧化碳和二氧化碳气体进行了分析。上述研究采用的均是 TDLAS 技术,所用设备的光程长、体积大,且激光器功耗高,需进行恒温散热设计,因此研究一种新的技术实现甲烷二氧化碳双气体一体化测量,以降低传感系统功耗及用户使用、维护成本,具有十分重要的意义。

近几年,随着 GaInAsSb(镓铟砷锑)固溶物异质结生长在定量技术上的突破,基于窄带隙 III-V 族半导体的中红外光谱范围的高效发光二极管(LED)和光电二极管(PD)器件陆续出现,为 NDIR 技术的工程应用提供了一种途径。本文基于 NDIR 技术,采用两个窄带中红外 LED 分别作为甲烷测量 LED 光源和二氧化碳测量 LED 光源(两个光电二

极管分别作为吸收红外光并将其转换为电流信号的探测器敏感元件),构建了一种新型的测量气体浓度的双 LED-PD 光学系统,并采用该系统实现了甲烷和二氧化碳双气体浓度的一体化检测,降低了系统成本和设备维护难度。此外,本文还对双 LED 光源脉冲电流调制技术进行了研究,以降低传感系统的功耗;同时,本文还研究了温度补偿算法,以补偿温度变化对传感系统测量精度的影响。

2 基本原理

2.1 基本检测原理

朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律是 NDIR 技术进行气体检测的理论依据,它定义了气体对光吸收的定量关系。在吸收中变化的能量与被测气体的分子振动频率相对应,因此每种气体均有特定的吸收光谱。光强变化与气体浓度之间的表达式为

$$I = I_0 \exp[-KNL/S(T)], \quad (1)$$

式中: I 为 PD 探测器接收到的光强; I_0 为 LED 光源发射的光强; L 为采样气室的光程; K 表示与被测气体光谱特性有关的吸收系数; N 为气体浓度; $S(T)$ 是气体温度 T 对光强影响的函数。则气体浓度 N 的表达式为

$$N = S(T) \frac{\ln(I_0/I)}{KL}. \quad (2)$$

由(2)式可知,在被测气体成分已知且光学器件和采样气室结构设计不变的前提下,光程 L 、吸收系数 K 是固定的,微处理器采集转换的 PD 探测器的光电流信号经光敏信号电路处理后的输出信号值与光强正相关,因此本文引入了传感器微处理器的初次计算浓度 N_j ,其表达式为

$$N_j = \frac{\ln(I_0/I)}{KL}. \quad (3)$$

由(2)式和(3)式可知,气体浓度 N 与初次计算浓度 N_j 之间的关系为

$$N = S(T)N_j. \quad (4)$$

由(4)式可知,实际被测气体浓度会受温度变化的影响。在实验室温度恒定的情况下,通过采集两路 PD 探测器光电流信号经光敏信号电路处理后的输出信号值与纯氮气环境下信号值之比的变化情况,即可根据(3)式计算出甲烷、二氧化碳气体的初次计算浓度,而后通过综合实验法即可得到温度补偿函数 $S(T)$ 的表达式。

2.2 传感系统的组成

中红外甲烷二氧化碳传感系统由光学部分和电

学部分组成。光学部分由甲烷测量 LED、甲烷测量 PD、二氧化碳测量 LED、二氧化碳测量 PD 及光学气室组成,电学部分由线性稳压电路、电流驱动电路、信号滤波放大器、测温电路及微控制器组成。传感系统框图如图 1 所示。

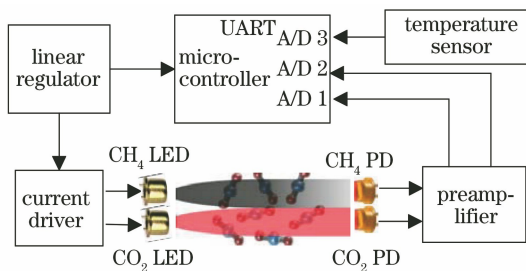


图 1 中红外甲烷二氧化碳传感系统原理图

Fig. 1 Schematic of mid-infrared methane and carbon dioxide sensing system

线性稳压电路将输入的 3.3~4 V 电压转换为各电学部分的工作电压。电流驱动电路调制两个 LED 光源按照脉冲逻辑顺序发出红外光,红外光被光学气室内的甲烷、二氧化碳气体分子吸收后,再被两个 PD 探测器吸收并转换为光电流,然后再经信号滤波放大后转换为电压信号进入微控制器 A/D (模/数)转换通道,微控制器依次采集甲烷、二氧化碳的浓度值,之后根据计算程序即可得到甲烷、二氧

化碳气体的浓度。微控制器通过 UART 接口与二次仪表通信。微控制器通过采集温度传感元件的信号计算温度值,然后根据(4)式补偿修正甲烷、二氧化碳的浓度值。

3 系统设计

3.1 谱线选择及光学部分设计

甲烷气体在 3.2~3.45 μm 中红外波段有非常强的主吸收峰,在 2.3 μm 处有一个较弱的次吸收峰;二氧化碳气体的红外光主吸收峰在 4.2~4.32 μm 波段,次吸收峰在 2.7 μm 处;水分子的红外光主吸收峰分布于 2.5~2.8 μm 波段,与二氧化碳气体次吸收峰高度重叠,存在交叉干扰。因此,应选择主吸收峰波段对甲烷、二氧化碳气体的浓度进行检测。

在光学部分,按照 LED 光谱最小光耦包含气体主吸收峰的设计原则,本文选用俄罗斯 LED Microsensor NT 公司生产的中红外发光二极管及光电二极管作为 LED 光源和 PD 探测器,采用 Lms34 LED 和 Lms36 PD 测量甲烷,采用 Lms43 LED 和 Lms43 PD 测量二氧化碳。Lms34 LED、Lms36 PD、Lms43 LED、Lms43 PD 与甲烷、二氧化碳主吸收峰的光谱关系如图 2 所示。

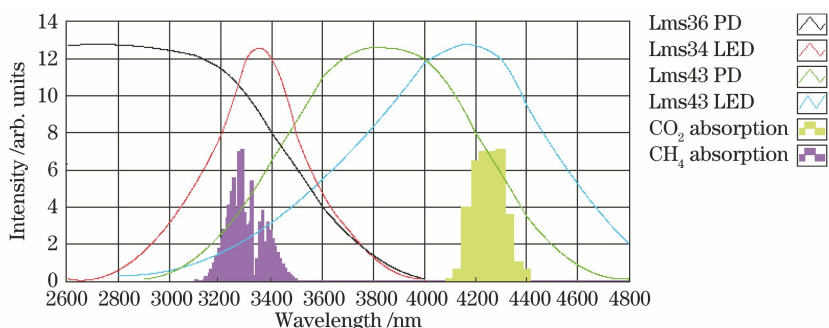


图 2 Lms34 LED、Lms36 PD、Lms43 LED、Lms43 PD 的光谱与甲烷、二氧化碳主吸收峰的关系

Fig. 2 Relation between spectra of Lms34 LED, Lms36 PD, Lms43 LED and Lms43 PD and main absorption peaks of methane and carbon dioxide

LED 光源是半导体发射源。随着温度升高,几个与温度相关的因素(包括载体异质结壁垒的过度损耗、表面重组及深层的非辐射性重组),都会导致 LED 发射强度减小,同时峰值波长向更长的方向变化。温度对 Lms34 LED 发射强度及峰值波长的影响如图 3 所示。

温度对 Lms43 LED 发射强度及峰值波长的影响规律与温度对 Lms34 LED 的影响基本一致,因此,如何消除温度对 LED 器件的影响关系到传感系

统的实用性及工作稳定性。

LED 器件由 GaSb 基板及生长的窄带隙 GaInAsSb/AlGaAsSb 异质结晶体组成。为减小器件的尺寸,将 Lms34 LED 和 Lms43 LED 这两个器件以点光源的形式定制成 2 个 LED 阵列,采用标准的 TO 类型的封装。同时,在封装内设计有基于帕尔贴原理的热电致冷器件,目的是使 LED 光源在宽范围内保持固定温度,从而将 LED 光源参数稳定在期望值上。此外,在封装内还设计有热敏电阻,温度

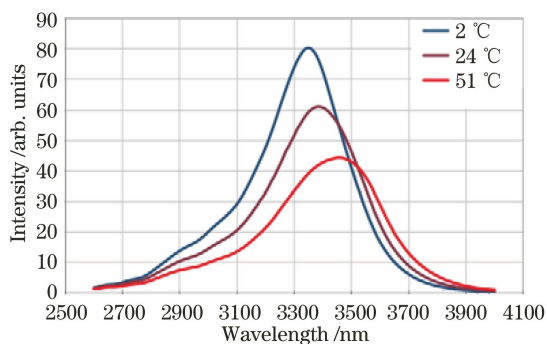


图 3 温度对 Lms34 LED 发射强度及峰值波长的影响
Fig. 3 Influences of temperature on emission intensity and peak wavelength of Lms34 LED

测量值 T 用于软件算法进行温度补偿。通过上述两项措施基本可消除温度对 LED 器件性能的影响。带有热电致冷器件的 LED 阵列设计如图 4 所示。

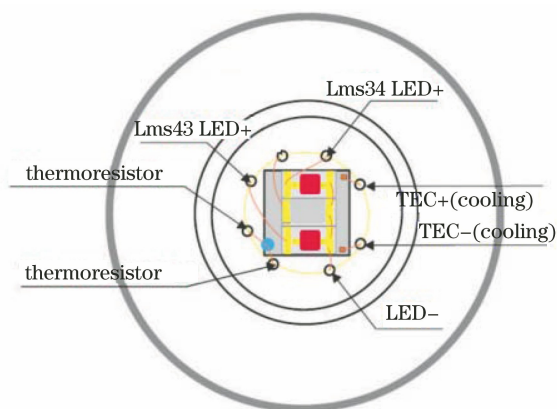


图 4 带有热电致冷器件的 LED 阵列设计图
Fig. 4 LED array design drawing with thermoelectric cooling device

光学气室采用不锈钢精密加工得到；光路反射面是采用超疏水、自清洁涂层工艺技术精密加工的球面镜，有利于发射光线的反射。光路结构为两个 LED 光源依次向光学气室顶部反射镜面发射中红外光，中红外光经反射镜面反射后被两个光电二极管同时吸收。

3.2 脉冲电流调制技术

LED 器件具有寿命长、响应快的优势，响应时间低至 0.1 ns。用于甲烷、二氧化碳浓度测量的 LED 光源有连续、准连续、窄脉冲三种驱动模式，而 LED 的驱动模式决定了光学参数。连续模式功耗高，实用性差；占空比为 50% 的脉冲驱动是可获得最大平均功率的准连续模式；脉冲宽度小于 1 ms 且占空比小于 10% 的脉冲驱动是窄脉冲模式，可以获得最大的峰值功率。为了在降低传感器系统功耗的同时获得 LED 在峰值波长处的最大功率，Lms34

LED 和 Lms43 LED 选择窄脉冲驱动模式。在驱动电流脉冲宽度为 2 μs 和脉冲频率为 8 kHz 的条件下，Lms34 LED 在不同脉冲电流下的发射光谱如图 5 所示。

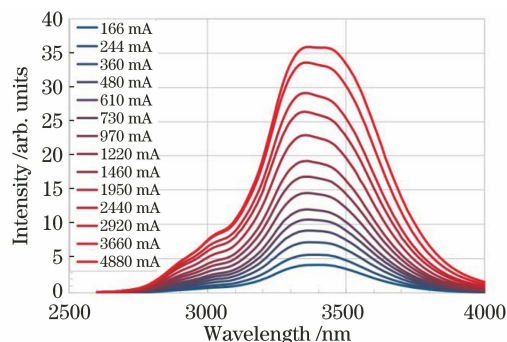


图 5 Lms34 LED 在不同脉冲电流下的发射光谱
Fig. 5 Emission spectra of Lms34 LED at different pulse currents

由图 5 可知，脉冲电流越大，Lms34 LED 的发射强度越大。在满足传感系统检测分辨率和灵敏度的前提下，应降低传感系统的功耗，以避免脉冲电流对线性稳压器件冲击造成的检测误差。Lms34 LED 和 Lms43 LED 的脉冲电流调制时序如图 6 所示。

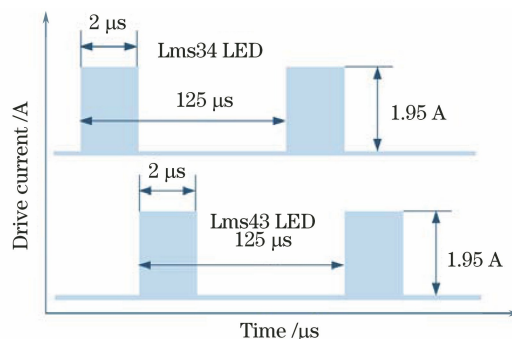


图 6 Lms34 LED 和 Lms43 LED 的脉冲电流调制时序
Fig. 6 Pulse current driving timing of Lms34 LED and Lms43 LED

Lms34 LED 和 Lms43 LED 光源按照图 6 所示时序依次交替上电工作，即：Lms34 LED 光源首先上电工作，2 μs 后断电，同时 Lms43 LED 光源上电工作，2 μs 后 Lms43 LED 光源断电，121 μs 后 Lms34 LED 光源上电工作。单个 LED 光源平均功耗 P 的计算公式为

$$P = \tau f U_F I_F, \quad (5)$$

式中： τ 为脉冲宽度； f 为脉冲频率； U_F 为工作电压； I_F 为驱动电流。

结合脉冲电流调制时序与 LED 发射光谱强度确定 LED 功耗参数如下：Lms34 LED 的驱动电流

为 1.95 A,工作电压为 0.5 V,脉冲宽度为 2 μ s,脉冲频率为 8 kHz(由脉冲宽度 125 μ s 推算得到)。

由(5)式计算可得 $P = 15.6$ mW,即单个 LED 光源的平均功耗为 15.6 mW,则 Lms34 LED 和 Lms43 LED 双 LED 光源的平均功耗为 31.2 mW。传感系统内 Lms43 PD、Lms36 PD、微控制器等电路器件的平均功耗约为 5 mW,因此中红外甲烷二氧化碳传感系统的平均功耗不足 40 mW。由此可以看出,该系统具有显著的低功耗优势,适合在对功耗要求较高的变送器中应用。

3.3 信号处理及计算

当中红外光线照射到光电二极管上时,Lms36 PD 和 Lms43 PD 会产生与照度成线性关系的两路光电流信号。光电流经过信号滤波放大电路后输出电压信号 U_{s36} 和 U_{s43} ,然后由微控制器 A/D 输入通道采样并转换,计算出 U_{s36} 和 U_{s43} 的电压值。

由图 2 可知,Lms43 LED 发射光谱和 Lms43 PD 吸收光谱与甲烷吸收带存在交叉关系,虽然它们在信号强度上相差几个数量级,但是在甲烷浓度较高时,仍会对二氧化碳的检测带来影响。因此,应先通过实验确定甲烷气体浓度对二氧化碳浓度检测值的影响系数,进行计算补偿,消除传感系统中甲烷和二氧化碳的交叉干扰。微控制器根据(3)式编写的运算程序及电压-浓度转换计算函数,结合气体交叉干扰补偿算法,分别计算甲烷、二氧化碳气体的初次计算浓度 N_j 。

4 温度实验与补偿算法

4.1 温度实验

由(4)式可知,甲烷、二氧化碳的实际浓度会受温度变化的影响,但是 LED 光源和光电二极管随温度变化的特性无法简单地通过理论分析得到。因此,本文采用综合实验方法得到了温度补偿函数 $S(T)$ 的表达式。

首先通过温度实验得到甲烷、二氧化碳标准气体在不同温度下的初次计算浓度 N_j 。然后选取三台实验装置,设置环境温度为 20 $^{\circ}$ C,通入 2.01% 的甲烷标准气体(标准气体中甲烷的体积分数为 2.01%)对系统进行甲烷测量精度的校准,通入 2.49% 的二氧化碳标准气体(标准气体中二氧化碳的体积分数为 2.49%)对系统进行二氧化碳测量精度的校准;之后将系统实验装置放入高低温试验箱中进行实验,在 -20~50 $^{\circ}$ C 的温度范围内,每隔 10 $^{\circ}$ C 设置一个实验点,分别通入 2.01% 的甲烷标

准气体和 2.49% 的二氧化碳标准气体,记录三台实验装置测量值的平均值。测试结果如表 1 所示。

表 1 -20~50 $^{\circ}$ C 范围内标准气体浓度下的系统测量值
Table 1 System measurement value under standard gas concentration in the temperature range from -20 $^{\circ}$ C to 50 $^{\circ}$ C

Temperature / $^{\circ}$ C	Measurement value /%	
	Methane (2.01%)	CO ₂ (2.49%)
-20	2.19	2.79
-10	2.14	2.70
0	2.10	2.63
10	2.06	2.57
20	2.01	2.49
30	1.97	2.42
40	1.91	2.36
50	1.87	2.28

由表 1 可知,甲烷、二氧化碳测量结果在 -20~50 $^{\circ}$ C 范围内的变化较大,测量值与真实值的最大偏差分别为 8.96% 和 12%,需要根据(4)式进行温度补偿。

4.2 补偿算法

将表 1 内的数据以 20 $^{\circ}$ C 测量值为基准进行中值归一数据预处理,得到不同温度下甲烷、二氧化碳温度对真实气体浓度的影响因子,连接各点绘成两

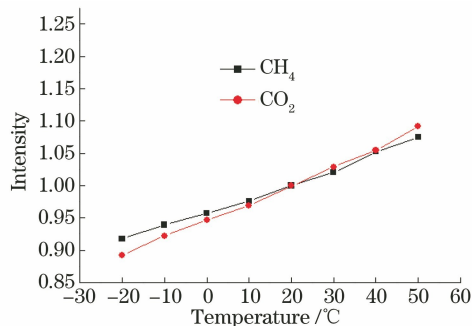


图 7 温度影响因子曲线

Fig. 7 Temperature influence factor curves

条温度影响因子曲线,如图 7 所示。然后分别进行甲烷、二氧化碳温度影响因子曲线的线性拟合,得到温度补偿函数 $S(T)$ 的表达式为

$$S_{CH_4}(T) = 0.0022T + 0.9586, \quad (6)$$

$$S_{CO_2}(T) = 0.0028T + 0.9465. \quad (7)$$

将(6)式和(7)式分别代入(4)式即可完成具有温度补偿修正的甲烷、二氧化碳气体浓度的计算。然后以此逻辑完成微控制器程序算法的编写,就可实现甲烷、二氧化碳浓度测量值的温度补偿修正,从而基本消除温度变化对测量结果准确性的影响。

5 系统实验

为了验证中红外甲烷二氧化碳双气体传感系统的基本性能,按图 1 所示系统原理设计加工了传感系统样件,并设计了以传感系统为气体浓度测量敏感元件的实验平台,如图 8 所示。



图 8 传感系统实验平台

Fig. 8 Sensor system experiment platform

在目前的矿用传感检测仪器中,基于热辐射光源的红外甲烷检测仪及激光甲烷检测仪的平均功耗一般不小于 100 mW,基于热辐射光源的红外二氧化碳检测仪的平均功耗约为 120 mW,而如图 8 所示中红外甲烷二氧化碳双气体传感系统在工作电压为 3.3 V 时的实测平均功耗为 38.3 mW。这说明本文设计的传感系统在气体检测领域具有一定的应用优势。

依据 AQ 6211—2008《煤矿用非色散红外甲烷传感器》及 AQ 1052—2008《矿用二氧化碳传感器通用技术条件》这两个国家安全生产行业标准的基本性能要求及试验方法,对传感系统在工作电压、工作电流、量程、示值误差、响应时间等性能方面进行测试,得到了传感系统的基本性能指标,如表 2 所示。

表 2 传感系统的基本性能指标

Table 2 Basic performance index of sensor system

Parameter	Value
Working voltage /V	3.2-4.0
Average current /mA	<13
CH ₄ measuring range (volume fraction) /%	0-100
CO ₂ measuring range (volume fraction) /%	0-5.00
CH ₄ indication error	±0.06%(0-1.00%) ±6% of true concentration (1.00%-100%)
CO ₂ indication error	±0.05%(0-0.50%) ±5%FS (>0.50%-5.00%)
Response time /s	<20

由表 2 可知,本文研制的中红外甲烷二氧化碳双气体传感系统的基本性能指标均满足或优于 AQ 6211—2008 与 AQ 1052—2008 中的相关要求。

6 结 论

为了降低传感系统的功耗以及用户的使用、维护成本,实现甲烷和二氧化碳双气体一体化测量的要求,本文提出了双 LED-PD 光学测量结构的气体传感检测方法,并介绍了双 LED 光源谱线选择、器件选型及光学部分的设计原理。然后研究了双 LED 光源脉冲电流调制技术的时序逻辑及低功耗算法,最后根据温度实验数据给出了温度补偿算法,实现了传感系统在 -20~50 °C 温度范围内的高精度测量。实验结果表明:传感系统的平均功耗低至 38.3 mW;甲烷测量误差最小为 0.06%(体积分数),二氧化碳测量误差最小为 0.05%(体积分数),可以满足煤矿中甲烷、二氧化碳双气体浓度实时测量的要求。

参 考 文 献

- [1] Yuan L, Jiang Y D, He X Q, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 306-318.
袁亮,姜耀东,何学秋,等. 煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 306-318.
- [2] He X Q, Wang A H, Dou L M, et al. Technology of microseismic dynamic monitoring on coal and gas outburst-prone zone [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3122-3129.
何学秋,王安虎,窦林名,等. 突出危险煤层微震区域动态监测技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3122-3129.
- [3] Zhang J G, Lan T W, Wang M, et al. Prediction method of deep mining dynamic disasters and its application in Pingdingshan mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1698-1706.
张建国,兰天伟,王满,等. 平顶山矿区深部矿井动力灾害预测方法与应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1698-1706.
- [4] Yu M G, Yang X F, Zheng K, et al. Progress and development of coal mine gas explosion suppression and disaster reduction technology in China [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 168-188.
余明高,阳旭峰,郑凯,等. 我国煤矿瓦斯爆炸抑爆

- 减灾技术的研究进展及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 168-188.
- [5] Li T G, Li S Y, Zhang J M, et al. Infrared detection method of gas based on Goertzel algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48 (3): 0304003.
李唐安, 李世阳, 张家明, 等. 基于 Goertzel 算法的红外气体检测方法[J]. 红外与激光工程, 2019, 48 (3): 0304003.
- [6] Jia L Q, Qi H N, Hu W J, et al. CO₂ concentration detection system for seed respiration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(6): 1397-1404.
贾良权, 祁亨年, 胡文军, 等. 种子呼吸 CO₂ 浓度检测系统[J]. 光学精密工程, 2019, 27(6): 1397-1404.
- [7] Ye W L, Meng Y X, Zhou B, et al. High-accuracy mid-infrared atmospheric ethane sensing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328020.
叶玮琳, 孟永贤, 周波, 等. 高精度中红外大气 C₂H₆ 传感系统的研制[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328020.
- [8] Li Y F, Liu Z W, Zhang T Y, et al. Development and application of near-infrared laser carbon dioxide gas sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (5): 0514003.
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): 0514003.
- [9] Dang J M, Yu H Y, Song F, et al. Development of a CO sensor for early fire detection [J]. *Optics and 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.
- [10] Zheng W X, Zheng C T, Yao D, et al. Development of a mid-infrared interband cascade laser methane sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38 (3): 0328013.
郑文雪, 郑传涛, 姚丹, 等. 一种中红外带间级联激光甲烷传感器的研制[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328013.
- [11] Song F, Yang S, Yu D, et al. Electrical-domain self-adaptive mid-infrared laser-based methane sensor system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1910-1916.
宋芳, 杨硕, 余迪, 等. 电域自适应中红外激光甲烷传感系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1910-1916.
- [12] Guo Q H, Yu Q, Gou Y, et al. Research of distributed multi-point methane detection system which based on laser self-stabilizing technology [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43 (2): 371-376.
郭清华, 于庆, 苟怡. 基于激光自稳频技术的分布式多点甲烷检测系统研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43 (2): 371-376.
- [13] Xiong S F, Fu X H, Liu D M, et al. Narrow-band filter based on infrared absorption characteristics of methane gas [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46 (10): 1023003.
熊仕富, 付秀华, 刘冬梅, 等. 基于甲烷气体红外吸收特性窄带滤波器的研究[J]. 光子学报, 2017, 46 (10): 1023003.
- [14] Li G L, Ji W H, Wang Y D. Design and experiment of mid-infrared differential CO detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0404005.
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): 0404005.
- [15] Yu X, Li L, Zhao J, et al. Development and test of multi-parameter compensation mid-infrared methane detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(6): 0612001.
于鑫, 李磊, 赵靖, 等. 多参数补偿中红外甲烷检测仪的研制与实验[J]. 光子学报, 2019, 48(6): 0612001.
- [16] Wu T, Zhang H L, Kong W P, et al. Simultaneous on-line measurement of exhaled carbon dioxide and water vapor based on 2.73 μm distributed feedback laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38 (12): 1230001.
吴涛, 张怀林, 孔维平, 等. 基于 2.73 μm 分布反馈式激光器同时在线测量呼出气体中的 CO₂ 和水汽[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1230001.
- [17] Ye W L, Zhou B, Yu H Z, et al. In-motion monitoring of atmospheric methane and ethane using a mid-infrared dual-gas simultaneous detection sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1938-1944.
叶玮琳, 周波, 余红志, 等. 中红外大气甲烷乙烷双组分气体的同步移动监测[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1938-1944.
- [18] Li M X, Liu J G, Kan R F, et al. Design of real-time measurement of atmospheric CO and CH₄ based on tunable diode laser spectroscopy system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0430001.
李明星, 刘建国, 阚瑞峰, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的 CO 和 CH₄ 实时检测系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0430001.
- [19] Li C G, Dong L, Wang Y D, et al. Compact mid-infrared trace gas detection system based on TDLAS and ICL [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018,

26(8): 1855-1861.

李春光, 董磊, 王一丁, 等. 基于 TDLAS 和 ICL 的紧凑中红外痕量气体探测系统[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(8): 1855-1861.

[20] Ji W H, Lü X C, Hu W Z, et al. Application of TDLAS technology to multicomponent detection in

olefin production process [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 1837-1845.

季文海, 吕晓翠, 胡文泽, 等. TDLAS 技术在烯烃生产过程中的多组分检测应用[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(8): 1837-1845.