

doi:10.3788/gzxb20164509.0912003

# 基于 TDLAS 技术的全量程激光甲烷传感器

庞涛<sup>1,2</sup>, 王煜<sup>1</sup>, 夏滑<sup>1</sup>, 张志荣<sup>1</sup>, 汤玉泉<sup>1</sup>, 董凤忠<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 安徽省光子器件与材料重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

**摘要:**根据煤矿安全生产监控系统对测量甲烷浓度全量程高准确度的需要, 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术, 设计了一种全量程一体化激光甲烷传感器. 采用 1 653.72 nm 分布式反馈半导体激光器作为系统光源, 单板电路实现激光器驱动、温度控制、信号调制与解调、浓度反演. 为兼顾高测量准确度和大动态测量范围, 系统在低浓度时利用波长调制技术进行甲烷浓度在线检测; 当气体浓度大于阈值时, 自动切换到直接吸收检测技术. 实验结果表明, 该传感器在浓度范围为 0~5% 内误差小于  $\pm 0.06\%$ , 在浓度范围为 5~100% 内误差小于真值的  $\pm 6\%$ , 响应时间约为 15 s, 满足矿井实际测量需要.

**关键词:**激光吸收光谱; 可调谐半导体激光器; 直接吸收; 波长调制; 甲烷检测

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)09-0912003-7

## Full Scale Methane Sensor Based on TDLAS Technology

PANG Tao<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, XIA Hua<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-rong<sup>1</sup>, TANG Yu-quan<sup>1</sup>, DONG Feng-zhong<sup>1,2</sup>

(1 Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** According to the needs of full range and high precision measurements of methane concentration in coal mine safety production monitoring system, a full-scale integrated laser methane sensor was designed based on a Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS). A 1 653.72 nm Distributed Feedback Laser (DFB) semiconductor laser was employed as the system light source. Laser driving, temperature controlling, signal modulation and demodulation, and concentration calculation were realized by a single board circuit. To meet a high measurement precision and a large dynamic measurement range simultaneously, the wavelength modulation technique was used to detect the methane at a low concentration. When the gas concentration is higher than the threshold set in the system, the direct absorption detection technique was switched to automatically. Experimental results show that, the measurement error is less than  $\pm 0.06\%$  in the range of 0~5% and less than  $\pm 6\%$  of the actual value in the range of 5~100%, and the response time is less than 15 s, which meets the requirements of the mine measurement in practice.

**Key words:** Laser absorption spectroscopy; Direct absorption; Wavelength modulation; Methane detection

**OCIS Codes:** 120.6200; 300.1030; 300.6260; 300.6380; 070.4790

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 11204320, 11204319, 41405034)、国家科技支撑计划(No. 2014BAC17B03)和中国科学院科研装备研制项目(No. Z201315)资助

**第一作者:**庞涛(1981-),男,博士研究生,主要研究方向为电子线路技术及高灵敏吸收光谱技术. Email: bumianren123@163.com

**导师(通讯作者):**董凤忠(1966-),男,研究员,博导,主要研究方向为新型光纤传感器以及有毒有害气体的快速在线监测. Email: fzdong@aiofm.ac.cn

**收稿日期:**2016-03-19; **录用日期:**2016-06-13

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

## 0 引言

防治瓦斯事故是煤矿安全生产的重点,开发高可靠性、高稳定性的瓦斯传感器对煤矿安全生产具有重大意义<sup>[1]</sup>. 甲烷是煤矿瓦斯的主要成分,按照检测原理可以将甲烷传感器分为催化型、热导型、气敏半导体型、光干涉型和红外型<sup>[2-3]</sup>. 催化型传感器灵敏度高、响应快、受湿度和温度影响小、方便使用,但其量程小,易受高浓度甲烷及硫化物影响产生中毒现象,且存在零点漂移和灵敏度漂移等,使得其需要频繁校准;热导型传感器受加工准确度影响明显,对低浓度甲烷测量误差大,易受空气湿度和氧气影响,零漂难以克服;气敏半导体灵敏度高、能耗少、寿命长,但选择性差,尤其是受水蒸气影响严重,线性测量范围窄( $<4\%$ ),准确度较差,响应时间长;光干涉型量程有限,易受空气中的水蒸气、氧气以及气压影响而产生测量误差;红外型<sup>[4]</sup>准确度高、无零点漂移和中毒现象发生,是目前应用最为广泛的传感器之一,但红外甲烷传感器存在着需要定期校准、易受其他气体交叉干扰等缺点. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的激光甲烷传感器具有实时测量、准确度高、选择性好、无需经常标定等优点,非常适合用于煤矿瓦斯检测报警<sup>[5-7]</sup>.

文献[8-10]利用长光程吸收池和激光吸收光谱技术实现了大气中甲烷含量的检测,并获得了极低的检测限,然而其测量范围有限;文献[11]利用谐波检测技术设计了全量程激光甲烷传感器,但是该传感器没有解决高浓度测量时谐波检测的非线性问题,使得系统标定繁琐;文献[12]选用相近强弱差距较大的两条甲烷吸收谱线,在低浓度时用强吸收线进行检测,在高浓度时通过温度控制调整激光器输出波长,用吸收弱的谱线测量,这种方法的缺点是:在某一个浓度值会频繁控制激光器的温度,使得激光器的温度在短时间内不稳定,最终导致测量不准确. 本文从硬件上将直接吸收和波长调制技术相结合,实现了测量准确度和动态范围的平衡,并利用现有的各种标准气体进行了测量试验,得到了较好的测量准确度和灵敏度.

## 1 TDLAS 测量原理

根据 Beer-Lambert 定律,一束初始强度为  $I_0$  的单色光,穿过待测吸收气体后可以表示为<sup>[13]</sup>

$$I_1 = I_0 \exp[-PS(T)\varphi(\nu)XL] \quad (1)$$

式中,  $I_0$  为激光出射强度,  $I_1$  为经过气体吸收后的激光强度,  $S(T)/(\text{cm}^{-2} \text{atm}^{-1})$  为该气体特征谱线强度,只与气体的温度有关,  $P$  为气体的压强,  $L$  为激光在气体中传播的距离,即测量光程,  $X$  为气体体积浓度,  $\varphi(\nu)$  为线型函数,描述了气体吸收谱线的形状,与气体温度和压力都有关系.

由式(1)可得

$$-\ln \frac{I_1}{I_0} = PS(T)\varphi(\nu)XL \quad (2)$$

一般认为气体吸收线型函数是标准的,可进行归一化处理,即

$$\int \varphi(\nu) d\nu \equiv 1 \quad (3)$$

结合式(2)~(3)可得

$$X = \frac{-\int \ln \frac{I_1}{I_0} d\nu}{PS(T)L} \quad (4)$$

从式(4)中可以看出,只要测得激光束穿过待测气体的透过率及测量光程就可计算出气体的浓度. 由于气体的吸收很微弱,直接吸收检测技术的准确度和灵敏度都较差,一般该技术用在大浓度或者长光程测量场合. 因此,研究人员开发了波长调制检测技术,该技术在激光器驱动电流中注入低频三角和正弦波,以实现激光器波长扫描和调制.

调制后的激光器的频率可以表示为  $\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos \omega t$ ,  $a$  为调制幅度,  $\omega$  为调制角频率,在吸收较弱(一般认为  $PS(T)\varphi(\nu)XL < 0.05$ ) 时,定义  $\alpha(\nu)$  为待测气体在频率  $\nu$  的吸收率.

式(1)可以简化为

$$I_1 \approx I_0 [1 - PS(T)\varphi(\nu)XL] = I_0 [1 - \alpha(\nu)L] \quad (5)$$

将  $\alpha(\nu)$  展开为傅里叶级数可得

$$\alpha(\bar{\nu} + a \cos \omega t) = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(\bar{\nu}) \cos n\omega t \quad (6)$$

式中,  $H_n(\bar{\nu})$  代表第  $n$  次谐波分量的傅里叶系数,将探测器信号输入锁相放大器,即可获取正比于  $I_0 H_n(\bar{\nu})L$  的各谐波分量<sup>[14-15]</sup>. 常温、常压下一般用洛伦兹函数来描述气体的吸收谱线,即

$$\varphi(\nu) = \frac{1}{1 + \left[ \frac{\nu(t) - \nu_0}{\Delta\nu} \right]^2} \quad (7)$$

式中,  $\Delta\nu$  为气体吸收谱线的半高宽,  $\nu_0$  为吸收谱的中心频率,定义两个无量纲变量,  $x = \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}$ ,  $m = \frac{a}{\Delta\nu}$ , 根据 Reid 等<sup>[13]</sup> 给出的二次谐波的表达式,可以得到在吸收线中心处的二次谐波信号峰值表达式为

$$P_{2f} \propto \frac{I_0 S(T) PXL}{\pi \Delta\nu_c} \left\{ \frac{2}{m^2} \left[ \frac{2+m^2}{(1+m^2)^{1/2}} - 2 \right] \right\} \quad (8)$$

由式(8)可以看出二次谐波的峰值与气体浓度成正比,仅有气体浓度是未知数,只要使用标准气体进行标定即可利用气体浓度和二次谐波峰值的关系进行浓度反演. 波长调制吸收光谱检测技术有效克服了电路及光路中的低频噪声,提高了测量灵敏度,是目前 TDLAS 技术中最常用的一种方法. 在进行波长调制技术理论推导时,假定气体的吸收率小于 0.05,然后获得了  $2f$ (二次谐波)信号和气体浓度呈正比关系,这就限制了这种技

术只能用在吸收率小的场合,否则会引入较大的非线性误差,甚至错误的测量结果.因此,本文将二者有机结合,优势互补,实现全量程甲烷浓度检测.

## 2 系统设计

### 2.1 硬件设计

考虑到矿用甲烷传感器的特殊应用场合,要从系统设计上全局考虑,提高系统的适用性,首先由 HITRAN 数据库可知,甲烷在  $1.33\mu\text{m}$  和  $1.65\mu\text{m}$  两个近红外波段存在吸收, $1.65\mu\text{m}$  波段的吸收更强而且在吸收线左右各  $0.5\text{ nm}$  范围内没有其他气体(例如水汽、二氧化碳等)的强吸收线,可以有效避免其他气体的交叉干扰,因此系统选用一体化  $1653.72\text{ nm}$  DFB 激光器作为系统光源.为了应对矿下潮湿、高粉尘的应用环境,激光器和探测器封装在测量气室底部,通过反射镜实现测量光路和电路隔离,吸收气室测量光程  $8\text{ cm}$ ,使用冶金粉末和钢网密封,防水透气,防止现场灰尘、油污等污染镜面影响测量.除此之外,电路设计应符合 GB3836.4-2010 中相关规范要求.系统功能框图如图 1.

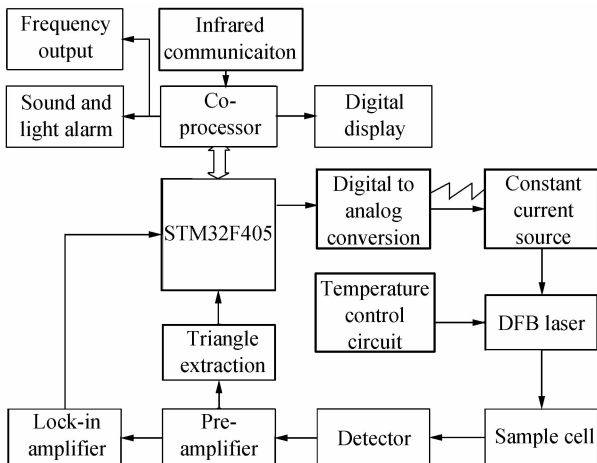


图 1 甲烷传感器框图

Fig. 1 Block diagram of  $\text{CH}_4$  sensor

选用高性能单片机 STM32F405 作为系统的主处理器,激光器在压控恒流源<sup>[16]</sup>下发出波长调制后的激光束,光束通过测量气室后由探测器和前置放大器转化为电压信号,为了同时实现谐波检测和直接吸收测量,设计了锁相放大电路和三角波提取电路,由单片机进行数据采集、信号滤波、浓度计算等.为了防止用户交互或者远程传输干扰影响系统测量性能,传感器使用了双处理器系统,协处理器主要负责红外交互、声光报警、频率输出、数码显示等功能.

#### 2.1.1 激光器信号驱动电路设计

采用谐波检测技术进行气体在线检测需要实现激光器输出波长扫描和调制,由锁相放大器完成信号解调和各个阶次谐波的提取,因而要根据激光器的特性

设置合适的扫描和调制电流,一般的做法是采用直流+低频三角波+高频正弦波的复合信号进行激光器电流驱动.常见的信号发生电路一般基于以下 3 个原理:1)利用分离器件实现信号产生,这种方案的电路复杂,有时候会出现器件参量难以选择的情况,电路性能难以保证;2)使用集成信号发生芯片,例如 max8038,这种电路有一定的集成度,但是在信号准确度和温漂方面难以保证性能;3)利用数字合成芯片(Direct Digital Synthesizer)产生信号,这种方法信号准确度高,各种参量可通过软件设置,是目前最常用的一种方法.但是谐波检测还需要进行参考信号相位调整,这种片外产生的参考信号如果采用模拟调相,难以保证准确度及稳定性,数字调相电路又太复杂,因此本文采用由 STM32F405+DA(Digital to Analog Convert)组合产生所需复合信号的方法,见图 2.由 DA 输出复合信号驱动激光器,同时一路 GPIO(General Purpose Input Output)口输出参考方波信号,可以通过软件编程实现线性相位调整.

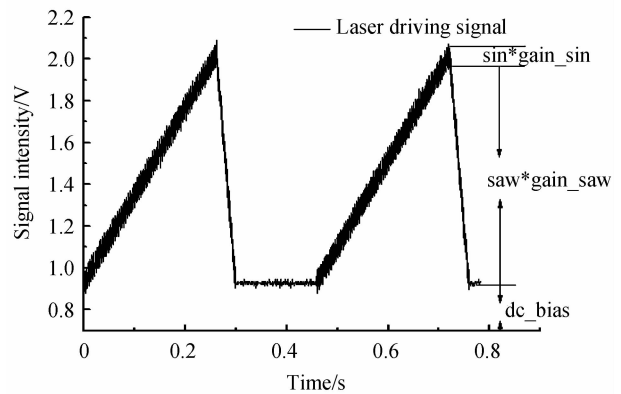


图 2 激光器实际驱动信号

Fig. 2 Actual driving signal of laser

具体实现为

$$\text{signal} = \text{dc\_bias} + \sin * \text{gain\_sin} + \text{saw} * \text{gain\_saw}$$

$$\text{REF\_signal} = \text{TTL}(\text{phase}) \quad (9)$$

式中,signal 为某一时刻单片机输入到 DA 中的数值,可通过软件设置复合信号中的直流分量、正弦幅值、三角斜率及幅值和参考信号的相位,相位调整准确度设置为  $1.8^\circ$ ,三角波周期设置为  $300\text{ ms}$ ,系统的测量周期为  $450\text{ ms}$ .

#### 2.1.2 三角波信号提取及锁相放大电路

为了同时实现直接吸收和谐波检测,系统设计了三角波提取电路和模拟锁相放大电路.探测器信号经过前置放大后,滤除信号中的正弦部分就可以得到三角波信号,主处理器可根据此信号进行直接吸收计算,进而得到浓度;系统利用高精度平衡调制器 AD630 实现谐波信号提取,根据参考信号频率的不同 AD630 输出一次或者二次谐波信号,谐波信号经过低通滤波器和限幅电路进入主处理器,用以浓度计算.5%浓度

甲烷的  $2f$  信号和直接吸收信号见图 3。

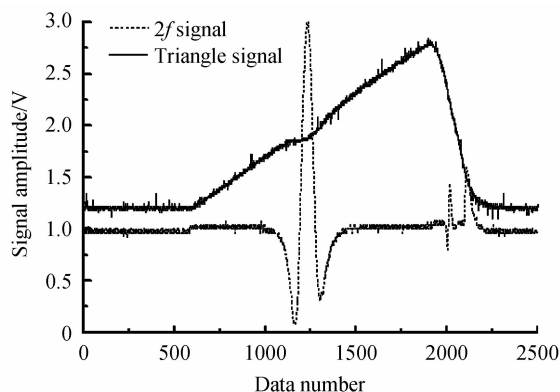


图 3 5%浓度甲烷的  $2f$  信号和直接吸收信号  
Fig. 3  $2f$  signal and direct absorption signal of 5% concentration  $\text{CH}_4$

### 2.1.3 报警及交互设计

甲烷传感器处于煤矿安全生产监控系统的底层,通过电缆和监控分站连接,分站给传感器提供本安电源,传感器通过分站将检测的甲烷浓度信息传递给监控系统.为了保证通信距离和减小环境干扰,矿下一般有  $1\sim 5\text{ mA}$ 、 $4\sim 20\text{ mA}$  电流信号,  $200\sim 1\text{ kHz}$  频率信号三种制式,系统将传感器输出定为  $200\sim 1\text{ kHz}$  (对应  $0\sim 5\%\text{ CH}_4$ ),  $1\text{ K}\sim 2\text{ kHz}$  (对应  $5\sim 100\%\text{ CH}_4$ ), 占空比为  $1:1$  的频率输出,并用光耦实现隔离.

本地显示、声光报警在安全生产中可以直观地反映测量点的甲烷气体浓度,在甲烷气体浓度超过报警阈值时,声光报警信号可以提醒现场作业人员及时采取相应措施或者安全撤离.

红外通信也是必不可少的功能之一.通过红外遥控器可以直接进行传感器标定、修正因子设置、报警限设置等,以方便现场调试与应用.

### 2.2 软件设计

系统设计的甲烷传感器有效结合了直接吸收和谐

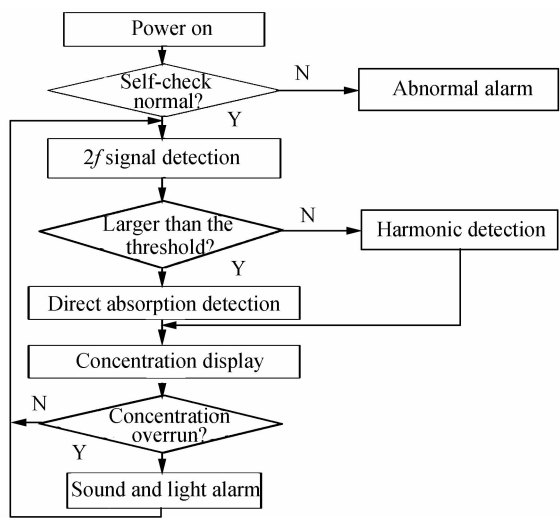


图 4 传感器工作流程图  
Fig. 4 Work flow chart of sensor

波检测技术的长处,使测量结果兼顾了测量准确度和大动态测量范围.系统上电后,系统进行自检,若各部分电路工作正常则进行谐波数据检测,如果检测数据大于设置的阈值则使用直接吸收的方法进行测量;否则,使用谐波检测的方法测量气体浓度,然后根据测量结果进行数据显示、传递或者报警.传感器工作流程图见图 4.

## 3 测量试验

目前还没有全量程激光甲烷传感器的相关标准出台,论文参照 AQ6211-2008(矿用非色散红外甲烷传感器)对系统进行了性能试验.

### 3.1 响应时间及连续测量试验

响应时间衡量了传感器对外界浓度变化的灵敏度,矿用传感器是以响应达到稳定值的  $90\%$  的时间来定义响应时间的,称之为“ $T_{90}$ ”时间.甲烷气体的爆炸限浓度为  $4.9\sim 15\%$ ,而煤矿一般将传感器的报警限设置为  $1\%$ .现将激光头和测量气室置于密闭容器内,充入  $1.02\%$  标准甲烷气体,室温常压下,测得传感器响应曲线如图 5.

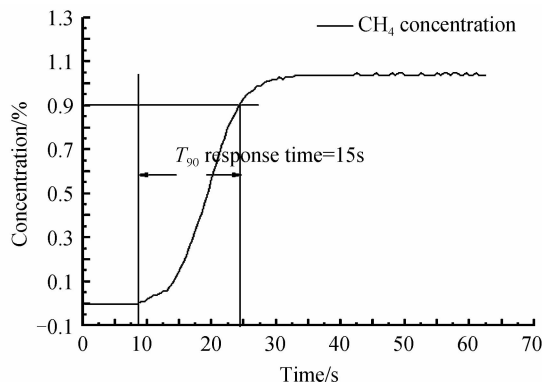
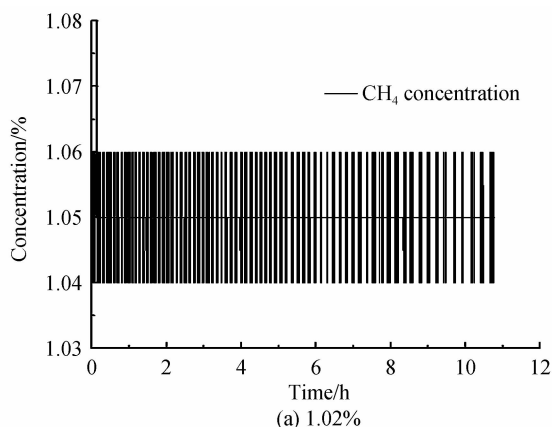


图 5 响应时间  $T_{90}$  测试  
Fig. 5  $T_{90}$  response time test

不难看出传感器的响应时间为  $15\text{ s}$  左右,优于 AQ6211 标准中  $25\text{ s}$  的规定.测量结果在  $1.05\%$  上下跳动,波动幅度不超过  $0.01\%$ ,连续  $11\text{ h}$  的数据记录后,冲入  $20\%$  浓度的标准气体,进行高浓度连续测量实验.

由图 6 可见,由于传感器在低浓度测量时采用谐



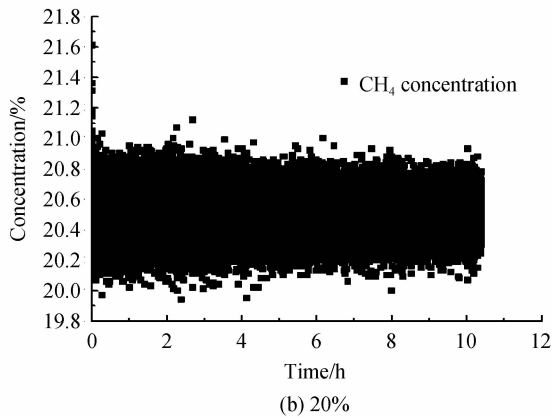


图 6 1.02%和 20%CH<sub>4</sub> 气体连续测量结果  
Fig. 6 Continuous measurement results of 1.02% and 20% CH<sub>4</sub>

波检测及其他数据处理办法,获得了较高的测量准确度,最大测量误差为 0.04%,因为传感器的分辨率设置为 0.01%,所以测量结果呈图 6 的离散状.20%的甲烷气体连续测量结果为平均值 20.5%,最大测量误差 1.0%,小于真值的 6%,测量的随机误差为 ±0.05%.

### 3.2 检测下限测量

系统最小检测灵敏度(系统最小检测信号幅度)等同系统噪声幅度标准差的 3 倍,即

$$S = 3\sigma \quad (10)$$

式中  $\sigma$  为没有吸收即零气时背景噪声的标准差.

图 7 为测量 0.1% (p) 浓度标准气体获得的二次谐波信号和零气时获取的背景噪声信号,经过统计分析可得,背景噪声的标准差为 0.013V,对应的二次谐波信号的峰值为 0.066 3 V,由此可得系统最小检测灵敏度为 0.039 V,根据谐波检测理论,二次谐波信号峰值和气体浓度呈正比可得甲烷传感器的检出限为  $585 \times 10^{-6}$ ,最低检出限即检测下限为  $150 \times 10^{-6}$ .

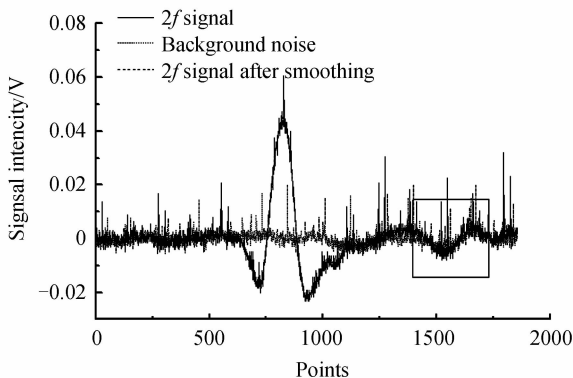


图 7 0.1%对应的 2f 信号和背景噪声信号  
Fig. 7 The second harmonic signal correspond to 0.1% and background noise signal

上述两个参量可以解释为当待测气体浓度为  $150 \times 10^{-6}$  时,传感器可以进行定性检测,无法定量;当气体浓度大于  $585 \times 10^{-6}$  时,传感器可以进行定量分析,并且测量结果具有一定的可信度.检测限除了受各

种噪声影响,主要取决于背景噪声中低频分量的幅度(如图 7 中方框),这一噪声可能来源于激光器调谐的非线性,也有可能来自于光路的反射和散射.已有文献报道的全量程激光甲烷传感器其测量下限大多数为 0.1%,本文设计的一体化甲烷传感器在检出下限参量上具有明显的优势.

### 3.3 气体交叉干扰试验

和基于红外吸收原理的甲烷传感器相比,采用 TDLAS 技术的传感器的优势是不受待测气体中的其他气体的干扰,本文以 CO<sub>2</sub> 为例进行了验证.以 5% 甲烷和氮气混合气作为配气仪的一路,100% 浓度 CO<sub>2</sub> 作为另外一路,两路流速统一设置为 0.5 L/min,常压室温下测量,实验结果如图 8.

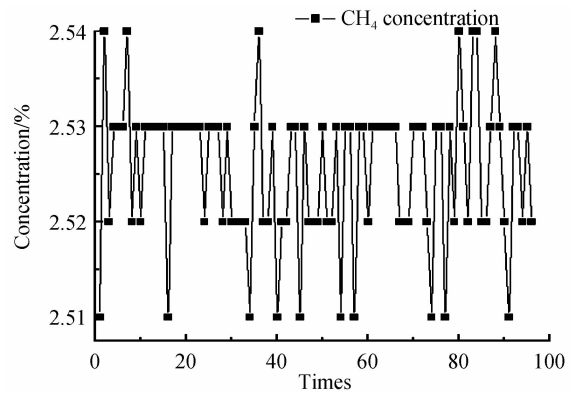


图 8 CO<sub>2</sub> 干扰测试  
Fig. 8 CO<sub>2</sub> interference test

测量结果平均值为 2.528%,最大测量误差为  $400 \times 10^{-6}$ ,这与使用 N<sub>2</sub> 进行配气的测量结果是一致的,由于本文使用的是纯 CO<sub>2</sub>,可以充分说明论文设计的传感器不受 CO<sub>2</sub> 浓度影响.

### 3.4 重复性试验

在相同测量条件下,对同一被测量连续进行多次测量所得结果之间的一致性称为重复性,重复性可以用测量结果的分散性定量表示,常使用标准差表征测量结果分散性.以 1.02% 浓度标准气体为测量对象,常压、室温下进行连续 10 次测量试验,每次时间间隔为 30 min,每次试验记录 10 组测量数据,试验结果如图 9.

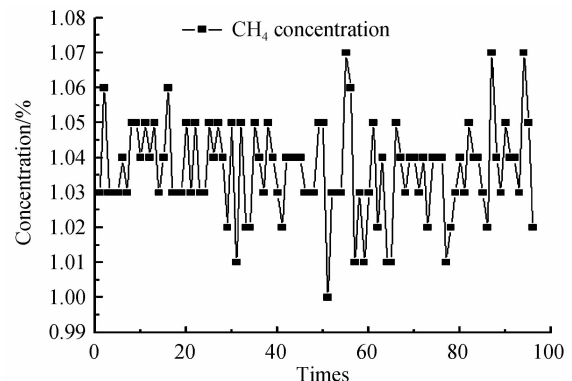


图 9 重复性测试  
Fig. 9 Repeatability test

测量的标准差为0.0137%，相对标准差为1.32%，具有较好的测量重复性。

### 3.5 全量程测量试验

为验证传感器在全量程范围内的性能，利用现有各种浓度标准甲烷气体对系统进行测量实验。测量环境为一个大气压，室温下。所使用的标准气浓度分别为0.1%、0.5%、1.02%、5.0%、10%、20%、50%、70%、100%，共进行3组试验，以3组数据的平均结果进行分析。

图10利用现有的测试点拟合出全量程测量曲线，拟合系数为0.99712，全量程范围内最大线性误差为3.24%。Full Scale 矿下甲烷传感器主要用于安全监控，在0~5%范围内需要较高的测量准确度(甲烷爆炸的浓度下限为4.9%)，全量程测量数据见表1。

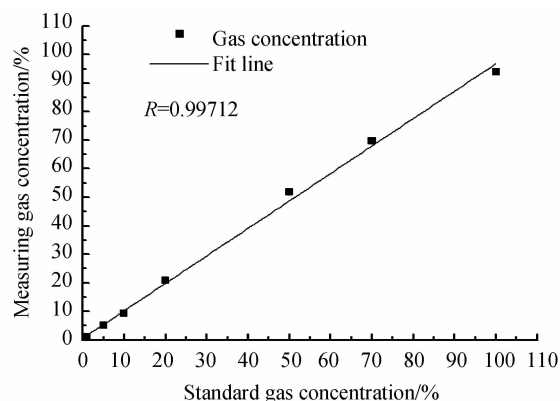


图10 全量程测量结果

Fig. 10 Measurement results of full scale

表1 全量程测量结果

Table 1 Measurement results of full scale

Standard gas (V/V)	Measurement result (V/V)	Measurement error (V/V)	Relative error
0.1	0.11	0.01	
0.5	0.54	0.04	
1.02	1.05	0.03	
5.0	4.92	-0.08	$\leq \pm 0.06\%$
9.97	9.36	-0.61	
19.98	20.9	0.98	
50	52	2.0	$\leq \pm 6\%$ of
70	69.7	-0.3	actual value
100	94	-6	

从表1的测量数据可以看到，本文设计的甲烷传感器在0~5%浓度范围内的测量误差小于 $\pm 0.06\%$ ，在5~100%的浓度范围内测量误差小于或等于真值的 $\pm 6\%$ ，50%和100%浓度时测量误差较大，分析认为在大吸收的情况下，直接吸收光谱技术中拟合系统背景基线出现了较大偏差，从而引起测量误差偏大，可通过调整扫描信号的幅度来减小这种误差，也可以采用分段标定的方法提高大浓度测量时的准确度，但测量准确度受标定步长限制，标定繁琐，不易操作。不过，参

照AQ6211-2008标准，系统设计的甲烷传感器在性能上是符合国家相关标准要求的，可以用于煤矿安全监控。

## 4 结论

以1653.72nm DFB激光器为系统光源，实现了基于TDLAS技术的全量程激光甲烷传感器研制。一体化电路设计，单板实现了激光器驱动、温度控制、调制解调、浓度反演、本地显示与报警、远程输出等功能。除此之外单板设计电路还具有一定的通用性，可通过更换激光器，进行其他气体的在线检测。采用波长调制和直接吸收技术相结合的方案，便于系统标定，保证较高测量准确度的同时兼顾系统大动态范围。试验表明，该传感器在0~5%浓度范围内测量误差小于 $\pm 0.06\%$ ，在5~100%浓度范围内测量误差小于真值的 $\pm 6\%$ ，满足实际测量需要，其显著优势是具有 $150 \times 10^{-6}$ 的检测下限。

### 参考文献

- [1] DENG Guang-fu. Research on system of gas sensor used in mine based on TDLAS[D]. Changchun: Jilin University, 2008.  
邓广福. 基于可调谐激光光谱的矿井瓦斯气体传感系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [2] LIU Yong-ping, WANG Xia, LI Shuai-shuai, et al. Gas concentration detection method based on infrared absorption spectroscopy technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 112002-112008.
- [3] 刘永平, 王霞, 李帅帅, 等. 基于红外技术的气体浓度检测方法研究[J]. 光子学报, 2015, **44**(1): 112002-112008.
- [4] 王汝琳, 王咏涛. 红外检测技术[M]. 化学工业出版社, 2006.
- [5] MASSIE C, STEWART G, MCGREGOR G, et al. Design of a portable optical sensor for methane gas detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, **113**(2): 830-836.
- [6] DONG Feng-zhong, KAN Rui-feng, LIU Wen-qing, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopic technology and its application in air quality monitoring[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, **22**(3): 315-325.  
董凤忠, 阚瑞峰, 刘文清, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术及其在大气质量监测中的应用[J]. 量子电子学报, 2005, **22**(3): 315-325.
- [7] WERLE P, D'AMATO F. Field laser applications in industry and research[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2011, **102**(2): 251-253.
- [8] WERLE P, SLEMR F, MAURER K, et al. Near-and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, **37**(2): 101-114.
- [9] KAN Rui-feng, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, et al. Infrared absorption spectrometer of monitoring ambient methane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 67-70.  
阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 基于可调谐激光吸收光谱的大气甲烷监测仪[J]. 光学学报, 2006, **26**(1): 67-70.
- [9] CHEN Jia-jin, ZHAO Wei-xiong, GAO Xiao-ming, et al. Optical multipasscell based on two cylindrical mirrors for high sensitivity detection of methane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(9): 0930003.  
陈家金, 赵伟雄, 高晓明, 等. 基于柱面镜光学多通池的CH4高灵敏度探测[J]. 光学学报, 2015, **35**(9): 0930003.

- [10] WANG Zhuo, CAO Jia-nian, ZHANG Ke-ke, *et al.* Optical low-concentration methane gas sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 255-256.  
王琢, 曹家年, 张可可, 等. 光学式低浓度甲烷气体传感器的研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2):255-256.
- [11] HUANG Jian-qiang, ZHAI Bing, YE Wei-lin, *et al.* Near-infrared CH<sub>4</sub> detection device using wavelength-modulation technique[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, **25**(5): 947-953.  
黄渐强, 翟冰, 叶玮琳, 等. 基于波长调制技术的近红外甲烷监测仪[J]. *光电子·激光*, 2014, **25**(5):947-953.
- [12] FAN Song-tao. Full range methane detection system based on TDLAS technology[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2013.  
范松涛. 基于 TDLAS 技术的全量程甲烷检测系统[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [13] REID J, LABRIE D. Second harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory[J]. *Applied Physics B*, 1981, **26**: 203-210.
- [14] KLUCZYNSKI P, AXNER O. Theoretical description based on Fourier analysis of wavelength-modulation spectrometry in terms of analytical and background signals[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(27): 5803-5815.
- [15] KLUCZYNSKI P, GUSTAFSSON J, LINDBERG A M, *et al.* Wavelength modulation absorption spectrometry-an extensive scrutiny of the generation of signals[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2001, **56**(8): 1277-1354.
- [16] FU Li, DANG Jing-min, MIAO Chun-zhuang, *et al.* Development of driver for room-temperature continuous mid-infrared quantum cascade laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(12): 1213001.  
付丽, 党敬民, 苗春壮, 等. 室温连续中红外量子级联激光器驱动电源的研制[J]. *光子学报*, 2015, **44**(12): 1213001.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 11204320, 11204319, 41405034), the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(No. 2014BAC17B03), the Special Fund for Basic Research on Scientific Instruments of the Chinese Academy of Science(No. YZ201315)