

## 中红外差分式 CO 检测仪的设计与实验

李国林<sup>1</sup>, 季文海<sup>1</sup>, 王一丁<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580;

2. 吉林大学 集成光电子学国家重点实验室吉林大学实验区 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** CO 分子在 4.6  $\mu\text{m}$  具有最强吸收峰, 以此作为气体吸收的中心波长, 结合光源 EMS200 光源的发光特性, 设计开放式的球面反射镜气室, 采用单探测器双通的结构, 研制了一种中红外差分式 CO 检测仪。利用模拟混合气站配备标准的 CO 气体浓度, 对该仪器的相关性能开展研究。研究表明: 仪器分辨率为 20 ppm(1 ppm= $10^{-6}$ ), 最低检测下限为 18 ppm。CO 浓度在 30~1 500 ppm 范围内, 其测量误差不超过 8.5%。与激光光谱技术的 CO 检测仪相比, 该系统采用脉冲红外热光源, 其性价比高; 采用开放球面反射镜气室, 光路简单易于实现。所以该 CO 检测仪在煤矿开采、环境监测、石油化工等领域具有较高的实际应用价值。

**关键词:** 红外光谱吸收; CO 气体检测; 光电检测

**中图分类号:** O657.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0404005

## Design and experiment of mid-infrared differential CO detector

Li Guolin<sup>1</sup>, Ji Wenhai<sup>1</sup>, Wang Yiding<sup>2</sup>

(1.College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. College of Electronic Science and Engineering, State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics Jilin University Region, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** CO molecules have the strongest absorption peak at 4.6  $\mu\text{m}$ , which was selected as the central wavelength of the gas absorption. Combined with the luminescence characteristics of light source EMS200, spherical mirror chamber open was designed. A mid-infrared differential CO detection system was developed using the double pass structure of single detector. The performance of the instrument was studied by using the standard gas concentration of carbon monoxide in the mixed gas station. The research results reveal that, the resolution of the instrument is 20 ppm, and the limit of detection (LOD) is 18 ppm. The relative error was not more than 8.5% within the low concentration range of 30~1 500 ppm. Compared with the CO detection systems utilizing laser spectroscopy technology, pulsed infrared thermal source used in this system, its performance-cost ratio was high; with open spherical mirror chamber, the

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2017LF023); 中国石油大学自主创新项目(15CX02121A); 国家科技支撑计划项目(2014BAD08B03)

作者简介: 李国林(1987-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电检测技术方面的研究。Email: liguolin@upc.edu.cn

通讯作者: 季文海(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光谱分析技术方面的研究。Email: gas\_upc@foxmail.com

light path was simple and easy to implement. So the proposed detector shows potential applications in CO detection under the circumstances of coal-mine, environmental protection and petrochemical industry.

**Key words:** infrared spectrum absorption; CO gas detection; photoelectric detection

## 0 引言

随着经济的发展,国内对煤炭资源的需求越来越大。矿难事故时有发生,特别在矿井下由于煤层气体泄漏或者特殊地质结构条件,大量 CO 涌出局部积聚而超标,引起 CO 中毒甚至爆炸,严重危害生产安全。因此,实时、准确检测 CO 浓度对维护生产生活安全具有一定的现实意义<sup>[1-3]</sup>。

目前 CO 气体的检测方法主要有电化学法、催化燃烧式、红外光谱吸收法等。红外光谱吸收法的基本原理是基于朗伯比尔定律,其主要优势在于灵敏度高、稳定性好、响应时间快等<sup>[4-9]</sup>,现在已经被广泛应用于气体检测领域。近年来,国内外许多科研机构或者高校从事非分光红外 (Non-Dispersive Infra-Red, NDIR) 气体检测的研究,例如日本的 Tohoku 大学、挪威的纳斯克电子光学公司、美国的 (Focused Photonics Inc, FPI) 等<sup>[9-13]</sup>。该课题组多年从事红外光谱吸收技术的研究,特别是在光源探测器的选取、电路设计、系统噪声分析、光路气室优化设计等方面做了大量研究<sup>[14-16]</sup>。

## 1 差分检测原理与公式

CO 气体分子在红外光谱区域总共有 3 个吸收带,以 4.6 μm 的基频吸收带、以 2.3 μm 的倍频吸收带和 1.56 μm 的泛频吸收带,其吸收系数之比大约 1 000:50:1,所以为了提高气体检测的灵敏度,笔者最终选择 CO 气体分子在 4.6 μm 处的基频作为气体吸收波长,吸收强度  $4.46 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1}(\text{molecule} \times \text{cm}^{-2})$ ,在有限的吸收光程内,尽可能增加测量灵敏度,其 CO 分子在基频处的吸收谱线如图 1 所示。基于单光源单探测器,设计一种中红外差分式气体检测仪。依据光源(EMS200)的发光特性设计新型的球面反射气室,研制光源驱动电路和探测信号处理电路,完成 CO 检测仪的集成。通过开展气体实验,对仪器进行标定,从仪器的检测精度和灵敏度开展研究。完全满足煤矿环境下的 CO 气体检测的要求,具有很好

的实际应用价值。

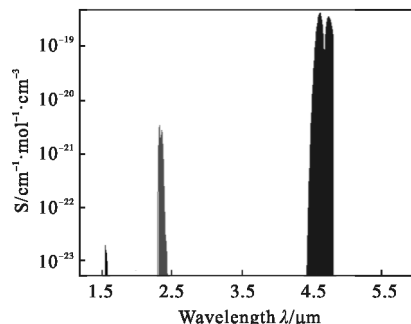


图 1 CO 分子的吸收谱线

Fig.1 Absorption lines of CO molecules

如果 CO 气体吸收谱线在光源的发射光谱范围内,当红外光照射到 CO 气体时,CO 分子吸收一部分能量,出射光光强衰减,那么入射光强与出射光强符合比尔朗伯定律,即

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-k(\lambda)cl} \quad (1)$$

式中:  $I(\lambda)$  为出射光强;  $I_0(\lambda)$  为入射光强;  $k(\lambda)$  为 CO 分子在  $\lambda$  处的吸收系数;  $c$  为气体浓度;  $l$  为光通过气体的光程。考虑到在矿井下,CO 分子包含灰尘颗粒、水蒸汽等,笔者对公式(1)修正为:

$$I(\lambda, l) = I_0(\lambda) \exp[-k(\lambda)cl + m(\lambda)l + n(\lambda)l + p(\lambda)l] \quad (2)$$

式中:  $m(\lambda)$  为瑞利散射系数;  $n(\lambda)$  为米氏散射系数;  $p(\lambda)$  为水分子吸收系数。采用的是单光源双通道的检测方法,定义信号通  $\lambda_1 = 4.66 \mu\text{m}$ ; 参考通道  $\lambda_2 = 3.95 \mu\text{m}$ 。如果有两束不同的光  $I_0(\lambda_1)$  和  $I_0(\lambda_2)$  通过 CO 气体,则有:

$$I(\lambda_1, l) = I_0(\lambda_1) \exp[-k(\lambda_1)cl + m(\lambda_1)l + n(\lambda_1)l + p(\lambda_1)l] \quad (3)$$

$$I(\lambda_2, l) = I_0(\lambda_2) \exp[-k(\lambda_2)cl + m(\lambda_2)l + n(\lambda_2)l + p(\lambda_2)l] \quad (4)$$

因为 CO 在  $\lambda_2 = 3.95 \mu\text{m}$  没有吸收,所以  $k(\lambda_2) = 0$ 。将公式(3)、(4)两边取对数,则得:

$$\ln[I(\lambda_1, l)] = -k(\lambda_1)cl + m(\lambda_1)l + n(\lambda_1)l + p(\lambda_1)l + \ln[I_0(\lambda_1)] \quad (5)$$

$$\ln[I(\lambda_2, l)] = m(\lambda_2)l + n(\lambda_2)l + p(\lambda_2)l + \ln[I_0(\lambda_2)] \quad (6)$$

因为  $\lambda_1 = 4.66 \mu\text{m}$  和  $\lambda_2 = 3.95 \mu\text{m}$  非常接近,根据米氏散射理论,有:

$$m(\lambda_1) \approx m(\lambda_2) \quad (7)$$

$$n(\lambda_1) \approx n(\lambda_2) \quad (8)$$

把  $\lambda_2=3.95 \mu\text{m}$  作为参考波长, 消除了水蒸汽的干扰。公式 (5)、(6) 作差, CO 的浓度则有:

$$c = \frac{\ln[I(\lambda_2, l)] - \ln[I(\lambda_1, l)] + \ln[I_0(\lambda_1)] - \ln[I_0(\lambda_2)]}{k(\lambda_1)l} \quad (9)$$

该检测方法可以消除了光源发光功率波动、传输路径、电子器件温漂和零点漂移等带来的干扰。同时也可以消除光路、外界复杂的环境因素变化对检测系统造成的干扰, 提高检测系统的稳定性。

## 2 实验系统

CO 检测系统主要由光学系统和电学系统构成。光学系统包括: 新型脉冲光源 EMS200、探测器 LM244、以及球面反射镜。由宽带红外热光源的驱动电路、气室光路、信号放大电路、滤波电路、峰值检波电路、AD 采样电路信号经 MCU 处理, 在液晶屏上显示 CO 浓度信息, 当超过一定浓度时, 声光报警。系统结构如图 2 所示。

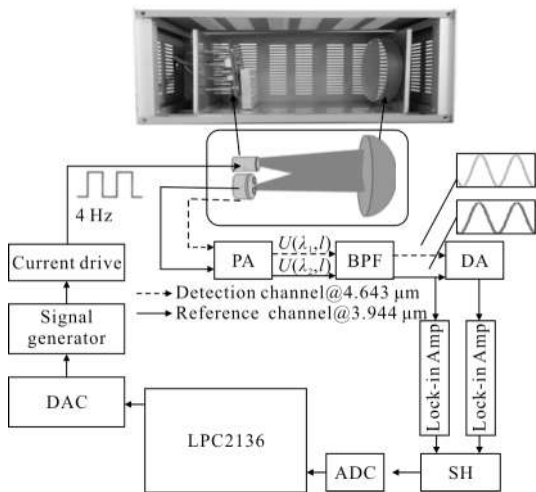


图 2 中红外差分式 CO 检测仪框图

Fig.2 Mid-infrared differential CO detector block diagram

### 2.1 气室结构

光源采用的 EMS200 光源, 探测器为双通道(滤光片波长(@4.66  $\mu\text{m}$ 、@3.95  $\mu\text{m}$ ))热释电探测器, 制作了反射镜气室, 光源和探测器固定在球面反射镜中心上下对称的位置, 气室结构如图 3 所示, 反射镜采用 K9 材质, 反射面镀铝(所展示反射镜实物半径为 150 mm)。

热释电探测器 LM244 两敏感窗口滤光片的透射

谱如图 4 所示, 具体参数为: 信号通道中心波长(Center Wavelength, CWL)为 4.66  $\mu\text{m}$ , 功率谱半宽度(Half Power Bandwidth, HPB or FWHM)为 180 nm; 参考通道的 CWL 为 3.95  $\mu\text{m}$ , HPB 为 90 nm。

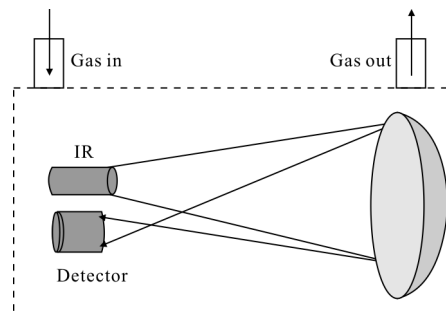


图 3 气室结构

Fig.3 Gas cell structure

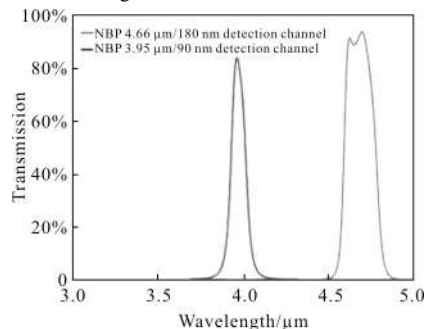


图 4 探测器敏感窗口滤光片透射谱

Fig.4 Transmission spectrum of detector sensitive window filter

### 2.2 硬件电路部分设计

脉冲红外光源的驱动电路是恒流驱动, 电路如图 5 所示。运算放大器的正向端是由 MCU 提供的

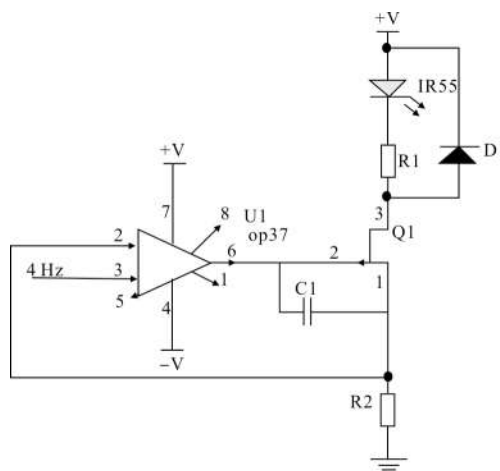


图 5 光源驱动电路

Fig.5 Light source driving circuit

4 Hz 方波输入, 幅度为 3.3 V, 当输入  $V_H=3.3\text{ V}$  时, 场效应管 Q1 导通, 为光源提供稳定电流, 当输入  $V_L=0$  时, 场效应管 Q1 截止, 此时没有电流通过光源, 光源不亮。从而达到调制光源的作用, 延长其使用寿命。驱动电流的稳定性如图 6 所示, 电流稳定性可达 1%。

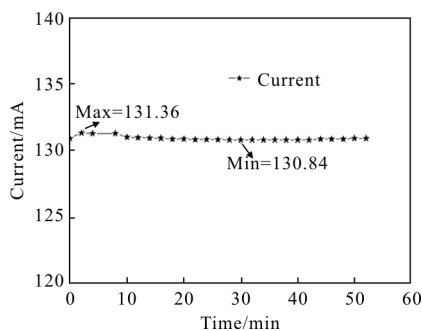


图 6 光源驱动电流稳定性实验

Fig.6 Experiment of light source driving current stability

光电探测器的输出的两路信号(信号通道、参考通道)经过前置放大、主放大、滤波电路后得到的输出波形图如图 7 所示。待测信号和参考信号经差分放大电路, 进入峰值检波电路, 得到与 CO 浓度相关的直流信号, 由 AD 对该直流信号采样, 输入到 ARM 进行数据处理, 推演出 CO 气体浓度。信号处理电路如图 8 所示。

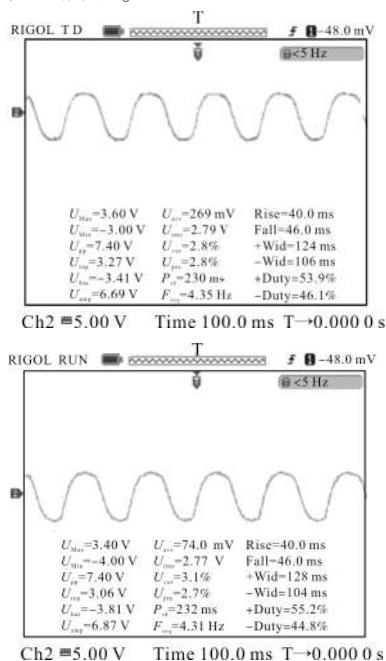


图 7 滤波器输出的待测信号和参考信号

Fig.7 Measured signal and reference signal of filter output signal

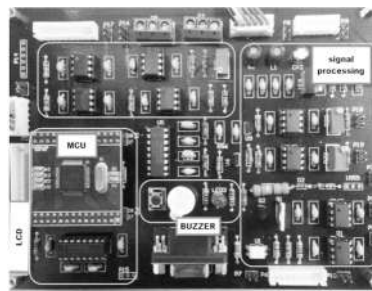


图 8 信号处理电路

Fig.8 Signal processing circuit

### 3 气体实验与分析

#### 3.1 气体标定实验

通过软硬件集成, 研制出差分式 CO 检测系统。利用模拟混合气站在 0~1 600 ppm 内配备 15 中标标准 CO 样品气体, 对该仪器开展标定实验。实验测得电压差信号(待测通道与参考通道的电压差)与 CO 气体浓度的曲线如图 9 所示, 拟合曲线方程为:

$$\Delta U = 221.9568 - 40.15397 \times \exp(-0.00153 \times C) \quad (10)$$

由图 5 可见, 拟合的曲线方程符合比尔—朗伯定律, 测量误差小于 9%。

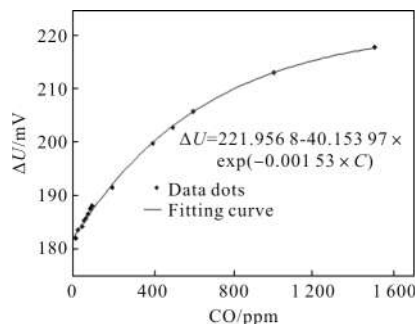


图 9 电压差信号与 CO 气体浓度曲线

Fig.9 Relation curve between CO gas concentration and voltage difference signal

#### 3.2 检测精度实验

为验证中红外 CO 检测系统的检测精度, 配制 0~1 500 ppm 的 CO 标准浓度的气体, 利该检测系统测量该样品的浓度, 测得仪器显示浓度和标准气体浓度关系如图 10 所示, 其拟合曲线为:

$$CS = 1.00704 * CD - 2.08034 \quad (11)$$

由图 10 可知: 该曲线的斜率为 1.00704, 具有很好的线性度。当 CO 气体最低浓度为 18 ppm 时, 其测量误差为 10%, 当气体浓度大于 30 ppm 时, 其

测量误差不超过 8.5%。

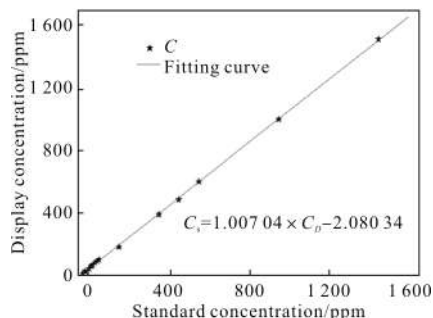


图 10 CO 气体标准浓度和仪器显示浓度的关系曲线

Fig.10 Relation curve between CO gas standard concentration and instrument display concentration

### 3.3 检测仪灵敏度实验

低浓度时,  $\Delta U$  较小, 所以为了更好地分辨低浓度信号, 需要增大减法通道的放大倍数, 即需要做一个量程切换。在 0%~0.01% 的范围内, 调节前置放大及主放大电路的放大倍数, 即将  $\Delta U$  放大为  $\Delta U'$ , 即可得到低浓度下仪器的灵敏度。如图 11 所示, 每隔 20 min 向 0 ppm 的气室中通入 20 ppm 的 CO 气体, 进行 4 次操作, 可以看出电压信号产生的变化足以分辨。所以该仪器的分辨率为 20 ppm, 即 CO 气体浓度超过 20 ppm, 该仪器都可以检测。

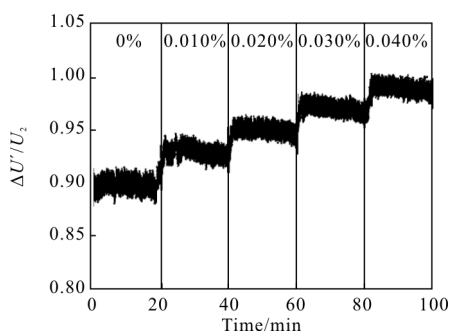


图 11 CO 检测系统的灵敏度实验

Fig.11 Sensitivity experiment of CO detection system

## 4 结 论

结合单光源双通道的单探测器实现了一种差分式红外 CO 检测系统。根据选用的热光源, 优化设计了球面反射镜气室以增加光程并提高聚光效率。通过前置放大、主放大、信号调理电路及转换电路等对传感器输出信号进行处理, 利用标定关系将其换算为浓度信息, 实现对 CO 气体的检测。对该系统的气体

实验研究可知, 该检测系统的仪器分辨率为 20 ppm, 最小检测下限为 18 ppm, 在其点的测量误差约为 10%; 在 30~1 500 ppm 范围内的测量误差小于 8.5%; 该系统采用红外热光源和热释电探测器, 性价比高。采用开放式球面反射镜气室结构, 便于测量煤矿下溢出的 CO 气体, 并且光路简单。而且无需外加压力控制装置, 结构易于实现, 从而具有较高的推广和应用。

### 参考文献:

- [1] Pan Weidong, Zhang Jiawei, Dai Jingmin, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy for simultaneous measurement of ethylene and methane near 1.626  $\mu\text{m}$  [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32 (6): 487-490. (in Chinese)  
潘卫东, 张佳薇, 戴景民, 等. 利用可调谐半导体激光吸收光谱法在 1.626  $\mu\text{m}$  处实现乙烯和甲烷的同步检测[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(6): 487-490.
- [2] Yao Lu, Liu Wenqing, Liu Jianguo, et al. Research on open-path detection for atmospheric trace gas CO based on TDLAS[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 305-312. (in Chinese)  
姚路, 刘文清, 刘建国, 等. 基于 TDLAS 的长光程环境大气痕量 CO 监测方法研究 [J]. 中国激光, 2015, 42 (2): 305-312.
- [3] Xia H, Wu B, Zhang Z R, et al. Stability study on high sensitive CO monitoring in near-infrared [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62: 214208.
- [4] Zheng Longjiang, Huang Xinyan, Bi Genfeng. Study of optical fiber carbon monoxide gas sensor with DFB LD[C]// Proceedings of SPIE, 2008, 6625: 66251Y-7.
- [5] Sun K, Chao X, Sur R, et al. Wavelength modulation diode laser absorption spectroscopy for high-pressure gas sensing [J]. *Applied Physics B*, 2012, 110(4):497-508.
- [6] Goldenstein C S, Strand C L, Schultz I A, et al. Fitting of calibration free scanned wavelength modulation spectroscopy spectra for determination of gas properties and absorption lineshapes[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(3): 356-367.
- [7] Chao Xing, Jeffries J B, Hanson R K. In situ absorption sensor for NO in combustion gases with a 5.2  $\mu\text{m}$  quantum-cascade laser [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 725-733.
- [8] Scherer J J, Paul J B, Jost H J, et al. Mid-IR difference

- frequency laser-based sensors for ambient CH<sub>4</sub>, CO, and N<sub>2</sub>O monitoring[J]. *Applied Physics B*, 2013, 110: 271–277.
- [9] Nikkari J J, Diiorio L, Thomson M J. In situ combustion measurements of CO, H<sub>2</sub>O, and temperature with a 1.58mm diode laser and two-tone frequency modulation [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(3): 446–452.
- [10] Zhang Lin, Zhang Liming, Li Yan, et al. Application and improvement of partial-least-squares in fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(10): 1610–1613. (in Chinese)  
张琳, 张黎明, 李燕, 等. 偏最小二乘法在傅里叶变换红外光谱中的应用及进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(10): 1610–1613.
- [11] Ye W L, Zheng C T, Yu X, et al. Design and performances of a mid-infrared CH<sub>4</sub> detection device with novel three-channel-based LS-FTF self-adaptive denoising structure[J]. *Sensors and Actuators B*, 2011, 155(1): 37–45.
- [12] Vanderover J, Wang W, Oehlschlaeger M A. A carbon monoxide and thermometry sensor based on mid-IR quantum-cascade laser wavelength-modulation absorption spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(4): 959–966.
- [13] Melas F D, Pustogov V V, Croitoru N, et al. Development and optimization of a mid-infrared hollow waveguide gas sensor combined with a supported capillary membrane sampler[J]. *Appl Spectrosc*, 2003, 57(6): 600–606.
- [14] Zheng Chuantao, Ye Weilin, Li Guolin, et al. Performance enhancement of a mid-infrared CH<sub>4</sub> detection sensor by optimizing an asymmetric ellipsoid gas-cell and reducing voltage-fluctuation: Theory, design and experiment [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 160(1): 389–398.
- [15] Li Guolin, Sui Yue, Dong Ming, et al. A carbon monoxide detection device based on mid-infrared absorption spectroscopy at 4.6 μm [J]. *Applied Physics B*, 2015, 119(2): 287–296.
- [16] Li Guojin, Yan Zihui, Song Nan, et al. Design and performances of a carbon monoxide sensor using mid infrared absorption spectroscopy technique at 4.6 μm [J]. *Spectroscopy Letters*, 2015, 48(6): 454–461.