

doi: 10.3788/gzxb20144301.0104001

# 袖珍式红外瓦斯检测仪的设计与实验

于鑫<sup>a</sup>, 高宗丽<sup>a</sup>, 宋楠<sup>a</sup>, 刘洋<sup>b</sup>, 郑传涛<sup>a</sup>, 王一丁<sup>a</sup>

(吉林大学 a. 电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点实验室, b. 吉林大学通信工程学院, 长春 130012)

**摘 要:** 在满足气体检测要求的前提下, 为了能够使气体检测仪器的小型化以及低功耗, 设计了袖珍式红外瓦斯检测仪. 以集光源、光路、红外探测器于一体的红外传感模块为核心, 修正了传统的气体吸收理论, 采用差分式气体吸收技术设计出一种具有低成本、低功耗、低检测下限、高信噪比的袖珍式非线性甲烷检测仪. 集成后的仪器采用干电池单电源供电, 工作时总电流在 150 mA 以内、总功耗小于 0.9 W, 检测仪的电路增益为 43.3 dB. 实验中进行了单、双通道气体检测实验, 采用新配气方法在甲烷爆炸限内进行双通道气体检测实验, 得到低检测下限和高灵敏度测试实验, 最低检测下限都能够达 50 ppm. 与传统的壁挂式检测仪器相比, 该仪器以手持式的形式完全可以满足检测有害气体的需求.

**关键词:** 光电检测; 红外探测器; 气体吸收; 甲烷; 袖珍式; 非线性系统; 单电源; 电路

**中图分类号:** TN215; TN219

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2014)01-0104001-6

## Design and Experiment of Pocket Infrared Gas Detector

YU Xin<sup>a</sup>, GAO Zong-li<sup>a</sup>, SONG Nan<sup>a</sup>, LIU Yang<sup>b</sup>, ZHENG Chuan-tao<sup>a</sup>, WANG Yi-ding<sup>a</sup>

(a. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering;

b. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** On the base of meeting requirements of gas detection, a low-cost, low-power, low limit of detection, high SNR(signal to noise ratio) pocket methane detector was designed, with the improvement on the original gas absorption theory, and the core sensing module contains a mid-infrared light source, optical path, a mid-infrared dual detector. The device adopted dry batteries single power supply, and totally the supply current was less than 150 mA while the power consumption was less than 0.9 W, and the gain of the circuit was 43.3 dB. The single and dual channel detection experiments were carried out to contrast, and with the novel proportioning gas method both the sensitivity and the minimum detection limit under low concentration range could reach to 50 parts per million. Compared with the pre-existing wall-mounted devices, this device satisfies the requirement of detecting explosive gases in a more convenient handheld style.

**Key words:** Photoelectric detection; Infrared detector; Gas absorption; Methane; Pocket; Nonlinear systems; Single power; Circuits

**OCIS Codes:** 040.1880; 040.3060; 250.0040; 260.3060; 300.1030

## 0 引言

随着国民经济的不断发展, 我国对煤炭的需求与日俱增, 所以采矿业的安全至关重要. 我国近几年煤矿灾害中最主要的瓦斯爆炸事件时有发生, 造成了人员伤亡和经济巨大损失, 煤矿瓦斯检测工作成为了

煤矿产业中的重点. 煤矿中瓦斯的主要成分是甲烷, 甲烷对人基本无毒, 但浓度过高时, 使空气中氧含量明显降低, 使人窒息. 常用的甲烷检测仪主要有载体催化型、热导型、光干涉型、气敏半导体型, 但是红外气体检测方法具有检测准确度高、量程大、可靠性高、使用寿命长等优点, 所以现在被普遍采纳<sup>[1-6]</sup>. 作为便携式瓦

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划 (Nos. 2007AA06Z112, 2009AA03Z442)、国家自然科学基金 (No. 61077074)、国家科技支撑计划 (No. 2013BAK06B04)、吉林省科技发展规划 (Nos. 20120707, 201101036) 和长春市国际合作项目 (No. 11GH01) 资助

**第一作者:** 于鑫 (1986-), 博士研究生, 主要研究方向为红外光电检测. Email: yuxinnick@163.com

**导师 (通讯作者):** 王一丁 (1956-), 男, 博导, 教授, 主要研究方向为红外气体检测, 红外透明导电薄膜. Email: wangyiding48@yahoo.com.cn

**收稿日期:** 2013-06-09; **录用日期:** 2013-08-06

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

斯检测仪的重要补充,袖珍式瓦斯检测仪具有功耗低、重量轻、体积小便于携带等诸多优点,成为瓦检员和相关工作人员的主要检测工具<sup>[7-11]</sup>.因此,对于袖珍式瓦斯检测仪的研究具有一定的现实意义.

近些年,国内外也有不少科研机构从事非分光红外(Non-dispersive infra-red, NDIR)气体检测和便携式气体检测仪器的研究,如前苏联、日本、英国、瑞士等国家.吉林大学从事甲烷检测研究 10 年左右,从新型光源的选取、电路噪音的去除、气室的优化、光路的设计、便携式仪器的研制等方面做了相关研究,其中补偿方法中的多点补偿和零点漂移也做了一定的工作<sup>[12-15]</sup>.

本文采用双通道非分光红外气体检测法,对原有气体吸收理论做了修正,设计了一款基于 E2V 传感器的袖珍式红外非线性甲烷检测仪.由于探测器内部已经将光源、光路以及探测器都集成在一起,所以传感器的体积较小(尺寸约为  $20 \times 20 \times 19 \text{ mm}^3$ ),其内部光路只是光源发出的光线经过反射形成,光程也就较短(约 30 mm).根据红外气体吸收原理比尔朗伯定律可知,在输入光强一定且输出光强变化量一致的情况下,只能检测到较大的气体浓度变化量,所以短光程会导致气体的检测下限较高.工作中通过电路上的处理尽可能克服或者减少此探测系统的缺点,同时又保持它体积小功耗低便于供电和携带的优点.实验中对比尔朗伯定律做了一定的扩展和修正,结合硬件处理完成了红外非线性袖珍式甲烷检测仪的制作.采用上位机 Labview 测试检测仪的输出电信号,全面分析了有效电信号的峰峰值与气体浓度的关系;并且得到仪器在低浓度时的灵敏度和最低检测下限均可达到 50 ppm.

## 1 硬件电路部分

整套硬件电路主要包括红外光源的驱动电路,红外光到达红外探测器输出电信号的处理电路、信号放大电路、滤波电路和峰值检波电路,AD 采样电路信号经过单片机处理输出,最终声光报警或者 LCD 显示信息,如图 1.

### 1.1 内部光源驱动

为使传感器正常工作,内置的光源必须受脉冲调制,最适宜的驱动信号是脉冲频率为 4 Hz、占空比为 1:2 的方波信号.内部光源的电阻不是定值,而是随驱动电压电平的高低变化而不同,当低电平时(即为冷态电阻约为  $8 \Omega$ ),高电平时(即为热态电阻约为  $82 \Omega$ ).焦热电探测器只能在电压突变时才有响应,故在电调制时需要 MOS 管控制开断.当驱动电压为低电平时灯丝不发光,内阻冷态启动阻值低,需要 MOS 管截止大电阻控流(此时调制电流约为 10 mA);当高电平时灯丝发光,内阻热态启动阻值较大,此时需要 MOS

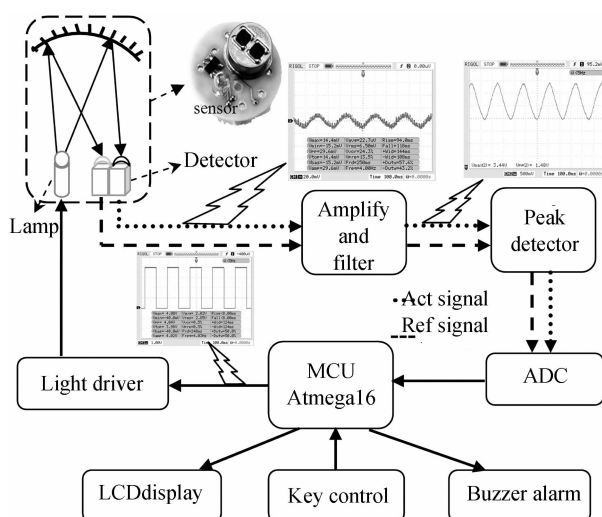
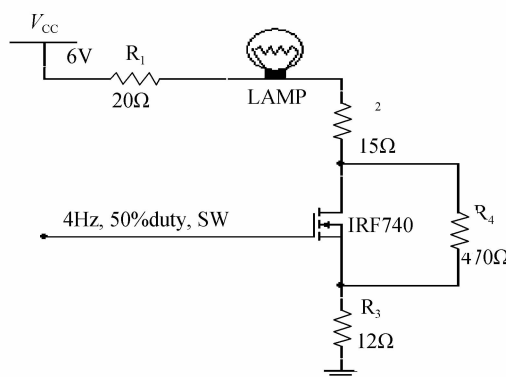
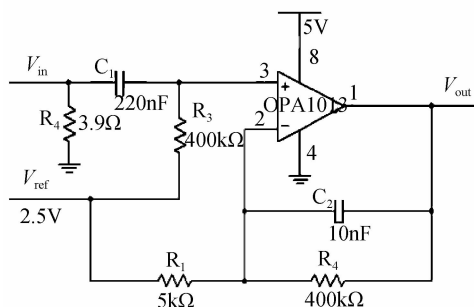


图 1 系统框图及主要部分

Fig. 1 System block diagram and the main part



(a) Internal light source driver circuit



(b) Single power supply amplify and filter circuit

图 2 内部光源驱动电路和单电源放大滤波电路

Fig. 2 Internal light source driver circuit and single power supply amplify and filter circuit

管导通短路掉大电阻(此时调制电流约为 110 mA),故整个驱动电路的电流有效值约为 60 mA 为最适宜(驱动电路如图 2(a),波形如图 1 中驱动电路信号线上方的子图所示).探测器输出信号的特性遵循光源的脉冲调制规律,并且主检测器与参考检测器之间的信号幅度比率与待测气体浓度成比例,便于进一步处理.

由于光源驱动电路的电流脉冲在信号线内产生交感脉冲,所以光源驱动电路应该与探测信号处理电路的地线完全分离,所以可以采用 $\pi$ 型滤波或者采用两块干电池分别供电来达到电源隔离的目的。

本文采用干电池单电源供电信号处理电路,探测器输出的有效信号通常峰峰值在 30 mV 以内,所以应该将这些信号立即抑制干扰地放大,其中放大电路应尽可能地靠近传感器,以减少由电子线路中导线或者器件之间带来的噪音,最终产生易于读取的探测信号。

### 1.2 单电源供电电路

用单电源供电的方法来进行有效信号的放大滤波等处理,具体电路如图 2(b),可以看出从探测器输出的原始波形是在一个直流偏置基础上叠加的交流分量变化。值得注意的是这个直流偏置电压不是一个固定值,它是温度、原始信号和供电电压的函数。为了放大这个变化的探测交流信号,需要使用交流耦合来去除这个直流偏置;交流分量叠加在一个参考电压( $V_{ref} = 2.5$  V,即  $V_{cc}$  的一半,相当于虚地),再放大这个交流分量,最终得到信号输出。

探测器输出的原始信号是一个峰峰值约为 30 mV 的交流分量(含噪音等干扰信号)叠加在 1 V 左右的直流分量上。而这个交流分量就是气体浓度检测的有效信息。这个原始信号经过滤波放大电路的处理得到的波形如图 1 中信号线上方的子图所示,可以看到是以 2.5 V 基准电压为直流分量再叠加一个峰峰值约为 1.14 V 的交流分量。

### 1.3 峰值检波电路以及单片机处理

放大电路之后的波形经过一级峰值检波电路得到直流电压值,最初通过采用传统的有源检波电路和峰值检波芯片 PKD01,实验后发现效果都不是很好,由于探测器输出的有效信号是低频信号,所以最终采用大电容和肖特基二极管串连的峰值检波电路,很好地解决了峰值检波的问题。ATmega16 单片机采峰值检波之后的电压值,液晶显示出来,之后可以判断是否达到预设值,单片机控制声光报警与否。

## 2 原理与公式

众所周知,非对称分子或者多原子分子气体能够吸收红外电磁辐射。当红外光照射到这些气体分子,入射的红外辐射波长与分子的特征吸收频率一致时,分子中原子的振动能级发生改变,光强出现衰减,气体对红外辐射出现吸收现象,这就是比尔朗伯定律,即

$$I = I_0 \exp(-KCL) \quad (1)$$

式中  $I_0$  是入射光的强度, $I$  是通过红外活性气体分子透射后的强度, $L$  是光通过气体的距离, $C$  是气体的浓度, $K$  是介质的吸收系数。通过这个吸收原理,就可以计算得到待测气体的浓度值<sup>[16-17]</sup>。

探测器输出的有效信号是与红外辐射光强成正比例的,故随着光强的改变,探测器的电压也对应着一个变化量,即

$$\frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{I_0 - I}{I_0} \quad (2)$$

式中  $V_0$  是没有待测气体通过时探测器输出电压值, $V$  是有待测气体通过后探测器输出的电压值。然后得到式(3),这样就可以计算得到气体浓度  $C$  的大小。

$$\frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{I_0 - I}{I_0} = 1 - \exp(-KCL) \quad (3)$$

采用双通道 NDIR 技术是为了更精确地测量跟补偿甲烷气体的浓度值,可以通过计算或者拟合函数给出吸收系数  $K$  的表达式,最终推算气体浓度值  $C$ 。传统的气体检测理论比尔朗伯定律有其自身的不足:1)光程并非单一值;2)光源的光强不恒定;3)气体吸收因素不仅仅与波长有关还可能与其他因素(比如滤光片的带宽等)有关;4)传感器的性能可能会随温度的变化而有一定的改变。基于这些考虑本设计在比尔朗伯定律基础上做一定的修正与补偿,最终完成一种非线性的理论推导方法。引入补偿算法,采用双指数拟合多项式,得到

$$V = V_0 [A \exp(-aC) + B \exp(-bC) + M] \quad (4)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $M$ 、 $a$ 、 $b$  是传感器系统本身和待测气体的相关常量。引入零点 Zero 和比率 Ratio,  $Zero = V_0 / V_{0ref}$ ,  $Ratio = V_{act} / V_{ref}$ ,其中  $V_{0act}$  是没有待测气体通过时主探测器输出信号的峰峰值, $V_{0ref}$  是没有待测气体通过时参考探测器输出信号的峰峰值, $V_{act}$  是通入气体后主探测器输出信号峰峰值, $V_{ref}$  是通入气体后参考探测器输出信号峰峰值。很显然 Zero 相当于是系统零点的一个定值,而 Ratio 是系统随气体浓度变化的一个函数,在没有待测气体通过时,Ratio=Zero。主检测器信号受灯的亮度(正比于驱动电压的电平值)、环境温度和主检测器上在滤光片光谱内待测气体对光吸收的影响;参考检测器也受到灯的亮度和温度的影响,但是因为使用了不同波长的滤光片,它没受到待测气体对光的吸收的影响,所以可以得到式(4)中的  $V_0 = V_{ref}$ , $V = V_{act}$ ,进而得到

$$Ratio = A \exp(-aC) + B \exp(-bC) + M \quad (5)$$

这样经过多次实验,记录双通道探测器分别输出的有效电信号比值,就可以经过一系列的数据处理推导拟合出这个系统的五个常量  $A$ 、 $B$ 、 $M$ 、 $a$ 、 $b$ ,最终达到测量气体浓度  $C$  的目的,这就是对传统比尔朗伯定律的一种补偿与修正。

## 3 气体实验与结果讨论

### 3.1 新配气方法

为了精确地测量气体浓度,配气是很关键的一步,本设计采用动态跟静态结合的方法来进行混合气的配

制.如图3所示,以一个固定容积 $V$ 的玻璃罩作为气体配制的气室,其内部放个小风扇为了均匀搅拌气室内气体.假定玻璃罩内恒温( $20^{\circ}\text{C}$ )、恒压( $1\text{ atm}$ ),最初没有注入甲烷气体的时候,气室内浓度是 $\rho_0=0$ .第一次注入纯甲烷气体 $\Delta V_1$ ,与气室容积 $V$ 内的气体均匀混合后再排出 $\Delta V_1$ 的混合气(理论上 $\Delta V_1$ 等于 $\Delta V_1$ ),此时气室内的甲烷浓度变为 $\rho_1$ ;第二次注入注入 $\Delta V_2$ 的纯甲烷气体,再排除 $\Delta V_2$ 的混合气(理论 $\Delta V_2$ 也等于 $\Delta V_2$ ),而此时的浓度变成 $\rho_2$ ;以此类推,第 $n$ 次注入气体后的甲烷浓度( $\rho_n$ )与第 $(n-1)$ 次( $\rho_{n-1}$ )的关系如式(6)所示.

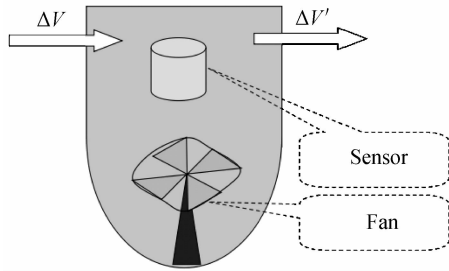


图3 气体实验装备

Fig. 3 Gas test equipment diagram

$$\rho_n = \frac{\Delta V_n + V \cdot \rho_{n-1}}{V + \Delta V_n} \quad (6)$$

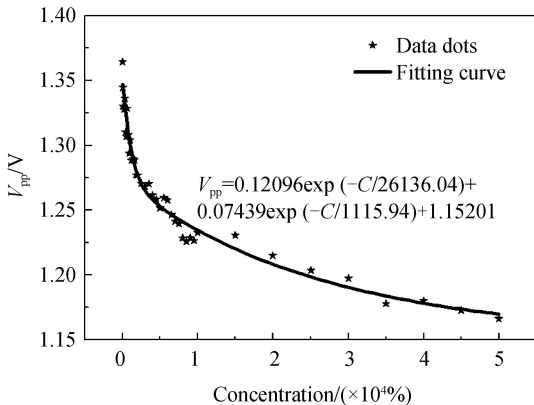
式中 $\Delta V_n$ 是第 $n$ 次注入的气体容积,故推得式(7)为

$$\Delta V_n = \frac{\rho_n - \rho_{n-1}}{1 - \rho_n} \cdot V \quad (7)$$

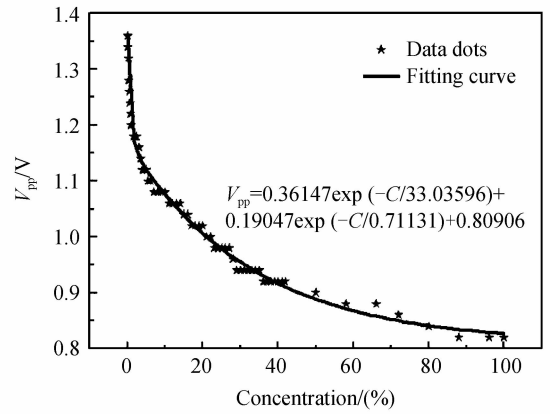
式(7)给出了每一次所需注入纯甲烷气体的容积与实时气体浓度的关系式.

### 3.2 单通道气体检测实验

首先做两组传统的单通道测量甲烷浓度的实验作为对比,一个是低于甲烷最低爆炸限浓度的实验(记为实验A),另一个是满量程的气体浓度实验(记为实验B).实验A跟B中待测气体浓度与有效电压信号 $V_{pp}$ 的具体关系以及双指数拟合曲线分别如图4(a)、(b)所示.MCU单片机采样峰值检波电路后的电信号,这个峰值减去直流分量就是有效电信号峰峰值的一半.通



(a) The  $C$ - $V$  data dots and fitting curves corresponding to experiments A



(b) The  $C$ - $V$  data dots and fitting curves corresponding to experiments B

图4 实验A和B气体浓度实验结果

Fig. 4 Experimental results of gas concentration to experiments A and B

过图4中浓度与电压拟合曲线可以看出大致满足比尔朗伯定律,但是拟合度不理想,误差较大.通过这组实验结果可以得到单通道气体探测的方法具有其自身的缺点,比如由于光强和周围环境的不稳定导致误差大,拟合度不好,最终灵敏度较低,检测下限不高.

### 3.3 双通道气体检测实验

采用双通道探测进行气体检测实验,通过单片机计算得到每个浓度点下的有效探测器(记为ADO)和参考探测器(记为RDO)分别输出电压值的均值.ADO与RDO端在有信号干扰时候的波动是一致的,所以ADO与RDO的输出数据有着一定的同步性,故做一定的线性化处理,也就是本文第三部分提到的比率 $\text{Ratio} = V_{\text{act}}/V_{\text{ref}}$ .对低甲烷爆炸限内气体浓度( $0\sim 5\%$ )做了41组实验数据,记为实验C,具体数据点以及双指数拟合曲线如图5.

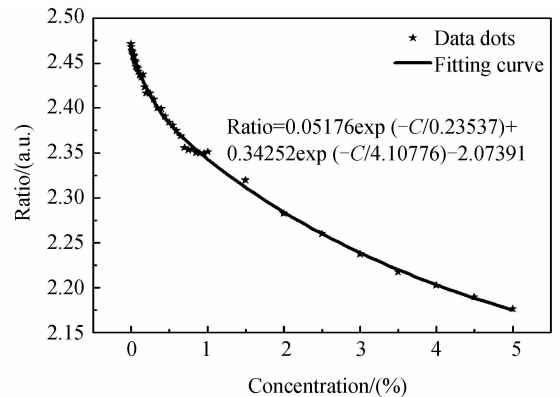


图5 实验C气体浓度跟电压关系的数据点以及拟合曲线  
Fig. 5 The concentration-ratio data dots and double-exponential fitting curve corresponding to experiment C

由图5可以发现拟合曲线能够很好地符合数据点群,说明实验C要比实验A和B具有更好的拟合度,更加符合本检测系统.也就是说双通道实验可以很好地降低单通道引入的干扰(比如光强的漂移和气室环

境的波动),而比率 Ratio 只取决于  $V_{act}$  和  $V_{ref}$  的大小.图 5 中还可以得到拟合曲线的方程,如式(8)所示.

$$\text{Ratio} = 0.05176 \cdot \exp(-C/0.23537) + 0.34252 \cdot \exp(-C/4.10776) + 2.07391 \quad (8)$$

式(8)与式(5)做对比,可以发现本系统的五个常量  $A$ 、 $B$ 、 $M$ 、 $a$ 、 $b$  对应的拟合值,也就是  $A=0.05176$ ,  $B=0.34252$ ,  $M=2.07391$ ,  $a=1/0.23537=4.24863$ ,  $b=1/4.10776=0.24344$ .这样就补偿得到了系统的

浓度-比率方程式,可以更精确地测试气体浓度值.

### 3.4 信噪比测试实验

首先测试探测器原始输出的信号以及没有信号时的纯干扰噪音信号,做比值得到原始信号的信噪比,波形如图 6(a)、(b).然后原始信号经过电路板输出的电信号再测试有效信号已经没有信号时输出的纯干扰噪音信号,再做比值得到经过系统后的信噪比,具体波形如图 6(c)、(d).

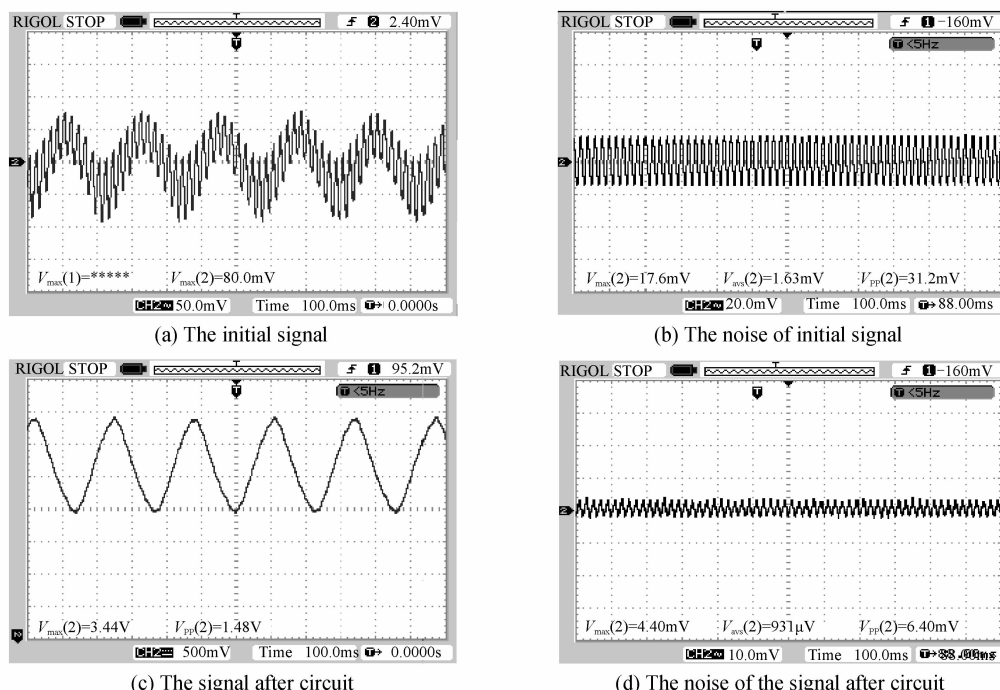


图 6 电路信号以及噪音信号图  
Fig. 6 The circuit signal and the noises

计算发现,原始信号的信噪比  $\text{SNR} = (80.0 - 31.2)/31.2 = 1.564$ ,经过系统后的信噪比  $\text{SNR}' = (1480 - 6.4)/6.4 = 230.25$ ,信噪比由原始的 1.564(=3.9 dB) 提高到 230.25(=47.2 dB),还是很理想的,可以方便地采集或者处理信号.

### 3.5 探测下线与灵敏度实验

采用双通道测试气体实验,将拟合后得到的式(8)做标定曲线,可以反推出气体浓度,经过再测试双通道电压比值可以得到甲烷浓度,与标准配气时的标准气体浓度做对比,具体曲线如图 7.可以发现数据很好地拟合成线性,并且斜率为 0.9974,近似于 1,拟合曲线的拟合标准误差为 0.03477.实验表明,该系统可以更精确地测量甲烷气体浓度,并且最低检测下限跟灵敏度可以达到 50 ppm.

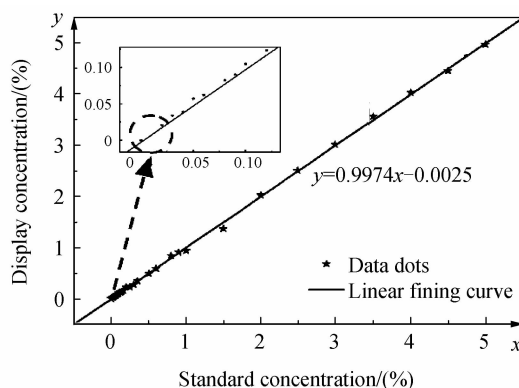


图 7 仪器显示的气体浓度与标准气体浓度的对比以及线性拟合曲线  
Fig. 7 The contrast between the displayed concentrations and the standard concentrations

## 4 结论

以集光源、光路、红外探测器于一体的传感模块为核心,在红外气体吸收原理基础之上扩展比尔朗泊定律,完成了一款 NDIR 非线性袖珍式甲烷检测仪.同时采用干电池单电源供电实现低功耗小型化.通过单、双通道气体检测对比实验,采取动态静态结合的新配气方法使得甲烷气体的最低检测下限能够达到 50 ppm.

### 参考文献

- [1] TAKAYA I, HITAI H, KIYOSHI K. A portable remote methane sensor using a tunable diode laser[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, **11**(6): 594 - 602.
- [2] CRAWFORD M, GEORGE S, GEORGE M, *et al.* Design of a portable optical sensor for methane gas detection[J]. *Sensors and Actuators B*, 2006, **113**(2): 830-836.
- [3] MIRUMYANT S O, MAKSIMYUK V S. A portable optical gas analyzer for remote measurement of the methane concentration in closed spaces and rooms [J]. *Journal of Optical Technology*, 2002, **69**: 56-59.
- [4] ASHCHEULOV A A, GUTSUL I V. Device for monitoring the radiation temperature in coal mines[J]. *Journal of Optical Technology*, 2000, **67**(3): 281-283.
- [5] CHEN Dong, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun. Time sharing scanning multiplexing method of tunable diode laser spectroscopy system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 1901-1905.  
陈东, 刘文清, 张玉钧. 调谐半导体激光光谱分时扫描多路方法[J]. 光子学报, 2009, **38**(8): 1901-1905.
- [6] CHEN Hong-li, LI Guo-hui, CHEN Yao-sheng, *et al.* The experiment for methane fiber optical sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(6): 541-544.  
陈红丽, 李国辉, 陈尧生, 等. 甲烷光纤气体传感器的实验研究[J]. 光子学报, 2000, **29**(6): 541-544.
- [7] UOTILA J, KOSKINEN V, KAUPPINEN J. Selective differential photoacoustic method for trace gas analysis[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2005, **38**(1-2): 3-9.
- [8] LIN Ji-peng, LIU Jun-hua. A new technology study on overlapped absorbed peak of infrared hybrid gas [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 408-412.  
林继鹏, 刘君华. 基于吸收峰混叠的红外混合气体分析方法的研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(3): 408-412.
- [9] WU Z, CHEN X, ZHU S, *et al.* Room Temperature methane sensor based on graphene nanosheets/polyaniline nanocomposite thin film[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, **13**(2): 777-782.
- [10] KAN R, LIU W, ZHANG Y, *et al.* Tunable diode laser absorption spectrometer monitors the ambient methane with high sensitivity[J]. *China Laser*, 2005, **32**(9): 1217-1220.
- [11] 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**(2): 271-277.
- [12] LI L, CAO F, WANG Y, *et al.* Design and characteristics of quantum cascade laser-based CO detection system[J]. *Sensors and Actuators B*, 2009, **142**(1): 33-38.
- [13] YE W, ZHENG C, 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.
- [14] ZHANG Y, GAO W, SONG Z, *et al.* Design of a novel gas sensor structure based on mid-infrared absorption spectrum [J]. *Sensors and Actuators B*, 2010, **147**(1): 5-9.
- [15] ZHENG C, YE W, LI G, *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*, 2011, **160**(1): 389-398.
- [16] ZHANG W, TAN Q, LIU J, *et al.* Two-channel IR gas sensor with two detectors based on LiTaO<sub>3</sub> single-crystal wafer[J]. *Optics and Laser Technology*, 2010, **42**(8): 1223-1228.
- [17] TAN Q, ZHANG W, XUE C, *et al.* Design of mini-multi-gas monitoring system based on IR absorption[J]. *Optics and Laser Technology*, 2008, **40**(5): 703-710.