

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201507038



非分散红外二氧化碳检测仪研制

刘 恒, 任洪亮

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 设计一种电调制、一体化的二氧化碳体积分数检测系统. 该系统基于 CO_2 气体分子对红外光的特征吸收和 Lambert-beer 定律, 采用双通道设计, 由热释电传感器检测到的两路信号经过 1 Hz 低通放大电路处理后, 输入示波器显示. 为了避免光源波动对测量结果的影响, 采用 5 V 稳压电路驱动红外光源, 单片机对其进行 1 Hz 亮灭调制. 对两路输出信号进行计算, 可得 CO_2 体积分数. 结果表明: 检测仪器量程为 0%~80%, 响应时间小于 1.5 s.

关键词: CO_2 ; 气体检测; Lambert-beer 定律; 热释电传感器; 光源调制; 滤波放大电路

中图分类号: X 853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)06-0854-04

Carbon Dioxide Detector Based on Non-Dispersed Infrared Principle

LIU Heng, REN Hongliang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A compact non-dispersed infrared CO_2 measuring system using electrical modulated infrared source is designed. The system uses dual channel pyroelectric sensors to detect CO_2 molecular based on characteristic infrared absorption and Lambert-beer law. Two channels signals detected from pyroelectric sensor are filtered by 1 Hz low pass amplifier circuit. The measured result is displayed on an oscilloscope. In order to avoid measurement result is affected by light source fluctuation, the infrared light source is powered by 5 V voltage regulator circuit, and it is switched on and off with 1 Hz modulation frequency controlled by a single chip. The volume fractions of CO_2 is obtained according to the calculation of the tow output signal. Result shows that the detector has the measurement rang of 0%-80%, the response time less than 1.5 s.

Keywords: CO_2 ; gas detection; Lambert-beer law; pyroelectric sensors; light source modulation; filtering-amplifying circuit

近年来,人们对温室气体主要成分二氧化碳的关注度日益提高^[1]. 开发一种便携式、大众化的红外二氧化碳气体检测装置显得尤为迫切^[2]. 目前,检测 CO_2 的方法主要有色谱法、电化学法、电气法及光学吸收法等^[3]. 国内 CO_2 检测系统常用于地下车库、矿井及温室大棚等场所,但国内厂家生产的非分散红外(NDIR)二氧化碳检测仪多数采用 20 世纪 80 年代的技术. 系统不但体积大,且使用寿命、抗干扰能力和精度等方面也有待提高^[4]. 基于此,本文设计一种采用红外光检测法的 CO_2 检测系统.

收稿日期: 2015-07-26

通信作者: 任洪亮(1980-),男,副教授,博士,主要从事光电检测及光学微操控仪器研发的研究. E-mail: renhongliang@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2012J05120); 福建省泉州市科技计划资助项目(2012Z95); 华侨大学科技文化创新基金资助项目(201510385040)

1 设计原理

不同分子或原子的电子所处的能级不同^[5], 电子在吸收外界辐射的能量时, 只能吸收能量大小与能级差相同的部分^[6]. 由 CO₂ 的吸收谱线可知: 对于波长为 4.00 μm 的红外光, CO₂ 几乎不吸收; 对于波长为 4.26 μm 的红外光, 几乎完全吸收. 此外, CO₂ 对红外光的吸收还遵从朗伯比尔定律^[7], 即

$$I = I_0 \exp(-\alpha CL).$$

(1)

式(1)中: L 为光在气室通过的长度; C 为被测气体体积分数; α 为光被吸收的比例系数, 它与吸收物质的性质及入射光的波长有关; I_0 为通过气体前的光强大小; I 为通过气体后的光强大小. 这一特性为系统的设计提供了依据.

系统示意图, 如图 1 所示. 气室安装红外光源的一端设计成抛物面, 气室内壁镀高反膜, 以保证平行光入射. 红外光源发出的光经过气室中的 CO₂ 吸收后, 入射到参考通道和测量通道的滤光片上, 两通道输出电压与入射光强有关, 分别为

$$U_1 = I_0 K_1,$$

(2)

$$U_2 = I_0 K_2 \exp(-\alpha CL).$$

(3)

式(3)中: K_1, K_2 分别为参比通道和测量通道的系统参数, 与热释电探测器的种类和滤光片的透光特性有关^[8]. 由式(1)~(3)可得系统设计的理论依据为

$$C = \frac{1}{\alpha L} \ln \frac{U_1 K_2}{U_2 K_1}.$$

(4)

2 系统硬件设计

2.1 热释电传感器和红外光源调制

2.1.1 热释电传感器 选用 PYS 3228 型红外热释电传感器, 其正常工作电压为 5 V. 热释电传感器两通道分别采用 4.00 μm 滤光片和 4.26 μm 滤光片. 4.00 μm 的滤光片作为参考通道, 4.26 μm 的滤光片作为测量通道^[9].

2.1.2 红外光源调制 选用 IRL 715 型红外光源, 其辐射波长为 0.38~4.40 μm. 红外光源相对辐射强度与驱动电压的关系, 如图 2 所示. 图 2 中: p 为相对辐射强度. 由图 2 可知: 当驱动电压为 5 V 时, 4.00, 4.26 μm 波长处的辐射强度基本相同. 为满足两波长对应辐射强度相同, 且降低光源波动引起的测量误差, 决定采用 5 V 稳压电源驱动红外光源. 热释电频率响应曲线与红外光源调制曲线, 如图 3, 4 所示. 图 3, 4 中: Res 为响应率; D 为光源调制深度.

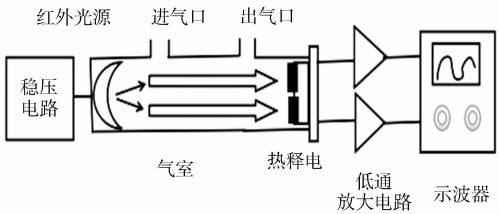


图 1 系统示意图
Fig. 1 System schematic diagram

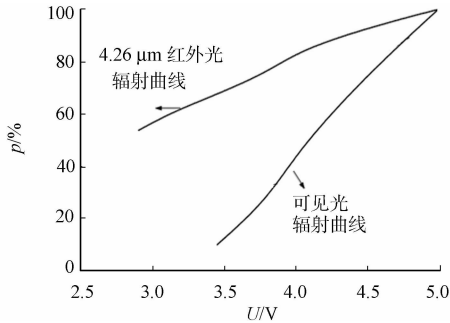


图 2 相对辐射强度与驱动电压函数关系
Fig. 2 Relative radiation intensity as function of supply voltage

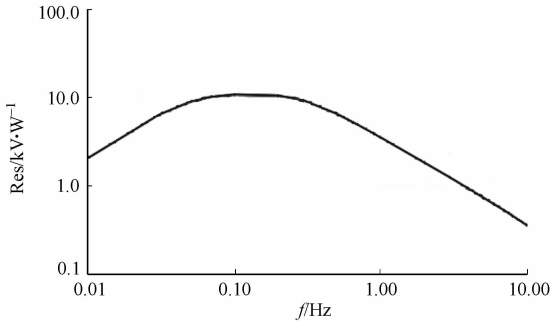


图 3 热释电频率响应曲线

Fig. 3 Pyroelectric detector frequency-response curve

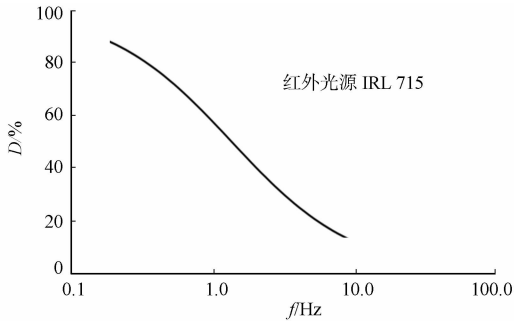


图 4 IRL 715 调制深度曲线

Fig. 4 IRL 715 modulation depth curve

由图 3,4 可知:热释电传感器的最佳响应频率为 0.1~0.4 Hz;红外光源适合低频调制. 然而,信号调制频率太低不利于放大滤波电路的实现,在实际电路中,一般不能满足热释电传感器的最佳调制深度. 考虑到系统的稳定性,决定采用频率为 1 Hz 的 5 V 电压驱动红外光源. 调制信号由单片机输出.

2.2 滤波放大电路

系统采用双通道设计,因参考通道和测量通道电路相同,文中仅以一路为例. 放大滤波电路,如图 5 所示. 热释电探测器输出有 0.4 V 的直流偏置,但有用的是随光源调制而响应的交流分量. 因此,放大电路中加入 C_5, C_6 隔直电容,以除去直流偏置.

R_5, C_4 和 R_3, C_1 用作二阶低通滤波,采用二阶低通,能够减小带宽,提高测量精确度^[10]. 电路传递函数可表示为

$$A = (1 + \frac{R_1}{R_2}) \frac{1}{1 + 3j\omega RC + (j\omega RC)^2} \tag{5}$$

式(5)中: $R=R_3=R_5=500\text{ k}\Omega; C=C_1=C_4=0.1\text{ }\mu\text{F}; \omega=2\pi f, f$ 为输入信号频率. 将 $f_0=1/(2\pi RC)=3.2\text{ Hz}$ 带入式(5),可得输入频率为 f 的信号时的电压放大倍数为

$$A = (1 + \frac{R_1}{R_2}) / (1 - (\frac{f}{f_0})^2 + j \frac{3f}{f_0}) \tag{6}$$

令式(6)分母的模等于 $\sqrt{2}$,可解出通带截止频率 $f_p=0.37f_0=1.2\text{ Hz}$. 热释电输入偏置电压为 0.4 V,幅值为 5 mV,频率分别为 1,5,10 Hz 的正弦信号时的输出波形图,如图 6 所示. 由图 6 可知:电路低通特性良好,满足信号处理要求. 电容 C_2 用于滤除高频噪声,其值越大,滤除高频噪声效果越好. C_2, R_1 并联后,与 R_1, C_5 构成放大电路. C_2 增大时,其阻抗 $1/(2\pi f C_2)$ 减小,使信号放大倍数减小. 在保证电路放大倍数的前提下, C_2 选用 $0.1\text{ }\mu\text{F}$.

2.3 红外光源稳压驱动电路

稳压芯片选用 ADP 2503 型 DC-DC 转换器(美国亚德诺半导体技术公司),其供电电压为 2.3~5.5 V,输出电压为 2.8~5.0 V,内部补偿最大化地减少了外部元件数量. 芯片输出电流高达 600 mA,可直接驱动额定电流为 110 mA 的红外光源. 当负载电流较高时,可采用电流模式的固定频率脉宽调制(PWM)控制方案,以获得出色的稳定性和瞬态响应. 供电电源可使用单节锂电池、多节碱性电池、USB 及其他标准电源. 稳压电路原理图,如图 7 所示. 其输出电压为

$$U_{out} = (\frac{R_1 + R_2}{R_1}) U_{ref} = (\frac{R_1 + R_2}{R_1}) \times 0.5 \tag{7}$$

式(7)中: U_{ref} 为参考电压值,由芯片本身决定,其值为 0.5 V. 在系统电路中, R_1 取 $37\text{ k}\Omega, R_2$ 取 $333\text{ k}\Omega, U_{out}$ 计算值为 5 V.

输入电容 C_3 可减小电池开关频率纹波的幅度. 电感 L_1 决定电感电流的纹波和环路动态特性,其值通常在 $1.0\sim1.5\text{ }\mu\text{H}$. 为了保证系统的稳定性和良好的瞬态响应,输出端接入 $22\text{ }\mu\text{F}$ 的电容 C_2 . 在输出端后,加入一级 LC 谐振滤波电路,使输出更加稳定^[11].

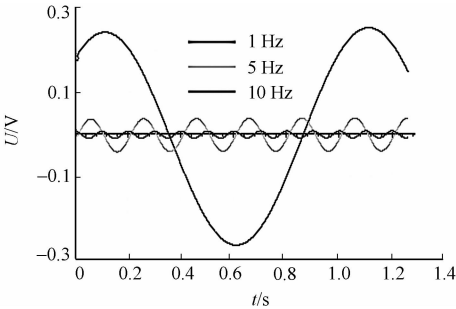


图 6 仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform

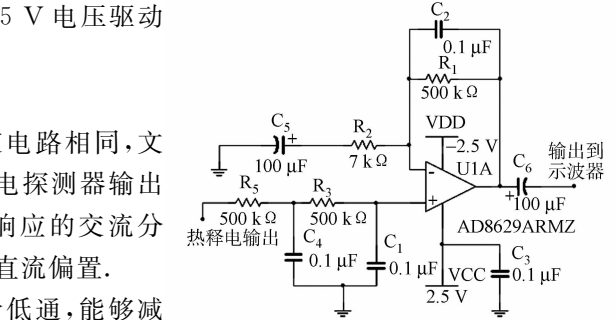


图 5 滤波放大电路

Fig. 5 Filter amplifier circuit

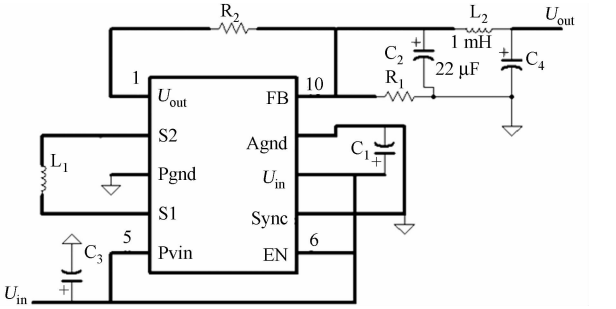


图 7 稳压电路

Fig. 7 Voltage regulator circuit

3 测试结果与分析

利用系统测量混合气体中 CO₂ 体积分数,选取的 CO₂ 体积分数分别为 0%,20%,40%,60%,80%。当 CO₂ 体积分数为 0 时,测得 U_1 为 100 mV, U_2 为 175 mV。由式(4)可知:此时, $\frac{U_1 K_2}{U_2 K_1}$ 应取 1,计算得 K_2/K_1 为 1.75。建立的二氧化碳体积分数($\varphi(\text{CO}_2)$)和输出电压关系,如图 8 所示。由图 8 可知:输出结果与混合气体中 CO₂ 体积分数之间有良好的线性关系。系统灵敏度与二氧化碳体积分数有关,其随体积分数的变化关系,如图 9 所示。系统用标准体积分数二氧化碳气体标定后,可实现定量测量二氧化碳的绝对体积分数。

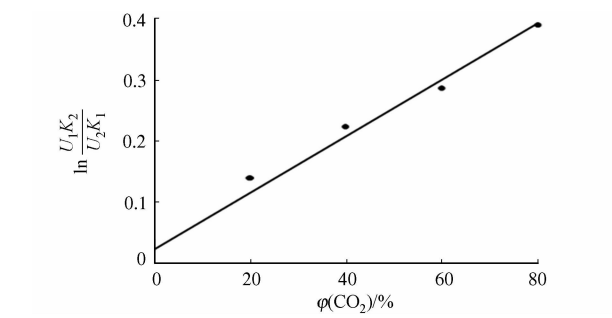


图 8 系统工作曲线

Fig. 8 System working curve

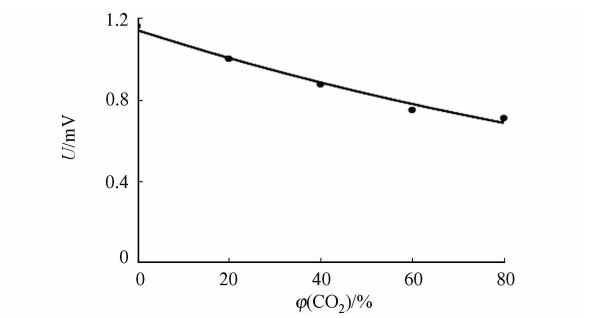


图 9 灵敏度与二氧化碳体积分数关系

Fig. 9 Sensitivity as function of CO₂ volume fraction

4 结束语

基于 CO₂ 气体分子对红外光的特征吸收和 Lambert-beer 定律设计了 CO₂ 体积分数检测系统。采用新型红外光源,并利用新型稳压芯片对光源进行调制,减小了以往由于红外光源不稳定带来的测量误差。系统采用新型热释电传感器,并且在信号处理部分采用低噪声、高灵敏度的运算放大器进行二级低通滤波放大,减小了噪声引起的误差,提高了测量灵敏度。此外,双通道差分检测设计提高了系统抗干扰能力,减小环境变化对测量的影响。测试结果表明:系统具有良好的工作特性,量程为 0%~80%,响应时间小于 1.5 s。

参考文献:

[1] 陈俊武,陈香生,胡敏. 中国低碳经济前景刍议(下): 中国减少碳排放措施[J]. 中外能源,2015,20(4):1-14.

[2] ROBERT F, THOMAS T. An automotive bisource spectroscopic carbon dioxide sensor with pressure compensation [J]. Sensors and Actuators B,2007,127(1): 82-88. DOI:10. 1016/j. snb. 2007. 07. 005.

[3] QIAN Weikang, HUANG Xiaoyin, QIAN Jianqiu. Research of implementation for multi-component gas monitoring based on principle of non-dispersive infrared[J]. Computer Engineering and Appicating,2012,48(S2):92-95.

[4] 王文萃,栾美生,于彤彦. 红外甲烷气体检测仪的设计以及干扰分析[J]. 红外技术,2009,31(8):458-460.

[5] 周世勋. 量子力学教程[M]. 北京:高等教育出版社,2009.

[6] SIPIOR J, EICHHOM L, LAKOWICZ J R. Phase fluorometric optical carbon dioxide gas sensor for fermentation off-gas monitoring[J]. Biotechnol Prog,1996,12(2):266-271. DOI:10. 1021/bp960005t.

[7] WERLE P. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors[J]. Spectrochemical Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,1998,54(2):197-236. DOI:10. 1016/S1386-1425(97)00227-8.

[8] 赵玲,赵燕,何秀丽,等. 基于超薄钽酸锂晶片及炭黑吸收层的热释电探测器[J]. 纳米技术与精密工程,2013,12(1):44-50. DOI:10. 3969/j. issn. 1672-6030. 2014. 01. 008.

[9] 任洪亮. 总有机碳分析仪信号处理算法的分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2014,35(2):142-145.

[10] 侯卫国,谷城. 压控电压源二阶低通有源滤波电路设计与仿真[J]. 实验技术与管理,2014,31(10):103-106.

[11] 余明扬,余斌,潘俊东,等. CLC 滤波电路参数对纹波抑制的影响[J]. 计算机仿真,2014,31(2):183-186.