

## 非分光红外二氧化碳浓度测量仪的研究

王学水 张冉冉 池金波

(山东科技大学 电子通信与物理学院 山东 青岛 266590)

**摘要:**介绍了一种非分光红外(NDIR) CO<sub>2</sub>浓度测量仪。从红外辐射与红外吸收的基本原理出发,以双通道气体吸收模型为基础,结合传感器技术,完成了以 CO<sub>2</sub>浓度检测功能为核心的理论分析;围绕红外光源和红外探测器设计了驱动电路和信号处理电路,并把传感器安装在受保护的光路系统中;并且根据实验所得数据改进了浓度计算方法。

**关键词:** CO<sub>2</sub>检测; 非分光红外; 红外传感器

**中图分类号:** TH73

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19358/j.issn.1674-7720.2016.19.024

**引用格式:** 王学水,张冉冉,池金波. 非分光红外二氧化碳浓度测量仪的研究[J]. 微型机与应用 2016, 35(19): 81-83, 88.

Research of the CO<sub>2</sub> concentration measuring instrument based on NDIR principle

Wang Xueshui, Zhang Ranran, Chi Jinbo

(College of Electronic Communication and Physics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** A new type of the CO<sub>2</sub> concentration measuring instrument based on NDIR principle is introduced. From the basic principle of infrared radiation and infrared absorption, based on dual-channel gas absorption model, and combined with sensor technology, the theoretical analysis of CO<sub>2</sub> concentration detection function is completed as the core. The driver circuit and the signal processing circuit are designed based on infrared light and infrared detector, and the sensor is mounted in the protected optical system. And the concentration calculation method is improved based on the experimental data.

**Key words:** CO<sub>2</sub> detection; NDIR; infrared sensor

## 0 引言

二氧化碳作为大气中重要的组成成分在人们的日常生活中起着极其重要的作用。电化学法、色谱法、光学吸收法等 CO<sub>2</sub>浓度检测技术在国内外已有成熟的应用,但把上述方法应用到民用电子,受应用环境、精度要求和成本等的限制,难以普及。非分光红外法又称非分散红外吸收分析(NDIR),即由光源发出的光直接穿过试样后通过滤镜到达检测器。基于 NDIR 的气体浓度检测设备具有稳定性好、体积小、响应时间快以及良好的便携性等优点。

目前,国内基于非分光红外原理的 CO<sub>2</sub>浓度测量仪的测量范围为体积分数的 3%~30% (30 000 ppm~300 000 ppm),测量电路和浓度计算方法适用于对应的浓度测量范围,数据拟合方式为最小二乘法。对 0~5 000 ppm 浓度范围的测量技术没有专门研究,而 5 000 ppm 被认为是人对 CO<sub>2</sub>长期耐受浓度的极限。本文应用非分光红外技术,研究了室内低浓度范围的 CO<sub>2</sub>气体的测量方法。

## 1 检测原理

红外 CO<sub>2</sub>气体浓度检测技术是以朗伯比尔定律为理论基础,根据双通道气体吸收模型来计算 CO<sub>2</sub>的浓度。

4.26 μm 的红外光是 CO<sub>2</sub>气体的一个吸收峰,但 CO<sub>2</sub>气体

对 4 μm 的红外光几乎没有吸收,如图 1 所示。

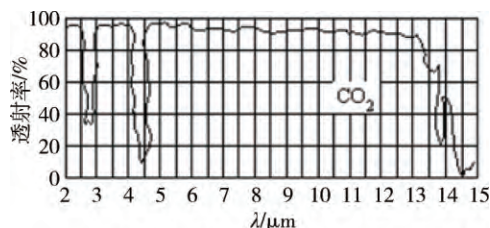


图1 CO<sub>2</sub>的红外吸收峰频率

假设 4.26 μm 红外光和 4 μm 红外光的初始光强分别为  $I_{m0}$ 、 $I_{r0}$ ,经 CO<sub>2</sub>吸收后剩余光强分别为  $I_m$  和  $I_r$ ,由郎伯比尔定律可知:

$$I_m = I_{m0} e^{-k l c} \quad (1)$$

CO<sub>2</sub>不会对 4 μm 红外光造成衰减,前后光强近似相等。

$$I_r = I_{r0} \quad (2)$$

式中  $k$  为 CO<sub>2</sub>气体对红外光的吸收系数,  $l$  为红外光源到接收器的长度,将式(1)和式(2)相除后再取对数<sup>[1]</sup>,可得:

$$\ln \frac{I_m}{I_r} = -k l c + \ln \frac{I_{m0}}{I_{r0}} \quad (3)$$

于是求得浓度:

《微型机与应用》2016 年第 35 卷第 19 期

欢迎网上投稿 [www.pcachina.com](http://www.pcachina.com) 81

$$c = -\frac{1}{kl} \ln \frac{I_m}{I_r} + \frac{1}{kl} \ln \frac{I_{m0}}{I_{r0}} = \frac{1}{kl} \ln \frac{I_r}{I_m} + \frac{1}{kl} \ln \frac{I_{m0}}{I_{r0}} \quad (4)$$

式(4)为浓度计算的基本公式,在把光强 $I$ 转换成电压信号 $U$ 的电路系统中,满足关系:

$$U_1 = P_1 I_m \quad (5)$$

$$U_2 = P_2 I_r \quad (6)$$

$P_1$ 和 $P_2$ 与光栅透光系数和传感器灵敏度有关,是与系统相关的常量。

所以浓度计算公式可以表示为:

$$c = \frac{1}{kl} \ln \frac{U_2}{U_1} + \frac{1}{kl} \ln \frac{I_{m0} P_1}{I_{r0} P_2} \quad (7)$$

式中 $U_1$ 为传感器输出的待测气体光强对应电压, $U_2$ 为传感器输出的参考气体光强对应电压<sup>[2]</sup>,式(7)中只有 $U_1$ 和 $U_2$ 是待测量,其余都是常量。进一步,根据对数函数的泰勒级数展开,保留到三次幂:

$$x = \ln \frac{U_2}{U_1} = \left( \frac{U_2}{U_1} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{U_2}{U_1} - 1 \right)^2 + \frac{1}{3} \left( \frac{U_2}{U_1} - 1 \right)^3 \quad (8)$$

引入中间变量 $x$ ,用来表示对参考气体电压和待测气体电压作比后取对数的近似值, $U_1$ 和 $U_2$ 越接近,近似值越接近真实值,于是得到 $\text{CO}_2$ 浓度的近似计算公式:

$$c = ax + b \quad (9)$$

## 2 系统设计及核心硬件实现

红外 $\text{CO}_2$ 气体浓度测量仪的功能框图如图2所示,包括红外光源、气室、红外探测器、放大电路、A/D采样电路、LCD显示电路和数据通信接口。红外光源使用IRL715,波长范围从可见光到 $5\mu\text{m}$ ,具有波长范围宽、可靠性高、输出稳定、时间常数短等优点。气室与外界环境连通,红外辐射垂直射入气室,一部分被气室中的气体分子吸收,剩余部分透过气室到达红外探测器。

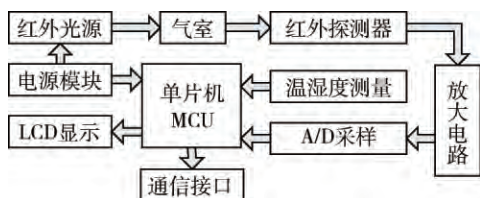


图2 红外 $\text{CO}_2$ 浓度测量仪系统框图

红外探测器选用TPS2534,它是基于热释电效应的一种热探测器。该探测器是双通道的,两通道上分别装有 $4.26\mu\text{m}$ 滤光片和 $4\mu\text{m}$ 滤光片,分别是待测气体电压通道和参考气体电压通道,红外探测器完成光强到电压的转换。探测器外接信号放大电路,经放大后的电压信号由A/D模块转换成数字信号后交由单片机处理。单片机通过内置算法求出气室中 $\text{CO}_2$ 浓度,该数值通过LCD显示器显示出来。

### 2.1 光路安装结构

红外 $\text{CO}_2$ 浓度探测器输出信号的有效性和可靠性必须以科学合理的光路安装结构为基础<sup>[3]</sup>。如图3所示,气

室外侧是光路保护罩,它两端留有红外光源IRL715和红外探测器TPS2534的安装空间,但是两者不能固定在这个保护罩上,必须以电路板为基板,将管脚焊接在电路板上。左侧红外光源的安装空间实际是一个抛物面反光镜,起到汇聚光线的作用。保护罩内侧涂有反光材料,对红外线几乎没有吸收作用。保护罩上端的透气纱网和通气孔保证了气室与外界环境连通,气室中 $\text{CO}_2$ 浓度等于环境中的浓度,同时避免粉尘等杂质进入气室,对传感器和光源起到保护作用,为系统的长期可靠性提供了保证。

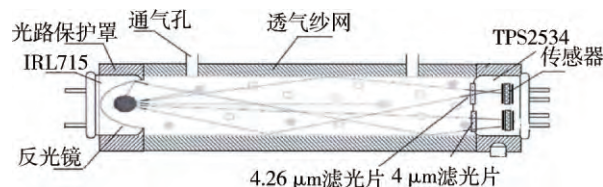


图3 光路安装结构

### 2.2 红外光源驱动电路

红外光源IRL715的工作电压为 $+3.3\text{V}$ ,该电压通过可控稳压芯片ADP3330-3.3获得,红外驱动电路如图4所示。芯片的导通和截止由管脚6控制。单片机程序控制红外光源发光频率为 $1\text{Hz}$ 、占空比为50%,保证光源输出稳定光强的时间足够长,方便检测。

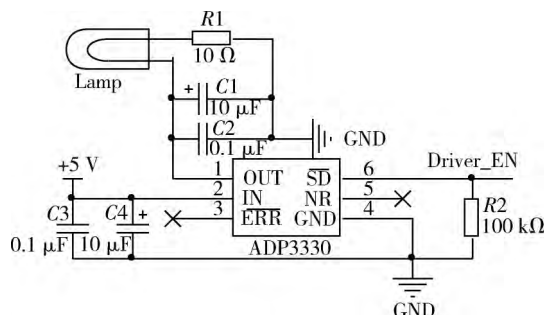


图4 红外光源驱动电路

### 2.3 放大电路

红外探测器和热电偶一样都是应用了热电效应原理,但热释电传感器的热电系数远高于热电偶。红外探测器的输出信号非常微弱,测量通道和参考通道上输出的模拟电压通常小于 $3\text{mV}$ ,叠加在直流电压上,在A/D采样之前,必须进行放大<sup>[4]</sup>。此电路中所用的运算放大器为圣邦微电子(SGMICRO)的SGM8554,它是四通道高精度运算放大器。

待测电压和参考电压放大电路如图5所示,两路气体放大电路是完全对称的。很明显,该放大电路是两极放大,前后级间通过 $1\mu\text{F}$ 极性钽电容实现信号耦合<sup>[5]</sup>,其余电容都是滤波电容,消除信号中的噪声干扰,前后级放大电路的结构和元件参数接近。

经过放大后的待测电压和参考电压波形图如图6所示,光路、传感器结构和电路组成的对称性使得待测气体电压波形与参考气体电压波形相近。待测气体电压波形

《微型机与应用》2016年第35卷第19期

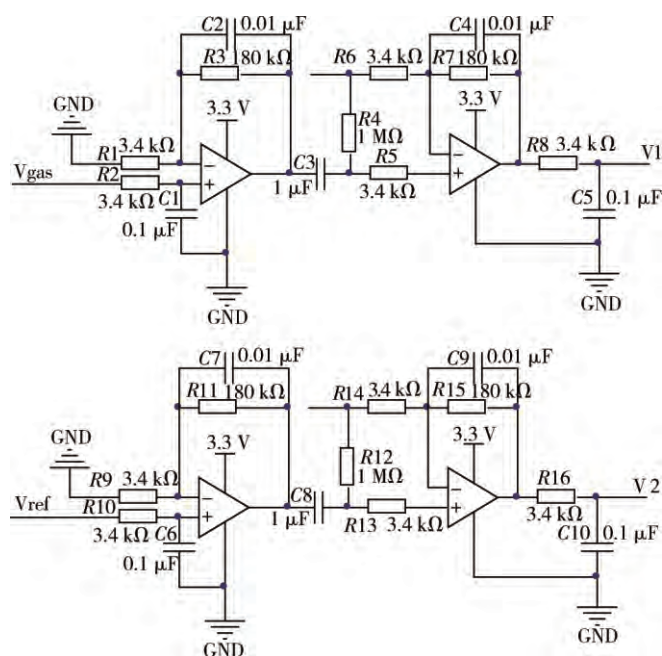


图5 传感器信号放大电路

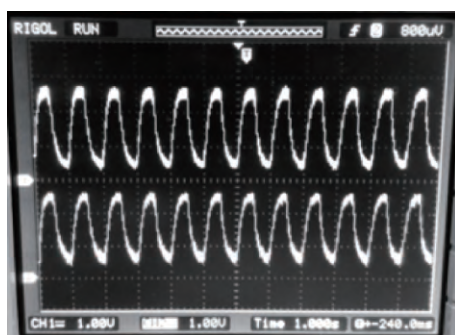


图6 放大后的待测电压和参考电压波形图

会随  $\text{CO}_2$  气体浓度的变化而有所变化,参考气体电压波形不随  $\text{CO}_2$  浓度而变化,电压之比接近于 1,满足式(8)的近似展开条件,与理论分析情形相符。

### 3 实验数据

将实验设备组装调试后分别置于 5 组浓度不同的标准浓度  $\text{CO}_2$  气体中,温度保持  $25^\circ\text{C}$  的恒温,得到 5 组实验数据,如表 1 所示。表中的中间数据 ( $\ln(U_2/U_1)$ ) 即式(9)中的  $x$ 。

表1 实验所得数据

中间数据 ( $\ln(U_2/U_1)$ )	标准浓度值/ppm
0.006 322	672
0.013 29	1 508
0.026 547	2 697
0.035 115	3 733
0.039 394	4 885

将实验数据在坐标系中标记出来,得到如图 7 所示的散点图,从趋势看符合式(9)。应用最小二乘法拟合出参数,可得图中所示方程。

《微型机与应用》2016 年第 35 卷第 19 期

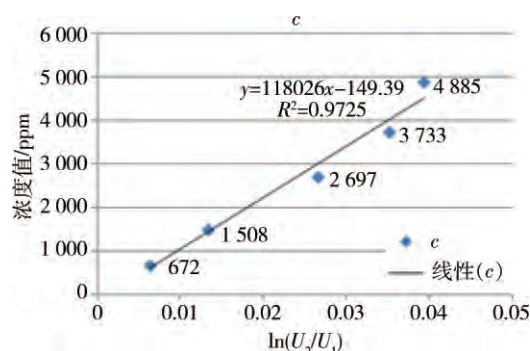


图7 最小二乘法拟合趋势图

图 7 所示方程在高浓度范围偏离真实值较大,会带来较大的测量误差。为了减小误差,根据测量数据,以上述测量点为线段端点,对浓度值与中间数据的关系进行分段处理,如图 8 所示。线段在整个量程内分布均匀的前提下,线段越多,误差越小。

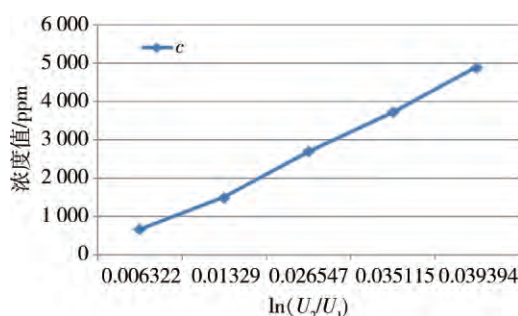


图8 分段处理拟合趋势图

使用图 7 所示的对应关系计算浓度,保持  $25^\circ\text{C}$  恒温,改变实验环境中的浓度值,得到与之对应的仪表显示浓度,如表 2 所示。实验数据表明该方法在低浓度  $\text{CO}_2$  气体检测中误差较小。

表2 标准浓度与对应的显示浓度

标准浓度/ppm	仪表显示浓度/ppm	相对误差/%
650	632	4.31
1 450	1 544	6.48
2 560	2 471	3.48
3 500	3 566	1.89
4 550	4 317	5.12

### 4 结论

本文设计的非分光红外二氧化碳测量仪适用于低浓度范围的  $\text{CO}_2$  浓度检测,具体应用于室内  $\text{CO}_2$  浓度的测量,设计中重点关注实用性、便携性、经济性,用非分光红外检测原理实现了  $\text{CO}_2$  浓度检测的理论分析和实物制作。结合双通道气体模型,推导出  $\text{CO}_2$  浓度的计算公式和在低浓度范围内的近似公式。选用 12 位 A/D 采样电路完成信号的采样处理,根据实验数据用分段处理方法改进了浓度计算方法,减小了误差。但外界环境的温度变化也会导

(下转第 88 页)

欢迎网上投稿 [www.pcachina.com](http://www.pcachina.com) 83



一致性的分布式控制器。该控制器的设计通过在控制律中引入持续激励扰动项,改善了前期工作的缺点,在参考信号不为持续激励信号时,也能让系统达到一致性。最后,将所提控制方法应用到两种不同参考信号的情况中,仿真结果验证了所提出的控制方法的有效性。

### 参考文献

- [1] WANG P K C, HADAEGH F Y. Coordination and control of multiple microspacecraft moving in formation [J]. Journal of the Astronautical Sciences, 1996, 44(3): 315-355.
- [2] BALCH T, ARKIN R C. Behavior-based formation control for multirobot teams [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 926-939.
- [3] Ren Wei. Distributed attitude alignment in spacecraft formation flying [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2007, 21(2-3): 95-113.
- [4] Ren Wei, BEARD R W. Virtual structure based spacecraft formation control with formation feedback [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 2002: 2002-4963.

- [5] Ren Wei, BEARD R W. Decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2004, 27(1): 73-82.
- [6] Zou Anmin, KUMAR K D, Hou Zengguang. Attitude coordination control for a group of spacecraft without velocity measurements [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(5): 1160-1174.
- [7] ABDESSAMEUD A, TAYEBI A, POLUSHIN I G. Attitude synchronization of multiple rigid bodies with communication delays [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(9): 2405-2411.
- [8] ISIDORI A. Nonlinear control systems [M]. Springer Science & Business Media, 1995.
- [9] Dong Wenjie, FARRELL J A. Cooperative control of multiple nonholonomic mobile agents [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(6): 1434-1448.

(下转第94页)

(上接第80页)

法,通过TT变换对角线元素序列的谱分析,精确捕捉行波波头到达量测端的时刻。并对T节点附近发生短路故障进行了研究,传统方法在T节点附近故障时无法正确判别故障分支,采用本文方法可以正确判别故障分支。MATLAB仿真结果表明本文方法的有效性,并且不受故障类型、故障距离和过渡电阻的影响,具有一定的抗干扰能力,具有一定的实际应用价值。

### 参考文献

- [1] 李传兵,谭博学,高鹏,等.基于D型行波原理的T接线路故障测距方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(18): 78-82.
- [2] 张峰,梁军,杜涛,等.T型线路的行波精确故障测距新方法[J].高电压技术,2009,35(3): 527-532.
- [3] 郭亮,吕飞鹏.T型线路的行波测距原理与算法[J].电力系统保护与控制,2010,38(23): 64-67, 74.

- [4] 张永健,胥杰,孙嘉.基于静态小波变换的T型输电线路行波测距方法[J].电网技术,2012,36(6): 84-88.
- [5] PINNEGAR C R, MANSINHA L. A method of time-time analysis: the TT-transform [J]. Digital Signal Processing, 2003, 13(4): 588-603.
- [6] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Location of the complex spectrum: the S transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.

(收稿日期:2016-05-14)

### 作者简介:

满蔚仕(1969-)男,博士,讲师,主要研究方向:电力系统故障诊断。

冯亚平(1990-)通信作者,男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统故障定位。E-mail: fengyaping921@163.com。

张志禹(1966-)男,博士,教授,主要研究方向:电力系统故障诊断。

(上接第83页)

致红外传感器的输出电压发生变化,该误差不能被参考气体完全抵消,需要大量的实验数据使温度对误差的影响在算法上得到修正。

### 参考文献

- [1] 张军辉,董永贵.电调制型NDIR传感器及信号处理方法的改进[J].清华大学学报,2008,48(2): 189-191.
- [2] 李静.红外二氧化碳测量仪的研制[D].西安:西安理工大学,2011.
- [3] 常态华,苏杰,田亮,等.检测技术与应用[M].北京:中国电力出版社,2003.

- [4] 王学水,池金波,马建玲.基于重力加速度传感器的三维高斯计的设计[J].仪表技术与传感器,2015(8): 23-25.

- [5] 孙会丽.谈电容及其在模拟电路中的应用[J].电子世界,2013(2): 34.

(收稿日期:2016-06-02)

### 作者简介:

王学水(1964-)男,硕士,教授,主要研究方向:科教仪器、智能仪器仪表。

张冉冉(1991-)女,硕士研究生,主要研究方向:智能传感器与信息处理。

池金波(1989-)男,硕士研究生,主要研究方向:信号检测与处理。

《微型机与应用》2016年第35卷第19期