

〈系统与设计〉

## 双波段红外可燃气体探测器的算法设计与实现

冯宏伟<sup>1</sup>, 刘媛媛<sup>2,3</sup>, 谢林柏<sup>3</sup>

(1. 无锡职业技术学院, 江苏 无锡 214121; 2. 无锡科技职业学院, 江苏 无锡 214028;  
3. 江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 本文基于可燃气体吸收特定波段的红外光原理, 设计了一款红外双波段可燃气体探测器。通过分析碳氢类可燃气体分子吸收特性, 确定了可燃气体的吸收波长与参考波长, 并完成了探测器的光路部分和整体硬件电路设计。通过在高低温实验平台内某一恒定温度下, 配制 8 组不同浓度的气体进行标定, 并记录下标定的数据, 生成了探测器的检测浓度计算曲线。同时, 通过对待测气体浓度为 0 状态下的多组不同环境温度测试, 得出探测器受环境温度影响的特性, 引入吸收参数  $H$ , 并建立吸收参数  $H$  与温度的补偿表, 实现了对因温度变化所引起的检测偏差的合理补偿。实验结果表明, 该探测器的精度较好、响应快, 高低温性能稳定, 完全符合国家标准和设计要求。

**关键词:** 双波段红外; 可燃气体; 探测器; 算法设计

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2019)03-0227-06

## Algorithm Design and Implementation for Dual-band Infrared Combustible Gas Detector

FENG Hongwei<sup>1</sup>, LIU Yuanyuan<sup>2,3</sup>, XIE Linbo<sup>3</sup>

(1. Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214122, China; 2. Wuxi Professional College of Science and Technology, Wuxi 214028, China;  
3. College of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Based on the principle of combustible gas absorbing infrared light at specific bands, an infrared dual-band combustible gas detector was designed in this study. By analyzing the molecular absorption characteristics of hydrocarbon combustible gas, the absorption band and reference band of the combustible gas were determined, and the optical path and hardware circuit of the detector were designed. With the high and low temperature experimental platforms at a constant temperature, 8 groups of gases with different concentrations were prepared for calibration, and the calibrated data were recorded to generate the detection concentration calculation curve of the detector. Meanwhile, the characteristics of the detector affected by the ambient temperature were determined through the multi-group test under the condition that the measured gas concentration was 0 under different ambient temperatures. The absorption parameter  $H$  was introduced, and the compensation table of the absorption parameter  $H$  and temperature was established to achieve reasonable compensation for the detection deviation caused by temperature change. The experimental results showed that the detector has good precision, fast response, and stable performance at high and low temperatures and completely meets the national standards and design requirements.

**Keywords:** dual-band infrared, combustible gas, the detector, recognition algorithm

### 0 引言

可燃气体在世界上已经成为不可缺少的资源, 碳

氢类气体(甲烷、乙烷等)是最为常见的可燃性气体, 但是也存在很多不确定因素, 比如会发生爆炸, 中毒等一些危险情况。对可燃气体泄漏进行可靠监测, 是

收稿日期: 2018-05-11; 修订日期: 2018-10-28.

作者简介: 冯宏伟 (1982-), 男, 山东郓城人, 硕士, 高级工程师, 研究方向智能仪器仪表的研发与设计。E-mail: f\_smith@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61374047)。

防范因可燃气体泄漏所引起的爆炸、火灾等事故而造成的财产损失或人员伤亡的有力保证<sup>[1-3]</sup>。

实现对泄漏可燃气的浓度监测，研制出准确、稳定、响应快速的探测器是非常有必要的。市面上，采用催化燃烧式的可燃气体探测器较多，但由于工业现场中待测气体的背景气体成分比较复杂，限制了这种探测器在复杂条件下的应用<sup>[4]</sup>。红外光可燃气体探测器对碳氢化合物具有较强探测能力，相比于催化燃烧原理，红外检测技术依靠其具有的准确度高、实时性好等众多优点，在化工、石油等行业得到了广泛应用<sup>[5-6]</sup>。

本文依据朗伯-比尔定律，实现对双波段红外可燃气体探测器的光路部分和整体硬件电路设计，通过在高低温实验平台内的多组温度下的通气试验，生成探测器浓度检测的计算曲线。同时，针对探测器检测精度易受温度影响的问题，引入吸收参数  $H$  这一变量，通过建立吸收参数  $H$  与温度的补偿表，以实现对温度变化所产生检测偏差的合理补偿，从而较好地解决温度漂移对探测器检测精度的影响。

## 1 双波段红外可燃气体探测器的原理

### 1.1 朗伯-比尔定律

当一束光透过气体介质时，光能中的一部分会被介质吸收而衰减，其衰减程度与透过的气体介质浓度、光程有直接关系。在气体介质浓度稳定时，光程越长，光能衰减越明显；在光程固定时，气体介质浓度越高，光能衰减程度越明显，这就是光的吸收定律——朗伯-比尔（Lambert-Beer）定律<sup>[7]</sup>，其表达式如式(1)所示：

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-\mu CL) \quad (1)$$

式中： $I_0(\lambda)$  为红外辐射的初始能量； $\mu$  为单位浓度内气体的吸收系数； $C$  为被测气体的浓度； $L$  为待测气体光路吸收长度； $I(\lambda)$  为红外辐射被气体吸收后的能量。

### 1.2 双波段红外可燃气体探测器的原理

红外光谱易受到温度、气流等环境因素的影响，在光能传送过程中，还存在散射、被杂质阻挡等情况。所以，若仅仅依靠单条光路不能准确测试待测气体的浓度。双波段测量技术是在单波段红外监测的基础上增加一路参比波段。选定待测气体对红外光具有吸收峰的波长为测量波长，而另一个对待测气体没有吸收能力的波长为参比波长<sup>[8-9]</sup>。

若利用参比端峰值信号  $I_{re}$  与测量端峰值信号  $I_m$  的比值来表示光强变化量，则可抵消光线穿过介质过程中不稳因素所带来的共模误差。现给定待测气体浓

度为零时测量端的电压峰值为  $I_m^0$ ，参比端的电压峰值为  $I_{re}^0$ ；若通入某一浓度待测气体后，测量端的电压峰值为  $I_m^c$ ，参比端电压峰值为  $I_{re}^c$ ；给出一个反映气体浓度信息的吸收参数  $H$ ，用下式表示：

$$H = (I_m^c / I_{re}^c) / (I_m^0 / I_{re}^0) \quad (2)$$

式中： $I_m^0 / I_{re}^0$  表征光线穿过介质时的自身光强； $I_m^c / I_{re}^c$  表征光线被待测气体吸收后所检测到光强，故吸收参数  $H$  基本反映光线被待测气体所吸收程度。

## 2 探测器光路及硬件整体框架设计

### 2.1 光路设计

为了使可燃气体红外吸收信号具有较好的探测率，红外双波段可燃气体探测光路由红外光源、聚光罩、玻璃视窗、镀金膜反光镜、双通道检测器、窄带滤光片等部分构成如图 1 所示。光路具体路线如下：红外光源经聚光罩发射出平行光，透过蓝宝石玻璃，穿过气室后汇集到镀金膜的反光镜上，经反射光线再次穿过气室，被红外传感器所接收。本设计采用反射式光路结构，要求镀金膜反光镜对  $3 \mu\text{m} \sim 4.5 \mu\text{m}$  的红外波段的反射率不小于 90%。该光路系统结构简洁，红外光透过视窗时，待测气体与传感器的电路部分通过视窗完全隔离开，对探测器的监测精度和可靠性有较大提高。

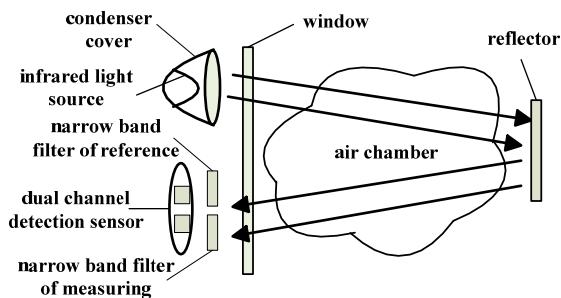


图 1 探测器光路结构图

Fig.1 Optical path structural diagram of the detector

### 2.2 探测器整体硬件结构

在电路的设计上，除实现光源驱动及调制、双通道信号的前置放大及调理、A/D 转换、温度信号采集、E2PROM 读写等基本功能外，还实现了对模拟电流环输出模块、MODBUS 通信模块的管理。硬件电路部分主要包括：微控制器及外围电路、光源驱动及调理电路、E2PROM 控制电路、双通道前置放大及处理电路、A/D 转换电路、加热棒调理电路、4~20 mA 电流环输出、双路 MODBUS 通信及功能安全自检模块等。本设计所用微处理器为 32 位单片机 STM32F105VC，图 2 给出了硬件整体结构框图。

其中,光源驱动及调理电路由端子连接红外光源,为探测器提供检测用的光路;双通道传感器产生测量信号和参比信号,通过前置放大处理模块进行放大、滤波后,输入到内部12位A/D转换模块转换成数字信号后,由微处理器处理单元进行处理;温度信号由温度传感器检测后输入到内部12位A/D转换模块转换成数字信号;温度信号、参比信号和测量信号经过数据处理后,由微处理器计算得到被测气体浓度值;再由模拟4~20mA电流环或MODBUS总线传送到集散控制室的控制器。

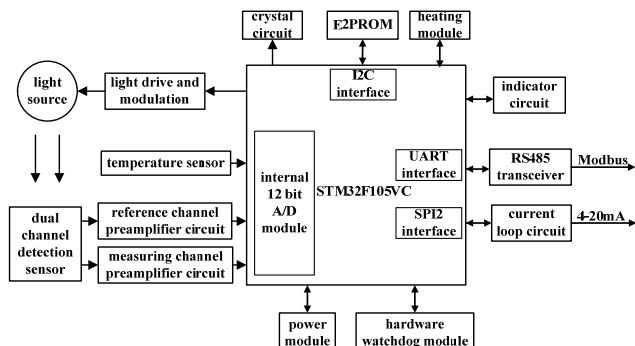


图2 系统硬件结构框图

Fig.2 System hardware structure diagram

### 3 系统软件总体设计

本设计将嵌入式软件分为多个功能模块,主程序通过调用各个功能模块完成复杂的系统功能。进入主程序,首先运行系统初始化,读取E2PROM上电默认状态量和存储气体表,然后系统进入无限循环的轮询状态。系统首先进行硬件看门狗清零,然后处理MODBUS通信模块和E2PROM读写操作,并通过内部定时触发传感器通道的数据采集任务,先进行光源驱动脉冲调制后利用微处理器内部12位模数转换器实现A/D转换,采集的数据经过处理运算后得到实际的可燃气浓度,随后主程序将采集的数据以4~20mA电流环或者MODBUS模块通信方式输出给集散控制中心的控制器,并输出相应的工作状态。系统主程序的流程图如图3所示。

### 4 实验与分析

由于在工程应用中,电子元器件、热释电传感器等易受温度影响,导致红外气体探测器的检测结果不稳定,降低了检测精度,甚至造成误报情况<sup>[10]</sup>。为了避免因环境的温度变化对监测结果带来的影响,有必要对探测器进行温度补偿,本设计选定温度补偿的范围为-40℃~70℃。

#### 4.1 高低温配气实验平台设计

为满足大量测试实验的要求,设计了如图4所示的高低温配气实验系统。

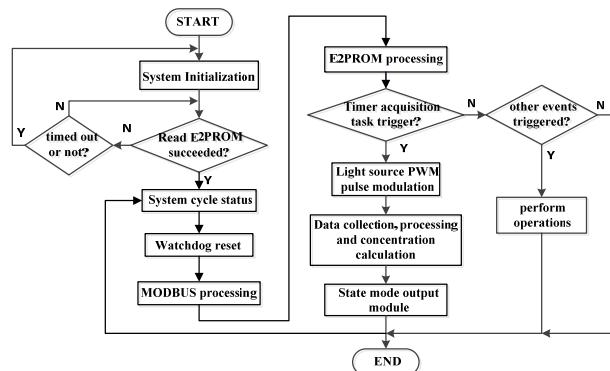


图3 系统主程序流程图

Fig.3 System main program flow chart

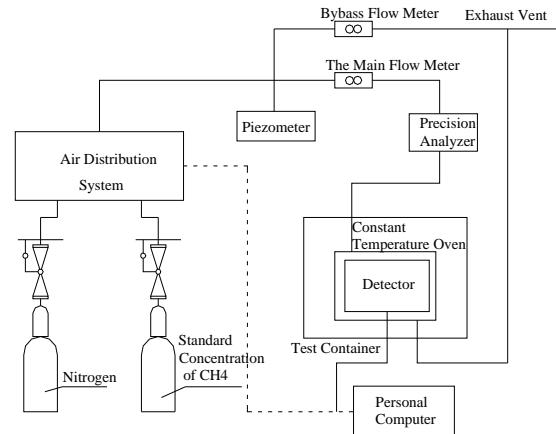


图4 高低温实验平台

Fig.4 High and low temperature experiment platform

依据GB15322.1-2003要求,本设计选用甲烷气作为检测对象。首先,由纯氮气瓶和99.99%浓度甲烷气瓶作为气源,经配气系统充分搅拌后,配置出不同浓度的混合气体,为保证压力计为大气压力下的读数,设置旁通流量计排压;主流量计是确证测试通道的流量恒定;恒温箱也是高低温箱,可提供不同的设定温度;测试容器内有大量的混合气体,待测探测器放置其中,测试容器具有进气口和出气;精密分析仪为高精度红外分析仪放置在测试容器进气口处,用来显示混合气体的浓度;PC机一方面控制配气系统的配气浓度,另一方面对探测器的检测数据进行记录。

#### 4.2 气体标定实验

标定实验过程中,将环境温度控制在(25±1)℃,待温度稳定1h后,由配气系统配制8种浓度的混合气体,记录下8个标定点的采集值,搭建出待测气体浓度的计算曲线。每个标定点的采集值包含T(探测器温度)、 $V_{re}$ (参比端峰值电压)、 $V_m$ (测量端峰值电压)和X(CH<sub>4</sub>气体浓度值)4个参数。记录8个

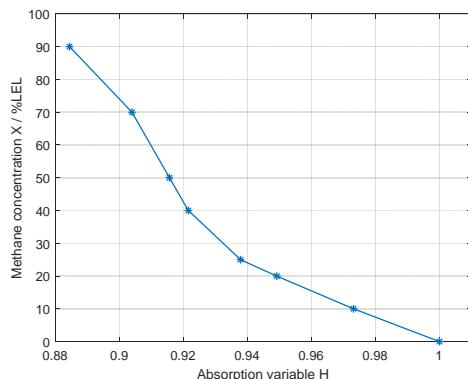
标定点的采集值如表 1 所示。

表 1 标定实验结果

Table 1 Calibration of experimental results

CH <sub>4</sub> concentration X(%LEL)	Reference peak voltage V <sub>re</sub> /mV	Measuring peak voltage V <sub>m</sub> /mV	Instrument temperature T/°C
0	3072	3165	30.1
10	3076	3084	30.3
20	3079	3011	29.8
25	3075	2971	29.7
40	3076	2929	29.8
50	3070	2896	29.9
70	3069	2858	30.2
90	3072	2799	30.1

从表 1 中可看出, 在固定的环境温度下, 测量端  $V_m$  随待测气体浓度的增加而降低, 参比端  $V_{re}$  基本没有变化。根据表 1 中所测数据, 利用式(2)可计算环境温度在 25°C 下的吸收参数  $H$ , 计算结果如图 5 所示。

图 5 吸收参数  $H$  和浓度之间的关系Fig.5 The relationship between parameters  $H$  and concentration

从图 5 中可看出, 红外可燃气体探测器检测电压值与甲烷气体浓度之间存在非线性关系。现采用将每两个标定点之间用线性关系处理, 用 9 条线段构建出待测气体浓度的曲线, 利用查表法计算出气体浓度。

#### 4.3 温度实验

按理论分析, 环境温度的变化会影响探测器的检测数据。通过对气体浓度为 0 时在不同温度环境下测试得到的数据, 可得温度影响的趋势如图 6 所示。

从图 6 中可看出, 探测器检测电压受环境温度的影响, 检测电压峰值随温度变化, 且参比端电压峰值与测量端电压峰值的变化幅值不完全一致。在软件处理过程中, 选用吸收参数  $H$  作为检测的自变量, 同样以气体浓度为 0 进行实验, 然后计算出不同温度下的吸收参数  $H$  如图 7 所示。

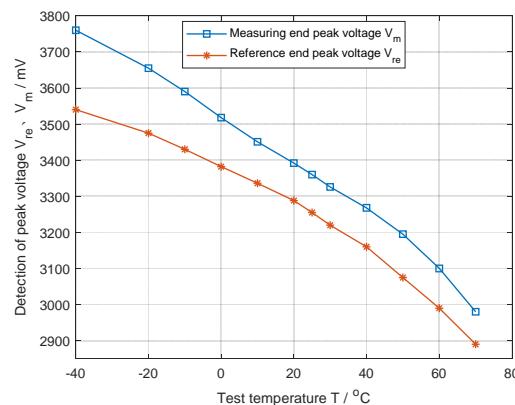
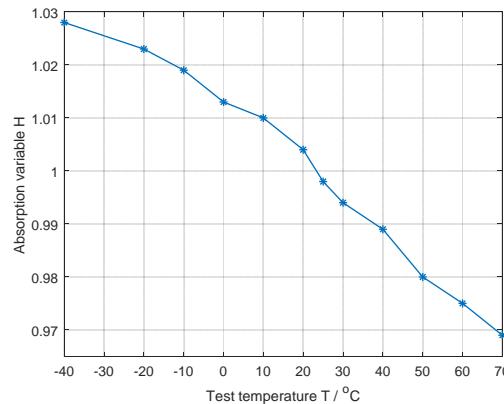


图 6 检测电压随温度变化的曲线

Fig.6 Detecting voltage varies with temperature

图 7 吸收参数  $H$  与温度的关系Fig.7 The relationship between parameter  $H$  and temperature

从图 7 可看出, 吸收参数  $H$  也会随温度变化而改变, 且有随温度升高而降低的趋势。若设计中对温度影响的因素不进行考虑, 计算得到的气体浓度值将会有较大的误差。结合图 6 和 7, 可知, 温度会对探测器的输出有较大影响, 通过建立温度与吸收参数  $H$  的补偿表, 探测器因温度变化引起的偏差就可以得到合理补偿。

#### 4.4 通气验证

为了检测探测器的性能, 依据 GB15322.1-2003 要求, 对探测器进行了精度和高低温通气实验。

精度测试是在标压 25°C 下, 将标定好的整表放置在恒温箱中, 以 0.5 L/min 的恒定流量通入配制好浓度为 10%、25%、50%、70% LEL 的甲烷气体, 并记录下响应时间 (达到稳定值 90% 所需时间), 记录测试结果如下表 2 所示。

由表 2 结果可看出, 探测器测量精度偏差不大于 1.4%, 系统响应时间小于 12 s。

表2 精度测试结果 Table 2 Precision test results

Standard CH <sub>4</sub> concentration (%LEL)	Measured concentration (%LEL)	Measurement deviation /(%)	Response time (Second)
10	9.8	0.2	10.7
25	24.6	0.4	10.9
50	50.2	0.2	10.5
70	70.6	0.6	10.6
90	91.4	1.4	11.3

表3 高低温测试结果 Table 3 High and low temperature test results

Standard CH <sub>4</sub> concentration (%LEL)	High temperature tested value(%LEL)	High temperature measurement deviation(%)	Low temperature tested value(%LEL)	Low temperature measurement deviation(%)
10	10.6	0.6	9.4	0.6
25	26.4	1.4	24.4	0.6
50	52.3	2.3	48.6	1.4
70	72.8	2.8	68.3	1.7
90	93.4	3.4	88.1	1.9

## 5 结论

本文实现了探测器的光路部分和整体硬件电路设计的同时,在建立探测器检测气体表的基础上,依据探测器检测精度易受环境温度影响的特点,引入吸收参数  $H$ ,并建立吸收参数  $H$  与温度的补偿表,较好地解决了探测器因温度漂移所引起的检测偏差的问题。针对环境湿度、压力等因素,同样存在对探测器检测精度有不同程度的影响,下一步尝试在探测器内部增加对环境湿度和压力的检测,以确保探测器可以在各种变化环境中都保持良好的检测性能。

## 参考文献:

- [1] 李黎,王一丁,李树维.红外气体检测技术在天然气安全生产中的应用[J].天然气工业,2011,31(1): 96-99.  
LI Li, WANG Yiding, LI Shuwei, et al. Application of infrared gas detection technology in gas production safety[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(1): 96-99.
- [2] 陈迎春.基于物联网和NDIR的可燃气体探测技术研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014.  
CHEN Yingchun. Study of combustible gas detection technology based on Internet of things and NDIR[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [3] 豆正伟,李晓霞,樊祥.抗红外/毫米波复合制导的无源干扰技术发展现状[J].红外技术,2009,31(3): 125-128.  
DOU Zhengwei, LI Xiaoxia, FAN Xiang. Research and Development of Passive Interfering to IR/MMW Compound Guidance[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(3): 125-128.
- [4] 李瑞.可燃气体探测器检验装置的设计[D].沈阳:东北大学,2008.

高温测试是探测器在高温 70°C ± 2°C 环境下放置 2 h 后通配制某一浓度下的性能测试; 低温测试是探测器在低温 -40°C ± 2°C 环境下放置 2 h 后通配制某一浓度下的性能测试。高低温测试数据如表 3 所示。

由表 3 结果可看出,探测器高温测试性能偏差不大于 3.4%,低温性能测试偏差不大于 1.9%。

实验结果表明,探测器的精度较好、响应时间较快、补偿算法合理、高低温性能稳定,完全符合国家标准和设计要求。

LI Rui. Design of Testing Device for Combustible Gas Detector[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.

[5] 刘岗.矿用红外瓦斯传感器设计[D].太原:中北大学,2013.

LIU Gang. Design of mine-used flameproof infrared gas sensor[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.

[6] 潘君骅.大口径红外光学系统的成像设计[J].光学学报,2003,23(12): 1475-1478.

PAN Junhua. The Methodic Design of the IR Imaging System with Large Aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1475-1478.

[7] Richard T Meyer. Gas Cell Selection for Analysis of Electronic Gases[J]. *Gases and Technology*, 2003, 4: 14-20.

[8] 余勇超.非分光红外气体传感器的光学系统和控制软件设计[D].武汉:华中科技大学,2011.

YU Yongchao. Design of Nondispersive Infrared Gas Sensor's Optical and Software System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.

[9] 陈友安.基于红外光谱吸收的甲烷气体在线监测系统设计[D].合肥:中国科学技术大学,2016.

CHEN Youan. Design of Online Monitoring System for Methane gas based on Infrared Spectrum Absorption[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.

[10] 黎湘贵.基于 MSP430 单片机的红外甲烷检测仪设计及实现[D].太原:太原理工大学,2015.

LI Xianggui. The Design and Realization of Infrared Methane Detector Based on MSP430 MCU[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.