

影响全天域光轴平行度检测精度因素分析

周雷刚^{1,2}, 梁庭^{1,2}, 高利聪^{1,2}

- (1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 为提高红外甲烷传感器的精度, 对气室结构、电路和数据处理进行了优化设计。通过实验和光学仿真对红外气体传感器气室结构进行了重新优化设计, 确定了最佳尺寸; 采用三级差动放大电路设计滤除噪声; 在数据处理的算法上, 选用二次插值查表法来拟合方程处理数据等一系列举措设计出新的红外甲烷传感器。在甲烷浓度为 0%~3% 的体积分数段内对传感器进行随机测试, 新传感器的反应时间能够控制在 20 s 以内, 探测器灵敏度得到提高, 测量误差控制在 $\pm 0.04\%$ 。与国内外相似的产品相比, 优化的传感器在高灵敏度、测量误差和反应时间上都达到了较高水平。

关键词: 气体检测; 气室结构; 查表法; 检测误差

中图分类号: TP23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3413-05

Analysis of influencing factors for precision of all-weather optical axis parallelism detection

Zhou Leigang^{1,2}, Liang Ting^{1,2}, Gao Licong^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To improve the precision of the infrared sensor, the chamber structure, circuit and data processing was optimized. The chamber structure of the infrared gas sensor was redesigned and optimized by the experiments and optical simulation. Three differential amplifier circuits were chosen to eliminate the system's noise, and the secondary difference look-up table was used to process the data, and a new infrared methane sensor was designed by those measures. The experiments were performed to obtain the new sensor's performance in the volume fraction 0%–3% of the methane. Results showed that the response time has been reduced to 20 s, the detection sensitivity was also improved, and the detection error was controlled within $\pm 0.04\%$. After comparing the similar products at home and abroad, it is clear that this new designed sensor exhibits enhanced performances including higher detection sensitivity, lower detection error and shorter response time.

Key words: gas detection; chamber structure; look-up table; detection error

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-10

基金项目: 国家 863 重大项目(2006AA040101)

作者简介: 周雷刚(1989-), 男, 硕士生, 主要从事光电传感器方面的研究。Email: zhouleigang2008@sina.com

导师简介: 梁庭(1979-), 男, 教授, 主要从事 MEMS 设计、传感器设计和自动控制等方面的研究。Email: liangting@nuc.edu.cn

0 引言

近年来,国内经济快速发展的同时,环境问题也日益显著。对于易燃易爆、有毒有害气体进行实时检测显得很有必要。使用红外光谱吸收技术对瓦斯的检测相对于传统的检测技术具有灵敏度高,专一性好,响应时间短、稳定性强、不易中毒等优点,被越来越多的应用在气体检测领域^[1]。

当今的光学传感器结构设计多采用反射式和直射式这两种结构,在实际的设计中反射式结构的传感器存在对光程的把握不够准确,多次反射光能损耗较大的情况^[2]。文中采用 MEMS 技术集成红外光源、热释电探测原件等制成的一种椭球式结构的红外传感器,经过光学仿真,光能大部分直接照射到热释电晶体,有效提高光能利用率,通过气室优化和温度补偿去噪处理后,测量结果能更加准确。

1 红外传感器系统工作原理

该系统的设计如图 1 所示,它内部包含红外光

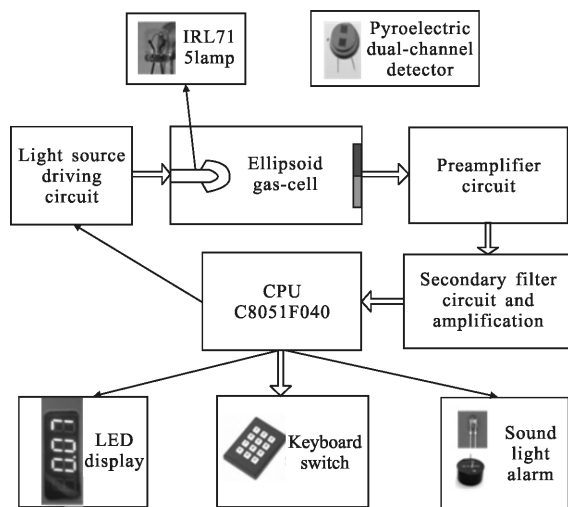


图 1 系统原理功能框图

Fig.1 System structure diagram

源(IRL715),双通道热释电探测器(PYS3228),中央处理器(C8051F040)、前置放大及滤波放大器、LED 显示器等^[3]。该传感器的工作流程:CH₄ 气体通过扩散进入气室,热释电探测器在中央控制器的调制信号下将光能信号转化为电信号经过前置放大、二次滤

波放大转换成合适的电压信号进入单片机进行 AD 转化,单片机控制将浓度信号显示在 LED 上,如果浓度超过设定的报警值,则系统会出现报警。

2 气室结构设计及优化

在以前的研究中提出的传感器结构红外光源发射的光能通过 4~6 次的发射到达热释电传感器,这样的设计对光能的损耗较大,为了能够提高光能的利用率,该节介绍一种能将大部分光能通过直射到达热释电元件的非对称集成光源气室结构。

2.1 气室结构模型及光路分析

提出的非对称集成光源气室结构示意图如图 2 所示^[3-4],它是一个对称的椭球体,可以用椭球体的方程表示如下,其中长短轴分别为 $2a$ 、 $2b$,光源和热释电原件分别在两个焦点的位置上。

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

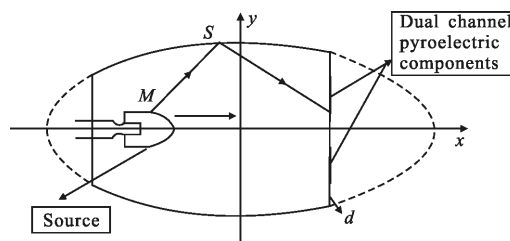


图 2 气室结构示意图

Fig.2 Gas chamber structure diagram

下面分析光路的传播路径,将光源看成为一系列的点光源的集合,这样选取其上的一点 M 进行分析。点光源 M 的能量一部分入射到椭球的一个小表面 S ,经过表面的反射进入探测器,这部分探测器接收到的能量只占线光源发射的 1%,另一部分光源能量直接进入探测器,它可占线光源发射能量的 35% 左右,这样的设计能够提高光能的利用率。这两部分光能总和用 ψ 表示,进入探测器后,光能转化为电量信号,经过后续处理成便于检测的电压信号。

2.2 气室尺寸优化及集成

接着来确定气室的尺寸大小。通过做实验比较,集成的传感器的反应时间大部分取决于起始气体的浓度和气室的结构,如图 3 所示,甲烷的气体浓度不

同对应的传感器响应时间不同。

热释电探测器的直径 d 越大反应时间越小,但是探测器的直径受限于气室的直径大小,红外气室的内径理论上越小越好,内径越小红外光损失越小,在这里取热释电的外径为 9.3 mm,通过实验,气室内径在 15~30 mm 之间与反应时间的关系呈现一个较稳定的状态,因此气室内径的尺寸在满足红外光源、热释电探测器封装尺寸的前提下取气室内径最大为 20 mm。

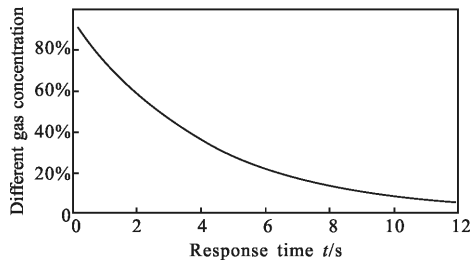


图 3 气体浓度与传感器响应时间的关系

Fig.3 Gas concentration relationship with the sensor response time

现在确定气室的长度 a 。由理论可得,气室 a 的长度越大,对线光源的利用率就能越高,传感器的灵敏度也能够增大,但是 a 越大,传感器的反应时间变长;气室长度 a 也不能太小,太小会导致传感器的灵敏度下降,甚至超出传感器的最低检测范围,导致传感器不能正常工作^[5]。气室长度 a 与传感器反应时间的关系如图 4 所示,可知传感器的气室长度 65~90 mm 之间都比较合适,考虑到光能利用率和实际的封装,传感器气室长度选取 80 mm。

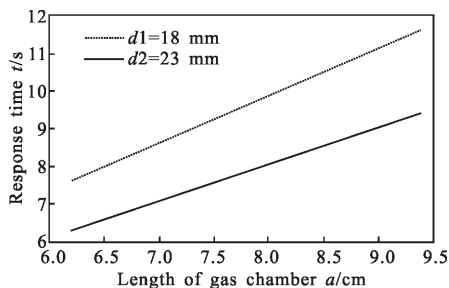


图 4 气室长度 a 和传感器反应时间的关系

Fig.4 Gas chamber a relationship with the sensor response time

在工艺加工过程中,将传感器的气室,热释电原件,红外光源,椭圆结构等都是便携可装配式的,这样的设计可以使在对不同气体检测时能够使用

相适应的气室,方便快捷;在内部椭圆结构的弧面上,采用金属 Au 镀膜,来进一步减少光源传播光能的损耗,Au 不仅具有金属膜高反射率、制备工艺简单等特点,而且相对于其它金属膜,Au 在红外光谱区具有更高的发射率,化学性能稳定,不易氧化的优点。

3 提高系统灵敏度的几个关键点

在集成好传感器后,影响传感器的精度的因素有很多方面,有环境噪声,温度变化等不可抗拒的因素。这些因素对传感器的精度、灵敏度和最低测量范围都有巨大影响,对于传感器输出的信号,在后续处理的方法和算法处理上有多方法可供选择,如在处理传感器输出信号的微弱信号时,可以采用同步累积的方法、相关检测方法、滤波处理方法等;在对采集的数据进行处理的时候,基本的处理思想也有线性插值查表法、分形插值法、参数校准法等。为提高传感器精度后续处理所采用的三种措施如下。

3.1 微弱信号噪声的硬件处理

传感器的热释电原件将光学信号转化成电学信号后,由于电压信号比较低,且有工频噪声、固有噪声、机械噪声等对有用信号影响,硬件处理采用下面方法:

首先,设计使用双通道的检测原理,在热释电原件、信号检测通道、信号滤波放大等所有信号采集处理的地方都将参考信号和探测信号处于同样的检测环境中,这样的差动设计能够有效降低环境噪声;最后,选择使用 2SK545 结型超效应管作为前置放大电路,使用 LM358 设计二次滤波放大电路滤除和一个主放大电路这样的硬件电路设计来处理信号^[6]。通过检测,笔者的设计能够很好的完成低噪声、高增益的处理要求。

3.2 温度补偿降低热噪声

对传感器进行温度补偿消除热噪声,在软件程序中计算浓度公式时,对朗伯-比尔定律进行零度校准和温度补偿,温度补偿主要是修正 $ACT/(ZERO*REF)$,利用公式:

$$\begin{aligned} & (ACT/(ZERO*REF))_{\text{comp}} = \\ & (ACT/(ZERO*REF)) * (1 + \alpha * (T - T_{\text{cal}})) \end{aligned} \quad (2)$$

式中:ACT="Act",通道测量峰峰值,REF=参考通道

测量峰峰值, ZERO=传感器在氮气中零位校准计算值, $\alpha=\alpha$ 温度系数(用户可以自己测量,也可以使用公司提供的值), T =当前温度(开氏温度, K), T_{cal} =零位校准时的温度。

这样理想气体浓度的计算公式可以修正为:

$$C_{corrected}=C*T/T_{cal} \quad (3)$$

3.3 二次插值查表法

传感器信号采集处理输入中央处理器后, 就应该计算传感器的浓度。在使用插值法时要对需要拟合的数据进行处理以进一步减少误差, 提高精度。对每个传感器做实验 10 次, 这样对于每一个浓度对应的相对吸收率 F_a 都能够得到 10 个数据, 对于其中的最大最小值, 它们可能起伏加大, 要首先移除, 然后得到剩下 8 个值做平均值作为各自浓度的对应的 F_a 值。

接下来就要对这些数据进行拟合。采用的是二次插值表的方法, 相对于普通的插值法, 二次插值法是将抛物线代替普通拟合的直线, 这样在拟合时就比一般的方法精度要高^[7-8]。其核心就是利用拉格朗日二次插值方法, 对于任意浓度检测值 x 都有比率值 y , 这样来计算浓度, 其表达式如下:

$$y = \frac{(x-x_{i+1})(x-x_{i+2})}{(x_i-x_{i+1})(x_i-x_{i+2})}y_i + \frac{(x-x_i)(x-x_{i+2})}{(x_{i+1}-x_i)(x_{i+1}-x_{i+2})}y_{i+1} + \frac{(x-x_i)(x-x_{i+1})}{(x_{i+2}-x_i)(x_{i+2}-x_{i+1})}y_{i+2} \quad (4)$$

根据朗伯-比尔定律:

$$I=I_0\exp(-KC^L) \quad (5)$$

传感器的两个通道的输出信号分别为 U_{Ref} 和 U_{Act} 分别与等效原理的入射光强和被吸收后的光强成正比为:

$$\frac{U_{Act}}{U_{Ref}} = \frac{I}{I_0} \quad (6)$$

这样可以得到一个相对吸收率的公式:

$$F_a = 1 - e^{-kLc} \quad (7)$$

由于 KL 乘积是一个常量, 这样只需确定 F_a 和浓度 C 的关系就可得到检测气体的浓度。通过实验可以拟合得到图 5, 其中黑色虚线为传感器的标定曲线, 黑色实线即为通过上述拟合的方法得到的, 从图 5 中可以看出, 该方法拟合的曲线与实验曲线十分吻合, 这种方法大大提高了传感器的精度^[9]。

Equation	$y=intercept+B1*x^1+B2*x^2+B3*x^3$		
Weight	No weighting		
Residual sum of squares	6.143 76E-4		
Adj R-square	0.999 93		
		Value	Standard error
B	Intercept	-0.018 6	-0.011 69
B	B1	-0.009 13	5.690 41E-4
B	B2	4.058 4E-6	7.275 76E-6
B	B3	3.377 42E-7	2.513 79E-8

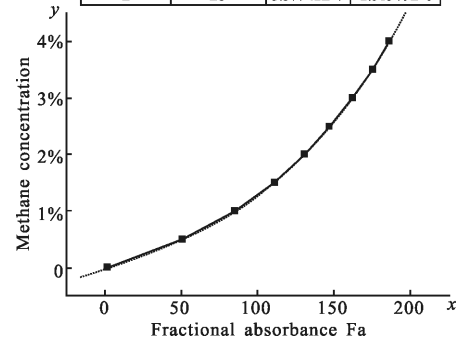


图 5 甲烷浓度与 F_a 的关系

Fig.5 F_a relationship with methane concentration

4 实验标定与性能测试

将传感器及其外围电路都调试好后, 进行灌胶密封后的产品如图 6 所示, 用甲烷气体进行检验, 观测整体的性能, 验证上面设计的正确性。



图 6 集成的传感器

Fig.6 Encapsulated sensor

首先进行标定实验, 采用北京金迅电子有限公司的计算机自动配气系统, 该系统通过实时高精度流量监控器 MFC 来控制流量配比, 实现气体的动态配比。将纯度为 99.9% 氮气作为载气和甲烷汇合送入配气箱, 通过计算机控制浓度记录下甲烷浓度为 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, 3% 的 F_a 值, 每个节点保持时间大约在 15 min, 然后拟合, 拟合曲线如图 5 所示。

其次, 对传感器的响应时间进行实验并记录数据, 对 10 组传感器通过多次测量发现, 当将传感器

置于配气系统中,通上气体之后,传感器的在 20s 之内都能够做出反应,相比以前的设计提高了有 6s 之多。

最后测试传感器的测量精度,与标定步骤基本相同,通过配气系统随机配置出不同浓度,记录传感器的显示浓度并计算误差,如表 1 所示,从该表可以得出,对于多个浓度值之内测试的 10 组传感器显示的最大误差不超过 $\pm 0.04\%$ vol。

表 1 传感器理论值与实测值及误差

Tab.1 Theoretical values, measured values and detect error of sensor

No.	Theoretical values	Measured values	Error
1	0	0	0
2	0.25	0.25	0
3	0.50	0.51	0.01
4	1.0	1.01	0.01
5	1.75	1.72	-0.03
6	2.25	2.24	-0.01
7	2.75	2.79	0.04
8	3.0	3.03	0.03

5 结 论

文中对加快气体扩散的速度,增加光能利用率,减少系统的响应时间,提高传感器的精度都做了总结和探讨。更改气室的结构增加了光能的利用率,并通过实验得到最佳的气室尺寸;使用三级差动放大电路和二次差值查表法,并通过温度补偿来处理数据。在所有的所示准备好后,通过配气系统对集成的传感器性能进行测试,结果表明经过上述处理的传感器不仅响应速度快,灵敏度高,并且具有很好的稳定性和重复性,符合设计要求。

参考文献:

- [1] Zhang Yonggang, Gu Yi, Li Yaoyao. Mid-infrared semiconductor light sources, detectors and its applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1846-1850. (in Chinese)
- [2] Liu Jun, Tan Qiulin, Zhang Weidong, et al. Miniature low-power IR monitor for methane detection [J]. *Measurement*, 2011, 44(5): 823-831.
- [3] Ye WeiLin, Zheng CuanTao, Yu Xin, et al. Design and performances of a mid-infrared CH₄ detection device with novel three channel based LS-FTF self-adaptive denoising structure[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 155(1): 37-45.
- [4] Tan Qiulin, Zhang Wendong, Xue Chenyang, et al. Design of mini-multi-gas monitoring system based on IR absorption [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(5): 703-710.
- [5] Zhu Zeping, Xu Yuhui, Jiang Binqing. A one ppm NDIR methane gas sensor with single frequency filter denoising algorithm[J]. *Sensors*, 2012, 12(9): 12729-12740.
- [6] Tian Hui, Fowler Boyd, Gamal Abbas El. Analysis of temporal noise in CMOS photodiode active pixel sensor[J]. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, 2001, 36(1): 92-101.
- [7] Tan Qiulin, Yang Mingliang, Xiong Jijun, et al. Parameters correction function method for concentration calculation and compensation in IR optical gas measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1396-1400. (in Chinese)
- [8] Xiao Guixian. The application of quadratic interpolation in sensor data processing [J]. *Journal of Huangshi Institute of Technology*, 2007, 24(4): 54-56. (in Chinese)
- [9] Sun Youwen, Zeng Yi, Liu Wenqing, et al. Cross-interference correction and simultaneous multi-gas analysis based on infrared absorption[J]. *Chin Phys B*, 2012, 21(9): 0907011-0907018.