

文章编号 1004-924X(2009)01-0014-06

空间双光路红外 CO₂ 气体传感器及其测量模型

李亚萍, 张广军, 李庆波

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:提出了一种基于空间双光路结构的红外 CO₂ 气体传感器。阐述了传感器光学探头的结构和工作原理,并给出了气室的几何形状和相应的尺寸参数。以朗伯-比尔定律为理论依据,结合空间双光路结构的工作机理,以及红外光源周期性开关的工作方式,推导出了该传感器的线性测量模型,并采用最小二乘法对建立的测量模型进行标定。在静态下对该传感器的传感特性进行了测试,测试结果表明:在 0~3% 的测量范围内,该传感器的实验值与真实值符合较好,其精度为 0.024 2%;系统运行良好,可无故障连续在线测量 30 d 以上。该传感器能有效消除温度信号和背景光信号的干扰,能够在 5~40 °C 的温度内、不同杂光背景下正常工作,基本满足 CO₂ 气体浓度测量的功耗低、精度高、稳定性好等要求。

关键词:空间双光路;红外吸收;CO₂ 气体传感器;最小二乘法

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A

Infrared CO₂ gas sensor based on space double beams and its measurement model

LI Ya-ping, ZHANG Guang-jun, LI Qing-bo

(Key Laboratory for Precision Optical-mechanical-electric Integration Technology of the Ministry of Education, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An infrared CO₂ gas sensor was developed based on space-double-beam structure. First, the structure and working principle of the optical probe were introduced. A new-type gas cell was presented and the optimal size of the gas cell were calculated in detail. Then, the linear mathematical model of the sensor was established based on Lambert-Beer Law, the principle of space-double-beam optical structure and the working model of an infrared light source in turning on and off periodically. Finally, the unknown coefficients in the mathematical model were calculated with Least Squares Method. The characteristics of the infrared sensor were tested in static state, tested results show that the values obtained from the experiment is close to the true values and the accuracy of the sensor is 0.024 2% when measurement range is 0~3%. The system can work continuously more than 30 days without the disturbance from the temperature signal and background optical signal, it also can work at 5~40 °C and on different background conditions. These results conclude that the sensor can satisfy the system requirements of lower-power-consume, higher-precision and stability.

Key words: space double beams; infrared absorption; CO₂ gas sensor; least squares method

1 引言

采用红外吸收原理进行 CO₂ 气体浓度测量已成为目前国内外 CO₂ 气体传感器最常用的方法之一^[1-2]。传统的红外 CO₂ 气体传感器多采用时间双光路结构,但由于其存在旋转部件,测量精度不高^[3]。空间双光路结构一般采用双气室或双探测器结构,因而不含旋转部件,但现有的空间双光路大多数结构复杂,对加工、装配工艺要求较高,很难产品化^[4]。

本实验室研制了一种新型的红外 CO₂ 气体传感器,其探头采用结构简单的空间双光路,并采用扩散方式进行采样。对该传感器建立正确的测量模型具有重要的意义,是该传感器能准确测量的关键。在建立传感器测量模型的方法中,可分为两种类型:一种是不考虑工作机理,只根据测量数据用纯数学方法建立测量模型,称为实验研究法建模;另一种是结合测量过程的机理以及数据处理方法来建立测量模型,称为分析法建模^[5-6]。目前在红外 CO₂ 气体传感器测量模型的研究中,仍仅限于使用以概率和数理统计为主的纯数学方法。

使用纯数学方法建模可以满足一般性的设计和分析要求,但对于扩散式 CO₂ 气体传感器,由于其引入了外界背景光信号和温度信号而使该方法建立的测量模型不能满足测量精度的要求。本文从分析研制的红外 CO₂ 气体传感器的测量过程机理入手,建立了该传感器的测量模型,并实验验证了该测量模型的有效性。

2 传感器探头结构的设计

图1为研制的红外 CO₂ 气体传感器的实物照片。该传感器的光学探头采用空间双光路结构,在确保传感器有较高精度和较好稳定性的同时,也使传感器的小型化成为可能。该传感器中光源直径大于接收器件直径,为此设计了一种带有接收光锥的气室,在降低光损耗的同时,提高了光信号的信噪比。该传感器还摒弃了采样气泵,利用气体的对流特性使被测气体自由进入开放式

气室。扩散式的采样方式使得该传感器不需要定期维修,可以长期稳定地工作。

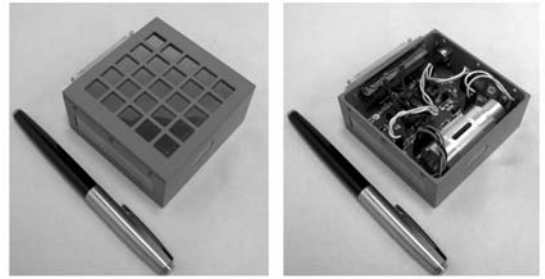


图1 红外 CO₂ 气体传感器的实物照片
Fig. 1 Photos of infrared CO₂ gas sensor

2.1 空间双光路结构

CO₂ 气体对 4.26 μm 波段的红外光强烈吸收,而对 4.0 μm 波段的红外光几乎不吸收^[7]。该传感器的空间双光路结构正是根据 CO₂ 气体这一吸收特性设计的,图2为该传感器的探头结构图。

如图2所示,红外光源发出的红外光透过蓝宝石窗片进入充满被测气体的开放式气室,4.26 μm 波段的红外光被 CO₂ 气体强烈吸收,未被吸收的该波段的红外光透过在 4.26 μm 附近透射的测量滤波片,由测量探测器测出其光强。而 4.0 μm 波段的红外光在穿过气室的整个过程中几乎未被 CO₂ 气体吸收,透过在 4.0 μm 附近透射的参考滤波片,由参考探测器测出其光强。其中测量探测器测出的光强反映着被测 CO₂ 气体的浓度,而参考探测器测出的光强则反映着气室的光损耗、红外光源的光强变化、以及红外接收器件的响应度漂移等。

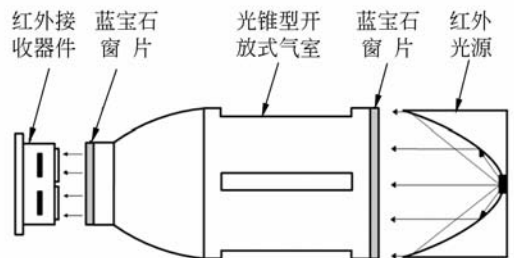


图2 传感器探头结构图
Fig. 2 Structure of sensor probe

2.2 气室

在该传感器的设计中,选用光源的直径大于

接收器件的直径。在这种情况下,如果采用传统的圆柱形气室,将会有很多光线损失。为此设计了一种带有接收光锥的圆柱形气室,图 3 为气室形状示意图。

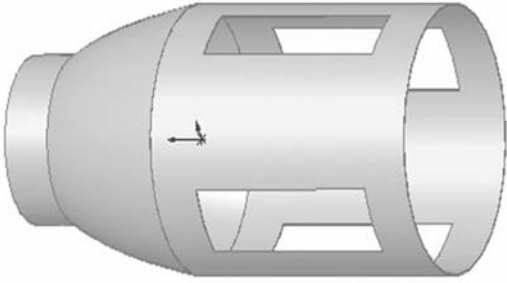


图 3 气室形状示意图

Fig. 3 Sketch map of gas-cell shape

图 4 为光线在气室中的传播示意图,图中,点 M 为旋转抛物面的焦点,光束 ab 、 cd 射到旋转抛物面,经抛物面反射后,一部分反射光束直接射到了 AB 上,另一部分光束需经气室壁 AC 、 BD 一次或多次的反射最终射到 AB 上。光束 bc 直接射到了 AB 上,无需旋转抛物面的反射。

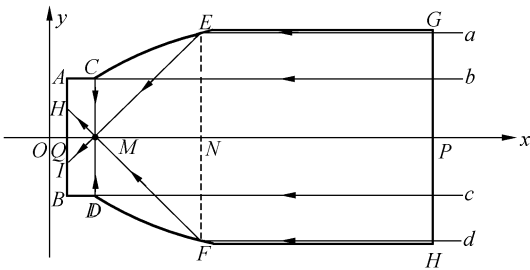


图 4 光线在气室中的传播示意图

Fig. 4 Schematic illustration of incidence light passing through gas cell

该传感器选用光源的直径为 10 mm,接收器件的直径为 6 mm,接收器件中两传感元件的间距为 2 mm。为提高光信号的信噪比,将气室的尺寸设计为: $AB = CD = 6$ mm, $EF = GH = 10$ mm, $MN = 2.7$ mm, $QM = 0.5$ mm,抛物线的方程为 $y^2 = 6x$, $QP = 20$ mm。

在该气室的四周均匀分布了 4 个长为 12 mm,宽为 3 mm 的矩形通孔,利用气体的对流特性使被测气体自由进入传感器,从而可以摒弃采样气泵,使传感器的体积、重量和功耗得以降低。

3 传感器测量模型的建立

大部分有机和无机多原子分子气体在红外区都有特征吸收波长,当红外光通过待测气体时,这些气体分子对特定波长的红外光有吸收,其吸收关系服从朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律:

$$I = I_0 e^{-K_{\text{gas}} J L}, \quad (1)$$

其中, K_{gas} 为吸收系数,它与气体的种类、光谱波长、压力、温度等许多因素有关^[8-10]。

该传感器采用了空间双光路结构,其中测量探测器所测的信号与 CO_2 气体浓度有关,而参考探测器所测的信号几乎没有受到被测气体浓度的影响。如将两输出信号相比,入射光强及探测器响应度的漂移将不再成为影响红外 CO_2 气体传感器精度的主要因素,从而可以提高该传感器的精度。

该传感器还采用了扩散式采样方式,这种采样方式使得两探测器输出的信号都包含有外界的背景光信号和温度信号。为此,该传感器的红外光源采用周期性开关的工作方式,测量探测器和参考探测器周期性地测出当红外光源在开、关两种状况时它们分别所感受到的光强,将两种状况下的光强分别相减,则可消除背景光信号和温度信号对传感器的干扰,使该传感器的测量结果更准确。

结合朗伯-比尔定律以及该传感器的工作机理,建立该传感器的测量模型,其具体的推导过程如下。令红外光源关闭,则测量探测器两端的电压为:

$$V_1 = V_{\text{backgr1}} + V_{\text{temperat1}}, \quad (2)$$

参考探测器两端的电压为:

$$V_2 = V_{\text{backgr2}} + V_{\text{temperat2}}, \quad (3)$$

再令红外光源打开,则测量探测器两端的电压为:

$$V_3 = I_{4.26} \cdot (e^{-K_{\text{gas}} J \cdot L} \cdot K_1 \cdot C_{\text{gas}}) \cdot R_{\text{gas}} + V_{\text{backgr1}} + V_{\text{temperat1}}, \quad (4)$$

参考探测器两端的电压为:

$$V_4 = I_{4.0} \cdot R_{\text{ref}} \cdot K_2 \cdot C_{\text{ref}} + V_{\text{backgr2}} + V_{\text{temperat2}}, \quad (5)$$

为消除温度信号和背景光信号对该探测器的干扰,将式(4)与式(2),式(5)与式(3)分别相减,得:

$$V_{\text{gas}} = V_3 - V_1, \quad (6)$$

$$V_{\text{ref}} = V_4 - V_2, \quad (7)$$

为消除由红外光源、热释电探测器以及电子器件等所引起的误差,将式(7)与式(6)相比,进而推导出 CO₂ 气体浓度 J 的计算公式:

$$J = \frac{\ln\left(\frac{V_{\text{gas}}}{V_{\text{ref}}}\right) + \ln\left(\frac{R_{\text{ref}} \cdot C_{\text{ref}} \cdot K_2 \cdot I_{4.0}}{R_{\text{gas}} \cdot C_{\text{gas}} \cdot K_1 \cdot I_{4.26}}\right)}{-K_{\text{gas}}L}, \quad (8)$$

式(8)中, $\ln[(R_{\text{ref}} \cdot C_{\text{ref}} \cdot K_2 \cdot I_{4.0}) / (R_{\text{gas}} \cdot C_{\text{gas}} \cdot K_1 \cdot I_{4.26})]$ 与 $-K_{\text{gas}} \cdot L$ 是系数,可以通过标定求出。从该式可以看出, $\ln(V_{\text{gas}}/V_{\text{ref}})$ 与 CO₂ 气体的浓度值 J 成线性关系。

其中:

$V_{\text{backgr1}}, V_{\text{backgr2}}$ —分别为背景光信号在测量探测器和参考探测器上所产生的电压;

$V_{\text{temperat1}}, V_{\text{temperat2}}$ —分别为温度信号在测量探测器和参考探测器上所产生的电压;

$V_{\text{gas}}, V_{\text{ref}}$ —分别为测量探测器和参考探测器两端电压变化值;

$I_{4.26}, I_{4.0}$ —分别为红外光源发出的 4.26 μm 和 4.0 μm 两波段的红外光的初始光强;

$R_{\text{gas}}, R_{\text{ref}}$ —分别为测量探测器和参考探测器的响应度;

$C_{\text{gas}}, C_{\text{ref}}$ —分别为测量滤波片和参考滤波片的透过率;

K_1, K_2 —分别为两波段的红外光通过气室时的光损失系数;

K_{gas} —为被测气体的吸收系数;

L —为气室的长度。

4 传感器测量模型的标定

简化上述 CO₂ 气体浓度 J 的计算公式,设:

$$a = -K_{\text{gas}} \cdot L, \quad (9)$$

$$b = \ln\left(\frac{R_{\text{ref}} \cdot C_{\text{ref}} \cdot K_2 \cdot I_{4.0}}{R_{\text{gas}} \cdot C_{\text{gas}} \cdot K_1 \cdot I_{4.26}}\right), \quad (10)$$

$$y = J, \quad (11)$$

$$x = \ln\left(\frac{V_{\text{gas}}}{V_{\text{ref}}}\right), \quad (12)$$

则已建立的测量模型可写成:

$$y = \frac{1}{a}x + \frac{b}{a}. \quad (13)$$

从上式可看出,变量 y 与变量 x 之间的关系是线性的,可以采用一元线性回归的方法来拟合直线。

常温常压下在普通的室内对该传感器的测量

模型进行标定,其具体的步骤为:

(1) 将该 CO₂ 气体传感器放入气压室内,并预热 10 min。

(2) 将浓度分别为 0.0%、0.213%、0.97%、1.61%、3.04% 的标准 CO₂ 气体依次充入气压室,待气压室内外 CO₂ 气体浓度恒定后,每个浓度点记录 8 个输出值,取均值作为该浓度点 x 的测量值,实验数据记录在表 1 中。

(3) 利用最小二乘法^[11-13]估计测量模型中的系数,得出该 CO₂ 气体传感器的测量模型为:

$$y = -2.84x + 1.29. \quad (14)$$

表 1 变量 x 的测量值

Tab.1 Measured values of variable x

测量次数	测量结果				
	0.0%	0.213%	0.97%	1.61%	3.04%
1	0.463	0.379	0.128	-0.078	-0.571
2	0.452	0.391	0.126	-0.086	-0.529
3	0.446	0.386	0.119	-0.082	-0.542
4	0.454	0.389	0.125	-0.094	-0.533
5	0.466	0.393	0.131	-0.085	-0.598
6	0.474	0.386	0.126	-0.090	-0.520
7	0.450	0.390	0.129	-0.063	-0.559
8	0.459	0.394	0.130	-0.074	-0.534
平均值	0.458	0.389	0.128	-0.082	-0.540

5 实验验证

对研制的传感器建立正确的测量模型具有重要的意义,是该传感器能否准确测量的关键。为此将标定好的测量模型应用于传感器中并进行 CO₂ 气体的浓度测量,以证明它的准确性和有效性。

验证实验的步骤与标定实验相似,另取标准浓度为 0.503%、0.76%、1.27%、2.11%、2.39% 的 CO₂ 气体分别输入气压室内,待气压室内外 CO₂ 气体浓度恒定后,每个浓度点测量 8 次,取均值作为该浓度点 y 的测量值,实验数据记录在表 2 中。

将每一个真实浓度值和其所对应的测量浓度值分别作为横纵坐标值建立坐标轴,如图 5 所示。通过该图可以看出:

(1) 大部分点分布于 45° 线附近,说明该测量模型的精度较好。

表 2 变量 y 的测量值Tab.2 Measured values of variable y

测量 次数	测量结果(%)				
	0.503%	0.76%	1.27%	2.11%	2.39%
1	0.513	0.737	1.292	2.097	2.412
2	0.508	0.748	1.300	2.904	2.421
3	0.512	0.750	1.270	2.087	2.411
4	0.524	0.752	1.288	2.100	2.420
5	0.520	0.752	1.290	2.119	2.419
6	0.516	0.749	1.263	2.094	2.416
7	0.507	0.738	1.273	2.107	2.392
8	0.487	0.715	1.242	2.079	2.355
平均值(%)	0.511	0.743	1.277	2.097	2.705

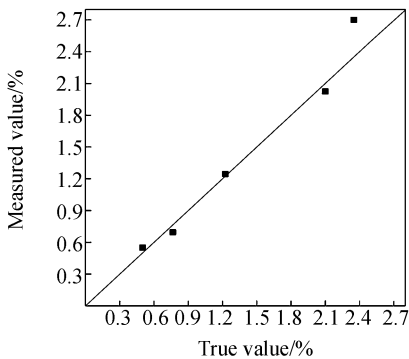


图 5 测量值与真实值的关系

Fig. 5 Relationship between measured values and true values

(2) 极个别点偏离 45° 线较大, 经具体分析多为实验误差所致。

6 结 论

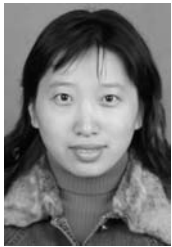
本文提出的空间双光路红外 CO_2 气体传感器的体积为 $80 \text{ mm} \times 78 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$, 重量为 200 g , 精度为 0.024% , 可连续无故障工作 30 d 以上。实验结果表明, 在 $0 \sim 3\%$ 的测量范围内, 该传感器的测量值几乎接近真实值, 证明该传感器的设计是准确、有效的。如被测 CO_2 气体的浓度值超出该范围, 则有效性需进一步通过实验验证。该传感器还摒弃了传统的采样气泵, 采用扩散式采样方式进行气体采样。该传感器的响应时间为 2.5 s , 表明扩散式采样方式并不影响该传感器的响应时间。该传感器的测量模型层次清晰, 形式简单, 其建立方法可供其它基于空间双光路结构的扩散式红外气体传感器参考。正确有效的设计方法以及体积小、重量轻、高精度、低功耗的优点, 使得该红外 CO_2 气体传感器很值得推广应用。

参考文献:

- [1] 张广军, 武晓利. 新型高性能红外二氧化碳传感器[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(6): 540-544.
ZHANG G J, WU X L. Novel IR carbon dioxide sensor with high performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(6): 540-544. (in Chinese)
- [2] GIULIANO B, CARLA C, REMO T. Measurement of long-term average carbon dioxide concentration using passive diffusion sampling [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 1625-1630.
- [3] ROBERT F, THOMAS T. An automotive bi-source spectroscopic carbon dioxide sensor with pressure compensation [J]. *Sensors and Actuators B*, 2007, 127: 82-88.
- [4] CONOR S. Development of an optical sensor probe for the detection of dissolved carbon dioxide [J]. *Sensors and Actuators B*, 2006, 119: 288-294.
- [5] 程基伟, 张琦. 材料腐蚀预测数学模型的研究[J]. 航空学报, 2000, 21(2): 183-186.
CHENG J W, ZHANG Q. Study of mathematical models in material corrosion prediction [J]. *Journal of Aeronautics*, 2000, 21(2): 183-186. (in Chinese)
- [6] 朱坚民, 王中宇. 基于神经网络的测量模型的建立及检验[J]. 光学精密工程, 2000, 8(4): 9-10.
ZHU J M, WANG ZH Y. Establishment and verification of measurement model based on neural networks [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(4): 9-10. (in Chinese)
- [7] 康永济. 红外气体分析器[M]. 北京: 化学工业出版社, 1993.
KANG Y J. *Infrared Gas Analyzer* [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 1993. (in Chinese)
- [8] 张广军, 吕俊芳, 周秀银, 等. 新型红外二氧化碳分析仪[J]. 仪器仪表学报, 1997, 18(2): 134-137.
ZHANG G J, LV J F, ZHOU X Y, et al.. New infrared carbon dioxide gage [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1997, 18(2): 134-137. (in Chinese)

- [9] ZHANG G J, WU X L. A novel CO₂ gas analyzer based on IR absorption [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42(2): 219-231.
- [10] YOSHIHARU T. Fabrication and characterization of an infrared-absorption-type CO₂ gas sensor using a PLZTOptical shutter [J]. *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)* 1999, 82(4): 1-8.
- [11] 黄富贵, 崔长彩. 评定直线度误差的最小二乘法与最小包容区域法精读之比较[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 879-892.
HUANG F G, CUI CH C. Comparison of evaluating precision of straightness error between least square method and least envelope zone method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 879-892. (in Chinese)
- [12] 李子芳, 崔长彩, 车仁生, 等. 基于遗传算法的圆度公差评定法与采用最小二乘法评定的比较[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(3): 256-261.
LI Z F, CUI CH C, CHE R SH, *et al.*. Comparison of genetic algorithm based evaluation of roundness with evaluation of roundness based on least squared method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(3): 256-261. (in Chinese)
- [13] 刘俊, 秦岚, 刘京诚, 等. 一种新型差动式压电加速度传感器[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 903-909.
LIU J, QIN L, LIU J CH, *et al.*. A novel differential piezoelectric accelerating sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 903-909. (in Chinese)

作者简介:



李亚萍(1980—),女,山西忻州人,博士研究生,主要从事光电精密测量方面的研究。E-mail: liyaping_mail@sina.com



李庆波(1975—),女,黑龙江伊春人,工学博士,副教授,硕士生导师,主要从事光电测试系统与数据分析、生物光谱分析与应用技术等方面的研究。E-mail: qbleebuaa@buaa.edu.cn

导师简介:



张广军(1965—),男,天津人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事光电测量与动态跟踪、光机电一体化、计算机视觉与模式识别等方面的研究。E-mail: gjzhang@buaa.edu.cn