

## 红外光学气体检测中的参数修正函数浓度计算与补偿方法

谭秋林<sup>1</sup>, 杨明亮<sup>1,2</sup>, 熊继军<sup>1,2</sup>, 薛晨阳<sup>1</sup>, 刘俊<sup>1</sup>, 张文栋<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 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)

**摘要:** 从红外光谱吸收理论出发, 提出了一种高精度的红外光学气体传感器气体浓度信号处理方法。重点阐述了气体浓度计算模型的建立和各参数的实验确定方法。从气体浓度计算的原理分析入手, 通过逐步修正郎伯-比尔定律得到了一个有效的气体浓度函数关系式, 供计算气体浓度用。为了减少外界温度对传感器检测结果的影响, 实施了温度补偿, 使得传感器能在不同温度条件下使用。经测试, 传感器达到了  $100 \times 10^{-6}$  的分辨能力, 具有良好的稳定性, 能够满足许多场合的使用。

**关键词:** 气体传感器; 浓度; 温度补偿; 参数修正

**中图分类号:** TP212.9   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1396-05

## Parameters correction function method for concentration calculation and compensation in IR optical gas measurement

Tan Qiulin<sup>1</sup>, Yang Mingliang<sup>1,2</sup>, Xiong Jijun<sup>1,2</sup>, Xue Chenyang<sup>1</sup>, Liu Jun<sup>1</sup>, Zhang Wendong<sup>1,2</sup>

(1. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement(North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** From the basic principle of infrared spectrum absorption method, the high-precision gas concentration signal processing calculation method of the IR optical sensor was presented. This paper focused on the establishment of the gas concentration calculation model and experimental method for determining the various parameters. From the analysis of the principle of gas concentration calculation method, a new formula for gas detection was obtained by gradually modifying the Lambert-Beer law. The formula can be used to calculate gas concentration. To reduce the environmental temperature influence on the detection results of infrared gas concentration, temperature compensation was required. Through temperature compensation, the sensor can be used in various temperature conditions. After measurement, the sensor has good stability and realizes the  $100 \times 10^{-6}$  distinguishing ability. It meets most occasions use requirement.

**Key words:** gas sensor; concentration; temperature compensation; parameters correction

收稿日期: 2013-09-04; 修订日期: 2013-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(51205373); 山西省自然科学基金(2012021013-4); 国家自然科学基金重点项目(61335008); 高等学校优秀青年学术带头人支持计划(2013)

作者简介: 谭秋林(1979-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事红外光学气体传感器、微纳传感器方面的研究。

Email: tanqiulin.99@163.com

## 0 引言

红外光学气体传感器因为具有:不易受有害气体的影响而中毒和老化、响应速度快、稳定性好、测量精度高、应用范围广等优点而得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。

基于红外光学原理的气体浓度计算常采用两种方法:线形插值-数据查表法与参数修正函数浓度计算法。两种方法都有各自的特点,线形插值-数据查表方法相对较简单,主要适应于精度不高的场合,如煤矿瓦斯报警器之类的<sup>[3]</sup>,因为它的精度主要取决于事先标定的数据表格情况,标定的数据段越多,结果就越精确,其具体计算是通过判断当前测试的浓度值所落在事先标定的各点的线形区间内,然后通过插值的方法来代入计算;而参数修正函数浓度计算法,主要适合于浓度计算精度较高的场合,如一些气体浓度定量分析等,它是通过分析理想化的气体吸收率模型,提出一些相关的参数来修正模型方程,得到更接近真实值的计算关系函数。文中阐述了参数修正函数浓度计算法,重点对参数修正函数浓度模型的建立过程和各参数的实验确定方法进行了阐述。

## 1 参数修正函数浓度计算的基本理论

红外光学气体检测主要利用了非对称双原子和多原子气体分子对红外辐射在某些特定区域内具有强吸收峰这一特性进行气体浓度检测<sup>[4-5]</sup>。根据郎伯-比尔定律,一束强度为  $I_0$  的平行光照射吸收介质,在通过一定厚度的介质后,由于介质吸收了一部分光能,透射光的强度就要减弱。吸收介质的浓度愈大,介质的厚度愈大,则光的减弱就越明显<sup>[6]</sup>。其关系式为:

$$I = I_0 \exp(-KLC) \quad (1)$$

式中: $C$  为气体浓度; $K$  为气体对红外光的吸收系数; $L$  为气体的入射光程; $I$  代表被测气体存在的情况下,被气体吸收后的光强度; $I_0$  代表目标气体不存在情况下的光强度,一般在氮气条件下测得,相当于光源的光强。

为了提高测试精度,测试中一般采用双通道(参考通道和响应通道),传感器的两个通道的输出信号  $U_{\text{Ref}}$ (参考通道信号)和  $U_{\text{Act}}$ (响应通道信号)分别与入射光强  $I$  和被吸收后的光强  $I_0$  成正比,即:

$$\frac{U_{\text{Act}}}{U_{\text{Ref}}} = \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

## 2 参数修正函数浓度计算模型的建立

朗伯-比尔定律是气体浓度定量测定的依据,广泛应用于紫外光、可见光、红外光的吸收测量<sup>[7-8]</sup>,但是它也有一定的局限性,该定律只对单一频率的红外光才适用。因此,在实际应用中采用非分光红外探测技术<sup>[9]</sup>(NDIR)。将一个窄带的滤光片安装在探测器上,使红外光线的频率尽量限制在一个窄的范围内,实现很窄带宽的一部分光到达红外探测器上。但是由于带通滤光片的透射率与吸收率都不完全一致,落于探测器上的辐射也不完全是单色的,这就引起了一定的偏差。因此,在实际计算过程中,需要对该定律进行修正。

非分光红外探测技术中,光强度是消光系数的函数,在窄带光学滤光片通过范围内的光都被探测器检测。其初始边界条件  $I = I_0$  在  $L = 0$  处仍然满足郎伯-比尔定律,但是,边界条件  $I = 0$  在  $L = \infty$  并不满足,因为在带通范围的一些波长处的光并不被气体吸收,被称为非吸收波段。

考虑非吸收波段对红外气体检测的影响,公式(1)被修正为:

$$I = I_0((1-S) \times \exp(-KLC) + S) \quad (3)$$

式中: $S$  为非吸收波段对输出信号贡献的比例系数,定义为跨度因子,相当于随着气体浓度增加变化比率的渐近线。公式(3)保持原边界条件  $I = I_0$  在  $L = 0$ ,并且定义边界条件  $I = SI_0$  在  $L = \infty$ ,由此分离出一个由非吸收波段引起的信号。

指数因子可以写成乘积的形式,对每一个单一波长的乘积  $KL$  是不能分开的,指数  $e^{-KLC}$  可以被转换为:

$$\exp(-KLC) = \exp(-(\sum \{KL\})C) = \exp(-\alpha C^\beta) \quad (4)$$

式中: $\alpha$  为一个常数,是郎伯-比尔定律中  $KL$  的平均值,也被定义为目标气体浓度的单位; $\beta$  为一个修正常数;依赖于光程与被测气体成分。

结合公式(3)和(4),推导出郎伯-比尔定律的修正形式:

$$I = I_0 \times \exp((1-S) \times \exp(-\alpha C^\beta) + S) \quad (5)$$

式中: $I$  为入射光强度,目标气体存在情况下,与探测器输出信号的峰-峰值正比例; $I_0$  为探测器入射信号

在目标气体不存在情况下的强度，它取决于参考输出的峰-峰值  $I_r$ ，以及在目标气体不存在的情况下，探测器输出峰-峰值与参考输出峰-峰值之间的比值  $(I/I_r)_0$ 。 $(I/I_r)_0$  定义为传感器的零位，用符号  $Z$  表示。它们之间的关系如下：

$$I_0 = I_r \times (I/I_r)_0 = I_r \times Z \tag{6}$$

将公式(6)代入公式(5)，经过变换可得到如下形式：

$$\left( \frac{I}{Z \times I_r} - S \right) / (1 - S) = \exp(-\alpha C^\beta) \tag{7}$$

由公式(7)可以推导得到气体浓度  $C$ ：

$$C = \left( - \frac{\ln \left( \frac{I}{Z \times I_r} - S \right) \times \frac{1}{1 - S}}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \tag{8}$$

根据公式(2)， $I/I_r$  实际为  $U_{Act}/U_{Ref}$ ，也即为两探测器的输出信号的比值，因此公式(8)可以改写为：

$$C = \left( - \frac{\ln \left( \frac{U_{Act}}{Z \times U_{Ref}} - S \right) \times \frac{1}{1 - S}}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \tag{9}$$

对于公式(9)，只需求解 4 个参数值，零位值  $Z$ 、跨度  $S$ 、参数  $\alpha$ 、参数  $\beta$ ，即可直接计算得到气体浓度的值。

### 3 各参数的实验确定方法

通过推导与分析，最终得到气体浓度  $C$  的关系公式(9)中有几个需要确定的参量，对于一个确定的气室光路结构及红外光源与探测器的情况下，这些参量实际上是一个常数。如何来确定这些参数，需要从公式的一些性质结合实验来计算。

#### 3.1 参数 $\alpha$ 和 $\beta$ 的确定方法

要确定这两个参数，从上面分析的可知，对于确定的同样的系统，在某一气体浓度情况下，该类测试系统对红外光的吸收率，也就是  $Fa$  值是一样的。

修正的吸收率计算关系式：

$$Fa = 1 - \frac{I}{Z \times I_r} = 1 - \frac{U_{Act}}{Z \times U_{Ref}} \tag{10}$$

依据这个关系式，选取 5 个气体传感器，对于量程为 5% 的气体进行实验(以甲烷为目标气体)，选取满量程的等间隔的 10 个点进行测试，并记录每个传感器的  $Fa$  值，最终求得平均值来确定该传感器在该浓度点下的吸收率，所测试得到的一组值来确定参

数  $\alpha$  和  $\beta$ 。测试的结果如表 1 所示。

表 1 不同浓度下的吸收率测试结果

Tab.1 Test results of absorption rate at different concentration

Selected point of gas concentration/%VOL	Average value of absorption rate by measurement of 5 gas sensors
0.0	0.000
0.5	0.030
1.0	0.052
1.5	0.065
2.0	0.077
2.5	0.085
3.0	0.096
3.5	0.101
4.0	0.111
4.5	0.118
5.0	0.125

通过上面的测试结果分析，选取函数关系式：

$$Y = X \times (1 - \exp(-\alpha C^\beta)) \tag{11}$$

式中： $Y$  为每一气体浓度下的平均吸收率； $X:1-S$ ，计算时因  $X$  从理论上分析，其影响非常小，可忽略不记。

因此，可以通过上述测试的结果进行曲线拟合，获得  $\alpha$  和  $\beta$  的值。

#### 3.2 $Z$ 的确定方法

$Z$  和  $S$  通常是在被确定的传感器系统后用来测试与校准传感器的依据。 $Z$  实际为在没有被测气体存在的条件下，两通道输出信号的比值，即称为零状态，是可以直接测试得到的。 $Z$  的计算关系式为：

$$Z = \frac{U'_{Act}}{U'_{Ref}} \tag{12}$$

式中： $U'_{Act}$ 、 $U'_{Ref}$  都是传感器处在气体浓度为零状态下测试的探测器输出的峰-峰值，为准确获取该值，选取纯氮气条件下测试。在计算过程中，通常取一段时间内传感器输出值平均量作为最终计算的  $Z$  值。

#### 3.3 $S$ 跨度值的确定方法

通过函数模型，可以得出其跨度计算关系式：

$$S = \frac{1 - U''_{Act} / (Z \times U''_{Ref})}{1 - e^{-\alpha (C''_{Ref})^\beta}} \tag{13}$$

式中： $U''_{Act}$  代表在满量程气体浓度下，气体传感器响应探测器输出的峰-峰值； $U''_{Ref}$  代表在满量程气体浓度下，气体传感器参考探测器输出的峰-峰值； $\alpha$ 、 $\beta$

都为线形修正参数,为一固定值,上述推导已求得;C"为红外气体传感器测试的满量程目标气体浓度(5%)。

### 4 参数修正函数浓度计算中的温度补偿方法

上述的计算与修正都是从理论以及设计模型方面来考虑与修正的,通常情况下,外界环境因素对传感器测试结果的影响也是非常大的。温度是影响最大的外界环境因素,因此必须要采取适当的措施对测试结果进行补偿。

采取实时测量温度补偿是提高检测精度与适应不同环境条件使用的有效措施,实际上温度对传感器的输出结果的影响是相当复杂的,主要概括起来有以下几点:

- (1) 理想气体定律中温度的影响;
- (2) 热释电材料对热的响应程度;
- (3) 光学滤波片带来的各方面的影响;
- (4) 内置在探测器管壳内的场效应管 FET 的各方面的影响。

这些因素对于设计的每个传感器的影响程度是不一样的。对于计算模型方程(9),温度主要影响的是吸收率,主要是对  $\frac{U_{Act}}{Z \times U_{Ref}}$  的计算结果影响,因此,可以引入参数  $\lambda$ ,结合温度关系来补偿这个结果,其补偿计算方法可以设计如下:

$$\left( \frac{U_{Act}}{Z \times U_{Ref}} \right)_{补偿} = \left( \frac{U_{Act}}{Z \times U_{Ref}} \right) \times (1 + \lambda(T - T_0)) \quad (14)$$

式中:T表示目前测试时刻的外界环境温度;T<sub>0</sub>表示在开始计算  $\frac{U_{Act}}{Z \times U_{Ref}}$  时的温度; $\lambda$ 是一个补偿参数,需根据具体要求来计算,其方法与  $\alpha$ 、 $\beta$  参数的确定类似。

通过选取一个测试的传感器,在不同的温度值条件下进行测试,最终得到一组  $\frac{U_{Act}}{Z \times U_{Ref}}$  值和不同的温度值,通过拟合的方法获得  $\lambda$  值。在试验测试过程中,对于文中研究的传感器,得到其  $\lambda$  为 0.003 16。

将公式(14)带入公式(9),得到最终的气体浓度计算公式:

$$C = \left( \frac{\ln \left( \left( \frac{U_{Act}}{Z \times U_{Ref}} (1 + \lambda(T - T_0)) - S \right) \times \frac{1}{1 - S} \right)}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (15)$$

### 5 实验测试

对于红外气体传感器是否具有实际的可用性,需要对其进行稳定性测试,这样才不至于在实际使

用过程产生一些虚假的信息,而造成误判现象。对于红外气体传感器稳定性试验测试结果如图 1 所示,从图中的输出信号曲线可以看出传感器具有良好的稳定性。采用参数修正函数浓度计算方法处理传感器浓度信号以后,传感器的精度与准确度上得到了很大程度的提高,实现  $100 \times 10^{-6}$  的分辨能力。图 2 描述了传感器对气体浓度响应的输出信号线形关系。

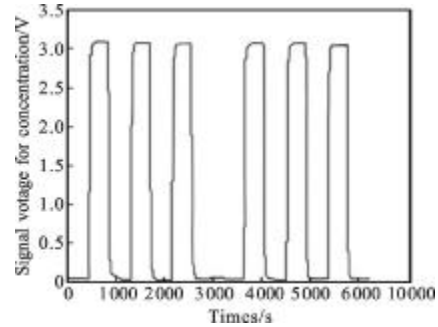


图 1 红外传感器输出稳定性测试

Fig.1 Results of stability test for IR gas output

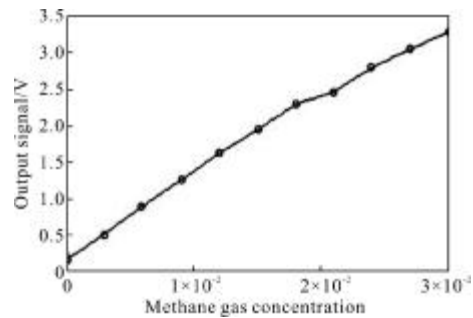


图 2 传感器对不同浓度气体响应曲线

Fig.2 Response relation under different concentration conditions

### 6 结论

文中重点分析了红外光学检测技术中的气体浓度信号处理方法:参数修正函数浓度计算法。主要阐述了参数修正函数浓度模型的建立过程和各参数的实验确定方法。文中对这种信号处理方法的基本原理和设计基本思路作了详细的讨论,并提出了针对此方法的温度补偿技术。通过温度补偿计算方法,修正了红外气体浓度传感器的检测结果,使得传感器系统能在不同温度条件下使用,克服了因地区与天气条件的改变对红外气体浓度传感器使用性的影响,传感器算法的使用性得到增强。经过实验测试,该方法在计算精度与准确度上得到了很大程度的提高,传感器实现了  $100 \times 10^{-6}$  的分辨能力,能够满足许

多场合的使用。

#### 参考文献:

- [1] Liang Gang. Development of miniature IR gas detecting instrument [D]. Taiyuan: North University of China, 2008. (in Chinese)  
梁刚. 微型红外气体检测仪的研制[D]. 太原: 中北大学, 2008.
- [2] Jacky Chou. Hazardous gas monitors: a practical guide to selection, operation and applications[D]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1995.
- [3] Tan Qiulin, Pei Xiangdong, Xiong Jijun, et al. The interpolation-data look-up table method for concentration calculation and compensation in optical gas measurement[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25 (11): 1484-1487. (in Chinese)  
谭秋林, 裴向东, 熊继军, 等. 光学气体检测中的插值-数据查表浓度计算与补偿方法 [J]. 传感技术学报, 2012, 25(11): 1484-1487.
- [4] Zhang Guangjun, Wu Xiaoli. A novel CO<sub>2</sub> gas analyzer based on IR absorption[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 42: 219-231.
- [5] Zhang Guangjun, Li Yaping, Li Qingbo. A miniaturized carbon dioxide gas sensor based on infrared absorption [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48 (12): 1206-1212.
- [6] Hodgkinson J, Tatam R P. Optical gas sensing: a review [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24: 1-3.
- [7] Liu Jun, Tan Qiulin, Zhang Wendong, et al. Miniature low-power IR monitor for methane detection [J]. Measurement, 2011, 44: 823-831.
- [8] 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.
- [9] Zhang Wendong, Tan Qiulin, LiuJun, et al. Two-channel IR gas sensor with two detectors based on LiTaO<sub>3</sub> single-crystalwafer [J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42: 1223-1228.