

# 不分光红外气体传感器建模与非线性校正

## Modeling and Nonlinearity Correction of Non-dispersive Infrared Gas Sensor

陶波波<sup>1</sup> 徐科军<sup>1,2</sup> 陈杭经<sup>1</sup> 张玉超<sup>1</sup> 王刚<sup>3</sup> 朱仲文<sup>3</sup> 胡体宝<sup>3</sup>

(合肥工业大学电气与自动化工程学院<sup>1</sup>,安徽 合肥 230009;  
工业自动化安徽省工程技术研究中心<sup>2</sup>,安徽 合肥 230009;重庆川仪自动化股份有限公司<sup>3</sup>,重庆 404001)

**摘要:** 不分光红外气体传感器输入和输出关系在本质上是非线性的,需要校正,以保证系统的测量精度。根据气体对红外光线的吸收定律,对传感器进行定性分析,得到数学模型结构,并研制了基于 DSP 的硬件平台和软件算法。随后进行了标定试验,通过试验数据,建立传感器输入与输出的非线性关系。对非线性参数进行优化,建立满足精度和实际应用需要的数学模型,确定浓度与信号幅值的关系。试验结果表明,通过该数学模型的非线性校正,使得系统的非线性误差小于 $\pm 1\%$  FS,满足实际测量的要求。

**关键词:** 不分光红外气体传感器 吸收定律 定性分析 DSP 非线性校正

**中图分类号:** TH741 **文献标志码:** A

**Abstract:** The relationship between input and output of non-dispersive infrared gas sensor is nonlinear in nature, and need to be corrected to ensure the measurement accuracy of the system. According to the absorption law of gas to IR light, qualitative analysis is conducted for the sensor, and the mathematical model structure is obtained. The hardware platform based on DSP and the software algorithm are researched and developed, and the calibration test is conducted; through the test data, the nonlinear relationship between output and output of the sensor is built. The parameters of the nonlinear relationship are optimized, the mathematical model satisfying accuracy and the demand for practical application is established, to determine the relation between concentration and signal amplitude. The result of experiments indicate that the nonlinear correction made by the mathematical model makes the nonlinear error less than  $\pm 1\%$  FS, that meets the requirement of practical measurement.

**Keywords:** Non-dispersive infrared gas sensor Absorption law Qualitative analysis Digital signal processing(DSP) Nonlinear correction

## 0 引言

不分光红外气体分析仪作为精度较高的检测工具,面临的一个难题是如何对传感器的非线性进行校正<sup>[1-3]</sup>。目前,国内外生产的红外气体分析仪的非线性误差一般为 $\pm 2\%$  满量程(full scale, FS),部分可达 $\pm 1\%$  FS<sup>[4]</sup>,但都没有详细披露校正的细节。部分企业采用多级运放对信号分段、分区间放大,以提供系统的线性响应,电路复杂且输出不连续。Bernie B. Bernard 等提出  $y = Ax/(1-x)$  的数学模型<sup>[5]</sup>,但系数  $A$  在实际操作中较难获得。有关企业凭经验用两条直线拟合输入与输出的关系,属于试凑的方法,非线性误差较大。作者曾采集五点不同浓度与信号幅值,并用最小二乘法拟合一条三阶曲线,使非线性误差小于 $\pm 1\%$  FS,而工程应用只允许采集三点作为曲线拟合数据。

本文以重庆川仪的 PA-200 型红外传感器为研究对象,根据传感器工作机理以及试验数据,提出满足系统非线性误差的方法。

修改稿收到日期:2013-05-26。

第一作者陶波波(1989-),男,现为合肥工业大学检测技术与自动化装置专业在读硕士研究生,主要从事 DSP 应用方面的研究。

## 1 模型构建

根据不分光红外气体传感器的工作原理和结构特点,构建数学模型。不分光红外气体分析仪是利用待测气体对红外光线的吸收作用进行气体分析的。由于不同浓度待测气体对红外光线吸收的辐射能不同,造成接收气室内温度升高不同,继而使得薄膜电容动极两边承受的压力不同,动极移动,从而使电容检测器上产生不同的电信号。这样,电容检测器就可以间接反映不同浓度的待测气体。

### 1.1 朗伯-比尔定律

气体对特定波长红外光线的吸收遵守朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律,待测组分是按照指数规律对红外辐射能量进行吸收的<sup>[6]</sup>,其表达式为:

$$I = I_0 e^{-kcl} \quad (1)$$

式中: $I_0$  为红外光线被气体吸收前的光强度; $I$  为红外光线被气体吸收后的光强度; $k$  为待测组分对红外光线的吸收系数; $c$  为待测组分的物质的量百分比浓度; $l$  为红外光线经过的待测气体层的长度。

由式(1)可知,被吸收的红外光线辐射强度  $I_0 - I$  与待测气体浓度  $c$  满足以下关系:

$$c = -\frac{1}{kl} \ln\left(1 - \frac{I_0 - I}{I_0}\right) \quad (2)$$

对于一台确定的不分光红外气体分析仪,  $I_0$ 、 $k$  和  $l$  均已确定, 由式(2)可知, 只需测量被气体吸收后的红外光线辐射强度  $I$ , 即可计算出待测气体的浓度  $c$ 。

由式(2)可以得出:

$$A = \ln \frac{I_0}{I} = kcl \quad (3)$$

通常记  $A = \ln \frac{I_0}{I}$  为吸光度<sup>[7]</sup>, 显然, 在  $k$  和  $l$  确定的情况下, 吸光度  $A$  与待测气体浓度  $c$  成正比。事实上, 当吸光度  $A$  很小时, 吸光度才与待测气体浓度有较好的线性关系; 当吸光度  $A$  较大时, 吸光度不再随待测气体浓度线性增加, 而呈饱和趋势<sup>[8]</sup>, 需要进行非线性校正。

## 1.2 分析检测原理

不分光红外气体分析仪由红外光源、薄膜电容检测器以及测量池(包括分析气室和参比气室)等组成。光源被切光片遮挡, 交替、间歇地射入参比气室和分析气室中。参比气室完全密封, 一般充有对红外光线辐射能量吸收极少的  $N_2$ , 而分析气室中连续地通待测气体。从参比气室和分析气室射出的红外光线, 交替进入接收气室。接收气室由前室和后室组成, 前室和后室通过半透半反的光学镜片隔开, 都充有吸收气体, 吸收气体的吸收曲线近似于待测气体的消光曲线。由于进入接收气室的两束红外光线存在能量差, 气室内上升的温度存在差异, 进而产生的压力不同, 从而推动薄膜电容的动极移动, 改变了薄膜电容的极距, 最终造成电容容值和电荷量的改变。

## 1.3 建模

当  $\Delta d/d \ll 1$  时, 电容  $C$  与  $\Delta d$  近似为线性关系, 具体的表达式为:

$$C = C_0 + C_0 \frac{\Delta d}{d} \quad (4)$$

式中:  $C_0$  为初始电容值;  $d$  为板间极距;  $\Delta d$  为板间缩小的极距值。

这样, 通过薄膜电容检测器将红外光线辐射能量变化转换成电量变化, 再通过电荷放大器将高内阻的电荷源转换为低内阻的电压源, 而且输出电压正比于输入电荷, 满足下述关系:

$$U_0 \approx U_{cf} \approx -\frac{Q}{C_f} \quad (5)$$

式中:  $U_0$  为电荷放大器输出电压;  $U_{cf}$  为反馈电容两端的电压;  $Q$  为电荷放大器输入电荷;  $C_f$  为反馈电容<sup>[9]</sup>。

电荷放大器输出信号, 再经过放大滤波等处理, 就能输出一个与待测气体浓度变化相对应的电信号。

由上述式(1)~式(5)以及被吸收的红外线辐射强度与信号幅值近似线性的关系, 可以建立红外传感器输入与输出模型的关系, 近似为:

$$y = a \ln(1 + bx) \quad (6)$$

式中:  $y$  为待测气体的浓度;  $x$  为信号的幅值;  $a$  与气体性质和气室长度有关;  $b$  与仪器的各项参数(如光路损失、放大电路的增益等)相关。

对式(6)进行幂级数的展开, 可得待测气体浓度与信号幅值的关系为:

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n \quad (7)$$

## 2 参数确定

根据不分光红外气体传感器的标定试验, 确定数学模型的参数。为此, 需要研制相应的信号转换、处理及控制系统, 以便得出参数。

### 2.1 系统研制

根据不分光红外气体分析仪的特点和数字信号处理算法的需要, 确定的系统硬件框图如图1所示。

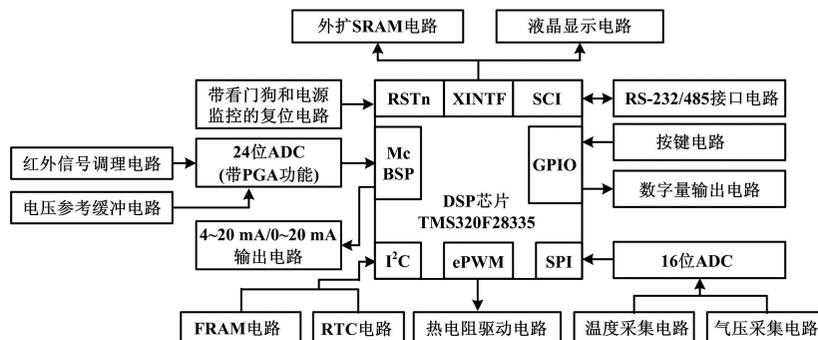


图1 系统硬件框图

Fig.1 Block diagram of system hardware

系统硬件主要包括红外信号调理与 A/D 转换模块、DSP 控制与处理模块、温度控制模块、压力补偿模

块、人机接口模块、通信模块以及电源管理模块等。

系统软件设计采用模块化设计方法, 将系统各个

功能组合成独立模块,由主监控程序统一调用。系统软件主要包括主监控模块、初始化模块、红外信号处理模块以及中断模块等,软件结构框图如图2所示。

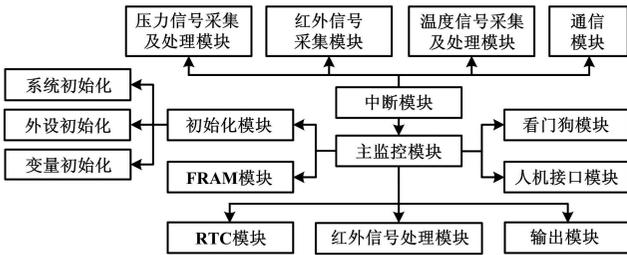


图2 系统软件结构框图

Fig.2 Block diagram of system software

整个系统的主监控程序流程图如图3所示,主要包括对红外信号的采集、处理以及结果的输出。系统上电后,DSP先调用各初始化模块,对系统、外设和变量进行初始化。在初始化完成后,进入一个循环,先判断Newdata(没有进行计算的数据的长度)是否 $\geq 3000$ (循环数据的长度),当 $Newdata \geq 3000$ 时,重新对变量进行初始化。当第一次进行计算时需要采集大于1200点的数据,满足时开始计算,标志位start\_calc1置1。为了确保有足够的新数据可用来计算,还需要判断标志位start\_calc2,标志位start\_calc2=1(表示采集到150点新数据),则进入算法程序。利用算法程序得到信号的幅值,并计算待测气体的浓度,通过液晶加以显示。

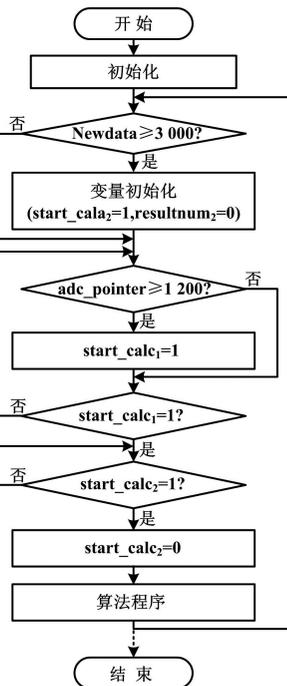


图3 主监控程序流程图

Fig.3 Flowchart of main control procedures

## 2.2 标定试验

为了获得式(7)所示模型的次数及系数,我们进行了多次试验。

整个试验装置的框图如图4所示。

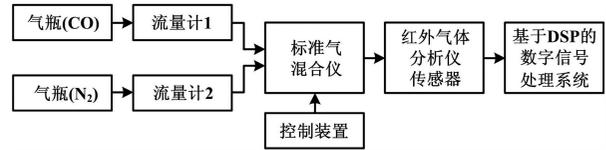


图4 试验装置框图

Fig.4 Block diagram of experimental apparatus

## 2.3 参数优化

通过气体混合仪配置了不同浓度的CO标准气体,根据DSP系统采集的不同浓度标准气信号的幅值,以及非线性误差小于 $\pm 1\%$  FS的要求,将其中浓度为0%、20%、50%、70%、100%的五点数据,在Matlab中利用最小二乘法拟合一个次数最低且满足非线性误差要求的曲线。不同标准浓度下的CO气体对应的信号幅值如表1所示。

表1 不同浓度CO对应的信号幅值

Tab.1 Signal amplitudes in different CO concentrations

标准浓度/%	幅值/V
0	0.020 435
20	0.276 792
50	0.557 138
70	0.689 281
100	0.838 905

根据以上五点数据,可以得到满足非线性误差要求的最低次数的曲线,曲线方程为 $y = 0.9071x^3 - 0.2488x^2 + 0.781x - 0.016$ 。然后,将所得方程的次数和系数置入DSP处理系统中,对气体混合仪配置的标准浓度分别为10%、30%、40%、60%、80%、90%的CO气体进行实时测量并观察系统的非线性误差。采用DSP实时处理的结果如表2所示。

表2 不同浓度CO的DSP处理结果

Tab.2 Processing results with DSP in different CO concentrations

标准浓度/%	DSP处理结果/%	最大非线性误差/%
10	9.31 ~ 9.36	0.69
30	29.68 ~ 29.80	0.32
40	39.48 ~ 39.56	0.52
60	59.48 ~ 60.10	0.52
80	79.79 ~ 80.11	0.21
90	89.21 ~ 90.09	0.79

从表 2 可以看出,系统的非线性误差最大为 0.79%,满足非线性误差小于 $\pm 1\%$  FS 的设计要求。

根据试验现场采集的大量数据,在系统的非线性误差小于 $\pm 1\%$  FS 和拟合曲线的次数最低的约束条件下,利用五点数据可以较好地拟合一条曲线,满足非线性误差的要求。曲线方程为:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (8)$$

需要说明的是,系统本身存在不可避免的系统误差,如光源电压波动、电子器件噪声及光学镜片老化等带来的误差;两种气体除了彼此之间的交叉干扰,还受其他气体(如  $H_2O$  等)的干扰;试验中配置的标准气体或“零点气”的不纯也会造成测量的误差<sup>[9-10]</sup>。因此,标准浓度为 0% 的待测气体,其信号的幅值不再是理论上的零值,式(8)中引入  $a_0$  作为误差的修正。

尽管式(8)可以使系统的非线性误差满足优于 $\pm 1\%$  FS 的设计要求。但是,在工程应用中,为了降低成本和测试强度,实际只允许采集零点、中点和终点作为拟合的数据,甚至只采集中点和终点作为拟合的数据,这样采集的数据就不足以拟合一条诸如式(8)的曲线。针对这个问题,通过对比分析最小二乘法拟合的三阶曲线后,对幂级数进行修正,忽略影响浓度较小的次数,得到浓度与信号幅值的曲线,并且根据不同测量范围的传感器建立不同的数学模型。针对重庆川仪自动化股份有限公司的 PA-200 型  $0 \sim 2\,000 \times 10^{-6}$  量程的红外气体分析仪,建立了  $y = ax^3 + bx$  的拟合曲线模型;针对 PA-200 型  $0 \sim 1\,000 \times 10^{-6}$  量程的红外气体分析仪,采用  $y = ax^2 + bx$  的拟合曲线模型。

针对 PA-200 型  $0 \sim 1\,000 \times 10^{-6}$  量程的红外气体分析仪,通过气体混合仪配置了 50% 和 100% 的  $SO_2$  标准气体,并用 DSP 系统采集处理数据来验证校正后的效果。不同标准浓度下的  $SO_2$  气体对应的信号幅值如表 3 所示。

表 3 不同浓度信号  $SO_2$  对应的幅值

Tab. 3 Signal amplitudes in different  $SO_2$  concentrations

标准浓度/%	幅值/V
50	0.678 853
100	1.046 329

根据以上两点数据,利用拟合曲线模型,可得到曲线  $y = 0.596\,463x^2 + 0.331\,626x$ 。然后,将所得方程的次数和系数置入 DSP 处理系统中,对气体混合仪配置标准浓度分别为 10%、20%、30%、40%、60%、70%、80%、90% 的  $SO_2$  气体进行实时测量并观察系统的非线性误差。采用 DSP 实时处理的结果如表 4 所示。

表 4 不同浓度信号  $SO_2$  对应的 DSP 处理结果

Tab. 4 Processing results with DSP in different  $SO_2$  concentrations

标准浓度/%	DSP 处理结果/%	最大非线性误差/%
10	9.52 ~ 9.56	0.48
20	19.76 ~ 19.79	0.24
30	29.61 ~ 29.65	0.39
40	39.59 ~ 39.62	0.41
60	59.42 ~ 59.46	0.58
70	69.37 ~ 69.39	0.63
80	79.27 ~ 79.31	0.73
90	89.20 ~ 89.22	0.80

从表 4 可以看出,系统的非线性误差最大为 0.80%,满足非线性误差小于 $\pm 1\%$  FS 的设计要求。

从试验现场所做的大量的试验结果可以看出,采用非线性校正后的曲线拟合模型,完全可以替代五点标定所采用的最小二乘法,使整个系统的非线性误差小于 $\pm 1\%$  FS。模型满足设计和实际应用的要求,具有良好的工作性能。

### 3 结束语

本文从气体对红外光线吸收的基本原理出发,构建模型结构,研制相关的硬件平台和软件算法,并在试验现场进行标定试验得到不同浓度下信号的幅值。利用最小二乘法对数据进行分析,建立传感器输入与输出的非线性关系,曲线满足系统非线性误差的要求。

根据工业实际应用的需要,对建立的传感器输入与输出的非线性关系进行校正,建立实际工业应用三点或两点标定的数学模型,克服五点标定的弊端,更加简单易行。针对不同测量范围的红外气体分析仪,提出不同的数学模型,确定待测气体浓度与信号幅值的曲线拟合关系。多台不同型号的红外气体分析仪的试验结果表明,非线性校正后的曲线拟合模型,能够使整个系统的非线性误差小于 $\pm 1\%$  FS,满足实际测量和应用的要求。

本文所设计的基于 DSP 的不分光红外气体分析仪数字信号处理和控制系统,已经申请国家发明专利,同时重庆川仪自动化股份有限公司正在对该技术成果进行进一步的工程化开发。

#### 参考文献

- [1] 孙友文,刘文清,汪世美,等. 非线性吸收对多组分气体分析的影响及其修正方法[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 295-302.
- [2] Wang Yuanbin. Infrared spectrum analysis of the gas in coal mine based on SVM[C] // IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009: 606-611.

(下转第 27 页)