

# 基于 NDIR 方法的机动车排放气体传感器

姜炎材, 陈红岩\*

(中国计量学院 机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 针对机动车尾气成分检测中存在的各种问题, 根据不分光红外 (NDIR) 方法的基本原理设计了新的测量方案。传感器同时测得了 CO、CO<sub>2</sub>、HC 化合物 3 种气体的浓度, 并以数字信号方式通过串行口输出测量结果, 避免了传输过程中的干扰, 可以很方便地应用到具有串口的各种数字处理设备中。用标准气体对传感器进行了实验标定, 其结果表明传感器测量精度达到国家标准要求。

**关键词:** 不分光红外; 气体传感器; 机动车尾气检测

中图分类号: TH86; TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)10-0077-04

## Vehicle gas emissions sensor based on NDIR method

JIANG Yan-cai, CHEN Hong-yan

(School of Mechatronics Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at many problems in vehicle emissions detection, a new detecting system was designed according to the non-dispersive infrared (NDIR) method. The concentration of CO, CO<sub>2</sub>, HC was detected by the sensor at the same time. The results were transformed to the digital signals and exported through the serial port in order to avoid the interference during the transmission, and it can be used to the digital processors conveniently. The precision experiments was done with standard gas samples. The results indicate that the sensor precision fits to the country standards.

**Key words:** non-dispersive infrared (NDIR); gas sensor; vehicle emissions detection

## 0 引言

汽车排放的尾气中的主要污染物包括 CO、CO<sub>2</sub>、HC 化合物和 NO 化合物等成分。随着机动车辆的迅速增长, 各种污染物的排放也随之剧增, 因此造成的大气污染也日益严重, 已经严重威胁到人类的生存。因此, 制定的汽车废气的排放标准也日益严格。由于 NDIR 方法可以快速、准确地探测气体浓度, 因此, 在国家标准中已经明确要求对 CO<sub>2</sub>、CO 和 HC 化合物的测量必须使用不分光红外吸收 (NDIR) 方法<sup>[1-3]</sup>。

本研究基于 NDIR 测量原理以及测量机动车尾气的国家标准 GB18285-2005, 提出了一套新型测量方

案, 可以同时快速测量 CO、CO<sub>2</sub>、HC 化合物 3 种气体成分的浓度, 测量结果以数字量的形式通过串行口输出, 可以很方便地应用到各种具有 RS232 串行通信方式的数字处理设备中。本测量方案具有较高的测量精度和较低的成本, 可以应用在多种简易场合。为制作便携式红外气体设备提供了新的参考方案, 具有重要的现实意义。

## 1 NDIR 法的基本原理与测量模型

非对称双原子和多原子分子气体 (如 HC<sub>4</sub>、CO 和 CO<sub>2</sub> 等) 受到红外光束照射时, 气体分子就要吸收自己对应波长红外光的能量, 将其转换为分子的内能<sup>[4]</sup>。

当红外光通过被测气体时,气体分子吸收光能量,吸收关系遵循 Lambert-Beer 定律<sup>[5]</sup>:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-k(\lambda)cl} \quad (1)$$

式中  $I$ —红外光通过被测气体后的光强; $I_0$ —红外光未通过被测气体时的光强; $l$ —红外光通过气体的长度; $k$ —气体的吸收系数; $c$ —气体的浓度; $\lambda$ —红外光的波长。

由式(1)可推知:

$$E(\lambda) = \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} = k(\lambda)cl \quad (2)$$

式(2)表明,当红外光通过气体的长度  $l$  固定时,红外光吸收度  $E(\lambda)$  与吸收辐射物质的浓度  $c$  成正比。

式(1)和式(2)仅适用于特定波长的红外光,因此在进行测量时需要用特定的滤光片滤除掉其它波段的红外光。CO、CO<sub>2</sub>、HC 化合物在光谱上都具有各自的强烈吸收带,并且这些吸收带互不重叠,能够同时进行测量而不互相干扰<sup>[6]</sup>。

## 2 传感器的整体结构设计

传感器的结构如图 1 所示。

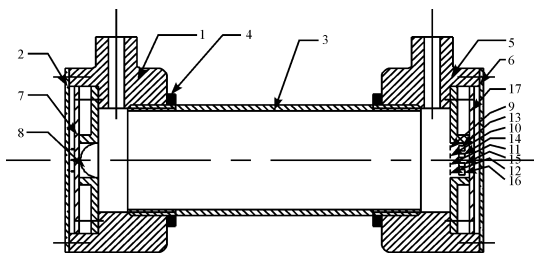


图 1 传感器的结构图

1—固定头座 1;2—屏蔽盖 1;3—气室;4—气室长度调节螺母;5—固定头座 2;6—屏蔽盖 2;7—红外源调制驱动电路;8—红外光源;9~12—滤光片 1~4;13~16—热电堆 1~4;17—前置放大器及信号处理电路

红外源调制驱动电路发出调制脉冲,控制红外光源发出一系列光脉冲。光脉冲是  $2 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$  的连续红外光谱,经过气室后,气室中的 CO、CO<sub>2</sub>、HC 化合物吸收了各自的特定波长的红外光。而后 4 个滤光片分别截取  $4.66 \mu\text{m}$ 、 $4.43 \mu\text{m}$ 、 $3.46 \mu\text{m}$  和  $3.93 \mu\text{m}$  的红外光,并分别投射到 4 个独立的热电堆上。热电堆吸收红外光后,两端产生一个微弱的电动势。这个微弱的电动势跟被气体吸收后的红外光的强度呈线性关系<sup>[7]</sup>。这个微弱的电动势约为几十微伏,经过前置线性放大电路放大后成为  $0 \sim 5 \text{ V}$  的信号。信号处理电路包括前置放大电路、A/D 转换电路和分析处理电路。信号经过放大电路后,滤除了高频噪声。A/D 转

换电路将 4 路  $0 \sim 5 \text{ V}$  的电压信号转换为数字量,经过分析处理电路分析处理后,得出气体的浓度值,通过 RS232 串口通信电路把测得的数字量浓度值发送给其它设备。

气室长度调节螺母用来调节气室的长度。气室长度越长,气体吸收越充分,测量精度也越高,同时也大大降低了测量信号的强度。而且在不同的环境下,最佳气室长度也有所差别。调节螺母螺纹采用精密的细牙螺纹,通过调节螺母的旋转圈数可以精确地改变气室的长度。

## 3 红外光源

红外光源采用 MIRL17-900 红外光源。它是一种能工作在高频、高强度输出的微型脉冲红外光源,发射光谱是一个灰体<sup>[8]</sup>。它具有高发射率,高热传导性,高稳定性以及很低的热驻留特性,这使它在高频脉冲工作时,能快速地加热和冷却,从而能在脉冲模式下工作。它带有抛物面反光镜,发出的红外光线具有很高的平行度,极大地减少了因红外光线在气室内的多次反射而造成的测量误差<sup>[9]</sup>。光源的光谱能量主要集中在  $1 \mu\text{m} \sim 20 \mu\text{m}$  的光谱范围内,覆盖了待分析的 3 种气体的所有特征吸收波段,能够增加待测气体的吸收能量,提高测量灵敏度。

## 4 红外探测器

红外探测器是传感器中的敏感元件,它将通过测量气室被待测组分吸收后剩余的光能,转换为电信号供测量用<sup>[10]</sup>。本研究采用 TPS4339 红外气体探测器,它是一种热电堆探测器,无须外接电源即可产生一个与入射光强度成线性关系的电压,这个电压十分微弱,是  $10 \mu\text{V}$  量级,需要放大后才能测量。TPS4339 带有 4 片热电堆,封装在 4 个独立的方格内,每个方格前面都有一个滤光片,仅允许待测组分敏感的光通过,4 个通道相互独立,最多可测量 4 种不同的气体<sup>[11]</sup>。

## 5 前置放大电路

前置放大电路是传感器的关键部分。由于红外探测器输出的信号十分微弱,而又要保证精度能够满足要求,这就对前置放大电路提出了较高的要求。放大电路的输入失调电压必须比探测器的输出电压 ( $10 \mu\text{V}$  左右) 小很多,并且为了把温度的影响因素降低到 1% 以下,经计算温漂必须小于  $0.01 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。放大后的信号应该在  $0 \sim 5 \text{ V}$  之间,因此放大电路要求在

0~5 V 间应该有较高的线性度。基于以上要求本研究选择 Analog 公司的 AD8552 集成运放,它具有 1 μV 的输入失调电压和 0.005 μV/°C 的温漂。工作在 0~5 V 单电源模式下,提供轨对轨输出,在 0~4.998 V 范围内有很好的放大线性度,完全能够满足设计要求。前置放大电路如图 2 所示。

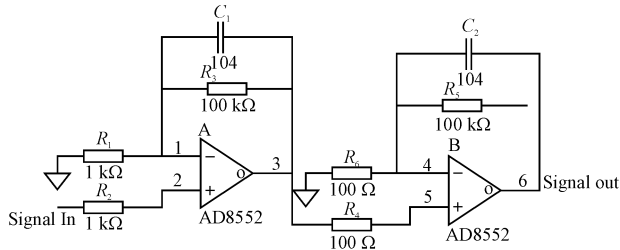


图 2 前置放大电路原理图

放大电路分两级放大,采用同相放大的方法,输入阻抗接近于无穷大,有利于提高信号的信噪比。

### 6 滤波电路

在测量过程中难免要窜入一些干扰,因此在进行数据采集之前必须去除这些干扰。本研究所需要的测量信号在 10 Hz 左右,而噪声源主要为 50 Hz 的工频和高温噪声。据此,笔者设计了带 50 Hz 陷波的低通滤波器,用来滤除工频和高温噪声。滤波电路采用 maximum 公司的 MAX274 可编程滤波器,通过改变接入的电阻可方便地调整滤波电路的各项参数。

### 7 数据处理、红外光源驱动及通信模块

这部分主要完成信号的 A/D 转换,数字滤波,根据信号计算待测成分的浓度并将计算结果通过 RS232 串行接口送出。本研究选用 STC5410AD 单片机完成这部分的设计。STC5410AD 是一款带有 10 位 A/D 转换的增强型高速单片机,10 位的 A/D 转换模块的分辨率小于 0.1%,完全可以满足设计需要。同时该单片机还具有 PWM 调制模块,可以用来产生红外源调制信号。为了尽可能避免工频等周期性因素的影响,本研究采用平均值数字滤波对采集的数据进行处理。考虑到公式中的运算较为复杂,用单片机计算无论从时间上还是精度上都难以保证,因此笔者采用查表的方法,查询浓度值。本研究预先在 0~5 V 范围内设定 N 个测量点,每个点用标准气体测出对应的测量值。查表的时候先查出测量值的区间范围,然后在区间范围内按线性关系算出其对应的浓度值。由于探测器对变化的光强敏感,同时为了使探测器产生交流的信号便于放大器放大。为了得到比较理想的探测器频率响

应特性,必须对红外光源进行调制。调制频率越高,探测器的相对输出就越小,灵敏度随之降低。综合两方面因素,通过实验比较,本研究选取 8 Hz 的调制频率,可以收到较好的效果。STC5410AD 单片机集成了 PWM 调制模块,可以利用定时器产生占空比可调的 8 Hz 脉宽调制信号,用作驱动电路的控制信号。利用单片机的串口与 PC 机等支持 RS232 的外部设备进行通信。每次传输两个字节共 16 位,前 4 位为 1111 表示开始发送,第 5~8 位为 CO<sub>2</sub> 浓度,第 9~12 位为 CO 浓度,第 13~16 位为 HC 化合物浓度。

### 8 软件设计

测量软件流程图如图 3 所示,单片机产生 PWM 波控制红外光源发光。在红外光源下一个红外脉冲到达之前,测量程序完成测量。四路测量同时进行,数据按照 CO、CO<sub>2</sub>、HC 化合物的顺序依次处理。

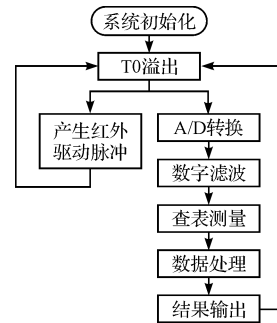


图 3 测量软件流程图

### 9 实验结果及分析

本研究通过测量标准气体对传感器的性能进行测试。使用国家一级标准物作对比实验。采用标准 3 号气(CO 浓度是 4.89%,HC 浓度是 930 ppm,CO<sub>2</sub> 浓度是 7.21%)和标准气 4 号气(CO 浓度是 7.95%,HC 浓度是 1 583 ppm,CO<sub>2</sub> 浓度是 12.64%)对传感器进行精确度检验。

使用标准 3 号气检测结果如表 1 所示。

表 1 标准 3 号气检测结果

	CO/(%)	HC/(ppm)	CO <sub>2</sub> /(%)
标准	4.89	930	7.21
1	4.72	934	6.95
2	4.74	944	7.01
3	4.74	937	6.97

使用标准 4 号气检测结果如表 2 所示。

表 2 标准气 4 号气检测结果

	CO/(%)	HC/(ppm)	CO <sub>2</sub> /(%)
标气 4 号	7.95	1 583	12.64
1	7.77	1 568	12.35
2	7.77	1 563	12.28
3	7.77	1 564	12.30
4	7.78	1 562	12.34
5	7.79	1 565	12.38
6	7.78	1 564	12.36

尾气示值误差计算

按下式计算示值误差为:

$$\Delta b = \frac{\bar{C}_a - C_0}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $\bar{C}_a$ —三次读数算术平均值;  $C_0$ —标准气体浓度值;  $\Delta b$ —相对误差。

重复性误差的计算中,测量值为  $C_i$ ,平均值为  $\bar{C}$ ,重复性误差用相对标准偏差表示,且:

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (2)$$

设  $d_i = C_i - \bar{C}$ ,则:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (3)$$

相对标准偏差为:

$$C_v = \frac{S}{\bar{C}} \times 100\% \quad (4)$$

经计算,可得到各项误差如表 3 所示。

表 3 检测误差汇总表

序号	检验项目	标准要求	检验结果	结论
示值 误差	CO	相对误差 $\pm 3\%$	-2.3%	合格
	HC	相对误差 $\pm 3\%$	-1.1%	合格
	CO <sub>2</sub>	相对误差 $\pm 3\%$	-2.6%	合格
重复 性 误差	CO		0.1%	合格
	HC	不超过 2%	0.1%	合格
	CO <sub>2</sub>		0.3%	合格

实验结果表明,根据 NDIR 方法所设计的传感器各组分测量相对误差均在 3% 以内,高于国家标准要求的 5%。各组分的绝对误差也均在国家标准限定范围之内,满足当前国家标准的测量要求,具有相对较高的测量精度。

这套测量方案简单易行,虽然测量精度与目前国

际尖端产品相比差距仍然很大,但是在要求相对不高的场合又有着相对较高的测量精度,测量方便快捷而且成本较低,为汽车检修和路检等场合提供了一种简单的高效测量方案,并具有重要的现实意义。

## 10 结束语

本研究分析了 NDIR 方法的基本原理,并根据国家标准设计了气体传感器。传感器同时测得 CO、CO<sub>2</sub>、HC 3 种气体的浓度,并以数字信号方式通过串行口输出测量结果。实验结果表明,传感器满足当前国家标准的测量要求,并具有相对较高的测量精度。

## 参考文献 (References):

- [1] 中国国家环境保护总局. GB18285—2005 点燃式发动机汽车排气污染物排放限值及测量方法(双怠速法及简易工况法)[S]. 北京:国家环境科学出版社,2006:9-12.
- [2] 宋文绪,杨帆. 传感器与检测技术[M]. 北京:高等教育出版社,2004:260-263.
- [3] 王汝琳,王咏涛. 红外检测技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [4] SUN J, KIM Y W, WANG L. After treatment control and adaptation of automotive lean burn engines with HEGO sensors[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2004, 18(2):145-166.
- [5] PHD J S. Applications of Thermoelectric Infrared Sensors (Thermopiles): Gas Detection by Infrared Absorption[M]. PerkinElmer Optoelectronics, 2000.
- [6] KOLMANOVSKY I V, SIVASHANKAR S N, SUN J. Optimal Controlbased Powertrain Feasibility Assessment: A software Implementation Perspective[C]. Proceedings of the American Control Conference, Portland, Oregon, 2005.
- [7] 王霞,金伟其,王汝琳. 红外气体传感器多光路光学系统设计[J]. 光学技术, 2002(2):152-154.
- [8] 熊友辉,蒋泰毅. 电调制非分光红外(NDIR)气体传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2003(11):4-5,9.
- [9] 张军辉,董永贵,王东生. 非调制型 NDIR 传感器及其信号处理方法的改进[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2008, 48(2):189-191.
- [10] 王海棠,黄琦兰,刘尚. 基于 NDIR 法汽车尾气分析仪的设计与实现[J]. 天津工业大学学报, 2006, 25(6):48-51.
- [11] BENOUNIS M, JAFFREZIC-RENAULT N, DUTAST J P, et al. Study of a new evanescent wave optical fibre sensor for methane detection based on cryptophane molecules[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 107(1):32-39.

[编辑:张翔]