

文章编号: 0253-9993(2007)11-1224-04

非分光红外甲烷传感器的研制

吴永忠, 陈丹艳, 郭太峰, 程文娟, 徐海卫, 郑淑丽, 刘勤勤

(合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 矿用红外瓦斯传感器技术的难题是探测器输出信号微弱, 光源电源波动、温度变化以及其它气体组分、水汽、灰尘等的干扰对测量精度会造成较大的影响. 针对这些关键问题, 讨论了数字化窄带滤波、双波长非分光测定技术等解决方案和相应的矿用传感器电路结构, 提出了基于朗伯比尔定律的温度补偿方法. 经试验测试, 传感器的研制实现了预期的目标. 测量精度优于 $\pm 0.1\%$, 响应时间小于 20 s, 其它技术指标和功能均符合矿用标准.

关键词: 非分光红外; 瓦斯; 气体传感器

中图分类号: TD712.55 **文献标识码:** A

Development of non-dispersive infrared methane gas transducer

WU Yong-zhong, CHEN Dan-yan, GUO Tai-feng, CHENG Wen-juan, XU Hai-wei,
ZHENG Shu-li, LIU Qin-qin

(Department of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Under the circumstances of coal mining applications, one of the problems on methane gas sensor technique based on infrared absorption is how to eliminate the bad measurement accuracy due to infrared source power supply jitter, thermal radiation, and interference of other gas, water vapor, coal dust etc.. Also, extremely small output signals for infrared detector was another defect of the method. So, a digital narrowband filter and a double-beam non-dispersive infrared technique were discussed. Also, a new kind of transducer architecture and a thermal compensation method based on Lambert-Beer Law were proposed for coal mining applications. As a result, an infrared methane transducer was developed successfully. Its measurement error is $\pm 0.1\%$, and its response time is less than 20 s. Its other features and functions all achieve the criterions for coal mining applications.

Key words: non-dispersive infrared radiation; methane; gas sensor

在国内煤炭技术市场上, 现役固定式瓦斯传感器主要有热催化型和热导型两类传感器, 在测量瓦斯的过程中, 敏感部件会因参与化学反应而受损, 这就是现有固定式矿用瓦斯传感器反应速度慢、寿命短和调校周期短的根本原因所在, 是原理性的、难以克服的“死结”。

瓦斯的另一个重要特性是对某些特定波长及其附近的红外光谱有强烈的吸收效应, 这种吸收效应服从朗伯比尔定律. 与现役瓦斯传感器不同的是, 利用红外吸收式原理制成的传感器在测量过程中与瓦斯发生反应的是器件发出的光, 而不是器件本身, 相对器件来说这种反应是一个物理过程, 该过程无损于器件. 所以, 利用这种原理所研制的瓦斯传感器可以克服现役传感器固有的缺陷, 实现反应快、寿命长、调校周期长等技术目标.

收稿日期: 2007-05-08 责任编辑: 高雪梅

基金项目: 安徽省“十五”二期重点攻关项目(040120501)

作者简介: 吴永忠(1964-), 男, 四川武胜人, 副教授, 博士, 硕士生导师. Tel: 0551-5516406, E-mail: wyz64@163.com

1 关键技术

尽管红外吸收型传感器具有响应速度快、测量精度高、寿命长等优点，但其存在的缺点也是不可忽略的，主要表现在：① 甲烷对红外光谱的吸收十分微弱，浓度越低，红外信号的变化量越小，一般根据探测器灵敏度的不同，每 1% 甲烷浓度的变化只能产生几个至十几个微伏电压的变化，这种变化常常会受电源电压波动的影响而无法准确测定；② 在测定的过程中不可避免地会受到其它气体组分、灰尘、水汽等环境因素的干扰；③ 红外探测器的特性常常受到温度的影响，所以环境温度必定会对测定结果产生重大影响。

在理想环境下，可以较容易地获得比较精确的测量结果。本项目将直接应用于 0 ~ 40 °C 的各种现场环境，温度的影响将是不容忽视的。因此，采取有效的措施解决上述问题是成功实现本项目预期目标的关键，具体实现方法是采用高精度前置放大器、数字化窄带滤波、双波长非分光定量测定算法和温度补偿技术。

1.1 非分光定量测定算法

如图 1 所示，在双波长非分光测定中，开始照射到吸收池的不同波长两束光的强度是相等的，均为 I_0 ；通过吸收池后，两束光的强度分别为 I_1 和 I_2 。对应波长 λ_1 和 λ_2 的光束，试样的吸收度 A_{λ_1} 和 A_{λ_2} 都服从朗伯比尔定律，分别为

$$A_{\lambda_1} = \ln(I_0/I_1) = \varepsilon_{\lambda_1} Lc + A_{s_1},$$

$$A_{\lambda_2} = \ln(I_0/I_2) = \varepsilon_{\lambda_2} Lc + A_{s_2},$$

式中， ε_{λ_1} ， ε_{λ_2} 分别为被测组分在 λ_1 ， λ_2 处的摩尔吸光系数； A_{s_1} ， A_{s_2} 分别为 λ_1 ， λ_2 处的背景吸收。

λ_1 和 λ_2 两个波段的背景吸收的关系为 $A_{s_1} - A_{s_2} = \Delta A_s$ 。其中 ΔA_s 是两个波段背景吸收的误差，当 λ_1 和 λ_2 选择适当时，一般认为 ΔA_s 很小，可以忽略不计。这样透过吸收池两束光的吸光度差值为

$$\Delta A = A_{\lambda_2} - A_{\lambda_1} = \ln(I_1/I_2) = (\varepsilon_{\lambda_2} - \varepsilon_{\lambda_1}) Lc. \tag{1}$$

式 (1) 表明， ΔA 与被测组分的浓度 c 成正比。这就是双波长非分光定量分析的依据。该方法能消除共存干扰组分的吸收，而不必预先分离或采用其他掩蔽手段。根据红外探测器的特性，电压输出 U 与照射光强 I 之间成正比关系，即 $U \propto I$ ，当光强为 I_1 和 I_2 时，双元红外探测器的输出满足

$$U'_1 = \beta_1 I_1, U'_2 = \beta_2 I_2, \tag{2}$$

式中， β_1 和 β_2 为常数。

若放大器 A 对这两路信号的放大倍率分别为 k_1 和 k_2 ，则

$$U_1 = k_1 U'_1, U_2 = k_2 U'_2. \tag{3}$$

综合式 (1) ~ (3)，可得

$$c = \frac{1}{L(\varepsilon_{\lambda_2} - \varepsilon_{\lambda_1})} \ln\left(\frac{k_2 \beta_2 U_1}{k_1 \beta_1 U_2}\right). \tag{4}$$

L ， ε ， k 和 β 都是与系统密切相关的常量，若要得到待测浓度值，则需预先求出 L ， ε ， k 和 β 。其求取方法：首先，求取 $k_2 \beta_2 / (k_1 \beta_1)$ 。将气室中充满浓度为 100% 的 N_2 ，则气室中甲烷浓度 $c = 0$ ，若放大器 A 此时的输出为 U_{01} 和 U_{02} ，根据式 (4) 可得 $k_2 \beta_2 / (k_1 \beta_1) = U_{02} / U_{01} = S$ 。带入式 (4) 可得

$$c = \frac{1}{L(\varepsilon_{\lambda_2} - \varepsilon_{\lambda_1})} \ln\left(S \frac{U_1}{U_2}\right). \tag{5}$$

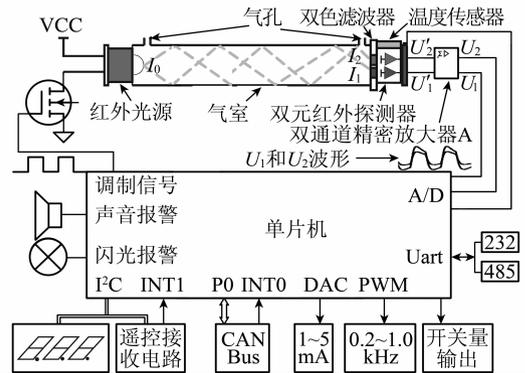


图 1 传感器硬件电路

Fig. 1 Transducer circuit

其次, 可根据已知浓度的气样, 反演式 (5), 求出 L, ε 的值. 式 (5) 还可以消除光源电压波动产生的影响, 限于篇幅, 其详细证明过程本文不再赘述.

1.2 温度补偿算法

环境温度的变化对测量结果会造成很大的影响. 根据研究表明, 温度对探测器两输出电压的比值具有线性关系, 即

$$(SU_1/U_2)_{\text{comp}} = (SU_1/U_2)[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (6)$$

式中, α 为温度系数, 取决于系统特性; T 为当前温度; T_0 为零标定点温度.

令 $\varepsilon = \varepsilon_{\lambda_2} - \varepsilon_{\lambda_1}$, 并将式 (6) 带入式 (5), 可得

$$c = \frac{1}{L\varepsilon} \ln \left\{ S \frac{U_1}{U_2} [1 + \alpha(T - T_0)] \right\}. \quad (7)$$

式 (7) 就是基于朗伯比尔定律的温度补偿算法.

1.3 数字化窄带滤波算法

红外探测器输出信号十分微弱, 一般都在微伏量级, 常常被噪声淹没, 为了降低硬件成本并提高精度, 采用了软件滤波方式的传感器. 数字滤波器是一个 9 阶巴特瓦兹带通滤波器, 中心频率 $f_0 = 2 \text{ Hz}$, 上边带 3 dB 截至频率 $f_1 = 3 \text{ Hz}$, 采样周期 $T = \frac{1}{1024} \text{ s}$, 采样数 $N = 256$, 忽略推导, 滤波器传递函数 $H(k) = (A - jB)/(A^2 + B^2)$, 其中

$$A = \sum_{m=0}^{(n-1)/2} C_{2m} \left[\frac{\cos(2\pi f_0 T) - \cos(2\pi k/N)}{\Omega_c \sin(2\pi k/N)} \right]^{2m} \cos(m\pi),$$

$$B = \sum_{m=0}^{(n-1)/2} C_{2m+1} \left[\frac{\cos(2\pi f_0 T) - \cos(2\pi k/N)}{\Omega_c \sin(2\pi k/N)} \right]^{2m+1} \cos(m\pi),$$

$$\Omega_c = [\cos(2\pi f_0 T) - \cos(2\pi f_1 T)] / \sin(2\pi f_1 T),$$

式中, n 为滤波器阶数.

2 电路设计

根据文献 [1, 2] 等标准的相关规定, 甲烷传感器硬件电路总体设计如图 1 所示, 整个系统由红外吸收式前端传感器、电源电路、红外光源驱动电路、声光报警电路、CPU 及其相关电路、LED 数码显示驱动电路、红外遥控接收电路、CAN 总线接口电路、1~5 mA 模拟电流输出电路、0.2~1 kHz 频率量输出电路、开光量输出电路、RS232 和 RS485 总线接口电路等组成. 甲烷对红外光谱的吸收带主要集中在 1.331^[3], 1.660^[4], 3.310^[5], 3.390^[6], 6.550, 7.660 μm ^[7] 等处, 一般认为 3.310 μm 及其附近的光谱对甲烷有特别的作用, 而 3.390 μm 及其附近的光谱不仅对甲烷有强烈的作用, 而且还对烷烃化合物有广谱作用, 考虑到煤矿瓦斯的主要成分虽然是甲烷, 但还含有少量由其它烷烃化合物组成的可燃性气体, 如乙烷、丙烷、丁烷、戊烷等, 所以选用了 3.390 μm 波段作测量信号用. 由于 3.950 μm 及其附近的红外光谱不受瓦斯和其它气体的影响, 常在双波长红外气体测定中作参考信号应用, 因此, 系统中的双色滤波器分别选用中心频率为 (3.400 \pm 0.080) μm , 3 dB 带宽为 180 nm 的 G5 滤波器和中心频率为 (3.950 \pm 0.020) μm , 3 dB 带宽为 75 nm 的 G20.3 滤波器.

电路工作原理: 首先由单片机输出 2 Hz 方波信号, 经一个场效应管放大后调制广谱可见/红外光源, 光线穿过气室照射到红外探测器前 G5 和 G20.3 窄带滤波器上, 经过滤波器后可选出 3.400 μm 和 3.950 μm 的红外光, 而阻断其余光谱, 这样紧贴在双色滤波器后的红外探测器便只能检测到 3.400 μm 和 3.950 μm 及其附近的红外信号, 并将其转换为电量输出, 该电量的变化将跟随红外光强度而成正比变化. 这就是双波长非分光调制技术原理的具体应用. 为了减小传感器尺寸, 气室长度设计为 8 cm, 由于红外探测器输出的电压信号接近 5 μV , 所以探测器后设计采用了 114 dB 增益的微弱信号放大器将信号放

大. 放大后的红外信号和嵌在气室中的温度传感器输出的温度信号经 AD 转换器转换为数字信号, 由单片机按式 (7) 变换为相应的浓度数据. 单片机通过 I²C 总线将浓度数据发送到 3 位数码管进行本地显示, 同时将浓度数据通过 DAC 和 PWM 调制器分别变换为 1~5 mA 电流信号和 0.2~1.0 kHz 频率信号输出, 供其它关联设备使用, 最大传输距离为 2 km. 开关量信号通过光电隔离电路由 P1.1 口输出, 输出电平符合 TTL 标准, 可为断电器提供断电信号. 系统提供了 CAN 总线和 RS485 总线 2 种数据通信方式, 传感器可单独组网与地面中心站进行双向通信. CAN 控制器通过地址映射方式联结到单片机 PO 口, 一旦有事件发生, CAN 总线控制器可通过 INTO 通知单片机, 单片机就此转入中断服务子程序, 处理该事件; CAN 总线传输速率为 4~1 024 kbps, 缺省速率为 100 kbps, 当速率为 4 kbps 时, 传输距离最大为 10 km, CAN 技术可提供全新的应用. RS485 总线为兼容现有部分监测系统而设置的, 工作特性符合工业标准. 系统功能的设置通过红外遥控方式进行, 可完成报警方式设置、传感器地址设置、数据通信方式 (CAN/RS485)、传感器远程复位、灵敏度设置、断电点设置、传感器校准、传感器自检等多种功能; 遥控接收电路的接收中断输出端与单片机 INT1 相连, 一旦收到遥控器发来的指令, 立即发出中断请求通知单片机, 单片机就此转入中断服务, 通过 I²C 总线读取遥控器发来的指令, 从而完成相应的工作. RS232 用于实现 ISP, 也可用它与 PC 通信, 实现传感器功能设置和其它数据传输.

3 结 论

经过长达 1 a 多的测试和试验表明, 各项指标均符合设计要求, 传感器测量范围为 0~5%, 测量精度为 $\pm 0.1\%$, 响应时间小于 20 s, 调校周期大于 90 d, 温度补偿算法的提出使测量精度及系统的温度稳定性进一步提高. 传感器可以单机独立应用, 也可以作为一个组件与现役瓦斯监测系统联合应用, 还可以自组网络形成系统应用, 适合于大、中、小各类煤矿. 本系统存在的主要缺点是电路尺寸偏大; 由于现有器件及其光学结构的技术限制, 传感器响应速度还不够高. 这都是未来研究所要解决的问题.

参考文献:

- [1] MT444-1995. 煤矿用低浓度载体催化式甲烷传感器技术条件 [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.
- [2] AQ6201-2006. 煤矿安全监控系统通用技术要求 [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.
- [3] 陈红丽, 李国辉, 陈尧生, 等. 甲烷光纤气体传感器的试验研究 [J]. 光子学报, 2000, 29 (6): 541~544.
- [4] 曹茂永, 张逸芳, 张士昌, 等. 吸收光谱式光纤瓦斯传感器的参数设计 [J]. 煤炭学报, 1997, 22 (3): 280~283.
- [5] 王一丁, 钟宏杰, 金钦汉, 等. 红外 CH₄ 检测仪 [J]. 吉林大学自然科学学报, 2001 (10): 69~71.
- [6] 尤 政, 任伟明, 宗维千, 等. 在 3.39 μm 波段甲烷吸收特性的测量与应用研究 [J]. 红外技术, 1994, 14 (4): 28~31.
- [7] 王玉田, 刘 瑾, 张景超, 等. 基于谐波检测技术的光纤甲烷气体传感器的研究 [J]. 测控技术, 2003, 22 (11): 19~21.