文章编号:1001-5078(2012)09-1007-04 ·红外技术及应用·

红外吸收粉尘传感器的设计

郑德忠,赵乐平
(燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室,河北 秦皇岛 066004)

摘 要:基于粉尘对红外光的吸收原理提出了一种测量粉尘浓度的传感器新方案。以朗伯-比尔定律为理论依据,传感器采用空间双光路结构,应用差分算法,建立数学模型,采用MSP430F149,ICL7605和AD620等芯片进行数据处理,并用实验结果验证可靠性。提出的粉尘设计方案对于提高粉尘测量精度,特别是烟道、煤矿中高浓度的粉尘安全检测均有重要意义。

关键词:红外吸收;粉尘浓度;空间双光路;差分
中图分类号:TP212 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.09.010

Design of infrared absorption sensor for dust concentration

ZHENG De-zhong,ZHAO Le-ping
(Measurement Technology and Instrumentation Key Lab of Hebei Province,Yanshan University,Qinhuangdao 066004,China)

Abstract: Based on the principle of infrared absorption,a novel design of infrared sensor measuring the dust concentration is proposed in the paper. The linear mathematical model of sensor is established based on Lambert-Beer,the structure of double light paths and applying difference algorithm. Msp430f149,ICL7605 and AD620 are applied in the signal processing section. Then,the reliability of the measurement is verified by experimental data. It seems that the proposed infrared absorption dust sensor can not only improve the measurement accuracy of the sensor but also offer an interesting and significant solution for the safety monitoring in the coal mine and flue.

Key words:infrared absorption;dust concentration;space double beams;difference

1 引 言

随着工业的发展,在提高生产效率的同时,产尘量及作业场所的粉尘浓度也在不断的增加。尤其是在煤矿厂和工业生产的烟道中都会产生大量的粉尘,粉尘散布到我们的周围,对人体、产品质量、环境、生态平衡很都有影响。因此,粉尘浓度的在线监测对确保人身安全和提高环境质量具有极其重要的意义。

在多种粉尘测量的方法中,基于光学方法来测量粉尘浓度的测试仪具有灵敏度高、响应速度快、寿命长等特点。本文提出了基于红外吸收原理测量粉尘浓度的传感器,传感器采用差分结构,能消除光源不稳定和光电器件零漂移等因素的影响,从而获取准确的粉尘测量浓度。

2 理论基础

光通过介质时,会与介质发生相互作用,除了被介质散射外,还会被介质吸收,其中吸收关系符合Lambert-Beer定律。当平行光通过均匀介质时,以Lambert-Beer定律为基础,通过测量入射光强和出射光强,经过计算得到粉尘浓度。所以透射光强和出射光强的关系为:

$$I_{OUT}=I_{IN}\exp(-\alpha CL) \tag{1}$$

式中,I_{OUT},I_{IN}分别为透射、入射光强;C为介质浓度;

基金项目:河北省科学技术研究与发展计划项目(No.05213503D)资助。

作者简介:郑德忠(1949-),男,教授,博士生导师,主要从事广义预测控制,虚拟仪器,遥测遥控技术,网络传输与信息技术,ARM嵌入式系统等方面的研究。

收稿日期:2012-01-10

L 为光与介质相互作用的距离；α 为介质对光波的吸收系数。α 与光波的波长和介质的性质有关，如粉尘颗粒的粒径、折射率等，与介质的浓度无关。

3 系统的组成结构和工作原理

检测系统的总体结构如图1所示。

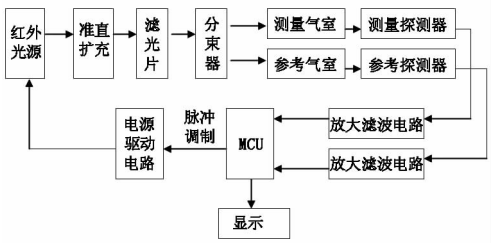

图1 系统总体结构设计

Fig. 1 schematic diagram of the designed sensing system

3.1 数学模型的建立

红外吸收粉尘传感器采用空间双光路结构，其中测量探测器所测量的信号与粉尘的浓度有关，而参考探测器所测量的信号没有受到被测气体浓度的影响。传感器的红外光源采用周期性的开关工作方式，即用单片机发出的脉冲来控制红外光源的发光和熄灭，得到合适频率的红外光。测量探测器所测得的测量信号和参考探测器所测得的参考信号分别经过放大滤波电路并行进入单片机中，可在同一时刻得到两路探测信号。这样，光源熄灭得到两路信号，包含了温度和背景光信号造成的波动。光源打开时又得到两路信号，这两路信号中分别包含光源的波动、测量光路的扰动、探测器和电子器件扰动等干扰因素所造成的误差。通过对这4路信号进行处理，就可以抵消上述各种干扰，得到更准确的测量结果。

根据 Lambert-Beer 定律建立数学模型[1-2]：

令红外光源关闭，测量探测器两端的电压：

$$V_1 = V_{11} + V_{12} \tag{2}$$

参考探测器两端的电压为：

$$V_2 = V_{21} + V_{22} \tag{3}$$

式中，V_{11}，V_{21} 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_{12}，V_{22} 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。

再令红外光源打开，则测量探测器两端的电压为：

$$V_3 = I_0 \times e^{-\alpha_{gas}CL} \times R_{gas} \times \eta_{gas} \times K_{gas} \times J_{gas} + V_{11} + V_{12} \tag{4}$$

参考探测器两端的电压为：

$$V_4 = I_0 \times R_{ref} \times \eta_{ref} \times K_{ref} \times J_{ref} + V_{21} + V_{22} \tag{5}$$

式中，R_{gas}，R_{ref} 分别测量探测器和参考探测器的响应度；η_{gas}，η_{ref} 分别为测量电路和参考电路的放大系数；K_{gas}，K_{ref} 分别为红外光通过测量气室和参考气室时的光损失系数；J_{gas}，J_{ref} 分别为测量滤光片和参考滤光片的透过率；α_{gas} 为被测粉尘气体的吸收系数；L 为气室的长度；I_0 为入射光的强。

为了消除背景信号和温度信号的干扰，将式(4)与式(2)，式(5)与式(3)分别相减，得：

$$V_{gas} = V_3 - V_1 \tag{6}$$

$$V_{ref} = V_4 - V_3 \tag{7}$$

为消除红外光源、气室扰动、探测器以及电子器件所引起的误差，将式(6)和是式(7)做以下处理，得到差分公式为：

$$F = \frac{V_{gas} - V_{ref}}{V_{gas} - V_{ref}} \tag{8}$$

将式(2)～式(4)和式(5)代入式(8)中得：

$$C = -\frac{1}{\alpha_{gas}L}\ln\left(\frac{R_{ref}\eta_{ref}K_{ref}J_{ref}}{R_{gas}\eta_{gas}K_{gas}J_{gas}} \cdot \frac{1+F}{1-F}\right) \tag{9}$$

整理得：

$$C = -\frac{1}{\alpha_{gas}L}\left[\ln\left(\frac{R_{ref}\eta_{ref}J_{ref}K_{ref}}{R_{gas}\eta_{gas}J_{gas}K_{gas}}\right) + \ln\left(\frac{1+F}{1-F}\right)\right] \tag{10}$$

因为对于函数 $y = \ln\left(\frac{1+F}{1-F}\right) = \ln\left(1 + \frac{2F}{1-F}\right)$，又因为设计中两路放大滤波电路的放大系数相同，由式(9)可知 $F \in (-1, 0)$，而 $\frac{2F}{1-F}$ 是增函数，且 $\frac{2F}{1-F} \in (-1, 0)$，则 $\frac{2F}{1-F} \in (0, 1)$。将函数 y 进行泰勒公式展开得：

$$y = \ln\left(\frac{1+F}{1-F}\right) = \ln\left(1 + \frac{2F}{1-F}\right) = \ln\left[1 + \left(-\frac{2F}{1-F}\right)\right] \approx -\frac{2F}{1-F} \tag{11}$$

将式(11)代入式(10)中，得粉尘浓度计算公式：

$$C = -\frac{1}{-\alpha_{gas}L}\ln\left(\frac{R_{ref}\eta_{ref}J_{ref}K_{ref}}{R_{gas}\eta_{gas}J_{gas}K_{gas}}\right) + \frac{1}{\alpha_{gas}L} \cdot \frac{2F}{F-1} \tag{12}$$

3.2 系统结构的设计

红外光源性能好坏直接关系到光路系统的稳定性以及红外探测器对光信号的接收与处理。选择 IRL715 光源，输出谱线从可见光到红外光5 μm 处，输出稳定，使用寿命长，尤其是在间歇状态下。本文中光源采用960 nm。驱动电路简单，用 LM317 驱动，用低频控制增强光源辐射，减缓老化。

采用封闭、内壁镀防腐蚀红外全反射膜的气室，设有进气泵、出气泵。在进气泵处放干燥剂，防止水蒸气对红外光的影响。小型渐变折射率透镜组成的气体气室使入射光经过透镜后先聚焦，然后再传输到另一面透镜上，这样，发散的反射光不能够返回光路，由此产生的相干噪声就可以消除，信号的噪声比也因此提高了5倍。结构如图2所示。

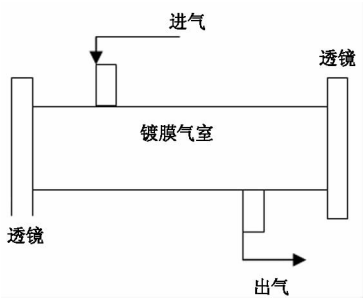

图2　气室结构设计

Fig.2　schematic diagram of the gas cell

滤光片选择上海兆九光电技术有限公司的960 nm的红外滤光片，中心波长为960 nm，带宽30 nm，峰值透过率$T>85$。

探测器是红外检测系统中的核心元件，它将通过测量气室被待测气体吸收后剩余的光能转换为某种形式的信号（电压或电流等）测量使用。本设计中光电探测器选择硅光电池S1337－1010BR，有效面积为10 mm×10 mm，波长范围320～1100 nm，峰值960 nm，响应时间3 μs[3]。它是一种大光敏面的高灵敏度、高效率的光电探测器件，适合于微光功率及照度计的探头，在零偏电压下工作，在该条件下S1337－1010BR光敏去有良好的均匀性，极好的线性和快的响应度，稳定性好等特点。

微弱信号的检测系统有前置放大电路和主放大电路两部分组成。由于前置放大电路主要起到了电流转换电压的作用，经过其放大的信号还不能满足采样电压的要求，因此还需要设计主放大器电路，前置放大电路选择ICL7650芯片[4]，该芯片采用CMOS工艺集成的斩波稳零高精度运算大器，输入电阻10^{12} Ω，偏置电流25 ℃时为1.5 pA，失调电压1 V，失调电压温度系数0.01，共模抑制比130 dB，具有其他高阻运算放大器没有的自动稳零优点，也能很好地解决抑制温漂和放大微弱直流信号或缓慢变化的信号，所以适合作微电流放大器。主放大电路采用AD620芯片，AD620具有精度高、低噪声、低功耗，使用简单等优点，只需外接一个可变电阻便可构成一个高精度的运算放电路，应用十分广泛。

系统采用MSP430F149单片机进行控制[5]，该单片机16位数据宽度，数据处理更为有效，并且内部集成了12位的ADC模块，采样速度快，最高可达200 Ksps，同时也简化了系统的设计，不必再选择A/D转换器进行连接设计。显示部分采用LCD1602模块。

3　传感器原理验证试验

在建好的粉尘浓度实验室进行了一些实验，实验用的粉尘是气煤煤粉，测量的数据如表1所示，将其进行线性拟合，如图3所示。

表1　测量气煤煤粉数据

Tab.1　measured date of gas pulverized coal

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$2F/(F-1)$	0.2013	0.1857	0.1609	0.1134	0.0754	0.0599	0.367	0.0046	0.0012
粉尘浓度/(mg·m^{-3})	395.18	355.69	310.12	240.46	185.42	145.98	100.72	65.05	23.05

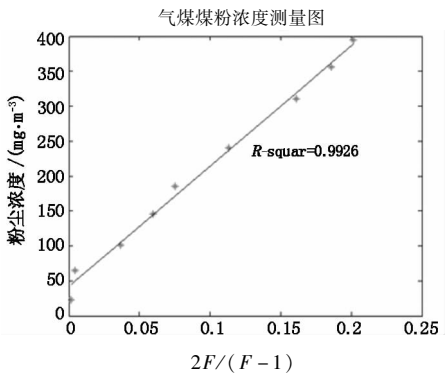

图3　气煤煤粉浓度拟合图

Fig.3　fitting diagram of concentration for pulverized coal

从以上数据的拟合直线可以看出，其线性相关系数为0.9926，说明粉尘浓度与$\frac{2F}{F-1}$非常符合线性关系，验证了以Lambert-Beer定律为原理的吸收式双光路粉尘浓度测量方法的可靠性。同时也可以看出，当粉尘浓度很低时，该种方法测得的粉尘浓度值误差很大，因此说明吸收式方法不宜测量低浓度的粉尘。

4　结　论

本文提出了基于红外吸收原理测量粉尘的新算法，根据算法建立的数学模型结构简单，层次清楚，

适合于粉尘传感器浓度的测量。结构上采用单光源、双光路、双气室结构,消除了同性干扰的影响干扰的影响,提高了检测精度。未来的工作将集中在全面实现设计功能、提高传感器的性能上。

参考文献:

[1] Li Yaping, Zhang Guangjiun, Li Qingbo. Infrared CO_2 gas sensor based on space double beams and its measurement model[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(1): 16 – 17. (in Chinese)
李亚萍,张广军,李庆波. 空间双光路红外 CO_2 气体传感器及其测量模型[J]. 光学 精密工程,2009,17(1):16 – 17.

[2] Liu Quan, Lin Haiyan. Study of optical fiber detection system of acetylene gas[J]. Journal of Transducer Technology, 2003, 22(4): 16 – 17. (in Chinese)
刘泉,林海燕. 光纤乙炔气体检测系统的研究[J]. 传感器技术,2003,22(4):16 – 17.

[3] Hao Xiaojian, Li Yangjun. Technology and application of photoelectric detection[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009: 66 – 69. (in Chinese)
郝晓剑,李仰军. 光电检测技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2009:66 – 69.

[4] He Jin, Liu Tiegen, Meng Zhuo, et al. Design of pre-amplifier circuit for detective system of weak signal[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(9): 1904 – 1906. (in Chinese)
何瑾,刘铁根,孟卓,等. 弱光强信号检测系统前级放大电路的设计[J]. 科学技术与工程,2007,7(9):1904 – 1906.

[5] Shen Jianhua, Yang Yanqin, Zhai Xiaoshu. Principle and application of 16 ultra-low single-chip microcomputer the series of MSP430[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 3 – 7. (in Chinese)
沈建华,杨艳琴,翟骁曙. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:3 – 7.