

文章编号:0253-9993(2012)07-1161-04

双差分法检测瓦斯含量新技术的实验研究

付 华,杨羲葵,刘宇佳

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院,辽宁 葫芦岛 125105)

摘 要:针对煤矿井下环境复杂,难以提取瓦斯(甲烷)气体的微弱信号问题,根据红外光谱吸收原理,提出一种新的双差分瓦斯检测技术。它采用双光路双波长方法,先后两次射入不同波长的单色光,通过两次差分经过探测器得到光生电压。然后经 AD7794 芯片实现两路光信号相除得到输出,最后对不同浓度的甲烷气体通过不同长度的新型 Ring-down 腔气室进行测量得到其浓度反演式。实验结果表明,采用双差分检测技术,有效地提取了瓦斯气体微弱信号,解决了光路扰动问题,具有较高的精度和准确度,其误差为 1%。

关键词:双差分检测技术;瓦斯含量;光谱吸收;Ring-down 腔

中图分类号:TD712.3 **文献标志码:**A

Experiment study on new technology of methane content measurement by dual difference

FU Hua, YANG Yi-kui, LIU Yu-jia

(Faculty of Electrical and Engineering Control, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: In view of the problem that the environment in local mine is complex, which makes it difficult to extract weak methane gas signal, a new methane detection technology based on dual difference was proposed according to the principle of infrared absorption spectrum. The detection technology adopted two wavelength-two path differential detecting structure and got light born voltage by a kind of monochromatic light's twice difference passing the detector with different wavelength. Then it got outputs by AD7794 chip achieving two light signals' division. Finally the concentration back-in-deuced formula was obtained through the measurement of variable concentrations of the methane gas injected into a new kind of gas chamber with different length which was designed by Ring-down cavity. The experimental results show that adopting dual difference can extract weak methane gas signal more effectively, and solve the perturbation problem of light path, and get higher precision and accuracy with error equal to 1%.

Key words: dual difference detecting; methane content; spectrum absorption; Ring-down cavity

目前,在我国煤矿安全事故中,瓦斯爆炸成为实现安全生产的最大障碍和困扰煤矿安全生产的重大难题。甲烷气体是矿井瓦斯主要成分,及时检测瓦斯的主要成分甲烷气体的产生源、泄漏源及浓度^[1],对煤矿安全运行,人身安全及环境保护有着十分重要的意义。随着光谱吸收型光纤气体传感技术^[2-3]的发展,差分检测和谐波检测在国内外进行了大量的报道,这类检测技术也达到了一个较好的精度和测量范

围,但是其成本也相对较高,更重要的是对瓦斯微弱信号的提取以及对小信号放大、大信号过饱和的矛盾都难以解决,为此,本文提出了一种结构简单的双差分检测系统,并在实验室运行成功。

1 双差分检测原理^[4-6]及系统构建

双差分检测原理就是先后分两次射入两种不同波长的单色光,经过光路系统及光电检测,最终得到

收稿日期:2011-07-07 责任编辑:毕永华

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50874059);中国博士后研究基金资助项目(20100471476)

作者简介:付 华(1962—),女,辽宁阜新人,教授,博士。E-mail:cpyyk@yahoo.com.cn

系统输出值,从而根据光谱吸收原理,得出待测气体浓度反演式。系统的总体结构如图 1 所示。

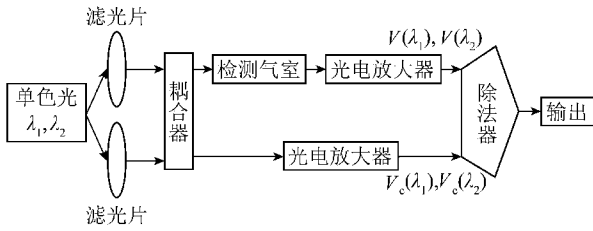


图 1 双差分检测系统原理

Fig. 1 Principle diagram of dual difference detecting system

首先,光源选取可以采取波长可调的扫描激光器,也可以采用宽带 LED 光源,但是扫描激光器成本较高,因此选用宽带 LED 光源^[7]替代。光源先后分两次射入波长为 λ_1, λ_2 的单色光,光信号通过其相应中心波长的滤光片^[8],再经过分光比为 99:1 的定向耦合器分成两路光信号,其中一路光信号直接进入探测器检测,另一路光信号先进入检测气室,光强会被待测的瓦斯气体吸收;最后经过光电放大,输出为 4 路光信号的光生电压,即波长为 λ_1, λ_2 经过检测气室的两路光信号的光生电压^[9-10] $V(\lambda_1), V(\lambda_2)$,以及没有经过检测气室直接经过探测器的两路光信号的光生电压 $V_c(\lambda_1), V_c(\lambda_2)$ 。在双差分检测方法当中,通过探测器测得的光生电压分别为

$$V(\lambda_1) = \rho\eta I(\lambda_1) = \rho\eta k I_0(\lambda_1) \exp[-\alpha CL + \delta(\lambda_1)L + B(\lambda_1)L] \quad (1)$$

$$V(\lambda_1) = \rho_c \eta_c I_c(\lambda_1) = \rho_c \eta_c k_c I_0(\lambda_1) \quad (2)$$

$$V(\lambda_2) = \rho\eta I(\lambda_2) = \rho\eta k I_0(\lambda_2) \exp[-\alpha CL + \delta(\lambda_2)L + B(\lambda_2)L] \quad (3)$$

$$V(\lambda_2) = \rho_c \eta_c I_c(\lambda_2) = \rho_c \eta_c k_c I_0(\lambda_2) \quad (4)$$

式中, ρ 为光电探测器的转换系数; η 为光电放大系数; $I(\lambda)$ 为气体吸收后的出射光强; $I_0(\lambda)$ 为单色光进入气室之前的光强; k 为光学系统的效率; α 为吸收系数; C 为待测气体的浓度值; L 为气体的吸收光程; $\delta(\lambda)$ 为其他非气体因素影对光强的影响; $I(\lambda)$ 为除待测气体之外气体对光强的影响。

2 光谱吸收式^[11]瓦斯传感器结构

光谱吸收型光纤甲烷气体传感器,是基于甲烷分子吸收谱线与发光谱的一致性进行工作的。实验中采用的是红外光谱吸收的红外瓦斯传感器,如果瓦斯气体吸收谱线在入射光的谱线范围内,红外辐射透过待测气体后,在相应谱线处发生能量衰减,未被吸收的辐射被红外探测器测得,通过测量该谱线处能量的衰减就可知被测气体浓度。

基于光谱吸收的红外瓦斯传感器结构^[12-13]如图 2 所示,入射光源采用 LED 红外光源^[14],调制电路采用 0.2 Hz 调制频率,数据测量模块采用 MAX197,数据处理模块采用 AT89C52,通讯模块为 MAX232,探测器 1,2 是热电堆探测器,整个传感器采用不锈钢进行外包装。其工作原理如下:首先由调制电路模块产生的正弦信号,调制红外光源发出的光信号,然后得到的探测光经过滤过相应波长的滤光片,再与经过气室的探测光和未经过气室的探测光做双差分,得到的 4 个光信号经过光电转换和 A/D 转换,经单片机数据采集,数字滤波、温度补偿之后,最终给出瓦斯浓度值。如果测值超过设定值就会发出声光报警信号来采取断电、通风等防灾措施。

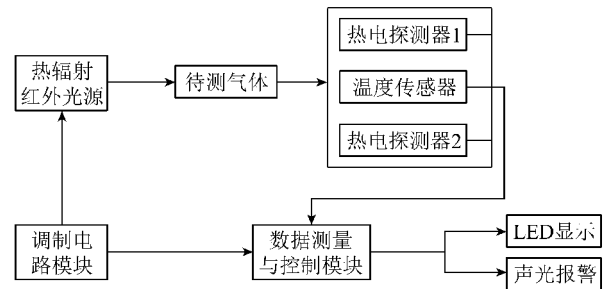


图 2 瓦斯传感器整体结构

Fig. 2 Overall structure of gas sensor

3 光学瓦斯传感气室设计

在双差分检测系统设计当中,需要根据光谱吸收原理,选取精度和灵敏度较高的光学传感气室,而设计气室的重要因素就是气室的长度,即光波与气体的有效作用距离,因此,笔者在气室长度设计上设计出了 Ring-down 腔^[15]吸收气室。根据朗伯定律,使光反复通过气体吸收腔能增加有效作用长度,可提高测试灵敏度。Ring-down 腔就是指光反复通过与被测物质碰撞来增加有效作用长度的一个装置,结构如图 3 所示,其工作原理是两个高反射率的平面镜构成了一个谐振腔,光在腔内的损耗就反映了气体吸收的强弱。

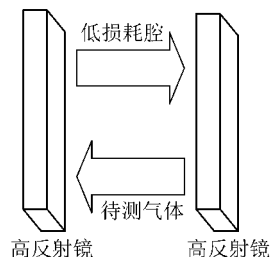


图 3 Ring-down 腔结构

Fig. 3 Structure of Ring-down cavity

实验中采用小型渐变折射率透镜 M_1, M_2 和气室内壁 L_1 和 L_2 反射镜相结合,设计了仿 Ring-down 腔结构气室^[16],如图 4 所示。可以看出,在小型渐变折射率透镜的焦平面中垂线上气室内壁放置一高反射率透镜,使发散光返回原光路,增加了气体与光的有效作用距离,提高了测试灵敏度。同时,选择合适的传感气室长度,在保证光功率(输入光强与输出光强之比)衰减不大的情况下,进行了仿真实验,当气体浓度 C 分别取值为 1%, 5%, 10%, 20%, 50% 时,得到光透过率与气室长度的关系曲线如图 5 所示。

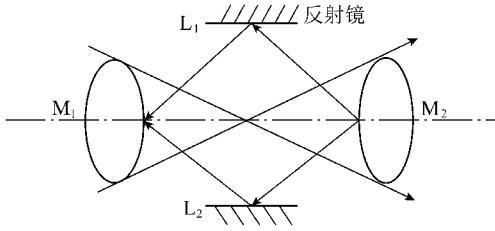


图 4 仿 Ring-down 腔结构气室

Fig. 4 Cavity of imitated Ring-down cavity structure

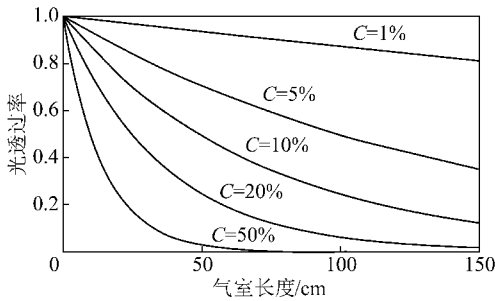


图 5 光透过率与气室长度的关系曲线

Fig. 5 Relation curves between light transmittance and cavity length

从图 5 可以看出,随着气室长度的增加,光功率在不断地衰减。为了保证光功率的衰减不至于过大,必须合理选取气室的长度进行实验,而无限地加长气室长度会造成光功率的极大衰减甚至趋向于零,显然仅靠无限制增加气室长度来增加有效作用距离是不可取的。实验中合理地选取了 5 和 50 cm 的气室进行了测量,发现增加长度虽然可以增加作用距离、减少噪声,但是灵敏度较低。通过比较,在保证灵敏度的情况下,同时又能增加光与气体的作用距离,实验选择 50 cm 的气室。

4 甲烷气体浓度的测定

在实验中测定甲烷气体浓度,不再采用传统的比尔郎伯定律,而是采用浓度值标定法,即取不同浓度的标准甲烷气体,在一定进气流速及温度下分别进行浓度值标定。将实际测量的 K 值与对应的甲烷浓度

值 C 放在存储器中,利用线性插值数值分析法,计算出瓦斯气体的浓度。为使测量更加简单,实验采用 K 值与浓度 C 的数量关系表示:

$$K = \frac{V(\lambda_1)}{V(\lambda_2)N_0} = k_0 \exp(-\alpha LC)$$

式中, K 为测量信号与参考信号之比相对于 N_0 的比值; k_0 为比例常数; N_0 为未充入甲烷气体时,波长分别为 λ_1, λ_2 的光生电压的比值; α 为吸收系数。

由于在室温条件下,甲烷的爆炸下限为 5%,因此将此限定值设定为气体检测系统的满量程,首先将甲烷体积分数为 0 时对应的 N_0 值计算出来,再根据实测的 $V(\lambda_1)$ 和 $V(\lambda_2)$ 计算 K 值,实验中分别选取 $C = 0.5\%, 1.0\%, 1.5\%, 2.0\%, 2.5\%, 3.0\%, 3.5\%, 4.0\%, 4.5\%, 5.0\%$ 进行测量(图 6)。根据测得的数据,得到标定曲线,并将线性参数(斜率和截距)存入 ROM 中,图 6 是甲烷体积分数与 K 值关系曲线,同时,根据当前计算的 K 值和对应的线性参数计算出所测气体的浓度。

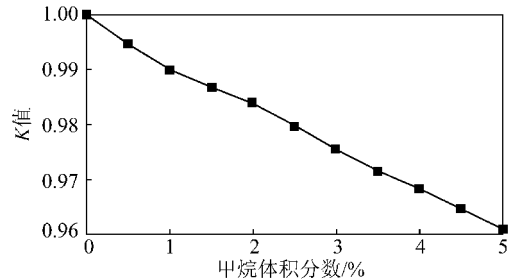


图 6 甲烷体积分数与 K 值关系曲线

Fig. 6 Relation curve between methane's volume fraction and K values

从图 6 可以看出 K 值与甲烷体积分数是呈线性关系的,当 $\alpha CL \ll 1, K = -0.008C + 1$,即 $C = -125K + 125$,实测关系变化趋势与理论值是一致的。

根据表 1 数据,按照 $e = \frac{C_m - C_s}{R} \times 100\%$ 算出相对误差,其中 C_m 为系统实测值, C_s 为标准甲烷气体浓度, R 为量程,可知系统的相对误差为 1%。

表 1 实测值与理论值对比

Table 1 Comparison between measured values and theoretical values

标准值/%	实测值/%
0	0
1.00	1.02
2.00	1.99
3.00	3.02
4.00	4.03
5.00	4.98

5 其他设计的考虑

另外,采用了程控可变增益 I-V 前置放大器^[17],前级电路输出饱和问题可以得到解决,其动态范围大大增加,解决了目前时间双差分检测中存在的小信号有效放大和参考信号饱和的问题。同时采用高精度 $\Sigma-\Delta$ 模数转换,大大抑制了噪声,实现高精度采集。将信号采集系统集成于电路,形成便携式光电检测采集系统,无需附加采集卡。同时由于 AD7794 的硬件相除功能,能实现双光路信号的实时相除,无需另外的数据处理过程。

6 结 论

(1)通过设计基于时间的双差分光纤气体检测系统,采用双光路双波长补偿法能够有效地消除光源的抖动,解决了系统的光路扰动问题。

(2)以检测甲烷气体为实验,设计了 Ring-down 腔吸收气室,分析了不同长度的吸收气室对传感器灵敏度的影响,增加吸收气室的长度能够增加光纤气体传感器的灵敏度,由实验数据得出其相对误差为 1%,达到了技术指标。

(3)同时,根据差分检测和光谱吸收原理,设计的光电检测和数据采集系统能够有效地提取微弱的瓦斯气体光信号,具有较高的精度。

参考文献:

- [1] 李 虹. 监测甲烷浓度的红外光吸收法光纤传感器[J]. 量子电子学报,2002,19(4):355-357.
Li Hong. Optical fiber sensor system of detecting gas concentration by light absorption method[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics,2002,19(4):355-357.
- [2] 张春志. 光谱吸收的煤矿瓦斯光纤传感气体分析[J]. 电子科技,2011,24(2):113-114.
Zhang Chunzhi. Analysis of coal mine gas optical fiber sensing gas based on spectrum absorption[J]. Electronic Science and Technology,2011,24(2):113-114.
- [3] 樊尚春. 光纤传感器技术及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004:4-30.
- [4] 王玉田,郭增军,王莉田. 差分吸收式光纤甲烷气体传感器的研究[J]. 光电子激光,2001,12(7):675-678.
Wang Yutian, Guo Zengjun, Wang Litian. Study on difference absorption optical fiber CH₄ sensor[J]. Journal of Optoelectronics Laser,2001,12(7):675-678.
- [5] 樊凤杰,孟 宗. 差分吸收式光纤甲烷气体传感器的研究[J]. 计量技术,2008,52(3):33-34.
Fan Fengjie, Meng Zong. Study on optical fiber gas sensor based on difference absorption[J]. Measurement Technique,2008,52(3):33-34.
- [6] 王 玫,颜 勇,张慧峰. 基于双 Duffing 振子差分的微弱信号频

率检测[J]. 电路与系统学报,2010,15(2):118-121.

Wang Mei, Yan Yong, Zhang Huifeng. Frequency detection of weak signal based on double differential Duffing oscillators[J]. Journal of Circuits and Systems,2010,15(2):118-121.

- [7] Dakin J P, Wade C A, Pinchbeck D, et al. A novel optical fiber methane sensor[A]. International Conference on Fiber Optics and Opto-Electronics[C]. London:Proc. SPIE.,1987:187-190.
- [8] 曹茂永. 光学检测瓦斯的原理和方法[J]. 中国煤炭,1997,23(10):24-25.
Cao Maoyong. The principle and method of optical gas detection[J]. China Coal,1997,23(10):24-25.
- [9] Jin W, Stewart G, Philip W, et al. Limitation of absorption-based fiber optic gas sensors by coherent reflections[J]. Appl. Opt.,1997,36(25):6251-6255.
- [10] 陈 鹏,金克新,陈长乐,等. La_{0.88}Te_{0.12}MnO₃/Si 异质结的整流和光伏特性研究[J]. 物理学报,2011,60(6):067303-3.
Chen Peng, Jin Kexin, Chen Changle, et al. Rectifying behavior and photovoltaic effect in La_{0.88}Te_{0.12}MnO₃/Si heterostructure[J]. Acta Physica Sinica,2011,60(6):067303-3.
- [11] 丰明坤,隋成华. 光谱吸收法光纤甲烷传感器性能的研究[J]. 光电子技术与信息,2003,16(6):27-30.
Feng Mingkun, Sui Chenghua. Research of optical fiber CH₄ sensor based on spectrum absorption[J]. Optoelectronic Technology & Information,2003,16(6):27-30.
- [12] 张 雷,尹王保,董 磊,等. 基于红外光谱吸收原理的红外瓦斯传感器的实验[J]. 煤炭学报,2006,31(4):480-481.
Zhang Lei, Yin Wangbao, Dong Lei, et al. Experimental of an infrared gas sensor based on infrared absorption spectrum theory in laboratory[J]. Journal of China Coal Society,2006,31(4):480-481.
- [13] 吴永忠,陈丹艳,郭太峰,等. 非分光红外甲烷传感器的研制[J]. 煤炭学报,2007,32(11):1225-1227.
Wu Yongzhong, Chen Danyan, Guo Taifeng, et al. Development of non-dispersive infrared methane gas transducer[J]. Journal of China Coal Society,2007,32(11):1225-1227.
- [14] 纪新朋,吴飞碟,王建业,等. 用于火灾探测的非色散红外吸收气体传感器[J]. 传感技术学报,2006,19(3):602-606.
Ji Xinpeng, Wu Feidie, Wang Jianye, et al. The application of the portable infrared absorption sensor in fire detection[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2006,19(3):602-606.
- [15] 郭秀梅,李艳萍,姜深生,等. 甲烷气体光纤传感系统的研究[J]. 煤炭科学技术,2009,37(5):72-73.
Guo Xiumei, Li Yanping, Jiang Luansheng, et al. Research on optical fiber sensor system of methane gas[J]. Coal Science and Technology 2009,37(5):72-73.
- [16] 张 洁,崔瑞雪,薛 瑞. 近红外气体吸收检测系统灵敏度分析[J]. 微计算机信,2008,24(15):275-276.
Zhang Jie, Cui Ruixue, Xue Rui. The analysis of the sensitivity of detecting system based on gas absorption in near-infrared field[J]. Microcomputer Information,2008,24(15):275-276.
- [17] Johnson Mark. Photo detection and measurement: maximizing performance in optical systems[M]. New York: McGraw-Hill Professional,2003:29-30.