

文章编号:1671-251X(2015)03-0042-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.03.011

李云成,梁永直,贾文沛,等.提高红外瓦斯传感器抗干扰性能及精度的研究进展[J].工矿自动化,2015,41(3):42-46.

提高红外瓦斯传感器抗干扰性能及精度的研究进展

李云成, 梁永直, 贾文沛, 容幸福

(太原理工大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:分析了影响红外瓦斯传感器抗干扰性能及精度的系统内部部件和外界环境因素,从吸收气室结构、信号调理电路、浓度转换算法、温度及压力补偿算法等方面论述了目前在提高红外瓦斯传感器抗干扰性能及精度方面的研究成果及进展。

关键词:瓦斯传感器; 红外吸收; 抗干扰; 测量精度

中图分类号:TD712.55

文献标志码:A

网络出版时间:2015-02-12 15:55

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150212.1555.011.html>

Research progress of improving anti-interference ability and precision of infrared gas sensor

LI Yuncheng, LIANG Yongzhi, JIA Wenpei, RONG Xingfu

(Institute of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Factors of inner components and outside environments on anti-interference ability and precision of infrared gas sensor were analyzed. Existing research achievements and progress were discussed about improving anti-interference ability and precision of infrared gas sensor from views of structure of absorption air-chamber, signal processing circuit, concentration conversion algorithm, temperature and pressure compensation algorithms, etc.

Key words: gas sensor; infrared absorption; anti-interference; measurement precision

0 引言

瓦斯爆炸是煤矿安全生产的重大威胁^[1]。目前瓦斯检测方法^[2]主要有燃烧催化法^[3-4]、半导体气敏法^[5-6]、气相色谱法^[7-8]、光干涉法^[9-10]等。基于燃烧催化法的瓦斯传感器是可燃气体专用传感器,其结构简单,成本低,对非可燃气体无反应,受水蒸气影响小,对环境温湿度的影响不敏感,不足之处是使用寿命低,易受硫化物中毒影响,在含氧量低的情况下检测误差较大,受热或被污染时灵敏度下降,需频繁调校及更换^[11]。基于半导体气敏法的瓦斯传感器采用相干光原理检测瓦斯浓度,其优点是制造成本低、灵敏度高、电路简单、寿命长并对湿度不敏感,缺

点是须在高温下工作、对气体的选择性差、元件参数分散、稳定性不理想、易因氧化而进入休眠状态、气体泄漏时无法及时反映^[12]。气相色谱法是一种分离分析方法,测量范围广,分离速度快,可达到较高的灵敏度,但采用该方法设计的瓦斯检测仪体积大,较为笨重,难以实现实时、在线检测。基于光干涉法的瓦斯检测仪测量准确、亮度高、视场清晰、使用方便、准确而高效,但其浓度指标显示不直观,易受温度、湿度、气压等因素的影响,在含氧量不足或氮氧比例失常时,易产生测量误差,且结构复杂,成本高,难以实现小型化^[13]。

基于红外吸收原理的瓦斯传感器具有气体选择性好、不易中毒、元件使用寿命长、灵敏度高、响应速

收稿日期:2014-06-17;修回日期:2015-01-19;责任编辑:李明。

基金项目:山西省社会发展科技攻关计划项目(20120313029-1)。

作者简介:李云成(1988-),男,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向为光机电一体化,E-mail:lyctyut@163.com。通讯作者:梁永直(1964-),山西太原人,讲师,博士,研究方向为智能传感器技术,E-mail:liangyongzhi@tyut.edu.cn。

度快、无需频繁调校、结构简单、易于小型化^[14-19]等优点。市场上已有多种矿用红外瓦斯传感器及便携仪^[20-24]。但红外瓦斯传感器检测信号微弱,且测量过程中存在多种干扰和噪声,如散光干扰、工频干扰以及散射噪声、热噪声等^[25]。另外,受外界温度、压力及湿度等因素的影响,红外瓦斯传感器的测量精度、稳定性和可靠性都会有一定程度的降低^[26]。因此,必须采用完善的系统设计方案和信号处理方式,以获得较高的抗干扰性能和测量精度。

1 红外瓦斯传感器抗干扰性能及精度的影响因素

红外瓦斯传感器由光学系统和电气系统 2 部分组成。瓦斯检测流程:由光源发出的红外光线经过气室中腔后被瓦斯气体吸收,则红外光线携带当前瓦斯浓度信息;探测器接收到红外信号并将其转换为电信号,信号调理电路将电信号进行放大滤波后传送至单片机处理,得到当前瓦斯浓度并进行显示^[27]。传感器的结构设计、元器件的选择和外部环境条件等会对其检测性能造成不同程度的影响。影响红外瓦斯传感器抗干扰性能和精度的因素主要包括以下几个方面。

(1) 吸收气室。气室作为红外瓦斯传感器的核心部件,直接影响测量精度。气室内壁设计、对光源的反射程度、气室长度及直径,都对传感器的灵敏度和响应时间有较大影响。

(2) 信号调理电路。红外瓦斯传感器检测到的信号十分微弱,只有十几到几十微伏,并且夹杂着大量噪声和干扰,因此,需要设计信号调理电路,抑制干扰和噪声,将有用信号保留并放大,再经模数转换后送入单片机进行处理。

(3) 浓度转换算法。浓度转换算法是根据瓦斯传感器采集数据的特点,采用合理的数值分析方法进行数据处理,拟合换算出瓦斯浓度。通过改进浓度转换算法,能够提升传感器的测量精度。

(4) 温度及压力。温度及压力对气体检测的影响呈现出复杂的非线性关系,因此误差补偿是提高红外瓦斯传感器检测精度的核心^[28]。

(5) 湿度。水蒸气会对瓦斯吸收产生干扰。瓦斯吸收峰值为 $3.33\ \mu\text{m}$,而水蒸气对波长为 $3.26\ \mu\text{m}$ 的红外光线有一个吸收峰值,导致测量误差。水蒸气遇冷凝结后,会在探测滤光片上形成水膜,水膜厚度变化引起滤光片表面对光的反射比变

化,导致探测器的响应度改变,产生测量误差^[29]。另外,红外瓦斯传感器长期工作于高湿环境中,会导致元件可靠性和稳定性变差,使得传感器可靠性下降。

2 提高红外瓦斯传感器抗干扰性能及精度的研究

针对影响红外瓦斯传感器抗干扰性能及精度的各种因素,许多研究人员在传感器设计和优化中不断探索和改进,使得红外瓦斯传感器的响应时间、精度和抗干扰能力有了极大提高。

2.1 吸收气室

为提高气室灵敏度,刘岗等^[30]提出了反射式红外气室的设计方法。该方法将气室内壁设计成镀金的旋转抛物面,红外光经抛物面反射成近似平行光束,增加了气体的吸收光程,提高了灵敏度。反射式气室采用 2 倍气室中腔长度估算光程,光线经过反射无法确定实际光程,导致瓦斯浓度检测误差较大。针对该问题,刘岗等^[31]采用半导体硅片状光源设计了一种新型直射式气室,其光程即气室中腔长度,测量结果更加准确。实验表明,采用直射式气室的红外瓦斯传感器的最大测量误差仅为 0.05% 。杨康等^[32]基于红外传感器的光学气室结构设计原则,推导出当光学气室的光程为 $60\ \text{mm}$ 、气室直径为 $15\sim 25\ \text{mm}$ 时,红外瓦斯传感器的响应速度较快。叶玮琳等^[33]设计了一种椭球体反射镜气室结构并进行优化,可使探测器输出信号幅度提高约 1.7 倍,有利于后续电路的信号放大、数模转换等处理。马仲扬^[34]提出单光源单光路单气室的气体红外检测系统,工艺简单,成本较低。沈锦荣^[35]、王霞等^[36]分别对多通道多光路气室进行了研究。前者采用一种多通道光路,提出在 1 个气室中分析多种气体成分的方法,结果表明该方法的检测精度和稳定性均达到较高水平;后者提出采用双光源四探测器的新型多光路系统设计方案,在长期工作稳定性和温度稳定性方面有较大提高。由于煤矿井下粉尘多且潮湿,刘永平等^[37]提出选用钨丝绕制成热辐射光源,既作为光源,又是加热元件,使气室结构简单,有利于传感器达到防爆性能要求。马勇等^[38]首次将积分球作为瓦斯传感器的吸收气室,充分利用了积分球可增加传感长度的优点,解决了以往瓦斯传感器气体传感长度和体积之间的矛盾关系,提高了瓦斯检测的灵敏度和稳定性。

2.2 信号调理电路

为提高红外瓦斯传感器的检测灵敏度和系统信噪比,刘东旭等^[39]采用单光路双波长方案,设计了以差动放大电路为核心的微弱信号处理电路,提高了传感器的检测灵敏度。该电路结构简单,实用可靠。梁刚等^[40]设计了高精度、低漂移的带直流基准电压的模拟放大电路,不仅对被选择的某一频率范围内的信号具有放大功能,而且对高频信号具有滤波功能。胡智芳等^[41]提出一种军品级标准放大电路,可将正弦信号放大 70 倍。

检测信号的难度在于信号中存在大量噪声,因此信号调理电路的关键任务是抑制噪声。薛晨阳等^[42]采用选频加窄带带通滤波器,配合中位值平均滤波的数据采集方法,很好地解决了低频调制红外瓦斯传感器信号的数据采集问题。郝世东等^[43]采用 2 路单电源供电的两级放大滤波电路,第一级电路实现信号的负反馈放大,第二级电路对信号进行滤波,两级电路均采用结构和参数完全相同的无限增益多反馈有源二阶带通滤波器,其反相端输入,失真较小,对元件灵敏度要求较低,效果良好。

2.3 浓度转换算法

在传感器应用技术中,需要根据传感器的特性曲线进行系统分析与设计,其中的关键问题是如何通过传感器输出数据获得精度高、形式简单的函数或曲线。肖贵贤^[44]、白宗文等^[45]分别介绍了二次插值法和分形插值法在传感器数据处理中的应用。前者采用抛物线近似代替区间内的实际曲线,拟合精度与线性插值法相比有很大提高,同时节省了表格数据存储空间;后者给出了一种基于分形插值法的数据处理方法,在实际数据处理中取得良好效果。这 2 种方法都具有精度高、编程简单、易于计算机实现等优点。

潘中桥等^[46]通过分析传感器采集的数据特点,提出了一种结合线性插值法和最小二乘法的新算法,即利用基于线性插值的查表算法求出瓦斯浓度,然后通过最小二乘法进行误差补偿,提高了传感器的测量精度。梁永直等^[47]对最小二乘法曲线拟合进行了分析,提出了一种改进的分段最小二乘法,通过测试数据对改进前后的拟合方法进行对比研究,证明分段最小二乘法能够有效提高气体检测精度,拟合误差小于 0.5%,且节省了存储空间,加快了运算速度,提高了检测灵敏度。张继龙等^[48]针对一些

曲线拟合方法对各个物理量的处理有失公平性,即通常只确保某一个物理量的拟合误差达到最小,而没有考虑其他物理量拟合误差的问题,提出了一种对每个物理量的重视程度相同的曲线拟合方法,并通过实际曲线拟合结果证明了该方法的正确性和有效性,具有较高的应用价值。

李卯东等^[49]指出改进的 BP 神经网络法拟合度较高,该方法克服了传统的最小二乘法拟合红外瓦斯传感器输出特性曲线时存在误差大、计算复杂,以及传统 BP 神经网络法拟合输出特性曲线时存在网络收敛速度慢、易陷入局部极小的问题,有效提高了红外瓦斯传感器的检测精度及响应速度。郑鸿飞等^[50]根据数据处理的最小二乘法原理,提出了一种动态测量的数据平滑方法,并利用神经网络良好的非线性映射能力,对标定数据进行输入/输出特性的反非线性逼近训练,结果表明,采用数据平滑方法可提高传感器测量准确度和抗干扰能力,采用神经网络进行数据处理较传统数据平滑方法,可将实验误差由 6.67% 降低到 0.98%。

2.4 温度补偿与压力补偿

矿用红外瓦斯传感器在应用中,探头受到环境温度 and 压力变化的影响^[51],其测量精度和工作可靠性都会降低。温度和压力变化越大,测量误差越大。一般采用恒温和恒压补偿装置及相应措施进行改善。

温度对瓦斯检测结果的影响很大且难以进行定量分析。王文萃等^[52]采用气室温控电路对气室内温度变化予以补偿,具体方法:将加热元件和热敏元件放在气室中,当气室温度低于恒温设定值时,热敏元件的电阻值就不等于恒温电阻值,打破电压平衡,驱动加热元件加热,温度升高,热敏元件的电阻值随之改变,当温度达到恒温值使电压平衡后,加热元件停止加热。通过放大器和三极管即可实现电阻值的比较以及对加热时长的控制。

环境温度对红外瓦斯传感器的影响不仅体现在朗伯-比尔吸收定律方面,而且直接影响红外光源的辐射强度、红外探测器件的灵敏度、探头前端电路中分离元件(如耦合电容)的特性等^[53]。李卯东^[54]通过实验测试发现环境温度 V_{CT} 与测量数据 V_C 存在近线性关系,建立了二者的数学模型: $\Delta V_{CT} = V_{CT} - V_C = K_C(t - t_0)$,其中 K_C 为常数, t 为环境温度, t_0 为标定温度。通过该模型对温度进行补偿,并

采用迭代法求得特定温度下的瓦斯浓度。

环境压力对红外瓦斯传感器测量的影响主要体现在朗伯-比尔吸收定律方面。吸收系数不仅与气体种类、入射光波长有关,还受环境温度、压力等因素的影响^[55]。在数据处理方面,刘炎等^[56]根据当前压力、压力与瓦斯浓度曲线拟合出的计算公式进行压力补偿。

3 结语

红外瓦斯传感器已广泛用于煤矿中,但产品性能参差不齐。总结的红外瓦斯传感器在结构和工艺方面的研究成果可降低内部部件对系统的干扰;补偿算法方面的研究成果可降低外界温度、压力等因素的干扰。由于中国煤矿环境复杂,红外瓦斯传感器的发展应该向智能化、集成化方向发展,其灵敏度、精度及稳定性等需要进一步提高,为煤矿安全生产提供更强有力的保障。

参考文献:

[1] 米建国,李继培. 依靠科技遏制瓦斯矿难[J]. 中国发展观察,2005(9):22-24.

[2] 王汝琳. 矿井瓦斯传感器的近代研究方法方向[J]. 煤矿自动化,1998,24(4):16-18.

[3] ONG K G, ZENG K, GRIMES C A. A wireless, passive carbon nanotube-based gas sensor[J]. IEEE Sensors Journal,2002,2(2):82-88.

[4] 谢宝卫,李国斌. 催化燃烧型瓦斯检测仪器性能特征及影响因素浅析[J]. 煤矿安全,2002,33(3):54-55.

[5] 蔡晔,葛忠华. 金属氧化物半导体气敏传感器的研究和开发进展[J]. 化工生产与技术,1997,4(2):29-34.

[6] 李巍,黄世震,陈文哲. 甲烷气体传感元件的研究现状与发展趋势[J]. 福建工程学院学报,2006,4(1):4-8.

[7] 张翔,张伟,刘金盾,等. 气相色谱测定厌氧发酵气组分优化条件研究[J]. 农机化研究,2007(7):199-201.

[8] 王晓梅,张玉钧. 大气中甲烷含量监测方法研究[J]. 光电子技术与信息,2005,18(4):8-13.

[9] 王茂光,陈明静,鹿祥瑞. 光干涉甲烷测定器的原理及修护[J]. 硅谷,2012(19):248-249.

[10] 柴化鹏,冯峰,白云峰,等. 瓦斯传感器的研究进展[J]. 山西大同大学学报:自然科学版,2009,25(3):27-31.

[11] 于震. 催化瓦斯传感器稳定性及提高检测可靠性的方法与实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2008.

[12] WU Q H, LEE K M, LIU C C. Development of chemical sensors using microfabrication and

micromaching techniques[J]. Sensors and Actuators B,1993,13(1/2/3):1-6.

[13] 郭鑫禾,王建学,刘宇轩. 光干涉瓦斯传感器的研究[J]. 煤炭学报,2000,25(增刊1):165-168.

[14] 刘中奇,王汝琳. 基于红外吸收原理的气体检测[J]. 煤炭科学技术,2005,33(1):65-68.

[15] E2V Technologies (UK). IR1xxx series miniature infrared gas sensors for hazardous areas[EB/OL]. [2014-05-05]. <http://www.archivedatasheet.com>.

[16] 卓邦远,刘海波. 一种高精度、高稳定性红外甲烷传感器的研究[J]. 现代科技,2009,8(7):98-99.

[17] 魏华. 煤矿安全中的非分光红外气体传感器[J]. 闽江学院学报,2010(2):97-99.

[18] 李小伟,马海燕,孙宗罡,等. 基于非分散红外(NDIR)原理的便携式瓦斯检测仪[J]. 山东科学,2008,21(1):66-68.

[19] 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):1224-1227.

[20] 祁泽刚,张永怀,孟艳锋,等. 基于智能红外气体传感器的仪表设计[J]. 计测技术,2010(增刊1):137-139.

[21] 郑顺卿,刘炎伟,刘正威,等. GJG4/100-H型甲烷传感器在超化煤矿的应用[J]. 中州煤炭,2010(7):89-90.

[22] 刘怀森,程伟,高修忠,等. GJG10H型红外甲烷传感器[J]. 煤炭科技,2010(1):80-81.

[23] 杨柳. 基于红外光谱的煤矿新型瓦斯传感器的设计[J]. 微型机与应用,2012,31(15):82-84.

[24] 马骥. 基于红外瓦斯传感器的瓦斯监测器设计[J]. 科技风,2012(15):63.

[25] 李明. 矿用红外瓦斯传感器系统抗干扰设计与信号处理[J]. 煤矿开采,2010,15(4):125-126.

[26] 彭继慎,赵末. 红外瓦斯传感器零点校正及温度补偿分析[J]. 煤矿机电,2009(1):54-56.

[27] 姚玉维,赵赛果,王汝琳. 新型矿用智能红外吸收瓦斯传感器的研究[J]. 工矿自动化,2008,34(2):28-31.

[28] 朱旭,陈俊峰,刘继东. 红外气体传感器的数据处理[J]. 自动化仪表,2007,28(4):57-60.

[29] KOHLER R, GOEBEL R, PELLO R. Effects of humidity and cleaning on the sensitivity of Si photodiodes[J]. New Developments and Applications in Optical Radiometry III,1991(28):211-215.

[30] 刘岗,梁庭,郇弢,等. 反射式红外甲烷传感器气室设计[J]. 传感器与微系统,2013,32(2):96-98.

[31] 刘岗,梁庭,郇弢,等. 红外甲烷传感器直射式气室设计[J]. 工矿自动化,2013,39(3):31-35.

[32] 杨康,杨绪军,刘健康,等. 红外甲烷传感器光学气室

- 设计[J]. 工矿自动化, 2013, 39(5): 22-26.
- [33] 叶玮琳, 王一丁, 宋占伟. 一种红外检测气室结构的设计和优化[J]. 半导体光电, 2010, 31(1): 144-147.
- [34] 马仲扬. 单光源单光路单气室的气体红外检测系统[J]. 电工技术, 2000(9): 31-33.
- [35] 沈锦荣. 多通道光路在气体分析中的应用[J]. 光谱实验室, 2001, 18(6): 730-732.
- [36] 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, 28(2): 152-154.
- [37] 刘永平, 黄存新. 矿用红外气体传感器的结构及光学系统的设计与实现[J]. 硅酸盐通报, 2009, 29(2): 400-405.
- [38] 马勇, 符江, 王焱. 基于积分球算法的新式瓦斯传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2010(7): 13-15.
- [39] 刘东旭, 王志斌, 张记龙, 等. 红外瓦斯传感器微弱信号处理电路设计[J]. 仪表技术与传感器, 2010(6): 69-71.
- [40] 梁刚, 马游春, 薛晨阳, 等. 红外 CH_4 检测仪的设计[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(6): 91-99.
- [41] 胡智芳, 李莉, 张海鹏. 红外甲烷传感器信号处理电路的设计原理[J]. 煤矿安全, 2011, 42(3): 65-67.
- [42] 薛晨阳, 谭秋林, 马游春, 等. 红外传感器的信号提取和数据采集的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2007(2): 45-46.
- [43] 郝世东, 梁永直, 夏路易. 红外气体传感器信号调理及数据处理[J]. 工矿自动化, 2013, 39(4): 27-30.
- [44] 肖贵贤. 二次插值法在传感器数据处理中的应用[J]. 黄石理工学院学报, 2007, 23(4): 54-56.
- [45] 白宗文, 张威虎, 周美丽. 分形插值法在传感器数据处
- 理中的应用[J]. 现代电子技术, 2007(14): 34-35.
- [46] 潘中桥, 马世伟, 孙波, 等. 红外甲烷气体传感器算法研究[J]. 电子测量技术, 2008, 31(12): 113-115.
- [47] 梁永直, 李卯东, 夏路易, 等. 红外甲烷传感器检测中的算法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2012(11): 149-150.
- [48] 张继龙, 甄蜀春, 曹鹏, 等. 实验数据的曲线拟合方法及其应用[J]. 测试技术学报, 2003, 17(3): 255-257.
- [49] 李卯东, 梁永直. 基于遗传优化的 BP 神经网络法在甲烷检测中的应用[J]. 工矿自动化, 2013, 39(2): 51-53.
- [50] 郑鸿飞, 张丽红. 智能传感器数据处理方法[J]. 电脑开发与应用, 2006, 19(11): 49-51.
- [51] 张广军, 吕俊芳. 红外线气体分析中环境温度 and 总压影响的补偿方法研究[J]. 计量学报, 1996, 17(3): 174-177.
- [52] 王文萃, 栾美生, 于彤彦. 红外甲烷气体检测仪的设计以及干扰分析[J]. 红外技术, 2009, 31(8): 458-460.
- [53] 荆宜青, 张全法, 宋璐, 等. 提高甲烷气体探测器抗干扰能力的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2009(10): 78-80.
- [54] 李卯东. 基于物联网的煤矿安全监测系统设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [55] 刘鹏, 杨学友, 杨凌辉, 等. 基于 MAX1452 硅压力传感器温度补偿系统的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2010(4): 61-64.
- [56] 刘炎, 张立斌, 蒋泽. 具有温度及压力补偿的矿用红外甲烷传感器设计[J]. 工矿自动化, 2012, 38(8): 7-10.