

文章编号: 1000-5862(2016)05-0465-04

基于双差分的高精度甲烷浓度探测系统

远双阳¹, 苟瑞君¹, 张楠²

(1. 中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051; 2. 北京宝林建筑安装工程有限公司, 北京 102400)

摘要: 现有的甲烷浓度检测系统大多采用窄带激光器、可调谐激光器等实现对甲烷特征波长位置的对准, 虽然可以有效提高检测精度, 但高性能激光器价格昂贵、结构复杂, 难以满足实际应用中需要小型化、便携化以及低成本的要求。据此设计了一种基于双差分的高精度甲烷浓度检测系统, 设计了浓度差分转换窗口, 可获取2组等效于窄带光对准的差分数据, 从而实现了仅用宽带红外二极管作为光源的高精度甲烷浓度探测系统。分析了该系统的工作原理, 推导了基于双差分的甲烷浓度函数, 给出了双差分的算法流程。实验采用LSIPD型PIN光电二极管与C30659型红外探测器采集响应光强, 利用GPro 500系列甲烷浓度检测仪作为标准检测设备对系统进行甲烷浓度检测误差分析。结果显示: 当甲烷体积分数小于4.0%时, 系统平均相对误差小于1.0%; 当甲烷体积分数高于4.0%时, 系统平均相对误差小于1.5%。验证了系统的可行性。

关键词: 光谱分析; 双差分; 甲烷浓度检测; 浓度标定

中图分类号: O 433 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2016.05.03

0 引言

甲烷(CH_4)是一种可燃性气体,也是瓦斯的主要成分^[1]。在工业生产中常常需要测试环境中的甲烷浓度,尤其在井下采矿的过程中,能否准确地获取甲烷浓度信息关系到井下工作人员的安全。

市场上的甲烷浓度检测设备多种多样,根据其工作机理划分大致分为催化燃烧型传感器、热导型传感器、气相色谱检测仪以及光学吸收法^[2-6]。催化燃烧型传感器将催化剂涂覆在探测器上,当被测气体与其产生化学反应时形成无焰燃烧,从而器件被加热,通过放热量计算甲烷浓度。该方法误差大、灵敏度低且易出现器件“中毒”现象。热导型传感器中采用热敏电阻等器件检测不同甲烷浓度条件下的热导率从而计算甲烷浓度。该方法虽然解决了器件“中毒”的问题,但是还是精度低、灵敏度差。气相色谱检测是色谱检测在气体中的延伸,根据不同气体的吸附速率不同而构成的,该方法具有精度高、速度快的特点,但是其设备结构通常较大不利于便携化,且每次吸附需要更换吸附检测瓶操作繁琐。光学吸收法是近年来被研究最多的甲烷浓度检测方法,主要分为直接吸收法和干涉法,该方法选择性好、稳定性好。

虽然光学吸收法有多种优势^[7-8],但其检测精度主要取决于特征吸收峰的对准程度,故为了获得较好的检测精度,常见的方法主要有:(i)采用可调谐激光器扫描被测气体的特征吸收波段,获得最强吸收位置(效果最好,精度最高,但系统成本大幅增加,且结构复杂,难以便携化);(ii)采用窄带滤光片限制入射光带宽,从而提高探测光强的信噪比(性能提升有限,合适的窄带滤光片制备困难);(iii)采用双气室差分的方法降低环境对甲烷浓度检测的干扰(主要用于抗干扰,对提高精度影响不大)等^[9-11]。基于以上分析,本文设计了一种基于双差分的高精度甲烷浓度探测系统,通过高低浓度窗差分实现对甲烷浓度检测精度的提高,通过有无待测气体的差分实现对系统抗干扰能力的提高。

1 双差分系统结构

系统结构如图1所示,在传统的基于红外吸收检测甲烷浓度的基础上,系统加入了一个由处理器驱动电机使其进行左右变换的窗口(窗体厚度为 d)。在2个窗口中分别充入高浓度甲烷样气1和普通空气2。其他部分与传统红外吸收型甲烷浓度检测系统类似,气室长度为 L ,通过气泵将待测气体抽入测试气室,经待测气体吸收后的探测光强由光电探测器检测得到,最终通过处理器中的算法实现甲

收稿日期: 2016-02-19

基金项目: 科技部国际科技合作项目(2012DFA10680)和国家自然科学基金(60637010)资助项目。

作者简介: 远双阳(1984-),河北任丘人,讲师,博士,主要从事安全科学与工程的研究。

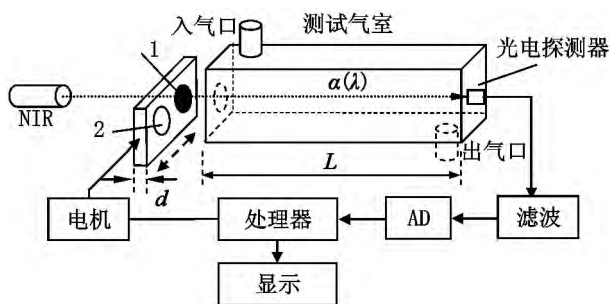


图1 基于双差分的甲烷浓度探测系统结构

烷浓度的求解. 在本设计中之所以称为双差分, 是因为其相比传统红外吸收法多了一次差分处理, 即采用1、2窗口实现了窄带光源对准的功能, 这是传统红外吸收法所不具备的, 这也是本方法在不采用调制扫描的基础上仍能大幅提高宽带光源检测甲烷浓度精度的优势.

2 理论计算

2.1 工作机理

双差分过程中需要进行4次数据采集: (i) 当测试气室中无被测气体时, 电机控制调节至1窗口, 得到光强 $I_{0|1}$, 表示光源经高浓度甲烷气体和初始状态气室时的检测光强; (ii) 当测试气室中无被测气体时, 电机控制调节至2窗口, 得到光强 $I_{0|2}$, 表示光源通过空气窗口和初始状态气室时的检测光强; (iii) 当测试气室中已经吸入了待测气体时, 电机控制调节至1窗口, 得到光强 $I_{x|1}$, 表示光源经高浓度甲烷气体和待测气体的检测光强; (iv) 当测试气室中已经吸入了待测气体时, 电机控制调节至2窗口, 得到光强 $I_{x|2}$, 表示光源通过空气窗口和未知浓度甲烷气体时的检测光强.

传统红外吸收法中的差分处理相当于本设计中仅采用2窗口得到2个光强量的差值, 这2个数据的差值主要用于消除干扰, 提高系统稳定性. 而本设计引入的窗口1中的高浓度甲烷气体可以实现在甲烷特征吸收峰位置对入射光能量全部吸收, 从而实现窄带对准的功能.

2.2 理论计算

根据光谱吸收理论, 甲烷气体存在可以强烈吸收特定的波长组, 而吸收量与甲烷气体的浓度是相关的, 即利用 Beer-Lambert 定律^[12] 可以定量分析甲烷气体浓度. 设入射光强为 I_0 , 探测光强为 I_x , 甲烷气体的吸收系数为 $\alpha(\lambda)$ 以及测试气室对应的有效长度为 L , 则传统吸收法的被测气体浓度为

$$c|_{\text{CH}_4} = \frac{1}{\alpha(\lambda)L} \ln(I_x/I_0). \quad (1)$$

而在双差分系统中, 将原有的初始光强和探测光强替换为浓度差分初始光强和浓度差分探测光强, 这样将浓度差分(1、2窗口的光强做差)使系统具有窄带对准特征吸收峰的效果.

由(1)式中光强表示的定义可知, 浓度差分初始光强可表示为

$$I_{0\text{等效}} = I_{0|2} - I_{0|1}, \quad (2)$$

浓度差分探测光强可表示为

$$I_{x\text{等效}} = I_{x|2} - I_{x|1}, \quad (3)$$

则双差分系统中甲烷浓度函数表达式有

$$c|_{\text{CH}_4} = \frac{1}{\alpha(\lambda)L} \ln \left(\frac{I_{x|2} - I_{x|1}}{I_{0|2} - I_{0|1}} \right), \quad (4)$$

其中 \ln 项内的分子等效于对待测气体浓度的探测光强值, 分母等效于初始光强值, 仍符合 Beer-Lambert 定律的形式. 在仅采用宽光源的条件下, 利用双差分算法可以获得类似于窄带激光器(或特征峰扫描)的吸收峰对准精度, 从而提高了系统的精确度及稳定性.

3 算法设计与浓度标定

3.1 算法流程

根据双差分系统的原理可知, 系统一共需要获取4个状态下的光强数据, 将这4组数据进行差分处理, 即可获得窄带激光照射被测气体的测试效果, 从而实现甲烷浓度的精确反演, 算法流程如下: (i) 向1窗口中充入高浓度(I_c)的甲烷气体, 2窗口充入普通空气, 此时气室为空气(无被测气体), 分别获得2个光强信息, 即 $I_{0|1}$ 和 $I_{0|2}$; (ii) 采用标准浓度的甲烷样气作为标定用气体, 充入气室, 分别获得2个光强信息, 即 $I_{x|1}$ 和 $I_{x|2}$; (iii) 求解标准甲烷浓度下的吸收系数值; (iv) 求解 $I_{x|2} - I_{x|1}$, 获得气室中标准甲烷浓度下的光强差, 求解 $I_{0|2} - I_{0|1}$, 获得气室中无待测气体下的光强差; (v) 由 Beer-Lambert 定律可知, 吸收系数为

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{c_{\text{标定}}L} \ln \left(\frac{I_{x|2} - I_{x|1}}{I_{0|2} - I_{0|1}} \right). \quad (5)$$

将计算得到的系统吸收系数保存, 在下次对未知甲烷浓度的气体测试时, 直接代入标定后的吸收系数和4个测试光强值即可求解甲烷浓度. 采用标准浓度标定吸收系数的方法比较简单直观, 相比计算查表等方法更接近于真实值.

3.2 浓度标定

由于在实际应用中, 被测区域的甲烷浓度变化一般都是实时监测的, 故一般是比较平稳变化的, 所以在反演浓度过程常采用低阶拟合的方式. 又因为

甲烷浓度的不同区间往往表达不同的含义,故每个区间的测试要求与严重程度有所不同,所以综合考虑后采用分段低阶插值的方式在获得吸收后完成甲烷浓度的反演. 设存在 $n + 1$ 个点 $\mu = x_0 < x_1 < x_2 < \cdots < x_n = b$, 其函数值有 $y_0, y_1, y_2, \cdots, y_n$, 则

$$q = \max_{0 \leq i \leq n-1} |x_{i+1} - x_i|, \quad (6)$$

若 $I_n(x)$ 满足: (i) $I_n(x)$ 在 $C[a, b]$ 内; (ii) $I_n(x_i) = y_i$; (iii) 在 $[x_i, x_{i+1}]$ 上 $I_n(x)$ 是线性的, 则 $I_n(x)$ 的分段线性插值函数可写为

$$I_n(x) = y_i \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} + y_{i+1} \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad (7)$$

其中 $I_n(x)$ 对应的误差函数为

$$R_n(x) = |f(x) - I_n(x)| \leq q^2 Q / 8, \quad (8)$$

由此, 将插值后的数据作为修正数据, 即可获得准确的甲烷浓度反演值.

4 实验

4.1 检测设备

系统采用 L1650-V6-SP 型红外二极管作为光源, 光电探测器采用 LSIPD 型 PIN 光电二极管. 1 窗口中充入体积分数为 90.0% 的甲烷样气, 2 窗口中充入普通空气, 窗口转换由处理器定时控制. 控制电机选用 YT 型可调速电机. 系统测试气室中光源到探测器距离 L 为 100 mm. 采用 GPro 500 系列甲烷浓度检测仪(检测范围 0 ~ 100%, 精度为 10^{-4}) 与本系统同时测试, 观察系统的检测性能.

4.2 检测结果与分析

在室内常温环境下向测试气室充入待测气体, 每充入一段时间后停止等待 3 min 使气室内气体彻

底稳定, 然后用本系统与 GPro 500 系列甲烷浓度检测仪分别测试甲烷浓度, 测试范围在 0 ~ 80.0%. 测试结果如表 1 所示.

从实验数据表 1 可知, 当甲烷体积分数小于 4.0% 时(现行矿井开采安全操作中要求当甲烷体积分数超过 4.0% 时要求井下全部断电停工, 故以 4.0% 为分界线), 本系统与 GPro 500 系列甲烷浓度检测仪的检测结果相比平均误差小于 1.0%, 可以实现快速准确地实时监测甲烷浓度的要求. 当甲烷体积分数高于 4.0% 时, 系统测试结果与标准检测设备的测试结果相比, 平均误差小于 1.5%, 同样符合实时监测的要求. 在该区间段的甲烷浓度检测主要是应对突发情况产生的快速甲烷气体泄漏现象. 由此可见, 本系统在没有采用高稳定性窄带激光器的条件下, 仅采用廉价的红外二极管(宽带光源)的基础上, 实现了对甲烷浓度检测总体平均误差优于 1.5% 的精度要求, 并且该结构紧凑可以实现小型化、便携化, 具有较高的实用价值.

5 结论

针对宽带光源甲烷气体浓度检测系统的精度较低的问题, 本文设计了一种基于双差分的高精度甲烷浓度检测系统. 实验采用宽带红外光源, 应用双差分算法实现了对甲烷气体浓度的检测, 测试结果与 GPro 500 系列甲烷浓度检测仪相比较, 实验结果表明甲烷体积分数在 0 ~ 80.0% 区间时, 系统总体平均相对误差小于 1.5%, 并且系统结构紧凑、成本低, 在小型化便携式方面具有较高的实用价值. 系统验证了系统的可行性.

表 1 甲烷浓度测试数据表 %

GPro 500 型甲烷 浓度检测仪	本系统	相对误差	GPro 500 型甲烷 浓度检测仪	本系统	相对误差
0.58	0.59	0.7	18.22	18.15	0.9
0.91	0.91	0.0	21.39	21.16	0.8
1.36	1.35	0.6	25.81	25.24	2.3
2.01	2.02	0.9	27.50	27.11	1.4
2.84	2.83	0.7	30.26	30.74	1.6
3.12	3.14	0.6	35.26	35.61	1.1
3.81	3.84	0.4	38.12	38.43	0.9
4.37	4.32	1.1	42.69	42.97	0.7
5.43	5.38	1.0	46.15	45.39	1.7
6.39	6.45	1.1	50.36	49.75	1.1
7.92	8.01	0.3	53.61	52.48	2.0
9.26	9.21	0.5	59.54	60.28	1.2
11.41	11.46	0.4	65.38	66.24	1.4
13.66	13.42	1.8	72.49	73.31	1.1
15.81	15.63	1.4	78.35	79.14	1.0

6 参考文献

- [1] 李彬,刘慧芳,何启欣,等.基于 1 654 nm 分布反馈激光器的甲烷检测系统[J].光谱学与光谱分析,2016,36(1):20-26.
- [2] 张悦,李晓,王志斌.基于热电效应的痕量气体检测技术研究[J].基于热电效应的痕量气体检测技术研究,2011,32(5):625-628.
- [3] 齐洁,董小鹏,沈炎鑫,等.基于扫描光源的光纤气体传感系统的研究[J].中国激光,2011,38(9):1-6.
- [4] 吴希军,王玉田,田瑞玲,等.取样光栅滤波的新型光纤甲烷差分检测系统[J].传感技术学报,2010,23(1):14-18.
- [5] Tan Qiulin,Tang Licheng,Yang Mingliang,et al. Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology[J]. Optics and Lasers in Engineering,2015,74:103-108.
- [6] 刘赞,王波,刘智超.一种新型甲醛质量浓度快速检测系统[J].河南科技大学学报:自然科学版,2016,37(4):101-105.
- [7] Lathdavong L,Shao J,Kluczynski P,et al. Methodology for detection of carbon monoxide in hot humid media by telecommunication distributed feedback laser-based tunable diode laser absorption spectrometry[J]. Applied Optics,2011,50(17):2531-2550.
- [8] 郑悦,党佩佩,叶玮琳,等.一种中红外差分甲烷检测仪的研制[J].光电子·激光,2016,27(4):366-369.
- [9] 曾盼,倪屹,高攀,等.基于可调谐半导体激光吸收光谱的甲烷传感系统[J].激光与光电子学进展,2015,52(12):123001-123004.
- [10] 乔记平,秦建敏,闫晓燕,等.基于 LabVIEW 与气体特征吸收光谱的甲烷浓度检测系统[J].仪表技术与传感器,2013,10:70-73.
- [11] 杨振,王贤平,桑明煌.基于双面金属包覆波导光强差分信号的波长锁定[J].江西师范大学学报:自然科学版,2014,38(2):136-138.
- [12] Triki M,Nguyen B M,Vicet A. Compact sensor for methane detection in the mid infrared region based on Quartz Enhanced Photoacoustic Spectroscopy[J]. Infrared Physics & Technology,2015,69:74-80.
- [13] 曹庄琪.空芯金属包覆波导传感器特性及应用领域分析[J].江西师范大学学报:自然科学版,2016,40(2):111-114.

Based on Double-Difference Precision Detection System for Methane Concentration

YUAN Shuangyang¹, GOU Ruijun¹, ZHANG Nan²

(1. Chemical Engineering and Environmental Sciences, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;

2. Beijing Po Lam Construction and Installation Engineering Company Limited, Beijing 102400, China)

Abstract: In the conventional methane concentration detection system, methane characteristic wavelength position was aligned used by narrow-band lasers, tunable lasers and so on. It can be achieved effectively improve the detection accuracy, but the high-performance lasers are expensive, complicated. So this method can not meet the practical needs of small, portable and low-cost requirements. Based on double-difference the high precision methane concentration detection system was designed. Conversion window of concentration differential was designed, it can get the equivalent of two narrow-band optical alignment difference data. Precision detection system for methane concentration is implemented only used by broadband infrared diode as a light source. Working principle of the system is analyzed, and the concentration function of methane was derived based on dual differential, while the double-difference algorithm flow was given. In experiments LSIPD type PIN photodiode and C30659 infrared detectors were used to collect the light intensity response. There was error analysis of the system to detect the concentration of methane by GPro 500 series methane concentration detector as standard testing equipment. The results show that when the methane concentration is less than 4.0%, average relative error of the system is less than 1.0%; When the methane concentration is higher than 4.0%, average relative error of the system is less than 1.5%. It verifies the feasibility of the system.

Key words: spectral analysis; double-differential; methane concentration detection; calibration concentration

(责任编辑:冉小晓)