

多点光纤瓦斯传感技术

樊士彬^{1,2} 徐红春^{1,2} 向雄^{1,2}

(¹武汉邮电科学研究院光纤通信技术和网络国家重点实验室, 湖北, 武汉 430074)
²武汉电信器件有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要 实验研究了近红外可调谐激光二极管吸收光谱技术(TDLAS)在气体监测中的应用,提出了在一种应用于煤矿瓦斯监测的光纤传感方法。该方法基于气体近红外波段的特征吸收,通过对窄线宽分布式反馈(DFB)激光器进行波长调制,并采用谐波检测技术,消除了光源波动和光纤抖动造成的影响,提高了瓦斯气体的测量灵敏度。同时,采用空分复用(SDM)技术组成光纤传感网络,提出了一种能实现在线监测的多点瓦斯传感系统,该方法降低了系统成本,能适应煤矿等恶劣环境的应用需求。

关键词 光纤传感; 瓦斯监测; 谐波检测; 空分复用

中图分类号 TN253

OCIS 060.2370 120.0280 280.4788

文献标识码 A

Multi-Point Optical Fiber Sensing Technology for Methane Detection

Fan Shibin^{1,2} Xu Hongchun^{1,2} Xiang Xiong^{1,2}

(¹State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks,
Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications (WRI), Wuhan, Hubei 430074 China)
²Wuhan Telecommunication Devices Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The application of near-infrared tunable diode laser spectroscopy (TDLAS) was investigated experimentally on gas detection, and the application on methane detection in coal mines with fiber sensor was presented. Based on gas absorption characteristics in near-infrared optical bands, with wavelength modulation on narrow-linewidth distributed feed back(DFB) laser, using harmonic detection technology, eliminating the effect of light source fluctuation and fiber jitter, the performance of measurement sensitivity is improved. By using the space division multiplexing(SDM) technology, a multi-point optical fiber sensor system for measuring methane is proposed. This method can reduce system costs, and will be adapted for requirement in harsh environments such as coal mines and so on.

Key words optical fiber sensor; detection of methane; harmonic detection; space division multiplexing

1 引言

随着国家对煤矿企业安全生产要求的不断提高和企业自身发展的需要,我国各大、中、小煤矿的高瓦斯或瓦斯突出矿井陆续装备矿井监测监控系统^[1]。据统计,国产安全检测用甲烷传感器几乎全部采用载体催化元件,然而,长期以来我国载体催化元件一直存在使用寿命短、工作稳定性差和调校周期频繁的缺点,严重制约着矿井瓦斯的正常检测。

为了预防与控制事故的发生,必须设置能在线实时安全检测甲烷气体浓度的仪器和设备,光纤传感技术可以极好地解决该难题^[2]。对于煤矿光纤瓦斯传感来说,与传统传感器相比,具有远距离在线实时测量、工作寿命长、稳定性高、抗干扰能力强、本质安全和节省维护费用等独特优势。光纤技术应用于传感领域时间虽然不是很长,但得到了较快的发展^[3]。

收稿日期: 2010-04-26; **收到修改稿日期:** 2010-06-18

作者简介: 樊士彬(1973—),男,工程师,本科,主要从事光通信用光电器件与模块等方面的研究。

E-mail: sbfan@wtd.com.cn

本文对光纤瓦斯传感的基本理论进行了分析,利用可调谐吸收光谱技术,采用波长调制和谐波检测的方法,设计出了适用于井下光纤瓦斯传感系统,并通过空分复用(SDM),实现了多点在线瓦斯监测。

2 基本原理和系统组成

光纤瓦斯传感的基本原理是利用气体分子(如 CO, CH₄ 等)对红外光均存在特征吸收,当特定波长的红外光通过瓦斯气体时(不同气体有各自的吸收波长),气体分子对特定波长的红外光有吸收作用,当气体浓度越大,其对红外光的衰减也就越大,对光的衰减情况进行相关计算,即可得到井下瓦斯气体的浓度。

根据比尔-朗伯定律,出射光强 I 与入射光强 I_0 和气体的浓度之间的关系式为

$$I = I_0 \exp[-\alpha(\lambda)CL], \quad (1)$$

式中 $\alpha(\lambda)$ 为气体吸收系数,即气体在一定波长 λ 处的吸收线型函数; L 为吸收路径的长度; C 为气体的浓度。

当 $\alpha(\lambda)CL \ll 1$ 时,(1)式可近似为

$$I = I_0 [1 - \alpha(\lambda)CL]. \quad (2)$$

为提高测量精度,一般采用近红外可调谐激光二极管吸收光谱(TDLAS)技术,通过波长调制和谐波检测来实现气体浓度的检测^[4,5]。对光源采用频率为 f 的信号进行直接调制时,光源的波长和输出功率也受到相应的调制。当光源的中心波长和气体的吸收波长对准时,考虑气体在一个大气压下的线型吸收洛伦兹函数,通过各项推导以及傅里叶变换,可以得到二次谐波与基波的光强比值为

$$\frac{I_{2f}}{I_f} = \frac{-k\alpha_0 CL}{\eta}, \quad (3)$$

式中 η 为激光器的调制深度; α_0 为气体谱线的吸收强度; k 为波长调制系数和气体吸收线宽之间的比值有关的量。用二次谐波与一次谐波的比值作为系统的输出,即可获得当前气体的浓度信息,同时也消除了光强波动所带来的误差。

典型的光纤气体传感器主要由光源、光路、气室、探测器和处理电路组成,如图 1 所示,光源发出的红外光经透镜耦合到光纤,然后通过长距离光纤传输到井下的开放气室,经气体吸收后通过光纤回传到地面的光探测器进行接收,最后经信号处理电路进行相关处理^[6]。

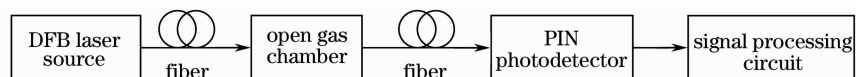


图 1 光谱吸收型光纤气体传感器原理图

Fig.1 Principle diagram of spectrum absorptive optical fiber gas sensor

1)光源 近年来,随着分布式反馈(DFB)激光器的在光通信中的广泛使用,生产成本大大降低,逐渐成为理想的窄带光源,其发射的光波长与气体的部分吸收谱线相重合,对于瓦斯气体而言,在近红外有多个吸收带,典型的吸收带为 1.6~1.85 μm ,常用的吸收波长为 1650 nm 左右的多个吸收峰。由于 DFB 激光器的波长对温度的变化比较敏感,因而系统需要相应的温控电路来保证其稳定度。

2)光路 光路采用目前广泛用于光纤通信中的石英单模光纤,由于其在 1.1~1.7 μm 近红外波段才具有低损耗的传输特性,因而对光源波长的选择有一定的限制,一般选择气体在近红外处的吸收波长。

3)气室 井下气室一般采用开放型,外面应放防尘防潮罩,一般采用特殊的高分子薄膜封装,为尽可能地提高光能传输效率,提高光电转换信息,在气室的光纤出入端、光源与光纤的入射端、滤波片的光纤出入端进行了耦合处理。按工作方式一般分为透射型气室和反射型气室^[7]。

4)光探测器 光探测器一般采用高灵敏度,低噪声的 InGaAs PIN 光电二极管来实现光的探测,其波长响应范围为 1100~1650 nm,该探测器也在通信系统中普遍使用,可很好地满足气体浓度测量的要求。

5)信号处理电路 光经过长距离光纤传输后,由于光纤和连接头的损耗,探测器接收的光十分微弱,因而对于探测器信号放大电路设计有较高的要求。信号光经光电转换放大和滤波电路后,由锁相放大电路提取出其中的包含气体浓度信息的谐波分量^[8]。

对于光纤气体传感器来说,其优点不仅在于适合于长距离在线测量、抗电磁干扰、安全可靠,更在于其能够组成一个光纤传感网络,实现大范围气体浓度的实时测量。由于光纤通信的迅猛发展,光纤和一些相关的

光学元器件成本也越来越低,这也为光纤传感网络提供了有利条件。同时,由于光纤气体传感需要特定波长的DFB激光器,对于甲烷来说,其吸收波长处于通信中的U波段,目前还没有大量使用,因而其价格相对比较昂贵。通过组网复用的方法,多个传感器共用一个DFB光源,可以降低整个系统的成本,同时也便于管理维护,实现多点测量,这可以说是光纤气体传感未来的发展方向。

采用空分复用技术组成光纤传感网络,则可以实现多点或多种气体实时监测。采用单光源的方法,经过光纤多路耦合器($1 \times N$ 路耦合器),分送到 N 路气室,再经过光纤回传到 N 个探测器,采用电子开关实现各通道的切换,经过信号处理,得到各单元点的浓度信息,系统结构图如图2所示。

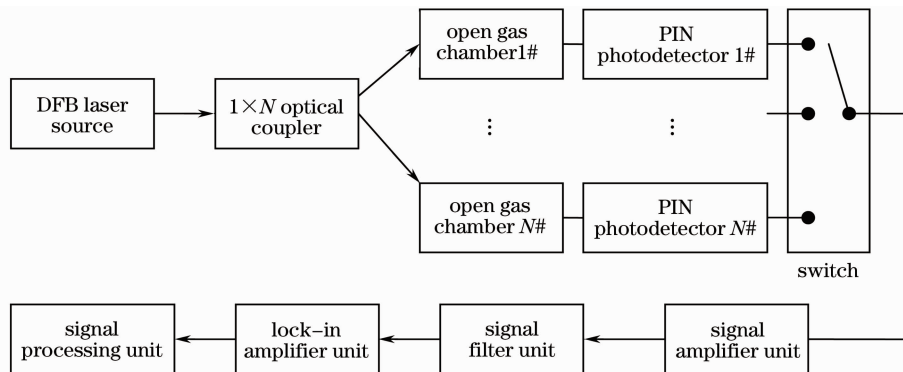


图2 光纤瓦斯多点传感系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of multi-point fiber sensing system

3 实验及结果

按照图2所示的方法,研制了光纤瓦斯多点传感系统,选用10 km长的G652单模光纤,其在1650 nm波段内的损耗小于0.5 dB/km,同时选用 1×32 路光耦合器和采用准直透镜制作的测量气室(光程长约为20 cm),经过10 km的光纤回传到光探测器中进行信号放大和处理。气室中充入气体的成分为 CH_4 和 N_2 的混合气体,考虑到煤矿井下对瓦斯气体的报警范围设定,配置有 CH_4 体积分数分别为0.1%,0.5%,1%,2%和4%的标准气体。系统浓度的输出由二次谐波与基波的幅度比值来决定,每次充入信号气体浓度之前,需要将气室中的残余气体用高纯 N_2 冲洗干净,然后再充入标准浓度的气体,以保证测量结果的准确性。

记录下不同标准浓度气体时,二次谐波与基波的比值,由于二次谐波信号较微弱,需要对其进行放大,以保证后续模拟/数字(A/D)测量转换的准确度,最终比值测量结果与标准气体浓度关系如图3所示。

从图中可以看出, x 轴为 CH_4 气体体积分数, y 轴为二次谐波与基波的比值,对实验结果进行拟合后,得到的拟合曲线为 $y=1.26x+0.11$ 。当 CH_4 气体体积分数为零时,由于激光器本身的电压直调会引入谐波失真量,实际中需要将该失真量扣除。同时,随着 CH_4 气体浓度的增大, $\alpha(\lambda)CL \ll 1$ 的近似会引入一定的误差,实际测量的谐波比值将比理论值偏小,图中的测量数据也反应出该点。当测量实际体积分数小于4%时,线性近似将是可行的。

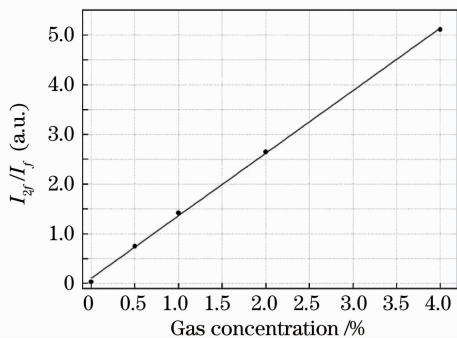


图3 谐波比值与气体浓度的关系

Fig. 3 Ratio of harmonics versus gas concentration



图4 光纤瓦斯多点传感样机外形图

Fig. 4 Profile of multi-point fiber gas sensing prototype

瓦斯气体的在线监测系统目前已研制出样机,可在线监测,实时显示各通道气体的浓度,监测点数可根据需要增加或减少;同时,在量程范围内可任意设定报警点,输出相应的报警信号,具有自检和自校准功能,并有相应的通信与调试接口,与传统的测量与报警仪器兼容,其外形如图4所示。

4 结 论

提出了一种基于SDM技术的瓦斯气体多点光纤传感系统,并且采用谐波检测技术,有效地在传感器通道中探测出微弱的气体浓度信号,可达到很好的效果。在更换或者复用不同波长激光器后,上述装置也可检测多种其他气体,如 H_2O 、 CO_2 、 CO 、 NO 、 SO_2 、 NH_3 、 C_2H_2 、 C_2H_6 、 H_2S 和 C_2H_4 等。因此,该光纤传感技术可望在包括煤矿、粮食存储、石油化工和电力等行业中得到更为广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 Yin Jian, Liu Junbo, Li Xuelai. Fiber methane sensor in coal mines[J]. *Safety in Coal Mines*, 2005, **36**(4): 39~41
殷 健, 刘俊波, 李学来. 矿用光纤瓦斯气体传感器[J]. *煤矿安全*, 2005, **36**(4): 39~41
- 2 Yu Hongbo, Liao Yanbiao, Jin Wei *et al.*. Review of the optical fiber gas sensor[J]. *Laser and Infrared*, 2002, **23**(3): 193~196
喻洪波, 廖延彪, 靳 伟 等. 光纤化的气体传感技术[J]. *激光与红外*, 2002, **23**(3): 193~196
- 3 Wang Tiejun, Zhang Lei, Dong Lei *et al.*. Minimum detection limit for methane with single laser remote sensing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 405~407
王铁云, 张 雷, 董 磊 等. 激光遥测甲烷气体最低可探测浓度[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 405~407
- 4 J. Reid. Second-harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory[J]. *Appl. Phys. B*, 1981, **26**(3): 203~210
- 5 Ruifeng Kan, Wenqing Liu, Yunjun Zhang *et al.*. A high sensitivity spectrometer with tunable diode laser for ambient methane monitoring[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 54~57
- 6 Wang Yutian, Liu Jin, Zhang Jingchao *et al.*. A methane gas sensor with optic fiber based on frequency harmonic detection technique[J]. *Measurement and Control Technology*, 2003, **22**(11): 19~21
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
- 7 B. Culshaw, G. Stewart, F. Dong *et al.*. Fibre optic techniques for remote spectroscopic methane detection-from concept to system realization[J]. *Sensors and Actuators B*, 1998, **51**(1-3): 25~37
- 8 Jiang Desheng, Ran Changyan, Bo Junjie *et al.*. Demodulation system of spectrum absorptive optical fiber gas sensor[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(4): 8~10
姜德生, 冉昌艳, 柏俊杰 等. 光谱吸收型光纤气体传感器解调系统的研究[J]. *光学与光电技术*, 2005, **3**(4): 8~10