

基于差分光谱吸收技术的双光纤光栅 乙炔测量系统

丁 晖 梁建奇 熊志辉

(西安交通大学电气学院, 陕西, 西安 710049)

摘要 提出一种基于双光纤光栅(FBG)差分光谱吸收技术的乙炔测量系统。以光纤光栅反射出的窄带光作为探测光, 基于红外吸收理论实现乙炔浓度的检测。通过引入参考光栅, 有效抑制了光路噪声、暗电流等干扰因素, 实现了大背景信号下微弱信号的测量; 利用数字滤波技术, 消除了系统响应信号中的低频干扰, 提高了系统的稳定性和可靠性。实验结果证明系统具有良好的测试重复性和较高的测试灵敏度, 最低检测限约为 25×10^{-6} 。本文的研究成果对进一步研究实现多组分混合气体的测试具有重要的意义。

关键词 光谱学; 差分光谱吸收; 双光纤光栅; 气体检测

中图分类号 TH744 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092902.0548

Double FBG System for Acetylene Sensing Based on Differential Absorption Spectroscopy

Ding Hui Liang Jianqi Xiong Zhihui

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract A differential absorption system based double fiber Bragg gratings(FBG) system for sensing acetylene is proposed. In this system the reflected light from FBG is used as the probing light to detect acetylene. By the introduction of a reference FBG, the noise from the light path is reduced greatly, so that the weak responding signals buried in the strong background signal can be picked out. Furthermore, by using digital filter, undesirable low-frequency periodic interference in the collected signal is removed, which makes the system more reliable and stable. The experimental results show that the system has high sensing sensitivity in detecting acetylene and the lowest detection limit is 25×10^{-6} . The proposed system has great potential for developing multi-gas sensing system in the future research work.

Key words spectroscopy; differential spectral absorption; double-fiber Bragg grating; gas sensing

1 引 言

乙炔的检测在环境污染监测、保障工业安全生产方面都具有重要的意义, 如高压电力变压器在生产高温过热故障和各种放电型故障(变压器局部放电、火花放电、油中电弧放电故障)时, 变压器油中会产生乙炔。通过对乙炔浓度进行在线检测, 可以有效判断变压器的各类故障^[1,2]。

光纤气体传感器由于具有的耐腐蚀、耐高温、抗电磁干扰等特点, 特别适用于危险环境下的气体检

测。如对煤矿中易燃、易爆气体的检测^[3,4], 火山喷发气体分析^[5]等。其中红外吸收式光纤气体传感器在众多光纤气体传感器中占据着重要的地位。

光纤气体传感器一般工作在近红外区, 而碳烃类气体在近红外波段($0.8 \sim 2 \mu\text{m}$)的吸收强度较弱^[6]。因此, 如何提高气体光谱吸收信号的信噪比, 提高系统的检测灵敏度, 是当前红外吸收式气体传感器的主要研究问题之一。此外, 根据量子力学理论可知, 不同的气体由于其分子结构不同, 具

收稿日期: 2008-05-15; 收到修改稿日期: 2008-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(60772016)资助课题。

作者简介: 丁 晖(1969—), 博士, 副教授, 主要从事光纤传感技术、智能传感器系统方面的研究。

E-mail: dinghui@mail.xjtu.edu.cn

有不同的红外吸收谱线。但对于碳烃类气体,彼此之间的特征吸收谱线的间隔小,甚至有交叉重叠的现象。如 CO 、 CO_2 、 C_2H_2 的吸收峰波长分别为 $1.567\ \mu\text{m}$ 、 $1.573\ \mu\text{m}$ 和 $1.530\ \mu\text{m}$ 。因此,在混合气体测试场合下,如何消除各种不同待测气体之间的相互交叉敏感,提高测试准确度是红外光谱吸收式传感器所要研究解决的另一主要问题。

目前常用的方法有半导体激光二极管^[4,7]和可调谐激光器法。前者对单一气体的测量具有很好的选择性,但由于调谐范围窄,不能用于多种气体测量的场合。可调谐激光器的输出波长可调谐范围较大,对待测气体具有良好的测试选择性,可用于多种气体测量。但是其目前昂贵的价格,极大地限制了在实际中的应用。

光纤光栅(FBG)作为一种新型的光学器件,近年来在光纤传感领域得到广泛的应用^[8~10]。FBG反射光的3 dB波长范围一般仅为 $0.1\sim 0.3\ \text{nm}$,而一般气体的吸收线宽为 $0.2\sim 0.5\ \text{nm}$ 。因此,利用FBG的反射窄带光作为待测气体的探测光,能够排

除其它非目标气体的影响,对单一气体实现良好的选择性测量。本文利用这一特点,构建了双光栅乙炔测试系统。此外,在本文的基础上,只要根据不同待测气体的吸收线波长,选择不同波长的FBG,就可进一步构建出多种气体测量系统。

2 系统组成及工作原理

系统的总体结构图如图1所示。光源采用中心波长为 $1550\ \text{nm}$ 的超辐射发光管(SLED),带宽为 $\pm 20\ \text{nm}$ 。通过调制其工作电流,使光源输出方波调制光 $I_0(\lambda, t)$ 。 $I_0(\lambda, t)$ 经环形器进入气室。测量光栅将中心波长为 λ_1 的出射光 $I_1(\lambda_1, t)$ 反射回气室。气室出射光经环形器,进入光电探测单元1。测量光栅的反射中心波长 λ_1 对应乙炔的强吸收峰: $\lambda_1 = 1530.37\ \text{nm}$ 。这样,探测光 $I_0(\lambda, t)$ 在 $\lambda = \lambda_1 = 1530.37$ 处的能量两次通过气室,相当于将待测物的吸收光程加长了1倍。参考光栅的反射光 $I_2(\lambda_2, t)$ 作为背景光,不被乙炔吸收,经环形器2直接送入光电探测单元2。

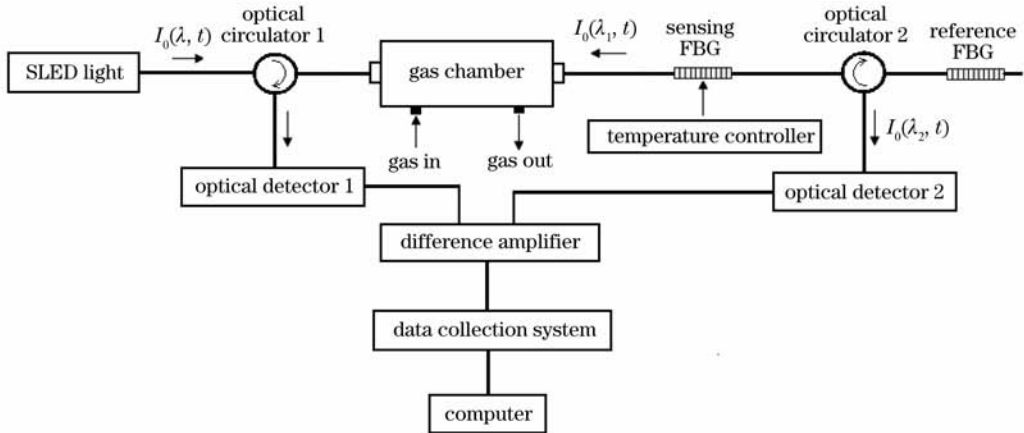


图1 系统结构框图

Fig.1 System structure diagram

为防止FBG中心波长与乙炔吸收峰之间可能存在的微小偏差引起测量灵敏度下降,利用FBG的温度可调谐性,将测量光栅置于恒温槽中。通过标定实验确定恒温槽最佳控制温度。在此温度下,系统具有最佳响应灵敏度,即认为此时光栅中心波长与乙炔强吸收峰是准确对准的。此外,恒定的温度也保证了光纤光栅反射中心波长的稳定性。

光电探测单元1的输出信号可表示为

$$u_1 = I_0(\lambda_1, t)k_1(\lambda_1)\mu_1 \exp[-\alpha(\lambda_1)C(2L)], \quad (1)$$

式中 $k_1(\lambda_1)$ 为测量通路的总传输系数,包括环形器1、气室耦合系数、测量光栅反射率等。 μ_1 为光电探测单元1的灵敏度, C 为待测气体浓度, L 为气室物

理长度,这里为 $30\ \text{cm}$, $\alpha(\lambda_1)$ 为待测气体在波长 λ_1 处的吸收系数。

考虑到乙炔在近红外段吸收很弱,即 $\alpha(\lambda_1)CL \ll 1$,式(1)可进一步写成

$$u_1 = I_0(\lambda_1, t)k_1(\lambda_1)\mu_1 [1 - 2\alpha(\lambda_1)CL] = u_0 + \Delta u, \quad (2)$$

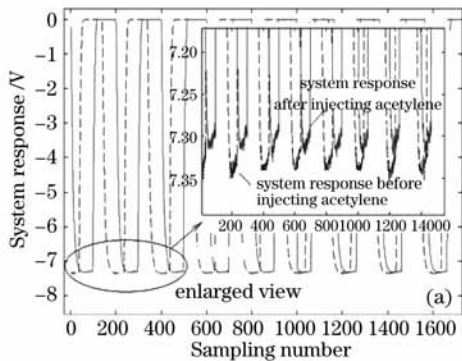
式中 $u_0 = I_0(\lambda_1, t)k_1(\lambda_1)\mu_1$, $\Delta u = -2I_0(\lambda_1, t) \times k_1(\lambda_1)\mu_1\alpha(\lambda_1)CL$

由于 $\Delta u \ll u_0$,因此对于单光栅系统,系统将输出一个较大的背景信号 u_0 。其中叠加一个微小的被测量变化 Δu 。本文利用参考光栅的反射光作为参

考光, 将信号 u_1 中的大部分背景信号 u_0 扣除。这样不仅能够提高系统的测试灵敏度, 同时对光路噪声, 光源输出不稳定性等各种干扰因素也能够起到一定的抑制作用。

3 实验结果与分析

按照图 1 所示系统结构组建了测试系统。SLED 的最大输出功率为 30 mW, 工作在光强调制情况下, 调制频率 $f = 500$ Hz; 光电探测器选用



PIN 光电二极管;

不使用参考光栅, 仅采用测量光栅, 对乙炔进行测量。图 2(a) 为注入体积分数 100×10^{-6} 乙炔前后光电探测单元 1 的输出信号。

从图中可以看到, 探测器输出信号中含有很强的背景信号, 乙炔的弱吸收, 只引起信号幅值发生了微小的变化。这样, 测量灵敏度很低, 系统测量准确度也难以保证。

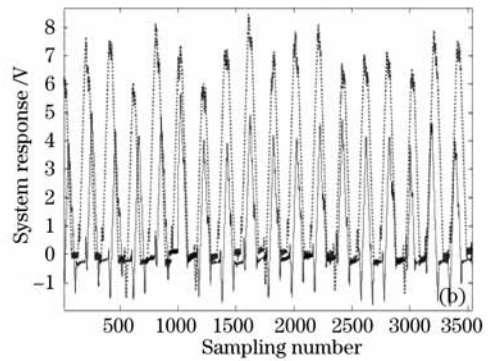


图 2 单光纤(a); 双光栅(b)系统对 10^{-4} 乙炔的响应信号

Fig. 2 Response of single FBG system (a), double FBG system (b) for 10^{-4} C₂H₂

图 2(b) 为双光栅系统对同样浓度的乙炔光谱吸收信号的测量结果。图中, 实线和点状线分别为注入 10^{-4} 乙炔前后双光栅差分放大信号 [图 1: $u(t)$]。对比图 2(a) 可以看出, 系统在注气前后信号变化的幅值约是单光栅系统的 40 倍。

及 2~4 次谐波分量, 对其余频率分量进行抑制。经过傅里叶反变换后得到图 4 所示结果。可见, 经过滤波处理, 信号幅值波动明显减小, 低频干扰得到明显抑制。

由图 2(b) 可见, 系统响应信号幅值有较大的波动, 含有较强的低频干扰信号。因此在对系统进行定标(气体浓度反演)之前, 首先对信号进行滤波处理。图 3 为输入 10^{-4} 乙炔, 系统差分放大信号 [即图 2(b) 中实线所示信号] 的傅里叶变换频谱图。

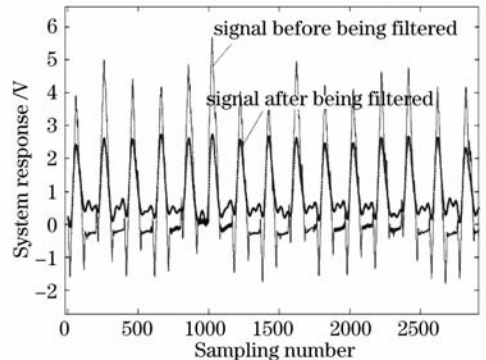


图 4 10^{-4} 乙炔响应信号经滤波处理前后对比图

Fig. 4 Comparison of original and filtered signal for 10^{-4} C₂H₂

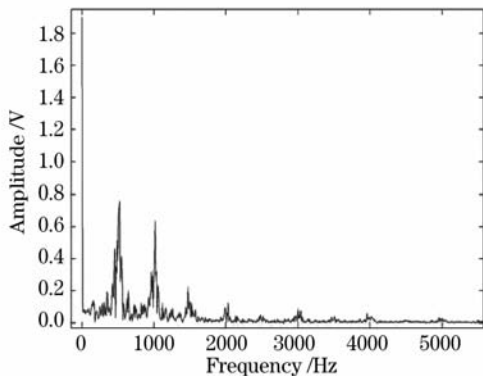


图 3 系统对 10^{-4} 乙炔响应信号的频谱图

Fig. 3 Spectrogram of system response signal for 10^{-4} C₂H₂

在信号处理时, 保留信号中直流分量、500 Hz

给系统注入不同标准体积分数的乙炔, 测量、记录系统在不同输入浓度下的差分响应输出信号: $u_i(t) (i = 0, 1, 2 \dots 11)$, 分别记录 10 个信号周期。计算在不同浓度下, 系统响应信号与系统在空气中响应信号的平均幅值之差, 最后得到系统标定曲线如图 5 所示。系统在体积分数 $0 \sim 150 \times 10^{-6}$, $150 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ 区间分别表现出良好的线性

关系。灵敏度分别约为 $20 \text{ mV}/10^{-4}$, $4.5 \text{ mV}/10^{-4}$ 。

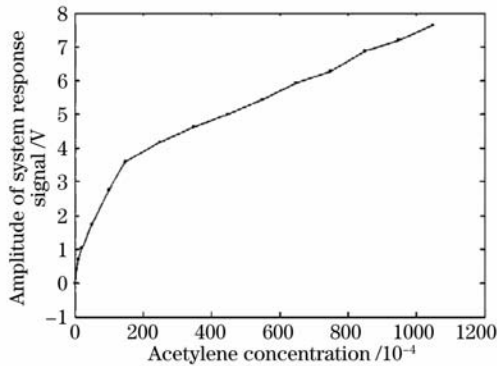


图 5 系统标定曲线

Fig. 5 Calibration curve

根据检测限的定义^[11], 当气室中为空气时, 对系统输出连续测量 20 次, 计算其标准差, 取置信度为 6, 经实验证明系统检测限为 25×10^{-6} 。

最后, 输入体积分数 50×10^{-6} 、 500×10^{-6} 、 800×10^{-6} 乙炔, 分别进行 12 次重复测量, 测量结果之间最大偏差均小于 3%, 系统重复性良好。

4 结 论

采用双光纤光栅差分吸收检测技术, 实现了大背景信号下微弱信号的检测。同时结合数字滤波技术, 对光路中存在的噪声、暗电流及信号中的低频干扰, 进行了有效的抑制, 提高了系统测试稳定性和可靠性。实验证明系统最低检测限约为 25×10^{-6} , 重复测量偏差小于 3%。

以光纤光栅反射的窄带光作为气体检测的探测光, 利于消除不同气体的交叉敏感, 提高气体测量的选择性。这对开发实现多组分混合气体的测量, 具有重要的意义, 也是本文下一步的工作。

参 考 文 献

- 1 Meng Zong. Study on absorption type optical fiber sensor of acetylene [J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2005, **126**(8): 27~28
孟宗. 吸收式光纤乙炔气体传感器的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2005, **126**(8): 27~28
- 2 Chen Weigen, Luo Mingcai, Zhang Song *et al.*. Restraining-interference method for photoacoustic signal detection of dissolved gases in transformer oil[J]. *High Voltage Apparatus*, 2008, **44**(2): 139~144
陈伟根, 罗明才, 张嵩等. 变压器油中溶解气体光声信号检测的干扰抑制方法[J]. *高压电器*, 2008, **44**(2): 139~144
- 3 Ulrike Willer, Mohammad Saraji, Alireza Khorsandi *et al.*. Near- and mid-infrared laser monitoring of industrial processes, environment and security applications [J]. *Opt. & Lasers in Eng.*, 2006, **44**(7): 699~710
- 4 Crawford Massie, George Stewart, George Mc Gregor *et al.*. Design of a portable optical sensor for methane gas detection[J]. *Sensors and Actuators B*, 2006, **113**(2): 830~836
- 5 Ulrike Willer, Dirk Scheel, Irina Kostjucenko *et al.*. Fiber optic evanescent field laser sensor for insitu gas diagnostics [J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2002, **58**(11): 2427~2432
- 6 A. D. Stuart. Optrode sensors for carbon monoxide. Proc. 15th Australian conference on optical fiber technology [J]. *Hobart, Australian*, 1991, **215**: 14~19
- 7 A. Lucchesini, S. Gozzini. Diode laser spectroscopy of ammonia and ethylene overtones[J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2004, **60**(14): 3381~3386
- 8 Guo Tuan, Liu Bo, Zhang Weigang *et al.*. Research on optical fiber grating chirp sensing technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 828~834
郭团, 刘波, 张伟刚等. 光纤光栅啁啾化传感研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 828~834
- 9 Yang Jian, Zhao Yong, Ni Xingjie. Development of novel fiber Bragg grating underwater acoustic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1575~1579
杨剑, 赵勇, 倪行洁. 新型光纤光栅水声传感器的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1575~1579
- 10 Zhang Jinlong, Yu Chongxiu, Wang Kuiru *et al.*. Displacement sensor with temperature compensation based on chirp fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 780~782
张锦龙, 余重秀, 王葵如等. 基于啁啾光纤光栅的温度自补偿位移传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 780~782
- 11 Jin Meilan, Zhong Yuehua. Discussion of the performance of gas chromatography [J]. *Measurement Technique*, 2007, **11**: 51~52
金美兰, 周月华. 气相色谱仪检测性能指标的讨论 [J]. *计量技术*, 2007, **11**(): 51~52