

文章编号 1004-924X(2012)01-0009-08

## 高灵敏度腔增强吸收式乙炔气体检测系统

陈 霄, 隋青美\*, 苗 飞, 贾 磊, 曹玉强  
(山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 基于超窄线宽激光特性和光源波长扫描技术, 构建了高灵敏度腔增强吸收式乙炔气体检测系统。该系统采用超窄线宽可调谐半导体激光器作光源, 使用两块高反射率平凹透镜组成的光学谐振腔作吸收池, 通过扫描腔长使入射激光频率与谐振腔模式相匹配, 利用激光失谐技术快速断开入射激光, 从而实现对微量乙炔气体浓度的衰荡测量。利用腔增强吸收技术测得了激光衰荡时间和  $6\,518.824\text{ cm}^{-1}$  附近的乙炔弱吸收光谱并进行了分析。结果表明, 乙炔气体浓度线性相关系数优于 0.999, 最大相对误差小于 2.5%, 极限检测灵敏度为  $2 \times 10^{-6}$ ; 逐次充入一定体积的乙炔气体, 动态响应时间均小于 10 s。该检测系统精确度高、灵敏度高, 具有较好的动态响应特性, 可用于电力变压器故障气体实时在线监测。

**关键词:** 乙炔; 浓度检测; 腔增强吸收技术; 超窄线宽激光; 激光失谐技术

**中图分类号:** O659.32; O657.319 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122001.0009

## High sensitivity acetylene detection system based on cavity enhanced absorption technique

CHEN Xiao, SUI Qing-mei\*, MIAO Fei, JIA Lei, CAO Yu-qiang

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

\* Corresponding author, E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

**Abstract:** Based on a wavelength scanning technique and the characteristics of ultra-narrow-linewidth laser, a kind of cavity enhanced absorption gas detection system with high sensitivity is designed. A semiconductor laser with ultra-narrow-linewidth and tunable wavelength is used as a light source, and an optical cavity which consisted of two mirrors with high reflectivity is also used as an absorption cell in this system. The laser frequency overlaps with one of cavity modes via scanning the cavity length and the input laser is switched off by using the laser detuning technique. Then, the ring-down detection of acetylene with low concentration is achieved. With the cavity enhanced absorption technology, spectra of acetylene near the region of  $6\,518.824\text{ cm}^{-1}$  and laser ring-down time at different concentrations are measured and also analyzed. The experiments for concentration measurement indicate that the relative error is less than 2.5%, relevance coefficient is 0.999 and the lowest detection limit is  $2 \times 10^{-6}$ . By filling a volume of acetylene into the gas cell gradually, the system dynamic response time is less than 10 s. Obtained results show that the system has advantages of good accuracy, high sensitivity.

收稿日期: 2011-03-08; 修订日期: 2011-07-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61074163)

ty and quick response, which can be used in the fault gas on-line monitoring for power transformers in real time.

**Key words:** acetylene; concentration detection; cavity enhanced absorption technique; ultra-narrow-linewidth laser; laser detuning technique

## 1 引言

乙炔是一种化学性质极为活泼的有毒气体,具有易燃烧、分解和爆炸等特点。乙炔气体是电力变压器绝缘油中故障气体的主要成分之一,因此对乙炔气体的浓度进行快速、实时在线检测在环境监测、变压器故障预测等领域具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

近年来,已有多种测量变压器绝缘油中乙炔气体浓度的方法,但干扰因素比较多,目前常使用的还是离线气相色谱法,即定期从变压器运行现场采集油样后,在实验室中使用气相色谱仪检测出油中溶解气体,进而诊断变压器的故障类型,但这种技术存在检测程序复杂、周期长,无法实现在线测量等缺点。在线监测技术采用高分子膜等材料进行油气分离并直接安装在变压器装置中对利用油中溶解气体的组分和浓度进行实时在线分析,能及时掌握变压器的运行状况<sup>[3-4]</sup>,因此十分受人关注。如光谱吸收测量技术是随着光纤传感技术发展出现的一种新型气体在线检测方法,该方法利用气体对窄线宽激光的吸收来获得高精度的气体浓度信息,实现气体的实时在线监测<sup>[5-14]</sup>。基于腔增强吸收光谱测量技术是在衰荡吸收基础上发展起来的一种高灵敏、高精度、快速响应的光谱吸收技术<sup>[15]</sup>,其利用激光器输出激光频率与谐振腔某一腔模共振匹配特性和激光失谐断开技术测得不同浓度下的激光衰荡时间,从而实现气体的超长光程在线检测。

本文利用超窄线宽激光特性和光源波长扫描技术,并结合谐振腔匹配光传输特性实现了微量乙炔气体的高灵敏度实时在线检测,为电力变压器故障预测和分析提供了有效的技术手段。

## 2 原理

### 2.1 腔增强吸收式测量技术

#### 2.1.1 气体浓度测量原理

腔增强吸收式浓度测量中的吸收池是一个由

两块相同的高反射率(反射率  $R \approx 99.96\%$ )平凹透镜组成的谐振腔(Fabry-Perot 腔),吸收池内的损耗主要为池内镜面损耗(镜面透射、散射、衍射等)和池内介质的吸收损耗。腔增强吸收技术要求耦合到谐振腔内的连续激光发生加强性干涉,即要求腔长  $L$  和光波长  $\lambda$  满足:

$$L = n(\lambda/2), n = 1, 2, 3, \dots, M, \quad (1)$$

由式(1)得知,当谐振腔的腔长为激光半波长的整数倍时,连续激光被耦合到谐振腔中,激光频率与谐振腔模式相匹配,发生加强性干涉,耦合进腔中的激光在腔内两块高反射率透镜之间来回反射。当耦合进谐振腔的激光被关断后,腔内激光在两个腔镜之间来回反射形成振荡出射的连续激光,激光透过谐振腔的强度随时间呈指数形式衰减。谐振腔的出射光强  $I(\nu)$  与入射光强  $I_0(\nu)$  满足  $I(\nu) = \frac{1}{e} I_0(\nu)$  关系时的时间称为衰荡时间,用  $\tau(\nu)$  表示,定义为<sup>[16]</sup>:

$$\tau(\nu) = \frac{L}{c[|\ln R| + k(\nu)L]}, \quad (2)$$

式中  $R$  为腔镜的反射率; $k(\nu)$  为气体吸收系数, $k(\nu) = pxS(T)\phi(\nu)$ ;  $p$  为腔内压强; $S(T)$  为温度  $T$  时气体吸收谱线线强,查阅 HITRAN 数据库获得; $c$  为光速; $x$  为腔内气体浓度; $L$  为 2 块高反透镜间距; $\phi(\nu)$  为吸收线型函数。

由于腔增强吸收式测量中高反透镜的反射率比较高,即  $R \approx 1$ ,所以  $|\ln R| \approx (1 - R)$ ,则式(2)可改写为:

$$\tau(\nu) = \frac{L}{c[1 - R + k(\nu)L]}, \quad (3)$$

即:

$$pxS(T)\phi(\nu)L = \frac{L}{c\tau(\nu)} + R - 1, \quad (4)$$

由式(4)得知,在温度、压强不变和高反透镜反射率已知情况下,谐振腔内气体介质浓度只与衰荡时间有关,激光耦合进谐振腔后切断入射激光测得激光在腔内的衰荡时间即可测得腔内气体浓度。

2.1.2 气体浓度测量灵敏度

系统浓度测量灵敏度可表示为输出光强变化与气体浓度变化的比值<sup>[17]</sup>,即:

$$\frac{\Delta I}{\Delta C} = -I_0(\nu)k(\nu)d. \quad (5)$$

由式(5)可知,在初始光强和吸收系数不变的情况下,气体检测的灵敏度与吸收光程长  $d$  有关。要提高系统灵敏度通常采用增加有效光程长的方法,腔增强吸收测量中,激光吸收的有效光程长为谐振腔的衰荡时间  $\tau(\nu)$  与光速  $c$  的乘积,由式(6)给出:

$$d = \frac{L}{(1-R) + k(\nu)L}. \quad (6)$$

由于腔内气体吸收系数比较小,即:  $k(\nu)L \ll (1-R)$ ,式(6)可改写为:

$$d = \frac{L}{1-R}. \quad (7)$$

由式(7)得知,在相同长度的腔内,气体的有效吸收光程提高了  $1/(1-R)$  倍,由于  $(1-R)$  数值非常小,系统能获得很长的有效吸收光程,极大地提高了系统浓度检测灵敏度。

2.2 激光失谐技术

腔增强吸收测量技术通过对腔衰荡时间的精确测量实现腔内气体浓度的高灵敏度检测。为了获得精确的衰荡时间,必须准确、快速地切断入射光源,使连续激光在腔内发生衰减振荡。激光失谐技术是利用激光调谐方法使激光频率与谐振腔模式不匹配,即激光被快速地调谐到与基模相隔半个模式间隔的波长来实现谐振腔入射激光的瞬间切断,切断时间在几十个纳秒范围内。激光失谐技术断开时间特性远远好于其他常用的切断设备,能迅速切断入射激光,有效地提高系统检测精度和灵敏度。激光失谐技术不需要由外部光开关(如声光调制器等)关断光源,系统更加简便,且能有效避免所选模式之外的其他模式被耦合到腔中。

2.3 光源波长扫描技术

超窄线宽可调谐半导体激光器波长扫描原理如图 1 所示,LD 和反射镜形成法布里-珀罗共振发光后,经光栅衍射产生的一级衍射光先投射到一个反射镜上,再由反射镜原路反射回光栅产生第二次衍射使一级衍射光反馈回激光器。当增益超过由部分反射和散射等多种因素引起的总损耗,谐振腔对其选频,特定频率的光波在谐振腔内积累能量并通过反射镜射出,形成激光。调节反

射镜与衍射光栅夹角可以选择不同的谐振波长,将反射镜与压电陶瓷相连,用函数发生器或信号发生电路扫描与反射镜连接的压电陶瓷,从而连续调节反射镜的位置,使激光器的输出波长在一定范围内扫描。

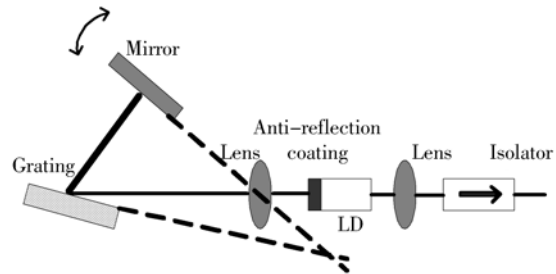


图 1 超窄线宽激光器原理图

Fig.1 Principle diagram of ultra-narrow-linewidth laser

3 实验装置及系统设计

3.1 激光光源测定及衰荡腔设计

系统选用超窄线宽半导体激光器作为光源,光源输出稳定,波长扫描范围广,激光带宽窄(约为 6 MHz),最大输出功率可达到 10 mW。激光器输出的超窄线宽激光具有能精确锁定气体吸收峰中心且带宽远小于气体单条吸收谱线宽的特性,有效排除了其它气体干扰,提高了系统浓度检测精度。

图 2 所示为设计的基于 16 位高精度数模转换芯片 DAC8532 的可调节信号发生电路,在 +5 V 工作电压下产生步进电压信号调节激光器内压电陶瓷,步进值为 0.3 mV。信号发生电路接入光源波长扫描端口调制激光器在  $6\,518.765 \sim 6\,518.885 \text{ cm}^{-1}$  内以  $0.004 \text{ cm}^{-1}$  步长输出激光。

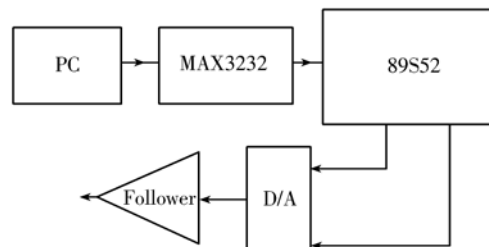


图 2 可调节信号发生电路图

Fig.2 Frame of adjustable signal circuit

衰荡腔选用内径约为 30 mm 的石英玻璃管,腔长约为 380 mm,腔内两侧分别固定了反射率约为 99.96% 的高反率球面透镜,透镜曲率半径

为 8 m, 腔镜间离  $L$  与透镜的曲率半径  $r$  之间满足稳定腔的条件  $0 < L < r$ , 其中一侧透镜与压电陶瓷(PZT)相连, 测量时利用驱动电路控制 PZT 以实现谐振腔长扫描。

### 3.2 传感系统设计

基于腔增强吸收技术的乙炔气体浓度检测系统如图 3 所示, 主要由超窄线宽激光光源、谐振腔式吸收池、压电陶瓷及控制部分、波长计、可调节信号发生电路、信号发生器、光电转换部分和信号处理等部分组成。

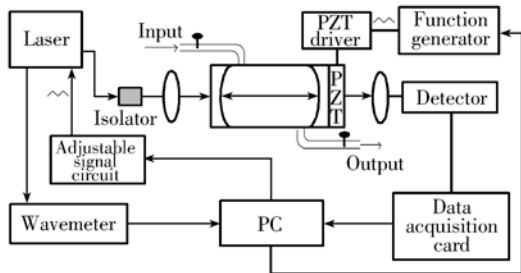


图 3 系统结构图

Fig. 3 Schematic of experiment system

实验中将可调节信号发生电路接入光源波长扫描端口调节激光输出波长, 同时将信号发生器(SP-F40)接入压电陶瓷驱动电路, 产生的三角信号驱动压电陶瓷扫描谐振腔长, 当激光器的输出激光频率与谐振腔的某一腔膜之间满足加强性干涉条件时, 激光被耦合到谐振腔式吸收池内。调制后的光源激光被分成两束, 当激光波长与谐振腔长之间满足耦合关系时, 一束激光经过隔离器(IO-F-1550)和准直透镜后耦合进谐振腔式吸收池内, 并在腔内多次反射被气体吸收, 吸收后的光信号透过谐振腔由光电探测器(NEW FOCUS 1811)接收, 光电转换后的电信号由速度为 40 MS/s 的 18 位数据采集卡采集后传入计算机, 同时计算机控制信号发生电路调节激光波长使其发生失谐断开并测得衰荡信号强度衰减为  $1/e$  的时间; 另一束激光直接输入与计算机相连接的波长计(HP 86120), 精确测量激光器的输出波长和功率, 并通过计算机记录。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 气体吸收谱线实验

选定乙炔气体  $\nu_1 + \nu_3$  带 P10 支  $6\,518.824\text{ cm}^{-1}$

处吸收光谱进行分析, 乙炔气体在此处的吸收线较强(线强为  $1.504 \times 10^{-22}\text{ cm} / \text{molecule}$ , 无其它相关气体干扰。气体吸收谱线测量前利用高纯氮气清洗腔体并对空腔损耗谱进行测量, 测得结果如图 4 所示。由于空腔损耗谱在较短的谱线范围

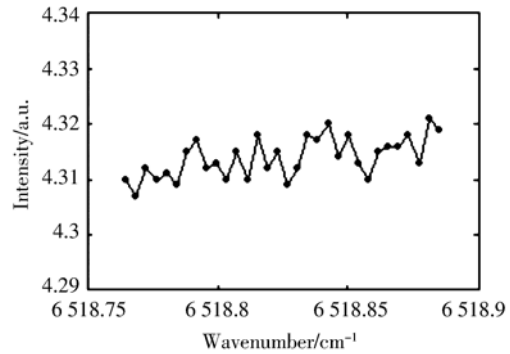


图 4 空腔损耗曲线

Fig. 4 Loss spectrum of empty cavity

内变化很小, 拟合时将它用常数项来表示, 由此分离空腔损耗值。用洁净的氮气清洗气室并将体积分数  $6 \times 10^{-4}$  的乙炔气体充入纯净气室内, 计算机控制可调节信号发生电路产生步进值为  $0.3\text{ mV}$  的电压信号, 并将其接入光源波长扫描端口调节激光器在  $6\,518.765 \sim 6\,518.885\text{ cm}^{-1}$  内以  $0.004\text{ cm}^{-1}$  步长输出激光, 同时每个激光波长上利用幅值为  $50\text{ V}$ 、频率为  $50\text{ Hz}$  三角信号扫描吸收池腔长, 测得吸收池透射光强最大时用计算机切断三角信号, 此时腔长为激光半波长整数倍, 激光能顺利耦合进吸收池。激光输出波长步进扫描非常缓慢, 可以认为激光与吸收池谐振腔耦合时每个激光波长是不变的。实验中保持气室压强和温度

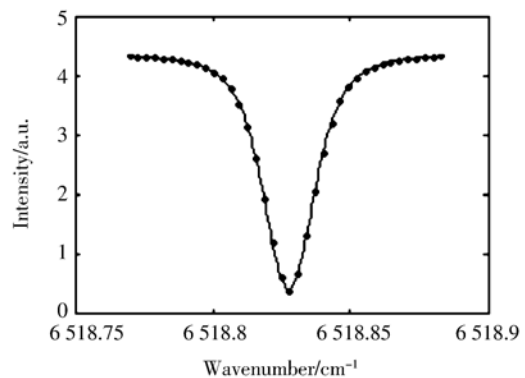


图 5  $6\,518.824\text{ cm}^{-1}$  附近乙炔吸收谱线

Fig. 5 Absorption spectrum of acetylene near  $6\,518.824\text{ cm}^{-1}$

分别为 1.5 kPa 和 296 K, 测得  $6\,518.765 \sim 6\,518.885\text{ cm}^{-1}$  内不同波长激光透射光强值, 每个波长的透射光强均为 10 次重复测量平均值, 用 Voigt 函数对测量结果进行拟合并分离出空腔损耗值<sup>[18]</sup>, 得到乙炔气体在  $6\,518.824\text{ cm}^{-1}$  附近吸收谱线如图 5 所示, 拟合后谱线半峰全宽 (HWHM) 约为  $0.017\text{ cm}^{-1}$ 。

#### 4.2 衰荡时间测量实验

将体积分数  $6.5 \times 10^{-5}$  乙炔气体充入用洁净氮气清洗过的气室进行激光衰荡时间测量实验, 保持气室压强和温度分别为 1.5 kPa 和 296 K。调节光源输出中心波数为  $6\,518.824\text{ cm}^{-1}$  的超窄线宽激光, 同时用幅值为 50 V、频率为 50 Hz 三角信号扫描谐振腔长, 测得吸收池透射光强最大时用计算机切断三角信号, 此时腔长为激光半波长整数倍, 激光能够顺利耦合进吸收池谐振腔内。保持吸收池压电陶瓷驱动电压不变, 计算机控制信号发生电路调节激光器压电陶瓷将激光快速调

谐到与基模相隔半个模式间隔的波长, 激光发生失谐断开, 无法耦合进吸收池谐振腔内, 原有的激光在腔内发生衰减振荡, 测得衰荡信号透射强度与时间关系曲线如图 6 所示, 由图得知吸收池腔内激光衰荡时间约为  $4.8\text{ }\mu\text{s}$ 。实验中将自动配气系统配置的 10 组不同标准浓度乙炔气体分别充入纯净的气室, 测量不同浓度下吸收池腔内激光的衰荡时间, 每个衰荡时间均为 10 次重复测量平均值, 测得乙炔浓度与衰荡时间关系曲线如图 7 所示。

#### 4.3 气体浓度检测实验

##### 4.3.1 精确度实验

将自动配气系统配置的 6 组不同标准浓度乙炔气体分别充入氮气清洗过的洁净气室, 保持气室压强和温度分别为 1.5 kPa 和 296 K。调节光源输出中心波数为  $6\,518.824\text{ cm}^{-1}$  的激光, 同时用幅值 50 V、频率 50 Hz 的三角信号扫描谐振腔长, 测得吸收池透射光强最大时用计算机切断三角信号, 此时腔长为激光半波长整数倍, 激光耦合进吸收池后利用激光失谐技术快速切断入射激光, 分别测得了不同输入浓度下的衰荡时间, 每个衰荡时间均为 10 次重复测量平均值, 根据所测衰荡时间算得气体实验测量浓度, 并将其与标准浓度进行直线拟合, 如图 8 所示。实验所测浓度与标准输入浓度线性相关系数优于 0.999, 测量最大相对误差小于 2.5%, 极限检测灵敏度为  $2 \times 10^{-6}$ 。

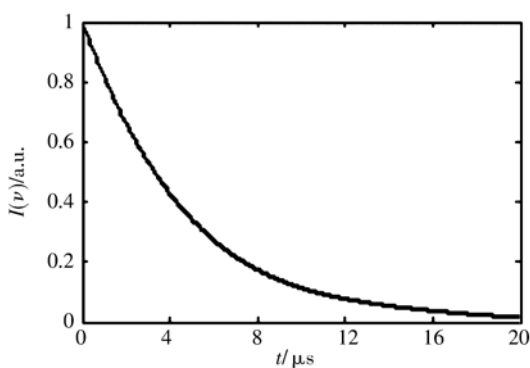


图 6 衰荡信号曲线

Fig. 6 Experimental curve of cavity ring-down signal

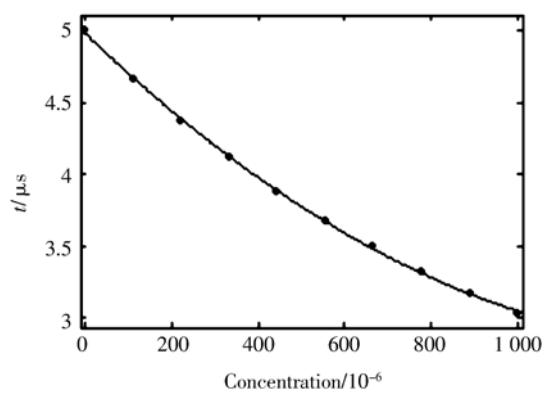


图 7 气体浓度与衰荡时间关系曲线

Fig. 7 Relationship between concentration and ring-down time

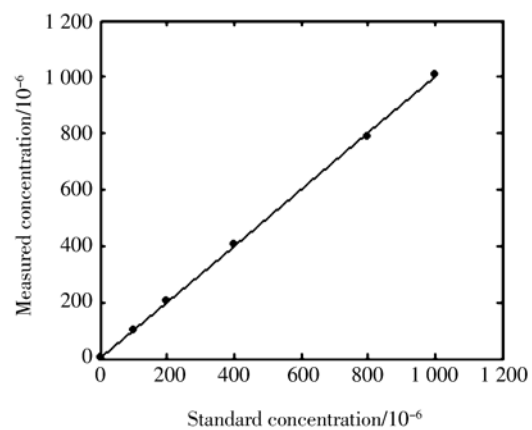


图 8 测量浓度与标准浓度拟合直线

Fig. 8 Measurement results and fitting straight line of multi-component gas concentration

##### 4.3.2 动态响应实验

用洁净的氮气清洗气室测试系统动态响应特性, 将气室中注入  $2 \times 10^{-4}$  标准乙炔气体, 打开乙

炔减压阀注入一定体积乙炔气体,关闭减压阀待测量稳定后再次打开减压阀注入一定体积乙炔气体,再次关闭减压阀待测量稳定后测得系统浓度响应曲线如图 9 所示,系统动态响应时间均小于 10 s,具有很好的动态响应特性。

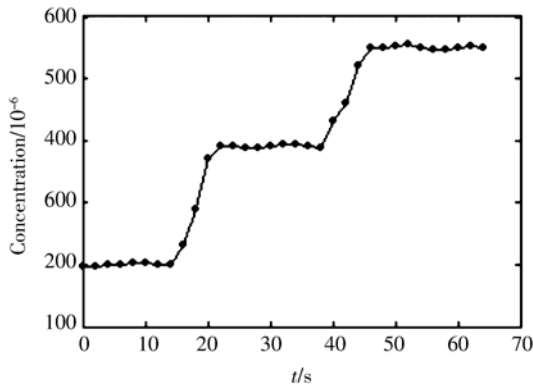


图 9 乙炔气体动态响应曲线

Fig. 9 System dynamic response in acetylene detection

#### 参考文献:

- [1] 许坤,周建华,茹秋实,等. 变压器油中溶解气体在线监测技术发展及展望[J]. 高压电技术, 2005, 31(8): 30-32.  
XU K, ZHOU J H, RU Q SH, *et al.*. A development and prospect of transformer oil dissolved gas on-line monitoring technology [J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(8): 30-32. (in Chinese)
- [2] 丁晖,梁建奇,熊志辉. 基于差分光谱吸收技术的双光纤光栅乙炔测量系统[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 548-551.  
DING H, LIANG J Q, XIONG ZH H. Double FBG system for acetylene sensing based on differential absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 548-551. (in Chinese)
- [3] 刘先勇,钟秋海,周方洁. 从变压器油中分离故障特征气体的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 56-60.  
LIU X Y, ZHONG Q H, ZHOU F J. Study on separating fault characteristic gases from transformer oil[J]. *Automation of Electric Power System*, 2005, 29(2): 56-60. (in Chinese)
- [4] DUVAL M. A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, 18(3): 8-17.

## 5 结 论

利用腔增强吸收测量技术和超窄线宽激光特性,结合光源波长扫描技术和激光失谐技术,精确测得乙炔气体在  $6\ 518.824\ \text{cm}^{-1}$  附近吸收光谱和不同浓度气体的衰荡时间,实现了微量乙炔气体浓度的高灵敏度实时在线测量,有效提高了系统的检测精度和灵敏度。实验结果表明,乙炔气体浓度测量线性相关系数优于 0.999,测量最大相对误差小于 2.5%,极限检测灵敏度为  $2 \times 10^{-6}$ ; 逐次充入一定体积乙炔气体,动态响应时间小于 10 s。该系统具有检测精度高、灵敏度高、动态响应快等特点,适合用于微量乙炔气体实时在线检测,在电力变压器安全监测等领域具有很好的应用前景。

- [5] 赵建华,赵崇文,魏周君,等. 基于近红外光谱技术的多组分毒性气体检测研究[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 567-572.  
ZHAO J H, ZHAO CH W, WEI ZH J, *et al.*. Study on monitoring multi-component toxic gases based on near-infrared spectroscopic method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 567-572. (in Chinese)
- [6] 庄须叶,吴一辉,王淑荣,等. 新结构 D 形光纤消逝场传感器[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1936-1941.  
ZHUANG X Y, WU Y H, WANG SH R, *et al.*. Optical fiber evanescent field sensor based on new type D-shaped fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1936-1941. (in Chinese)
- [7] 李亚萍,张广军,李庆波,等. 空间双光路红外  $\text{CO}_2$  气体传感器及其测量模型[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 14-19.  
LI Y P, ZHANG G J, LI Q B, *et al.*. Infrared  $\text{CO}_2$  gas sensor based on space double beams and its measurement model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 14-19. (in Chinese)
- [8] 吴希军,王玉田,刘学才,等. 棱镜气室在光纤甲烷检测系统中的应用研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1261-1267.  
WU X J, WANG Y T, LIU X C, *et al.*. Applica-

- tion research of prism gas cell in fiber optic methane sensing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1261-1267. (in Chinese)
- [9] 李丽,林玉池,付鲁华,等. 光纤光栅空分复用传感系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 473-477.  
LI L, LIN Y CA, FU L H, *et al.*. Research on spatial division multiplexing of fiber Bragg grating sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 473-477. (in Chinese)
- [10] 何莹,张玉钧,阚瑞峰,等. 基于激光吸收光谱开放式大气CO<sub>2</sub>的在线监测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(1): 10-13.  
HE Y, ZHANG Y J, KAN R F, *et al.*. Open-path online monitoring of ambient atmospheric CO<sub>2</sub> based on laser absorption spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(1): 10-13. (in Chinese)
- [11] 张雷,尹王保,董磊,等. 新型多功能矿用危险气体传感器的研究[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(5): 550-553.  
ZHANG L, YIN W B, DONG L, *et al.*. A novel versatile sensor for the hazardous gases under mines [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(5): 550-553. (in Chinese)
- [12] 陈东,刘文清,张玉钧. 可调谐半导体激光光谱火灾气体探测系统[J]. *中国激光*, 2006, 33(11): 1553-1556.  
CHEN D, LIU W Q, ZHANG Y J. Tunable diode laser spectroscopy system for fire gases sensing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, 33(11): 1553-1556. (in Chinese)
- [13] 刘琨,刘铁根,江俊峰,等. 基于波长调制技术的内腔式气体传感研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 105008.  
LIU K, LIU T G, JIANG J F, *et al.*. Investigation of intra-cavity gas sensing technology based on wavelength modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(1): 105008. (in Chinese)
- [14] 顾海涛,王欣,王健,等. 基于半导体激光吸收谱的在线CO和CO<sub>2</sub>浓度同时测量技术[J]. *光电子·激光*, 2009, 20(8):1070-1073.  
GU H T, WANG X, WANG J, *et al.*. An on-line CO and CO<sub>2</sub> concentration measurement technology based on LDAS[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(8):1070-1073. (in Chinese)
- [15] CHEUNG A S C, MA T M, CHEN H B. High-resolution cavity enhanced absorption spectroscopy using an optical cavity with ultra-high reflectivity mirrors[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2002, 353(3-4): 275-280.
- [16] ENGELN R, BERDEN G, PEETERS R, *et al.*. Cavity enhanced absorption and cavity enhanced magnetic rotation spectroscopy [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, 293(5-6): 331-336.
- [17] 乔学光,王佳,贾振安,等. 光纤CH<sub>4</sub>气体传感器的实验研究[J]. *光电子·激光*, 2009, 20(7): 851-854.  
QIAO X G, WANG J, JIA ZH A, *et al.*. Experiment research for fiber methane gas sensor [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(7): 851-854. (in Chinese)
- [18] 夏慧,刘文清,张玉钧,等. 可调谐二极管激光光谱技术测量燃烧环境下H<sub>2</sub>O浓度的实验设计[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(3):214-217.  
XIA H, LIU W Q, ZHANG Y J, *et al.*. Experimental design of H<sub>2</sub>O concentration measurement with tunable diode laser spectroscopy in combustion environment[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(3):214-217. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈 霄(1985—),男,江苏连云港人,博士研究生,2007年于山东大学获得学士学位,主要从事光电子技术,光纤传感技术等方面的研究。E-mail: cx\_012003@yahoo.com.cn



隋青美(1963—),女,山东东营人,博士,教授,博士生导师,1983年、1986年于山东工业大学获得学士、硕士学位,2001年于天津大学获得博士学位,主要从事检测理论与应用,光纤传感技术等方面的研究。E-mail: qmsui@sdu.edu.cn



苗 飞(1979—),男,山东淄博人,博士研究生,2003 年于东南大学获得学士学位,主要从事光电子技术,光纤传感技术等方面的研究。E-mail: mr\_miaofoei@mail.sdu.edu.cn



曹玉强(1963—),男,山东威海人,教授,硕士生导师,1990 年于山东工业大学获得硕士学位,主要从事生产过程计算机控制系统、新型传感技术方面的研究。E-mail: cx\_012003@163.com



贾 磊(1959—),男,山东人济南人,博士,教授,博士生导师,1993 年于浙江大学获得博士学位,主要从事流程工业计算机信息集成与自动控制系统、智能交通、光纤传感等方面的研究。E-mail: cx\_012003@163.com

#### ● 下期预告

## 中间视觉条件下的道路交通安全照明技术

赵建东<sup>1</sup>,杨 勇<sup>2</sup>,李兆轩<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院,北京 100044;

2. 交通运输部 公路科学研究院,北京 100088)

为有效评价在中间视觉条件下的道路交通安全照明问题,研制了反应时间测定仪。通过采集 LED、高压钠灯、金卤灯 3 种不同光源背景下人眼观测目标的反应时间,研究了在中间视觉条件下各种光源的视觉功效。首先,测试在不同背景亮度、视标对比度、视标偏心角条件下,人眼对不同光源下视认视标的反应时间数据;其次,利用相关系数法对数据进行回归分析,得出反应时间与不同背景亮度、视标对比度和视标偏心角的关系;最后,基于视觉功效法分析研究 3 种光源在中间视觉条件下的反应时间趋势和道路交通安全照明光源光效。当背景亮度小于或等于  $1.5 \text{ cd/m}^2$  时,高压钠灯与金卤灯、LED 灯产生相同的视觉功效,高压钠灯所需背景亮度最大,金卤灯次之,LED 灯最小。在中间视觉条件下,LED 作为道路照明光源时,其视觉功效优于其他 2 种光源。