

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0248-04

# 基于吸收光谱技术的两种气体浓度的在线检测

尚 盈 魏玉宾 王 昌 李艳芳 张婷婷

(山东省科学院激光研究所, 山东省光纤传感技术重点实验室, 山东 济南 250014)

**摘要** 可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术是利用二极管激光器的波长调谐特性, 获得被选定的待测气体特征吸收线的吸收光谱, 从而对待测气体进行定性或定量分析。油中溶解气体分析是评估变压器绝缘状态和分析变压器绝缘故障的重要依据, 针对监测故障气体  $\text{CO}_2$  和  $\text{C}_2\text{H}_2$  的需要, 将 TDLAS 技术与多次反射杯特池技术、谐波检测技术以及光开关的时分复用技术相结合, 设计了一套同时在线监测  $\text{CO}_2$  和  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体浓度的系统。该系统具有精度高、选择性强、响应速度快和本质防爆等优点, 适用于电力变压器故障气体的在线检测。

**关键词** 光谱学; 吸收光谱技术; 谐波检测;  $\text{CO}_2$ ;  $\text{C}_2\text{H}_2$ ; 变压器; 故障气体

**中图分类号** O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0248

## Two Gas Concentration on-Line Monitoring Based on Absorption Spectra

Shang Ying Wei Yubing Wang Chang Li Yanfang Zhang Tingting

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong Province,

Laser Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250014, China)

**Abstract** Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) technique is a method to detect trace-gas qualitatively or quantitatively based on the scan characteristic of the diode laser used to obtain the absorption spectroscopy in the characteristic absorption region. The dissolved gas analysis (DGA) is essential for the insulation state assessment and the fault diagnosis of transformers. In order to monitor the fault gases  $\text{CO}_2$  and  $\text{C}_2\text{H}_2$ , a set of system of simultaneous online monitoring the concentrations of  $\text{CO}_2$  and  $\text{C}_2\text{H}_2$  is designed, and this system makes use of TDLAS technique combined with multiple reflection pool, harmonic detection and time-division multiplexing optical switch technique. The system has benefits of high accuracy, selectivity, fast response and the nature of explosion-proof, which is suitable for power transformer fault gases on-line monitoring.

**Key words** spectroscopy; absorption spectra technique; harmonic detection;  $\text{CO}_2$ ;  $\text{C}_2\text{H}_2$ ; transformer; fault gases

### 1 引 言

可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术利用可调谐半导体激光器窄线宽和波长可调谐特性检测气体的单根分子吸收谱线, 它与波长调制技术及二次谐波检测技术相结合, 是一种高灵敏度、高选择性、快速在线非接触测量的检测技术<sup>[1,2]</sup>, 在环境监测<sup>[3]</sup>、煤矿安全监测、医疗和电力设备监控<sup>[4]</sup>中得到了广泛应用。本文采用 TDLAS 技术在线检测变

压器中的标志气体浓度, 得知变压器的运行状况。

电力变压器是变电站的主要设备之一。而对变压器油中气体的检测分析是对变压器运行状态进行判断的重要监测手段。变压器在运行中由于种种原因产生的内部故障, 如局部过热、放电、绝缘纸老化等都会导致绝缘劣化和产生一定量的气体溶解于油中, 不同的故障引起油分解所产生的气体组分也不尽相同, 从而可通过分析油中气体组分的含量来判

收稿日期: 2010-03-16; 收到修改稿日期: 2010-05-28

基金项目: 煤矿采空区自然发火火灾光线在线预测预报系统(2009GG10007016)和煤矿安全可靠监控系统关键技术研究(2009BAK54B01)资助课题。

作者简介: 尚 盈(1981—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事测试技术和光纤传感器方面的研究。

E-mail: sy81012607@163.com

断变压器的内部故障或潜伏性故障<sup>[5]</sup>。

变压器内部故障中包括放电产生  $C_2H_2$  气体，油和纸过热产生  $CO_2$  气体。为了能及时、准确地反映变压器的运行状况，在分析  $CO_2$  和  $C_2H_2$  气体红外吸收光谱特性的基础上，将吸收式光纤传感技术、谐波检测技术及计算机数据处理技术相结合，本文研制了一套  $CO_2$  和  $C_2H_2$  气体浓度在线监测系统。该系统具有灵敏度高、响应速度快等优点，特别是传感探头不带电、本质防爆的特点，适用于电力变压器故障气体在线监测。

## 2 基本原理

当一束光强为  $I_0$  的输入平行光入射到待测气体中时，光通过气体发生衰减。根据 Lambert-Beer 定律<sup>[6]</sup>，输出光强  $I(t)$  与输入光强  $I_0(t)$  和气体浓度之间的关系为

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

式中  $\alpha(\nu)$  为气体吸收系数，即气体在一定频率  $\nu$  处的吸收线型， $L$  是吸收路径的长度， $C$  是待测气体的浓度。

痕量气体含量比较低，吸收信号比较弱，用直接吸收的方法难以探测到。而谐波检测已经被广泛应用于弱信号的检测中。使用频率为 10 kHz 的正弦波对激光器进行调制，然后用它的二倍频信号进行解调，得到吸收的一次、二次谐波信号。使用该方法来提高系统的检测灵敏度<sup>[7~9]</sup>。

在近红外波段，气体吸收系数很小，满足  $\alpha(\nu)CL \ll 1$ ，这样(1)式可近似为

$$I(t) = I_0[1 - \alpha(\nu)CL], \quad (2)$$

将(2)式展开为傅里叶级数序列，它的一次谐波和二次谐波的系数分别为<sup>[10~12]</sup>

$$I_1 \propto I_0, \quad (3)$$

$$I_{2f} \propto \alpha_0 CL I_0, \quad (4)$$

于是有

$$\frac{I_{2f}}{I_1} \propto \alpha_0 CL. \quad (5)$$

由(5)式可见，二次谐波和一次谐波的比值不含  $I_0$  项，这样用其作为系统的输出可以消除光源波动等噪声的影响。

## 3 系统设计及工作原理

### 3.1 系统设计

基于分布式反馈激光器(DFBLD)的双光源光谱吸收式两气体检测系统框图如图 1 所示。系统由

双光源电路、传感器、检测电路和数据处理单元组成。双光源电路由驱动调制电路和温控电路组成。系统采用 1532 nm 和 1608 nm 的双 DFBLD 分别用于检测  $C_2H_2$  气体和  $CO_2$  气体，光源驱动调制部分又称波长调制驱动调制电路，主要由低频调制锯齿波、高频正弦调制和光源驱动 3 部分电路组成。在该系统中锯齿波频率采用 100 Hz，正弦波频率为 10 kHz。由于光源受温度影响其波长漂移比较严重，所以必须对光源进行恒温控制，使其工作在恒温状态。传感器是指怀特池，怀特池是开放式气室，激光在气室内经过多次反射光程达到 10 m，光通过气室时，由于气体的吸收而使一次、二次谐波发生变化，从而通过检测一次、二次谐波确定气体浓度。检测电路主要由光电转换、放大滤波电路组成。数据处理单元由锁相放大、数据采集和上位机数据处理组成。

### 3.2 工作原理

可调谐半导体激光器的温度控制和偏置电流控制电路实现激光器的中心波长和输出功率的调节控制，频率为 10 kHz 的高频调制正弦信号和频率 100 Hz 的低频调制锯齿波改变输入电流，使激光器输出的激光波长扫描被测气体分子的吸收线，如图 1 所示。双光源共用一组锯齿波和正弦调制波电路，而拥有各自的温度控制和偏置电流控制路，从而可以实现在 1532 nm 和 1608 nm 两个吸收线处的浓度监测。双光源通过光开关将经过调制的激光发送到开放式的怀特池气室，吸收后的激光经过检测电路转换为电信号，随后传输到锁相放大器，以参考信号的二倍频(20 kHz)进行解调，得到怀特池中气体吸收谱线的一次、二次谐波信号，由数据采集卡对锁相放大器出来的一次、二次谐波信号进行模拟/数字(A/D)转换，经过数据处理计算得出相应的气体浓度值。

## 4 实验结果

将  $C_2H_2$  标气分别由配气系统配置为  $10 \times 10^{-6}$ ， $20 \times 10^{-6}$ ， $40 \times 10^{-6}$ ， $50 \times 10^{-6}$ ， $80 \times 10^{-6}$ ， $100 \times 10^{-6}$  体积分数的  $C_2H_2$  气体，将  $CO_2$  标气配置为 0.4%，0.5%，0.8%，1% 体积分数的  $CO_2$  气体，将配置好的不同浓度的气体依次通入开放式的怀特池气室，通过上位机软件控制光开关通道的选通，第一通道为  $CO_2$  气体，第二通道为  $C_2H_2$  气体，图 2 是  $C_2H_2$  气体和  $CO_2$  气体吸收后的二次谐波图形。

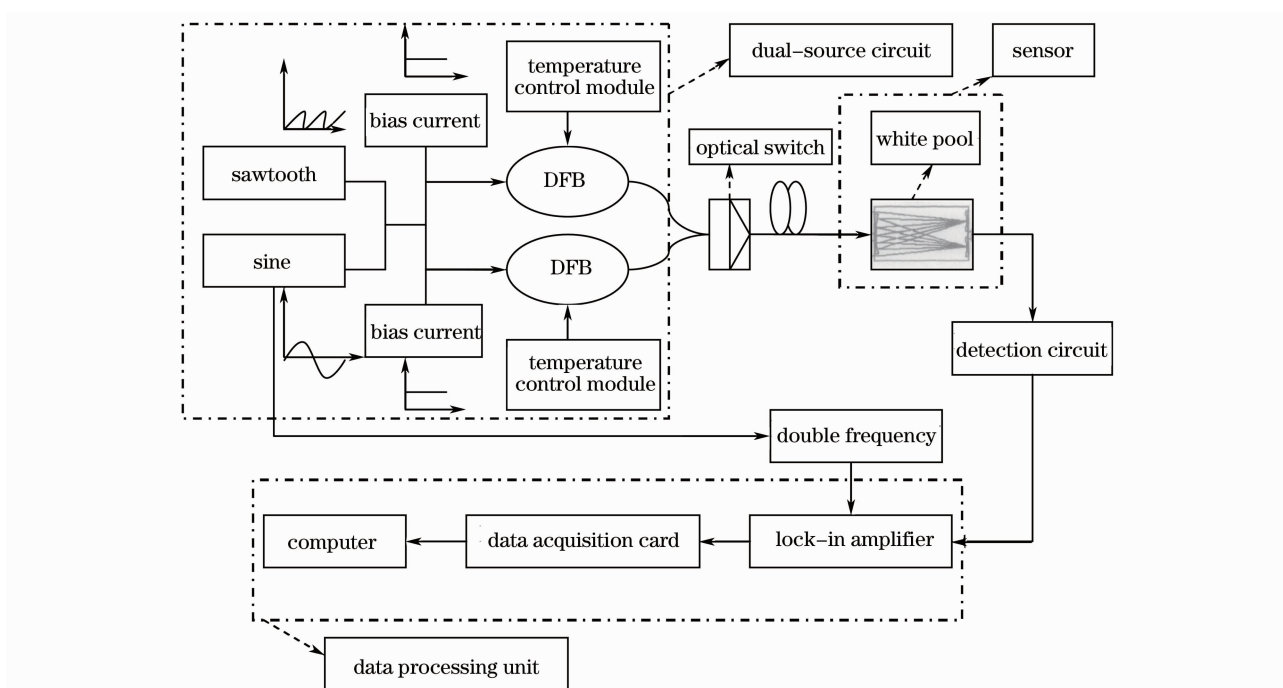


图 1 基于 DFBLD 的双光源光谱吸收式两种气体检测系统框图

Fig. 1 Two gas on-line monitoring system diagram based on absorption spectra using pairs of lasers

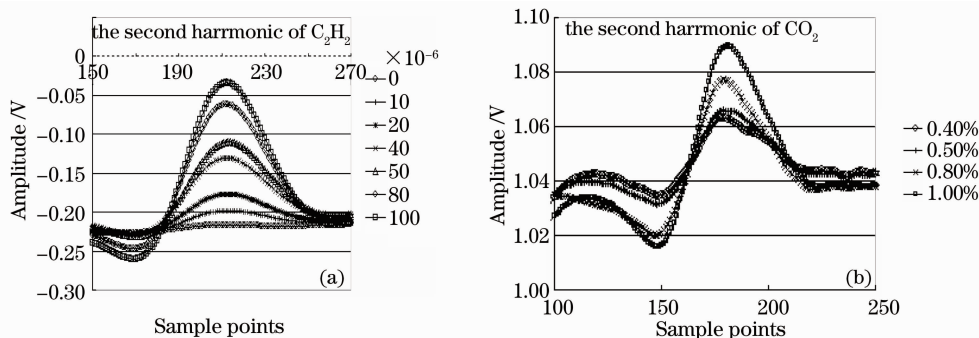


图 2 二次谐波图形

Fig. 2 Graphics of the second harmonic

图 3, 4 分别为  $C_2H_2$  气体和  $CO_2$  气体的二次谐波/一次谐波比值和浓度关系图。系统标定完毕之后, 将上述配置好的不同浓度的气体再次通入气室, 计算出的气体浓度与气体的实际浓度值的关系如

图 5, 6 所示, 由此可以得出, 该系统能够同时准确检测出两种气体浓度。

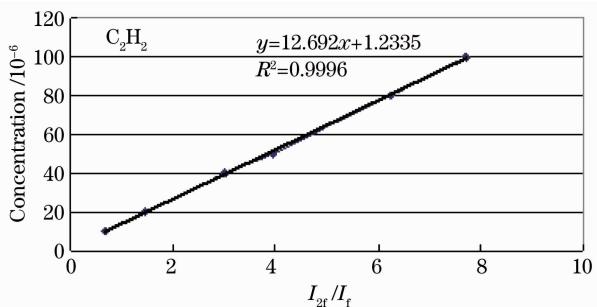


图 3  $C_2H_2$  的二次谐波/一次谐波比值和浓度的关系  
Fig. 3 Relationship between  $I_{2f}/I_1$  and concentration of  $C_2H_2$

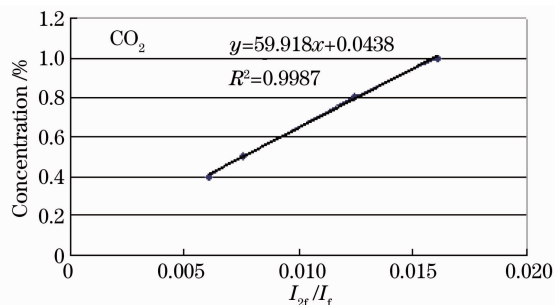


图 4  $CO_2$  的二次谐波/一次谐波比值和浓度的关系  
Fig. 4 Relationship between  $I_{2f}/I_1$  and concentration of  $CO_2$

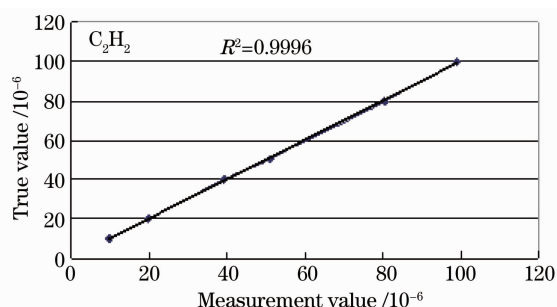


图 5 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体浓度计算值与实际浓度值的关系

Fig. 5 Relationship between calculated concentration and true value of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>

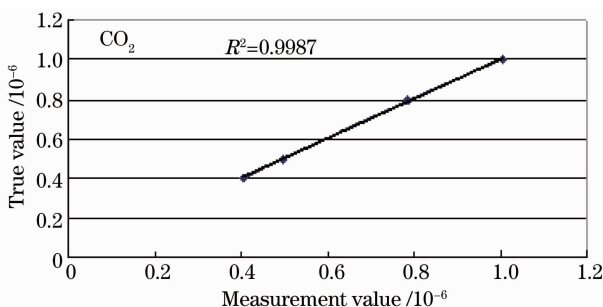


图 6 CO<sub>2</sub> 气体浓度计算值与实际浓度值的关系

Fig. 6 Relationship between calculated concentration and true value of CO<sub>2</sub>

## 5 结 论

电力变压器作为电力系统的关键设备,需要关注其安全运行情况。将 TDLAS 技术与多次反射杯特池技术、谐波检测技术以及光开关的时分复用技术相结合设计了双光源光谱吸收式两种气体监测系统,该系统采用二次谐波与一次谐波比值的方法,消除了光强扰动的干扰,对变压器运行过程中由于各种原因产生的故障气体 CO<sub>2</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 浓度进行在线监测,为下一步通过分析气体组分的含量判断变压器的内部故障或潜伏性故障提供了准确、及时的气体浓度参数。

### 参 考 文 献

- 1 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun. Infrared absorption spectrometer of monitoring ambient methane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 68~70  
 阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧. 基于可调谐激光吸收光谱的大气甲烷监测仪[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 68~70
- 2 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun. Concentration calibration method of ambient trace-gas monitoring with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(3): 392~395

- 阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧. 可调谐二极管激光吸收光谱法监测大气痕量气体中的浓度标定方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(3): 392~395
- 3 S. Barrass, Y. Gerard, R. J. Holdsworth *et al.*. Near-infrared tunable diode laser spectrometer for the remote sensing of vehicle emission[J]. *Spectrochimica Acta*, 2004, **A60**: 3353~363
- 4 Jin Zulong. Transformer chromatographic on-line monitoring system and its key technology [J]. *Transforme*, 2009, **46**(6): 57~63  
 金祖龙. 变压器色谱在线监测系统及其关键技术[J]. *变压器*, 2009, **46**(6): 57~63
- 5 Yin Changhua, Wang Chen. Research on the online monitoring techniques for the dissolved gas in oil-immer sed power transformer [J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2007, **17**(1): 171~172  
 阴昌华, 王 晨. 变压器油中溶解气体在线监测技术的研究[J]. *科技情报开发与经济*, 2007, **17**(1): 171~172
- 6 Humio Inaba. Optics Remote Sensing of Environmental Pollution and Danger by Molecular Species Using Low-Loss Optics Fiber Network System [M]. New York: Springer Verlag Heidelberg, 1999. 288~298
- 7 Li Ning, Yan Jianhua, Wang Fei *et al.*. Effect of linewidth on measurement of CO<sub>2</sub> by wavelength modulation absorption spectrometry using tunable diode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1567~1572  
 李 宁, 严建华, 王 飞等. 光谱线宽对可调谐激光调制吸收光谱技术测量 CO<sub>2</sub> 浓度的影响 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1567~1572
- 8 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun. Tunable diode laser absorption spectrometer monitors the ambient methane with high sensitivity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1218~1220  
 阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧. 可调谐二极管激光吸收光谱法监测环境空气中甲烷的浓度变化[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1218~1220
- 9 Chen Dong, Liu Wenqing, Zhang Yujun. Tunable diode laser spectroscopy system for fire gases sensing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1553~1556  
 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
- 10 Wang Tiejun, Zhang Lei, Dong Lei. 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. 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
- 11 Tu Xinghua, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Second-harmonic detection with tunable diode laser absorption spectroscopy of CO and CO<sub>2</sub> at 1158 μm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(7): 1191~1194  
 涂兴华, 刘文清, 张玉钧等. CO 和 CO<sub>2</sub> 的 1.158 μm 波段可调谐二极管激光吸收光谱的二次谐波检测研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(7): 1191~1194
- 12 Liu Jin, Yang Haima, Zhang Jing. Fiber optic multi-point gas sensor for acetylene based on frequency modulation harmonic detection technique[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008, (6): 5~6  
 刘 瑾, 杨海马, 张 菁. 基于谐波检测技术的多点光纤乙炔气体传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2008, (6): 5~6