

## 乙炔气体浓度的 TDLAS 在线监测

丁志群, 鲍吉龙, 赵洪霞, 章学首

(宁波工程学院 电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315016)

**摘要:** 介绍了利用可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术实现乙炔浓度在线监测的研究。该系统通过复合调制信号调制近红外分布反馈式二极管激光器(DFB LD)作为光源, 光纤耦合器将激光分为两束, 分别通过 0.5 m 封闭短光程气体吸收池和参考光路, 双路接收采集含有气体浓度信息的测量光信号和参考光信号送后级处理, 应用快速傅里叶变换(FFT)得到含有气体浓度信号的各次谐波检测分量, 实现乙炔浓度信息反演, 其中多次平均、数字滤波及背景扣除等数字信号处理技术被用于提高系统信噪比。通过理论分析和试验系统实验证明, 该系统在软、硬件上的设计可以满足乙炔气体的在线监测, 且系统体积小, 光路调试和标定简单, 便于实际应用。

**关键词:** 气体浓度监测; 短光路气体池; 可调谐半导体激光吸收光谱

**中图分类号:** X0832    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)04-1015-05

## Acetylene gas concentration on-line monitoring using TDLAS

Ding Zhiquan, Bao Jilong, Zhao Hongxia, Zhang Xueshou

(School of Electronic Information, Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China)

**Abstract:** A novel acetylene concentration on-line monitoring system using the tunable diode laser absorption spectroscopy(TDLAS) technology was introduced. Near infrared (NIR) distribute feedback laser diode (DFB LD) was used as light source, 0.5 m short path absorption cell, 16-bit analog-to-digital data-acquisition card obtains four channels data which should be processed by a personal computer, four channels obtain separately by varying the laser wavelength using different temperature and different light paths (signal light path and reference light path). Wavelength modulation spectroscopy(WMS) technique is slowly ramping the wavelength by scanning weak absorption lines of acetylene. Fast Fourier transform (FFT) analysis obtains the harmonic signal of absorption spectrum in the harmonic detection (HD). Because interfered by residual amplitude modulation and the laser small dc drift, some digital signal processing techniques such as mean value, digital filtering and background correction are implemented to improve the signal-to-noise ratio. Both theory analysis and experimental results show that the sensitivity of this system can meet the needs of transformer incipient fault diagnosis, which structure is compact and its calibration and adjustment of light path are easy.

**Key words:** gas concentration monitoring; short optical path gas cell; TDLAS

收稿日期: 2012-08-05; 修订日期: 2012-09-10

基金项目: 宁波市自然科学基金(2006A610023)

作者简介: 丁志群(1970-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事光谱检测技术及应用方面的研究。Email: dzq@nbut.cn

## 0 引言

保护环境是国家可持续发展战略中的重要内容,气体污染对人类和环境危害较大:持续时间长且易形成二次污染,从而造成更大危害。加强有害易爆气体的监控是防止污染加剧的有效措施,然而由于有些有害气体在大气中的含量很低,属于痕量气体,一般的气体监测仪器无法实现精确测量。因此,发展痕量气体的在线监测方法、研制新型气体污染监测设备以增强对环境有害痕量气体含量的监测能力十分必要。我国对痕量气体监测系统的研究已经处于起步发展阶段,但在小型化、实用性能上与国外还有一定的差距。以此为背景,文中阐述了以乙炔气体为对象的痕量气体浓度监测系统的研究,在系统小型化上做了较大改进。系统选择可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术作为乙炔气体监测的理论根据并进行了相关研究。采用近红外二极管激光光谱进行气体监测具有选择性好、灵敏度高、实时性好、非接触式测量等优点,近年来已经被广泛应用于环境检测、大气科学、痕量分析、光谱测量等领域,更为有利的是,在同一监测系统中只要选用不同波长的光源就可实现对不同气体浓度的监测。

## 1 测量原理

### 1.1 基本测量原理

当激光光源发出一定频率  $\nu$  的单频光穿透一定浓度的待测气体时,假设入射光强为  $I_0$ , 穿透光强为  $I_1$ , 依据 Lambert-Beer 定律<sup>[1]</sup>得出:

$$I_1 = I_0 \exp\left(-\int_0^L k_\nu(x) dx\right) = I_0 \exp(S(T)g(\nu)P_{\text{abs}}NL) \quad (1)$$

式中: $S(T)$ 为吸收气体分子的一个基本属性并可以在公开数据库中查到; $g(\nu)$ 为吸收谱线线型函数; $P_{\text{abs}}$ 为总体压强; $N$ 为气体浓度; $L$ 为通过吸收气体的光程。

### 1.2 激光调制

由于光谱吸收非常微弱,一般采用频率调制技术向激光二极管注入正弦波电流进行频率调制<sup>[1]</sup>。调制光谱技术能有效地减少激光源和探测器自身带来的噪音,可以提高信噪比几个数量级。激光光源经过正弦波调制后频率和光强都受到相应的调制<sup>[2]</sup>,具体如公式(2)所示:

$$\nu = \nu_0 + \nu_m \sin 2\pi ft$$

$$I_0' = I_0(1 + \eta \sin 2\pi ft) \quad (2)$$

式中, $\nu_0$ 为中心频率; $\nu_m$ 为频率调制幅度; $\eta$ 为光强调制系数; $f$ 为电流调制频率。为了扫描整个待测气体吸收谱线,对激光光源注入频率为低频锯齿波。假设二极管激光器在研究波段附近的电流-频率关系系数为  $k_\nu$ , 在低频调制范围内认为激光二极管的输出波长随着注入电流强度线性变化。通常工业应用中吸收谱线用 Lorentz 函数或 Gauss 线型来拟合。该系统用 Lorentz 曲线描述气体分子的吸收谱线线型:

$$g(\nu) = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\nu_c}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_c}{2}\right)^2} \quad (3)$$

式中: $\Delta\nu_c = P_{\text{abs}} \sum N_i(2\gamma_i)$ , 代表半最大值全宽(FWHM), 即碰撞宽度; $\gamma$ 为碰撞加宽系数。调制后的激光通过待测样本后透射激光光强变为:

$$I(t) =$$

$$I_0 \left\{ 1 + \eta \sin 2\pi ft - S(T)P_{\text{abs}}L \left[ \frac{2}{\pi \Delta\nu_c} \frac{1}{1 + (x + m \sin 2\pi ft)^2} \right] \right\} \quad (4)$$

$$\text{式中: } m = \frac{\nu_m}{\Delta\nu_c/2}; x = \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_c/2}.$$

将  $I(t)$  展开傅里叶级数序列,它的一次谐波  $f$  和二次谐波  $2f$  的系数分别为:

$$I_1 = \eta I_0 \quad (5)$$

$$I_2 = I_0 H_2(x, m) \quad (6)$$

$$H_2(x, m) = \frac{NLP_{\text{abs}}S(T)}{\pi \Delta\nu_c} \cdot$$

$$\left\{ \frac{\sqrt{2} m^2 (M+1-x^2) \sqrt{M+\sqrt{M^2+4x^2}}}{m^2 \sqrt{M^2+4x^2}} + \frac{4xm^2 \sqrt{\sqrt{M^2-4x^2}-M}}{m^2 \sqrt{M^2+4x^2}} - \frac{4\sqrt{M^2+4x^2}}{m^2 \sqrt{M^2+4x^2}} \right\} \quad (7)$$

$$\text{式中: } M = 1 - x^2 + m^2.$$

激光器每次扫描指定波长范围,可以测量透射光强信号的二次谐波  $I_2$  的最大值  $P_2$ , 根据二次谐波的系数(公式(7))得出气体浓度  $N$  为:

$$N = \frac{\pi \Delta\nu_c P_2}{2LP_{\text{abs}}S(T)I_0} \left\{ \frac{2}{m^2} \left[ \frac{2+m^2}{(1+m^2)^{1/2}} - 2 \right] \right\}^{-1} \quad (8)$$

## 2 系统设计

基于 TDLAS 的气体动态参数快速测量系统主要由光源部分、气室部分以及数据检测与信号处理部分构成。整个实验系统如图 1 所示。

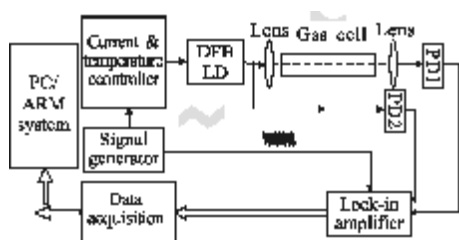


图 1 乙炔浓度的 TDLAS 在线监测系统框图

Fig.1 Schematic of acetylene concentration on-line monitoring system based on TDLAS

### 2.1 激光光源

根据哈佛 Hitran 数据库, 气体吸收谱处于红外区的精细结构是由许多线宽很窄的谱线构成的。乙炔气体在 1525 nm 处由简正振动 V1 和 V3 形成振动泛频吸收 (V1+V3), 根据转动量子的正负得到左右两个吸收峰谱, 分别被称为 R 支和 P 支。测量时选取其中吸收系数最大的一个单吸收峰, 中心波长为 1530.371 nm。分布反馈式二极管激光器 (DFB LD) 是具有优良选频特性的单纵模激光器, 由于 DFB LD 输出的是单模激光, 线宽为 1 MHz, 乙炔的单个吸收峰的半宽有 900 MHz<sup>[2]</sup>, 当激光束通过气体吸收池时, 随着光波频率扫过吸收谱线, 其吸收强度也受到高频调制<sup>[3]</sup>。系统中通过调整温度和注入电流来粗调和精调其输出光谱的中心波长和光谱宽度<sup>[4]</sup>。激光器选用安立公司的 NLK1556STB DFB LD<sup>[5]</sup>。

### 2.2 气室设计

根据朗伯-比尔定律, 灵敏度与光源的光强和气体吸收的光程长度有关系。为了获得较大的光强变化, 需要增加气室的长度, 实验室研究通常采用怀特池, 原理是其两端有多面反射镜, 使光在反射镜之间来回反射, 以增加光和吸收气体相互作用的长度, 高达几千米的光程利于提高检测灵敏度。但由于怀特池结构复杂, 导致体积庞大, 安装和清洁都不方便, 光路调整困难, 并不利于小型化设计<sup>[6]</sup>。另外, 怀特池因光的多次反射会产生标准具效应, 这种效应产生的干扰不同于噪声信号, 而是一种稳定的干涉条纹, 不易消除<sup>[7]</sup>, 故采用单光程封闭式短吸收池。设计了一个长为 0.5 m 的不锈钢管作为封闭式气体池, 两端端窗为石英玻璃密封封装。

### 2.3 调制信号发生电路

系统中激光器的调制采用 LDC-3724B 激光器

控制器对 DFB LD 光源进行电流和温度控制。设计了 DFB LD 调制信号及锁相放大器参考信号发生电路, 能同时产生三路高精度、不同频率的正弦波、方波和三角波。调制信号发生电路产生 0.5~2 kHz 的正弦波和 0.5~20 Hz 的三角波, 并利用加法器得到正弦波和三角波的叠加波对 DFB 光源进行调制。

### 2.4 光电检测电路设计

PIN 型光电二极管具有灵敏度高、响应速度快、噪声低等特点, InGaAs PIN 的响应谱在 1~1.8  $\mu\text{m}$  区域, 最大响应波长在 1.6  $\mu\text{m}$  附近, 满足系统要求。该系统选用北京世通光通讯技术有限公司的 PDS453-2a 对管作为两个光电探测器, 其中 PD1 接收通过气体池的光信号, PD2 接收光纤耦合器分光的光信号作为参考信号。PD1 转换的电信号经电流/电压转换和信号调理后输入 SR830 锁相放大器得到锁相检波的二次谐波信号。

## 3 实验结果与分析

共有四路信号送到数据采集卡, 分别是 PD1、PD2 信号, 锁相检波的  $I_2$  以及激光器调制信号。在快速傅里叶变换 (FFT) 实验中采用体积百分比 (V/V) 的形频谱分析, 如图 2 所示。可以看出, 经过气体池的 PD1 信号因为气体吸收产生了多个高频分量, 但信号存在干扰, 不利于气体浓度反演。

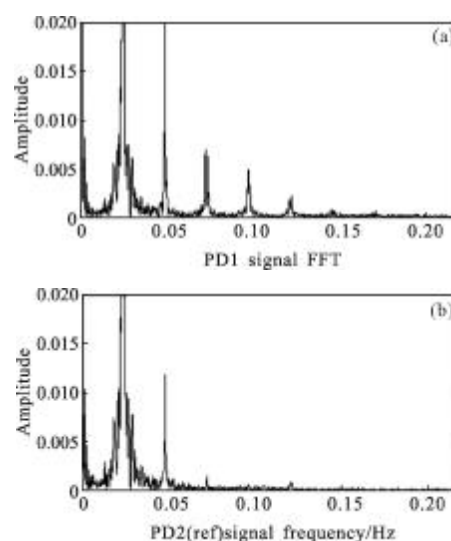


图 2 PD1、PD2 信号的 FFT 频谱分析

Fig.2 FFT analysis of PD1 &amp; PD2 signals

实验中采用体积百分比 (V/V) 的形式。先用真空抽

气泵将气室抽真空,然后采用 1mL 的注射器向气室中注入乙炔气体,可以精确到 0.01mL。气室为圆柱形,长度为 50cm,内径为 25mm,气室体积  $V_1=3.14 \times (2.5/2)^2 \times 50 \approx 245.31$  mL,能够标定的乙炔气体的最小浓度为  $0.01/245.31 \approx 4.08 \times 10^{-5} \approx 40.8$  ppm。实验时,每次向气室注入 0.01 mL 的纯乙炔气体,每次注入气体后都进行多次采集。第一次注入 0.01 mL 乙炔气体后,共采样 100 次,一次采样和 100 次采样平均值波形分别如图 3(a)、(b)所示。在锁相放大器上取幅值,得测量的二次谐波信号幅值如表 1 所示。求其平均值为 94.532 mV,对应的气体浓度为 40.8 ppm。多次采样平均法的信噪比比周期平均法的信噪比有提高,但波形还是有部分噪声存在,所以考虑均值滤波算法<sup>[9]</sup>。以某一点为中心,同时取前后两点,将三点做平均,即:

$$f(n)=[f(n-1)+f(n)+f(n+1)]/3 \quad (9)$$

表 1 0.01 mL 乙炔气体的二次谐波幅值

Tab.1 0.01 mL acetylene gas amplitude of second harmonic

Concentration	40.8	40.8	40.8	40.8	40.8	40.8	40.8
	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$
Amplitude /mV	94.336	95.235	94.320	95.103	94.680	94.581	94.552

均值滤波后得到二次谐波的幅值为 94.154 mV,与平均值测量结果相差 0.380 mV。在第一次注入乙炔气体后,再次重复向气体池中注入气体,每次注入 0.01 mL,并且多次采样取平均,均值滤波,最后得到的波形在同一坐标面上显示如图 4 所示。可以得出不同气体浓度值对应的二次谐波幅值的输出,如表 2 所示。采集不同浓度的乙炔气体可以得到上述波形图,可以看出乙炔气体浓度和幅值存在一定的正比例关系。下面通过曲线拟合来得出气体浓度和二次谐波曲线幅值的正比例关系。在相同的调制条件下,乙炔气体吸收光谱二次谐波信号的幅值是与浓度直接成正比关系,因此可以根据检测到的二次谐波信号的幅值来反演气体的浓度。利用 MATLAB 编程,将从 PD1 探测器采集的数据进行快速傅里叶变换(FFT),得到它的二次谐波幅值,换算出乙炔浓度信息,根据实验数据拟合得到浓度  $c$  和幅值之间的函数关系。多次采样平均幅值(mV)拟合的乙炔气体浓度与二次谐波幅值之间的关系为:

$$y=0.0826c+90.8657 \quad (10)$$

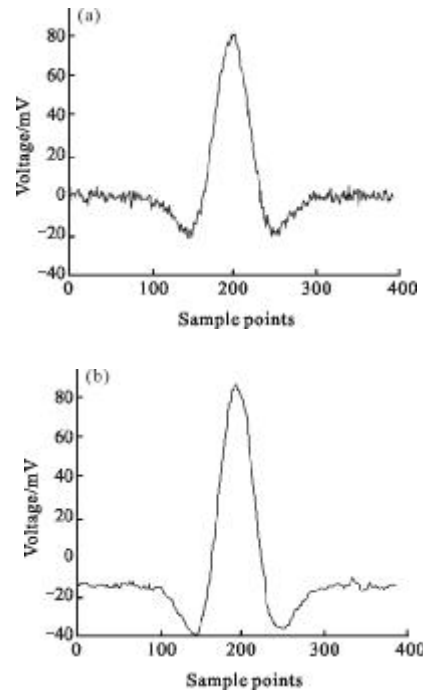


图 3 一个周期采样和 100 个周期采样平均后的谐波波形

Fig.3 Waveforms of one periodic sampling and average sampling of 100 cycles

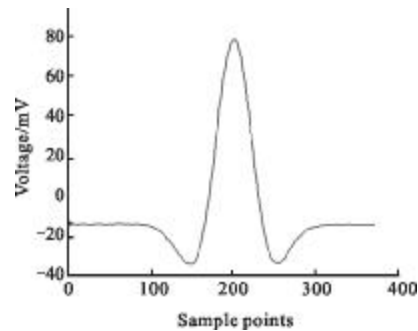


图 4 均值滤波后的谐波波形

Fig.4 Harmonic waveform after mean filtering

表 2 不同浓度乙炔气体二次谐波的最大幅值

Tab.2 Peak values of second harmonic for different concentrations of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>

No.	Volume/mL	Concentration	Amplitude/mV	Amplitude/mV
1	0.01	$40.8 \times 10^{-6}$	95.325	94.514
2	0.02	$81.6 \times 10^{-6}$	97.102	97.421
3	0.03	$122.4 \times 10^{-6}$	101.341	100.258
4	0.04	$163.2 \times 10^{-6}$	103.022	104.125
5	0.05	$204.0 \times 10^{-6}$	108.215	107.287
6	0.06	$244.8 \times 10^{-6}$	109.821	110.982
7	0.07	$285.6 \times 10^{-6}$	115.547	114.658
8	0.08	$326.4 \times 10^{-6}$	117.056	118.246
9	0.09	$367.2 \times 10^{-6}$	120.910	119.351
10	0.10	$408 \times 10^{-6}$	125.341	124.652

乙炔气体浓度和均值滤波后的二次谐波信号幅值之间的关系为:

$$y=0.0804c+91.2165 \quad (11)$$

均值采样和均值滤波后,气体浓度和二次谐波幅值的拟合曲线分别如图5(a)、(b)所示。可以验证乙炔气体浓度和二次谐波幅值之间存在正比关系,同时可以看出均值滤波的线性度更高,测量点的偏移量更小。

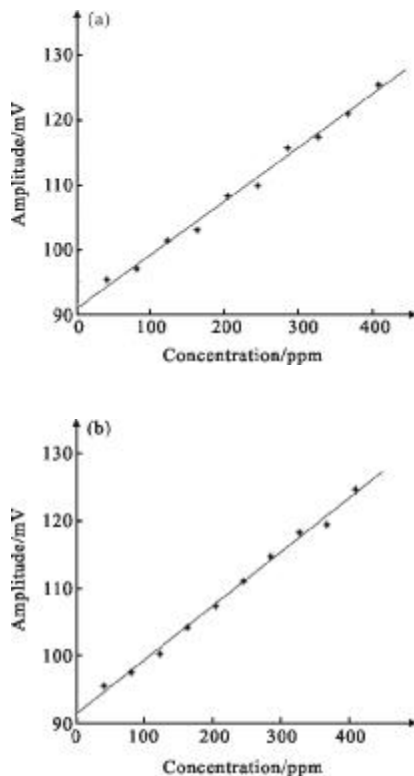


图5 均值采样(a)、均值滤波(b)的气体浓度与二次谐波幅值的关系

Fig.5 Average sampling concentrations (a) and mean filtering concentrations (b) vs second harmonic amplitude

## 4 结 论

文中利用TDLAS 技术实现了乙炔气体浓度监

测的研究,采用数字信号处理技术,使得在短光程吸收池下低浓度乙炔气体的探测成为可能,今后将在现有乙炔气体在线监测系统的基础上做更多软、硬件方面的提升工作,使得气体浓度的探测精度得到进一步提高。

## 参考文献:

- [1] Gustafsson U, Sandsten J, Svanberg S. Simultaneous detection of methane, oxygen and water vapors utilizing near-infrared diode lasers in conjunction with difference frequency generation[J]. *Appl Phys*, 2000, B71: 853-857.
- [2] HITRAN. The HITRAN Database [EB/OL]. (2012-12-13) [2013-01-10]<http://www.cfa.harvard.edu/HITRAN/>
- [3] Edwards G C, Thurtell G W, Kidd G E, et al. A diode laser based gas monitor suitable for measurement of trace gas exchange using micro meteorological techniques [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 11(5): 71-89.
- [4] Li X L, Xia Y X, Huang J M, et al. A Raman system for multi-gas-species analysis in power transformer [J]. *Applied Physics*, 2008, B93: 665-669.
- [5] Ding Zhiqun, Zhao Hongxia, Fang Xiaohui, et al. Trace detection of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> using tunable diode laser absorption spectroscopy[C]//*Laser Sensing and Imaging: Proceedings of SPIE*, 2011, 8192: 167-173
- [6] Mei Haiping, Huang Honglian, Rao Ruizhong. Fiber microlens collimation and coupling optical path in measuring atmospheric optical turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 910-913. (in Chinese)
- [7] Xu Rongrong, Liu Deming, Cao Feng, et al. Design of multipoint optical fiber methane sensing system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (4): 686-689. (in Chinese)
- [8] Zou Debao, Chen Wenliang, Du Zhenhui, et al. selection of digital filtering in the escaping Ammonia monitoring with TDLAS[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(9): 2322-2325. (in Chinese)