

doi:10.3788/gzxb20174606.0612002

# 光声光谱技术在多组分气体浓度探测中的应用

查申龙<sup>1,2</sup>, 刘锐<sup>1</sup>, 谈图<sup>1</sup>, 王贵师<sup>1</sup>, 高晓明<sup>1</sup>

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥, 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥, 230031)

**摘 要:** CO 和 CH<sub>4</sub> 气体作为判断变压器运行状态的故障气体, 对其浓度的探测在变压器维护中具有重要意义. 为了准确探测变压器运行过程中产生的 CH<sub>4</sub> 和 CO 气体浓度, 本文利用光声光谱技术, 设计了一套基于宽带光源的多组分气体探测系统, 和共振型光声系统相比, 该系统中所用的非共振型光声池体积小, 易加工, 池内各处信号强度相同, 降低了对声学信号探测器的安装要求. 系统的性能通过对 CO 和 CH<sub>4</sub> 气体的探测进行评估. 首先, 从理论上分析了信号强度与调制频率呈反比, 然后根据宽带光声系统在不同调制频率下的响应, 确定系统的最佳调制频率为 22 Hz. 在最佳调制频率下, 根据温度与待测气体光声信号的关系, 对光声信号进行温度补偿, 消除温度变化对光声信号的影响, 进一步提高了系统的稳定性. 最后, 通过不同浓度的 CH<sub>4</sub> 和 CO 气体对系统进行标定. 实验表明, 温度补偿前后, 光声信号随温度的漂移分别为 0.023 23V/°C 和 8.383 48×10<sup>-5</sup> V/°C, 通过对不同浓度 CH<sub>4</sub> 和 CO 气体的探测, 系统的线性度分别达到 0.995 和 0.998 4. 在一个大气压下, 积分时间为 1s 时, 宽带光声探测系统对 CO 和 CH<sub>4</sub> 气体的探测极限浓度能够达到 1μL/L. 该系统成本低, 线性度好, 探测灵敏度符合国标对变压器维护过程中 CO 和 CH<sub>4</sub> 气体的探测要求.

**关键词:** 红外光谱; 气体探测; 光声光谱; 甲烷; 一氧化碳; 宽带光源; 温度补偿; 灵敏度

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0612002-6

## Application of Photoacoustic Spectroscopy in Multi-component Gas Concentration Detection

ZHA Shen-long<sup>1,2</sup>, LIU Kun<sup>1</sup>, TAN Tu<sup>1</sup>, WANG Gui-shi<sup>1</sup>, GAO Xiao-ming<sup>1</sup>

(1 *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(2 *University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China*)

**Abstract:** CO and CH<sub>4</sub> as the fault gases in transformer, the detection of their concentration has important significant in transformer maintenance. In order to detect CH<sub>4</sub> and CO gas concentration in transformer accurately, a photoacoustic spectroscopy multi-component gas detection system based on broadband thermal radiation light source has been developed. Compared to resonant photoacoustic cell based photoacoustic detection system, the non resonant photoacoustic cell used in the system has the advantage of small volume, easy to processed, high sensitivity and the intensity of signal is the same everywhere in non-resonant photoacoustic cell, thus reduce the requirements for the installation of the detector. The performance of the system was evaluated by detection of CH<sub>4</sub> and CO. First, the relationship of the intensity of photoacoustic signal in non resonant photoacoustic cell between the radius and the modulation frequency was simulated by theoretical, it is illustrated that the signal enhanced with the reduction of the radius and the modulation frequency. Then the optimum modulation frequency of the system was determined as 22 Hz by the response of the system under different modulation frequencies.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41575030, 21307136) 资助

第一作者: 查申龙 (1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高灵敏度激光光谱技术与应用. Email: zslwinner@163.com

导师 (通讯作者): 高晓明 (1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为高灵敏度激光光谱技术和光学传感器. Email: xmgao@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2016-12-12; 录用日期: 2017-03-20

<http://www.photon.ac.cn>

The function relations of photoacoustic signal and the temperature were studied, then the photoacoustic signal was corrected by temperature compensate based on the function of signal and gas temperature under optimum modulation frequency to eliminate the impact of temperature to photoacoustic signal, the stability of the system was improved after temperature compensate. The drift of the signal to temperature is  $0.023\ 23\text{V}/\text{C}$  and  $8.383\ 48 \times 10^{-5}\ \text{V}/\text{C}$  respectively before and after temperature compensate. At last, the system was calibrated by different concentrations of  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}$  gas, the experiment show that the photoacoustic signal increased with the increasing of gas concentration and the linearity can reach to 0.995 and 0.998 4 respectively for the detection of different concentrations of  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}$  gas. The multi-component gas detection system based on broadband photoacoustic spectroscopy has the sensitivity of  $1\ \mu\text{L}/\text{L}$  for  $\text{CO}$  and  $\text{CH}_4$  detection under atmospheric pressure with the 1s integration time. The developed system has low cost, good linearity and the sensitivity conform to the requirement of national standard in the process of transformer maintenance.

**Key words:** Infrared spectroscopy; Gas detection; Photoacoustic spectroscopy; Methane; Carbon monoxide; Broadband light source; Temperature compensation; Sensitivity

**OCIS Codes:** 120.2440; 120.0280; 280.3340; 280.4788

## 0 引言

基于激光光谱技术的气体以及颗粒物浓度探测在工业过程控制和环境监测中具有广泛应用<sup>[1-3]</sup>. 光声光谱技术作为一种新型的气体探测技术,具有稳定性好、灵敏度高、响应速度快和容易操作等优点,因此被广泛应用于痕量气体探测中. 在 Alexander Graham Bell 发现光声效应<sup>[4-5]</sup>之初,由于缺少合适的光源和声学信号探测器,光声技术的发展几乎停滞不前. 激光器的出现及其技术的进步,推动了光声光谱技术的发展,各种基于光声技术的应用不断见于报道. Charles M. Wynn<sup>[6]</sup>等人利用  $\text{CO}_2$  激光器作为光源,对  $\text{NH}_3$  进行探测,灵敏度达到  $0.015\ \mu\text{L}/\text{L}$ . 虽然用气体激光器作为光源的光声光谱探测系统具有很高的灵敏度,但是由于气体激光器价格昂贵,体积大,系统复杂,限制了其在便携式光声探测系统中的应用. 光通讯中应用的分布反馈式 (Distributed Feedback, DFB) 半导体激光器的出现使光声探测系统更易于集成,灵敏度更高,同时由于 DFB 激光器具有稳定性好、功率高、激光线宽窄等优点,因此被广泛应用于光声光谱气体探测系统中<sup>[7-11]</sup>. 国内陈伟根教授课题组利用 DFB 激光器设计了基于共振型光声光谱技术探测系统,并对  $\text{CH}_4$  气体进行了高灵敏度探测<sup>[12]</sup>. 随着微处理器,声信号探测器以及弱信号检测技术的发展,出现了一些新型的光声光谱技术,如悬臂增强型光声光谱技术,石英音叉增强型光声光谱技术<sup>[13]</sup>等. 虽然 DFB 激光器体积小,便于光声系统的集成,但是由于其调谐范围窄,在实际应用中难以用于多组分气体同时探测. 鉴于此,本文利用宽带热辐射红外光源设计了一套基于光声光谱技术的多组分气体探测系统,此系统可用于变压器运行过程中产生的故障气体探测. 变压器由于过热或者放电等故障,将会产生  $\text{CO}$  和  $\text{CH}_4$  等故障气体,通过探测不同故障气体的浓度,即可判断变压器的运行状态,从而为变压器的维护提供技术参考. 现阶段用于变压器故障气体分析的方法主要为气相色谱法,由于色谱技术需要载气,色谱柱易受污染,需定期更换,所以其维护成本高. 光声光谱技术用于变压器故障气体探测具有操作简单、维护成本低、选择性好、灵敏度高等优点. 本文选用的热辐射光源的光谱范围覆盖了可见到红外波段,利用窄带滤光片选择出待测气体对应的吸收谱线,即可对气体进行光声探测. 由于不同的气体具有特定的吸收光谱,所以选择不同的窄带滤光片,即可实现对不同气体的同时探测.

## 1 光声光谱技术原理

待测样品吸收特定频率的光从基态跃迁到高能态,然后通过无辐射跃迁的方式释放能量,从而引起周围温度和压力的变化,由于样品吸收的光被周期性调制,所以样品中将会产生周期性的压力波,即声波. 气体分子吸收周期性调制的红外光,产生的压力波  $P$  可表示为<sup>[14]</sup>

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = - \left[ \frac{(\gamma - 1)}{c^2} \right] \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中,  $c$  为光声池中的声速,  $\gamma$  表示气体热容比,  $H$  为气体吸收调制光产生的热功率密度.

对方程(1)进行傅里叶变换,则有

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{c^2}\right)P(r, \omega) = \left[\frac{\gamma-1}{c^2}\right]i\omega H(r, \omega) \quad (2)$$

方程(2)的边界条件为垂直于刚性光声池壁的声速分量为零,同时应满足正交归一化方程<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} \iiint P_i^*(r)P_j(r)dV = V\delta_{ij} \\ \left(\nabla^2 + \frac{\omega_j^2}{c^2}\right)P_j(r) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于直径为  $a$ , 长度为  $L$  的圆柱形光声池, 波动方程可表示为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial P_j}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 P_j}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 P_j}{\partial z^2} + k_j^2 P_j = 0 \quad (4)$$

利用贝塞尔函数, 求出其解, 可表示成

$$P_j = \frac{\cos(m\theta)}{\sin(m\theta)} [AJ_m(K_r r) + BN_m(K_r r)] \cdot [C \sin(K_z z) + D \cos(K_z z)] \quad (5)$$

其中,  $J_m, N_m$  为第一类和第二类贝塞尔函数,  $K_r, K_z$  为贝塞尔函数系数.

根据圆柱型腔的边界条件, 光声信号的振幅表达式可表示成

$$A_j(\omega) = -\frac{i\omega}{\omega_j^2} \frac{\left[\frac{\gamma-1}{V}\right] \int P_j^* H dV}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2} \quad (6)$$

式中,  $\omega_j$  为简正模式  $j$  的谐振角频率,  $V$  为光声池的体积.

圆柱形光声腔中的声场分布可表示成

$$P(r, \omega) = \sum_j A_j(\omega) P_j(r) \quad (7)$$

如果调制频率低于光声池的最低阶共振频率, 则光声池工作在非共振状态, 非共振条件下的光声信号可表示成

$$A(\omega) = \frac{i\alpha(\gamma-1)W}{\omega[1-i/(\omega\tau_0)]\pi a^2} \quad (8)$$

式中,  $W$  为入射光的功率,  $\tau_0$  为光声信号的弛豫时间,  $\alpha$  为吸收系数.

根据光声光谱技术的理论, 非共振型光声池中光声信号与半径和调制频率的关系如图 1 所示, 可见在非共振型光声探测系统中, 光声池的半径越小, 调制频率越低, 信号强度越强.

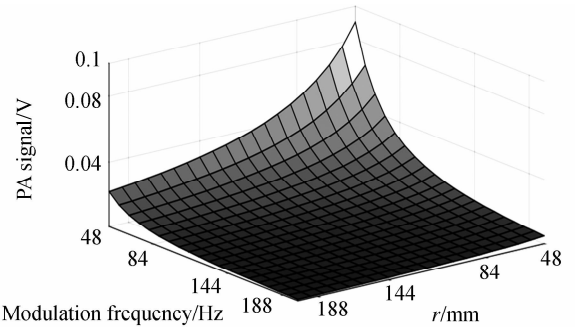


图 1 光声信号与非共振型光声池半径和调制频率的关系  
Fig. 1 The relationship between the intensity of photoacoustic signal with modulation frequency and the radius of non-resonant photoacoustic cell

## 2 实验装置

基于宽带光源的多组分光声光谱探测系统的原理如图 2 所示, 采用热辐射光源作为光声信号的激发光源, 其光谱范围覆盖了可见光到红外波段, 输出光功率为 1W. 宽带光源光强的稳定性由光功率计 (OPHIR NOVA II) 进行监测, 在 90 min 内, 通过 CO 和 CH<sub>4</sub> 滤光片后光功率的波动小于 1.67% 和 1%. 经过汇聚后的光束由斩波器进行调制, 然后通过窄带滤光片进入非共振型光声池, 在光声池的出射窗口采用平面反射镜将入射光反射回池内, 从而增加入射光的功率, 进一步增强了光声信号的强度. 探测系统中非共振型光声池的长度为 40 mm, 直径为 20 mm. 由于气体分子在红外波段具有特定的吸收光谱, 所以可以利用特定中心波长的窄带滤光片选择出待

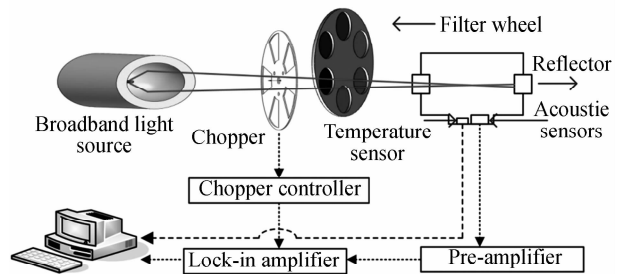


图 2 探测系统原理图

Fig. 2 The principle diagram of the detection system

测气体的吸收谱线,同时要求其它气体分子在所选滤光片的带宽内无吸收或者吸收非常弱,从而避免其它分子吸收的干扰.本文中用来探测  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  的窄带滤光片的中心波长分别为 7 780 nm 和 4 650 nm,带宽均为 200 nm.图 3 给出了  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  气体在中红外波段的吸收谱线.光声池内产生的信号通过声学传感器(Knowles Electronics, EK-23133)进行探测,然后经过前置放大器(Model 5113)进行放大,最后利用锁相放大器(Stanford Research System SR850)对信号在调制频率处进行解调,提取出光声信号,锁相放大器输出的信号通过采集卡(AC6115)由计算机进行采集.

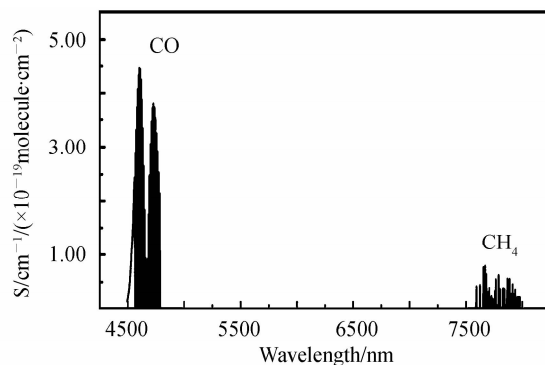


图 3  $\text{CO}$  和  $\text{CH}_4$  在中红外波段的吸收谱线  
Fig. 3  $\text{CO}$  and  $\text{CH}_4$  absorption spectrum in the mid-infrared range

## 3 结果与讨论

### 3.1 最佳调制频率

在实际应用中由于光声池壁噪声,斩波器转动产生的噪声以及环境噪声的存在,在进行气体探测之前需要对宽带光声系统的最佳调制频率进行标定.本文中宽带光声系统的最佳调制频率通过探测系统在不同调制频率下对一个大气压,浓度为  $3000\mu\text{L/L}$  的  $\text{CH}_4$  标准气体的响应来标定.同样地,在光声池中充入一个大气压的高纯氮气,记录系统在不同调制频率下的输出信号强度,作为系统的本底噪声,图 4 记录了在光声池中分别充入一个大气压的  $\text{CH}_4$  标准气体和高纯氮气,调制频率从 1 Hz 到 84 Hz 之间变化时,锁相放大器输出的信号强度.在调制频率低于 22 Hz 的范围内,随着调制频率的降低,声学传感器对信号的获取效率降低,因此,光声信号随着调制频率的降低而降低.另外,光声信号的强弱还和吸收的光能向声能转换的效率有关,调制频率越高,光-声转换效率越低,即光声信号强度与调制频率成反比,如式(8)所示.因此,在调制频率超过 22 Hz 以后,光声信号随着调制频率的增大而降低,所以本文设计的宽带光声探测系统的最佳调制频率为 22 Hz.

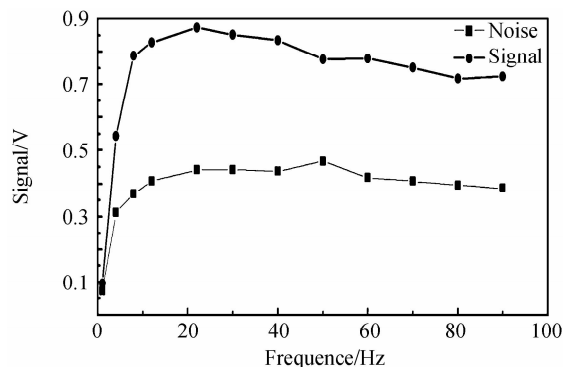


图 4 不同调制频率下的信号和噪声  
Fig. 4 The signal and noise under different modulation frequency

### 3.2 温度补偿

光声信号的强度是光声池常数和气体吸收系数的函数,在不同的温度下,光声池常数和气体的吸收系数不同,所以有必要进一步研究在不同温度下气体光声信号强度变化.本文设计的光声探测系统中,在非共振型光声池中安装了一个热敏电阻,用于实时记录光声池内的温度变化,选择  $\text{CH}_4$  气体作为待测气体,通过质量流量控制器用高纯氮气将  $\text{CH}_4$  标准气体稀释到浓度为  $488\mu\text{L/L}$ ,利用宽带光声探测系统对  $\text{CH}_4$  气体进行探测,同时记录了 30 min 内光声信号和池内温度的变化,图 5 为光声池内温度随着时间的变化.从图 5 中可以看出,光声池内的温度随着探测时间的增加而升高.图 6 为不同温度下  $\text{CH}_4$  气体的光声信号.由此可见,光声信号随着气体温度的增加而增强,在温度超过一定值后,光声信号随着温度的增加而降低.本文根据光声信号与温度的函数关系对光声信号进行温度补偿,消除池内气体温度变化对光声信号的影响,从而进一步提高了系统的稳定性.图 7 为浓度为  $488\mu\text{L/L}$  的  $\text{CH}_4$  气体在通过温度补偿前后的光声信号.在进行温度补偿前光声信号随温度的漂移为  $0.02323\text{V}/^\circ\text{C}$ ,通过温度补偿后信号随温度的漂移为  $8.38348 \times 10^{-5}\text{V}/^\circ\text{C}$ ,可见该算法有效消除了温度变化对光声信号的影响.

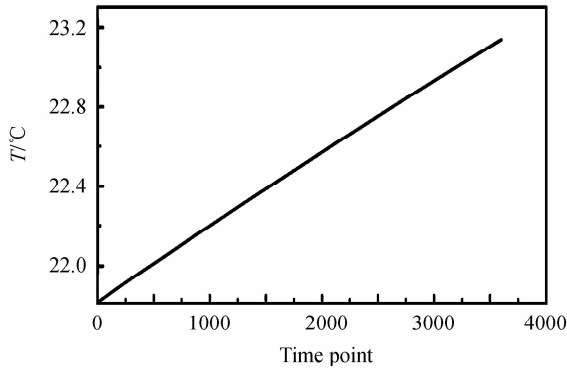


图5 光声池内温度随时间的变化

Fig. 5 The temperature in photoacoustic cell change with time

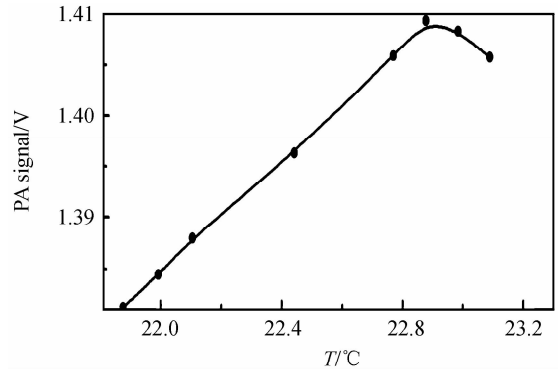
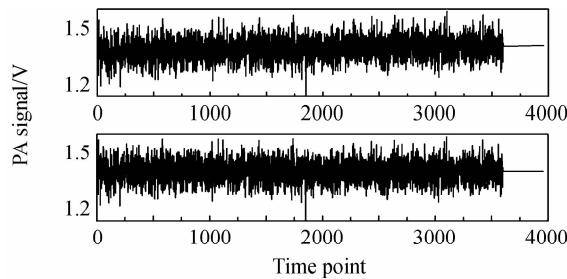


图6 不同温度下的光声信号

Fig. 6 Photoacoustic signal under different temperature

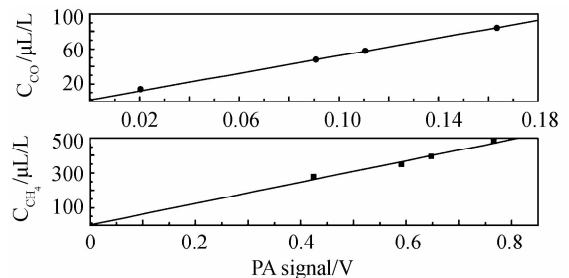
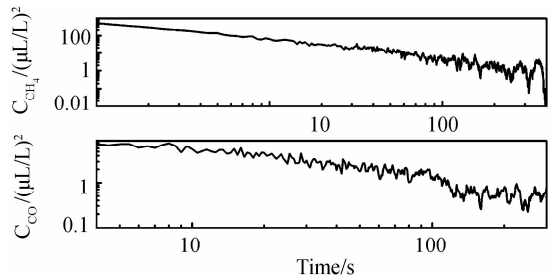
图7 温度补偿前后 CH<sub>4</sub> 气体的光声信号Fig. 7 The photoacoustic signal of CH<sub>4</sub> before and after temperature compensation

### 3.3 系统的标定

在运用光声光谱技术对未知浓度的气体探测之前,需要对系统进行标定.在光声光谱技术中,通常采用最小二乘法对气体浓度与光声信号值进行拟合,从而对系统进行标定.这种方法易于操作,而且能够有效避免气体吸收系数和光声池常数的变化引入的误差.本文中用高纯氮气将 CH<sub>4</sub> 和 CO 标准气体稀释到不同浓度,用宽带光声系统对其进行探测,不同浓度的 CH<sub>4</sub> 和 CO 气体浓度与光声信号的关系如图 8 所示.从图 8 中可以看出,光声信号随着气体浓度的增加而增强,本系统对 CH<sub>4</sub> 和 CO 的探测线性度分别达到 0.995 和 0.998 4.对于未知浓度的气体,可根据宽带光声系统探测的信号值由标定的函数计算出其浓度.

### 3.4 系统的最低探测极限浓度

本文利用宽带光声系统分别对浓度为 488 $\mu$ L/L 和 48 $\mu$ L/L 的 CH<sub>4</sub> 和 CO 气体进行了 30 min 的探测,在对 CH<sub>4</sub> 和 CO 气体的探测过程中锁相放大器的积分时间为 1s,锁相放大器的灵敏度分别为 1mV 和 100 mV,前置放大器的放大倍数分别为 350 和 150.然后利用 Allan variance 对采集的 CH<sub>4</sub> 和 CO 气体的光声信号进行分析,其结果如图 9 所示.从图 9 中可以看出,系统在平均时间为 200 s 和 120s 时,对 CH<sub>4</sub> 和 CO 气体的探测灵敏度能够

图8 不同浓度 CO 和 CH<sub>4</sub> 的光声信号Fig. 8 The photoacoustic signal of different concentrations of CO and CH<sub>4</sub>图9 系统对 CH<sub>4</sub> 和 CO 探测的 Allan VarianceFig. 9 Allan variance of the system to the detection of CH<sub>4</sub> and CO

达到  $1\mu\text{L/L}$ , 符合国标对变压器维护过程中  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  气体的探测要求。

## 4 结论

本文利用宽带光源设计了一套基于光声光谱技术的多组分气体探测系统, 通过对  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  气体的探测, 对系统性能进行评估. 本文对气体光声信号的强度与调制频率和气体浓度的关系进行了深入研究, 通过系统在不同调制频率下的响应, 确定最佳调制频率为  $22\text{Hz}$ . 通过不同浓度的  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  气体对宽带光声探测系统进行标定, 系统具有很好的线性度. 由于待测气体温度的变化将会引起光声信号强度的变化, 所以本文在采集光声信号的同时, 对待测气体的温度进行同步采集, 然后根据光声信号强度与温度的关系, 对信号进行温度补偿, 有效消除了待测气体温度变化对光声信号的影响, 从而进一步提高了系统的稳定性. 利用 Allan Variance 对长时间采集的光声信号进行分析, 可知, 本文设计的宽带光声探测系统对  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  的最低探测极限浓度能够达到  $1\mu\text{L/L}$ , 符合国标对变压器维护过程中对  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  的探测要求. 本文设计的宽带光声探测系统结构简单, 稳定性好, 灵敏度高, 在变压器维护领域具有广泛的应用前景.

## 参考文献

- [1] LIU Qiang, LIU Kun, GAO Xiao-ming, *et al.* Development of a photoacoustic spectroscopy system for the measurement of absorption coefficient of atmospheric aerosols[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(7):1729-1733.  
刘强, 刘锟, 高晓明, 等. 适用于测量大气气溶胶吸收系数的光声光谱系统的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(7):1729-1733.
- [2] YU Xin, GAO Zong-li, SONG Nan, *et al.* Design and experiment of pocket infrared gas detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1):0104001.  
于鑫, 高宗丽, 宋楠, 等. 袖珍式红外瓦斯检测仪的设计与实验[J]. *光子学报*, 2014, **43**(1):0104001.
- [3] CHEN Dong, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun. Time sharing scanning multiplexing method of tunable diode laser spectroscopy system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8):1901-1905.  
陈东, 刘文清, 张玉钧. 调谐半导体激光光谱分时扫描多路方法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8):1901-1905.
- [4] BELL A G. On the production and reproduction of sound by light; The photo-phone[J]. *American Journal of Science*, 1880, **20**(118): 305-324.
- [5] MIKLÓŠ A. Acoustic aspects of photoacoustic signal generation and detection in gases[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2015, **36**(9): 2285-2317.
- [6] WYNN C M, PALMACCI S, CLARK M L, *et al.* High-sensitivity detection of trace gases using dynamic photoacoustic spectroscopy[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(2): 1-5.
- [7] NASIM H, JAMIL Y. Diode lasers: From laboratory to industry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, **56**(2014): 211-222.
- [8] CHEN Xin-gang, MA Zhi-peng, HUANG Hui-xian, *et al.* Design and study transmission model of one-dimension photoacoustic cell for detection of dissolved gases in transformer oil [J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, **50**(4):35-41.  
陈新岗, 马志鹏, 黄会贤, 等. 变压器油中溶解气体光声光谱检测—维光声池信号传输模型研究与设计[J]. *高压电器*, 2014, **50**(4): 35-41.
- [9] ZHOU Qu, TANG Chao, ZHU Shi-ping, *et al.* Detection of dissolved carbon monoxide in transformer oil using 1.567 m diode laser-based photoacoustic spectroscopy[J]. *Journal of Spectroscopy*, 2015, **2015**(737635):1-8.
- [10] ZHENG Hua-dan, YIN Xu-kun, DONG Lei, *et al.* Multi-quartz enhanced photoacoustic spectroscopy with different acoustic micro-resonator configurations[J]. *Journal of Spectroscopy*, 2015, **2015**(218413):1-7.
- [11] LV Guang-ping, CHANG Jun, WANG Qing-pu, *et al.* Research progress of optical  $\text{H}_2\text{O}$  sensor with a DFB diode laser [J]. *Photonic Sensors*, 2014, **4**(2): 113-119.
- [12] YUN Yu-xin, CHEN Wei-gen, SUN Cai-xin, *et al.* Photoacoustic detection of methane dissolved in transformer oil[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, **28**(34): 40-46.  
云玉新, 陈伟根, 孙才新, 等. 变压器油中甲烷气体的光声光谱检测方法[J]. *中国电机工程学报*, 2008, **28**(34): 40-46.
- [13] LIU Kun, YI Hong-ming, GAO Xiao-ming, *et al.* Off-beam quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(10): 1594 - 1596.
- [14] LIU Qiang. Research on absorption properties of atmospheric aerosol based on photoacoustic spectroscopy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.  
刘强. 光声光谱技术测量大气气溶胶吸收特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [15] LI Yang-liu. Dissolved gases on-line analysis technology of insulation oil based on membrane extraction and photoacoustic spectroscopy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.  
李洋流. 基于膜分离与光声光谱的绝缘油中溶解气体在线分析技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.