

# 变压器油中溶解气体光声光谱检测的温度特性

陈伟根<sup>1</sup> 刘冰洁<sup>1</sup> 周恒逸<sup>2</sup> 王有元<sup>1</sup>

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400030; 2. 湖南省电力公司试验研究院 长沙 410007)

**摘要** 气体光声光谱检测技术能很好地应用于变压器油中溶解气体的在线监测。温度是光声光谱检测的重要影响因素之一。论文基于光声光谱技术的基本原理, 利用分布反馈半导体激光器构建了一种便携式、可调谐的光声光谱装置; 在分析光声池声学理论的基础上, 结合实验探讨了温度对光声池池常数、谐振频率以及气体吸收系数的影响。以变压器油中主要特征气体C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>进行实验分析, 得到了乙炔气体光声信号与温度之间的关系曲线, 理论及实验结果为进一步完善油中气体光声光谱在线监测系统奠定了重要基础。

**关键词:** 油中溶解气体 光声光谱 光声池 温度特性

**中图分类号:** TM411; TM214

## The Temperature Characteristics of Photoacoustic Spectroscopy Detection for Dissolved Gases in Transformer Oil

Chen Weigen<sup>1</sup> Liu Bingjie<sup>1</sup> Zhou Hengyi<sup>2</sup> Wang Youyuan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University Chongqing 400030 China; 2. Hunan Electric Power Company Testing Research Institute Changsha 410007 China)

**Abstract** Gas photoacoustic spectroscopy (PAS) can be well applied in transformer oil-dissolved gas detection online monitoring. The effect of temperature on the photoacoustic spectroscopy detection is significant. A portable and tunable experimental setup with a distributed feedback diode laser is developed based on the fundamental of PAS in the paper. The influences of temperature on photoacoustic cell constant, resonant frequency and gas absorption coefficients with the experiments are discussed. Based on the experimental analysis of the acetylene dissolved in transformer oil, the relationships between acetylene photoacoustic signal and temperature are given. The theoretical and experimental results laid an important foundation, for the further improvement in oil gas photoacoustic spectroscopy of on-line monitoring system.

**Keywords:** Dissolved gas-in-oil, photoacoustic spectroscopy, photoacoustic cell, temperature characteristic

国家高技术研究发展计划(863计划)(2009AA04Z416)和国家自然科学基金(50777069)资助项目。

收稿日期 2009-10-29 改稿日期 2010-06-11

## 1 引言

变压器油中溶解气体的检测及分析是运行电力变压器状态监测的有效方法, 在国内外得到了广泛

应用<sup>[1-3]</sup>。光声光谱气体检测方法作为一种新型光学检测传感技术, 克服了传统油中气体在线监测技术的不足, 并具有不消耗气样、长期稳定性好、灵敏度更高、检测时间短、便于现场检测等优点<sup>[4]</sup>; 将其应用到油中溶解气体在线监测技术领域具有巨大

的应用潜力<sup>[4-7]</sup>。

近年来,英国 Kelman 公司相继研制出基于光声光谱技术(PAS)的在线式和便携式油中气体分析仪,其检测范围、灵敏度等技术指标基本满足现场检测的需要。然而在进一步的测试中发现,仪器的检测精度易受外界光照、温度、压力、振动等环境因素的干扰,导致现场应用效果不甚理想;其中温度因素对检测的影响尤为显著。因此,很有必要对温度影响光声光谱检测开展深入分析,本文利用分布反馈半导体(DFB)激光器构建了一种光声光谱测量装置,通过对温度与光声池池常数、谐振频率以及气体吸收系数的影响的实验探讨,实现了变压器油中主要特征气体  $C_2H_2$  的光声光谱检测温度特性的研究。

## 2 实验装置及原理

基于光声光谱技术的基本原理,本文构建了一种便携可调谐的光声光谱装置,其原理图如图 1 所示。

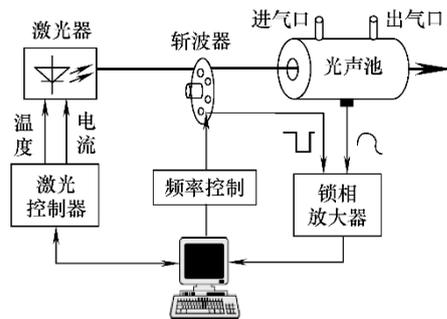


图1 光声光谱实验装置原理图

Fig.1 The test device of photoacoustic spectroscopy

该装置采用 NEL 公司的 DFB 半导体激光器,代替了传统的 CO 和  $CO_2$  激光器,具有可调谐、窄线宽、操作简便、体积轻巧、价格低廉等技术特性,符合便携式可调谐的设计要求。激光器由 InGaAsP 材料制作而成,为单纵模辐射,边模抑制比 43dB、发射线宽为 2MHz,相对于气体的吸收线宽(一般在 GHz)来说可以忽略,因而该激光器是一种理想的单色光源,其工作波长可通过改变其工作温度或注入电流进行调谐。激光控制器为 Thorlab 公司的 ITC502。麦克风选用 Knowles 公司的麦克风 EK-3024,并将其开口设置与谐振腔管壁平齐,以获得最好的检测效果,其灵敏度为 22mV/Pa。斩波器采用 Stanford 公司的 SR540,频率调制范围可达到 3.7~4kHz。锁相放大器为

Stanford 公司的 SR830,其利用互相关检测提出微弱信号。

光声池作为光声光谱检测的核心部分,由黄铜加工而成,内表面抛光,并用透过率大于 90% 的石英窗片密封,工作模式设计为纵向谐振;其纵剖面如图 2 所示,中部的谐振腔是长 10cm、直径 1cm 的圆柱型腔体;谐振腔两端的腔体称为缓冲室,用来隔离窗口片对光吸收而产生的噪声。光声池的性能将直接决定了光声光谱检测的精度。

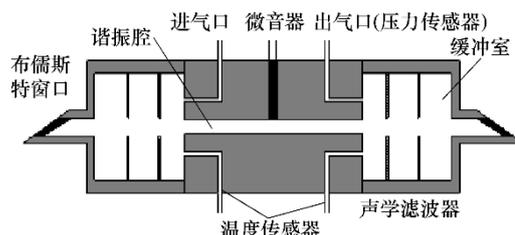


图2 光声池的纵剖面图

Fig.2 The longitudinal section drawing of PA cell

## 3 光声池声学理论

光声池是光声光谱检测中的关键部位,在封闭的池内,试样气体因吸收调制光能而产生的热源  $H(\mathbf{r},t)$  会在光声池中激发出光声信号。光声信号可用声压  $p(\mathbf{r},t)$  来描述,气体中热声波的产生一般用如下数学模型来描述<sup>[8]</sup>:

$$\nabla^2 p(\mathbf{r},t) - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 p(\mathbf{r},t)}{\partial t^2} = -\frac{\gamma-1}{v^2} \cdot \frac{\partial H(\mathbf{r},t)}{\partial t} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{r}$  为位移矢量;  $\gamma$  为气体绝热系数;  $v$  为气体中声波的传播速度;  $H(\mathbf{r},t)$  为热功率密度。

在柱坐标系中,简正模式  $j$  下的谐振频率  $f_j$ 、振幅  $A_j(\omega)$  可表示为

$$f_j = f_{jm} = \frac{\omega_j}{2\pi} = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{\alpha_{jm}}{R_c}\right)^2 + \left(\frac{q}{L_c}\right)^2} \quad (2)$$

$$A_j(\omega) = -\frac{i\omega(\gamma-1)N_{tot}\sigma P_0 c \int_{V_c} p_j^* g dV}{\omega_j^2 V_c [1 - \omega^2/\omega_j^2 - i\omega/(\omega_j Q_j)]} \quad (3)$$

式中,  $\omega_j$  为简正模式  $j$  的谐振角频率;  $P_j^*$  为  $P_j$  的复共轭;  $V_c$  为光声池谐振管的体积;  $Q_j$  为模式  $j$  的品质因数; 激光功率为  $P_0$ ;  $C$  为气体浓度; 交叠积分  $\int_{V_c} p_j^* g dV$  表示光强分布与简正模式的耦合程度,用  $I_j$  表示。

根据以上各式,并按照谐振式光声池的设计原

理, 合理设计光声池的外形、尺寸、结构、材料等, 使光声池工作在一个简正模式下, 即保证  $\omega = \omega_j$  的谐振条件。可得到此时在光声池中的  $r_M$  处的声压为<sup>[9]</sup>

$$p(r_M, \omega_j) = -(\gamma - 1) \frac{Q_j L_c}{\omega_j V_c} I_j p_j(r_M) \alpha P_0 \quad (4)$$

式中,  $-(\gamma - 1) \frac{Q_j L_c}{\omega_j V_c} I_j p_j(r_M)$  这部分作为光声池的一个重要特性参数, 称为池常数, 记作  $C_{\text{cell}}$ 。对于一个一维纵向谐振光声池, 工作在一阶纵向谐振模式下的池常数  $C_{001}$  可简化为

$$C_{001} = \frac{4(\gamma - 1) Q_{001} L_c^2}{\nu V_c \pi^2} \quad (5)$$

式中,  $Q_{001}$  为一维纵向谐振光声池的品质因数。

因而, 光声信号  $S_{\text{PA}}$  可表示为

$$S_{\text{PA}} = p(r_M, \omega_j) = C_{\text{cell}} \alpha P_0 \quad (6)$$

上式表明, 光声信号  $S_{\text{PA}}$  与气体的吸收系数  $\alpha$  及光功率  $P_0$  成正比, 而池常数  $C_{\text{cell}}$  反映出系统吸收光能转化为声能的能力, 式 (6) 是进行气体光声光谱检测的基础公式。

## 4 光声光谱检测的温度影响分析

### 4.1 温度对池常数的影响

池常数  $C_{\text{cell}}$  作为光声池的一个特性参数, 表征了光声光谱系统将气体吸收的光能转化为声能的能力。对于一阶纵向谐振光声池, 其大小与光声池的体积、品质因数、气体中声传播速度等因素有关。

品质因数  $Q$  是光声池的另一个重要参量, 它反映了光声池对声波的谐振增强性能,  $Q$  值越大, 对声波的放大作用越大。理论上, 对于纵向谐振光声池, 其品质因数  $Q$  主要由面损耗引起的品质因数来计算<sup>[10]</sup>。

$$Q = \frac{R_c}{\delta_v + (\gamma - 1)\delta_h(1 + 2R_c/L_c)} \quad (7)$$

式中,  $\delta_v$  为粘性边界层厚度又称粘滞系数;  $\delta_h$  为热边界层厚度, 一般用热传导系数表示。

大量研究表明, 温度的变化将直接影响光声池的粘滞系数和热传导: 当温度升高时, 粘滞系数和热传导会随之增大; 当温度降低时, 随之降低。这些变化将决定着品质因数的改变, 进而影响池常数。其次, 温度对光声腔池常数的影响还应考虑气体中的声传播速度随温度的变化。

通过以上理论分析, 可以得出温度对池常数的影响结论: 随着温度升高, 光声池的粘滞系数和热传导随之增大, 从而使得谐振腔中存储的声能量减小, 最终导致品质因数下降; 同时在气体中的声传播速度也增大; 综合两者的影响, 使得光声池池常数减小。反之随温度降低, 池常数增加。

此外, 本文又从实验的角度, 设置激光器的输出功率  $P_0$  为 13.7mW、斩波器的工作频率为 1442Hz、锁相放大器的积分时间为 1s; 在不同温度下, 通过测量吸收系数已知 ( $3.04 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1} \text{MPa}^{-1}$ ) 的标准  $\text{C}_2\text{H}_4$  气体得到的光声信号, 然后再利用式

(6) 反演计算得到池常数; 由此画出了池常数随温度变化的规律曲线, 如图 3 所示。图中表现的趋势与理论分析体现了良好的一致性。

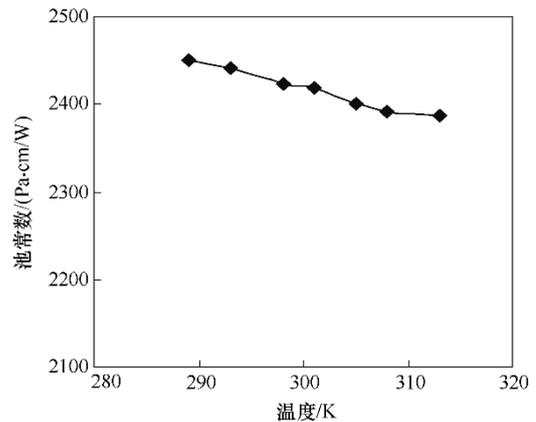


图 3 光声池常数随温度的变化曲线

Fig.3 Photoacoustic cell constant under different temperatures

### 4.2 温度对谐振频率的影响

谐振式光声池的原理是声波在腔体中传输时, 通过调制光源照射频率使其与声波在腔室中传播的本征频率 (谐振频率或共振频率) 重合形成共振, 以此对光声信号实现共振放大, 从而利于检测。

由式 (2) 反映出, 谐振频率的大小与光声池的长度、半径以及声波的传播速度等有关。在光声池的长度、半径等因素固定的情况下, 声波的传播速度直接决定了谐振频率的大小。理论上, 随着温度的上升, 声波在气体中传播速度会增大, 从而使得光声光谱检测的谐振频率随之增大。

图 4 是本文通过有限元方法模拟一维光声信号传输模型得到的不考虑温度对气体吸收系数等其他因素的影响时, 光声信号与光声腔谐振频率随温度变化的规律。图中, 当温度为 293K 时, 谐振频率为 1609Hz, 光声信号为 1.203mV; 温度 283K 时, 谐振频率为 1581Hz, 光声信号为 1.214mV; 温度

273K时, 谐振频率为 1553Hz, 光声信号为 1.225mV。故随着温度的上升, 谐振频率显著增大。当温度从 293K 下降到 273K 时, 谐振频率变小。其变化趋势与前文分析相符。

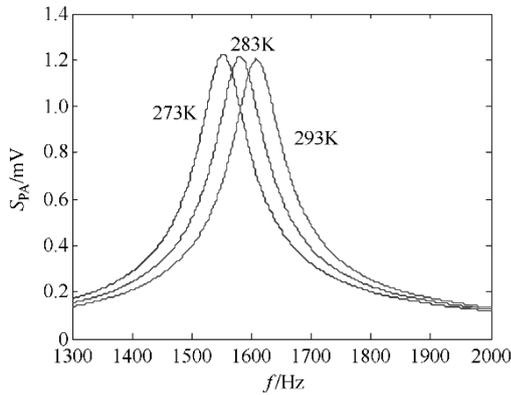


图4 光声信号与谐振频率随温度的变化曲线

Fig.4 Temperature vs. PA signals and resonant frequency

综上所述, 温度对气体光声光谱检测的谐振频率影响非常大。因此, 在进行气体检测的时候, 应根据环境温度因素及时调整光源的调制频率, 以确保光声信号值最大。

#### 4.3 温度对吸收系数的影响

红外光谱主要根据气体分子吸收谱线的形状、吸收谱线位置以及特征吸收谱线强度进行气体的定性定量分析, 而吸收系数是标明吸收谱线位置及其强度的一个重要参数; 并且吸收系数还是由光声信号值反演气体浓度计算中的重要组成。

根据文献[11-12]中指出的, 由量子力学和光谱学理论可知, 单位体积内气体单根吸收谱线的吸收系数与吸收谱线的线强度、线型函数及压强和温度有关。其中线强度  $S(T)$  是温度的函数, 可以用 HITRAN2004 的光谱分析软件 HAWKS 获得, 也可以根据参考温度  $T_0$  时的线强度  $S(T_0)$  计算<sup>[13-14]</sup>。

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp \left[ -\frac{h\nu_c E_i''}{k_B} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \cdot \frac{1 - \exp(-h\nu_c \nu_{0i} / (k_B T))}{1 - \exp(-h\nu_c \nu_{0i} / (k_B T_0))} \quad (8)$$

式中,  $k_B$  为波尔兹曼常数;  $E_i''$  为低跃迁态的能量;

$\nu_{0i}$  为跃迁频率;  $Q(T)$  为总的分子内部分割函数,

具体值在 HITRAN2004 中查询。

考虑到实验室及现场进行油中溶解气体分析时

待测气体的温度, 本文以变压器油中的  $C_2H_4$  和  $C_2H_2$  为代表, 采用逐线积分方法计算得到了压强 0.1MPa、温度 246~346K 下  $C_2H_4$  和  $C_2H_2$  吸收谱线的峰值吸收系数随温度的变化趋势, 如图 5 所示。由图可看出, 气体的峰值吸收系数随温度的升高而增大, 其变化梯度近似常数。这是因为压强一定时, 吸收谱线的峰值吸收系数主要取决于该谱线的线强度, 而  $C_2H_4$  和  $C_2H_2$  吸收谱线的线强度在温度 246~346K 内随温度升高而近似线性升高。

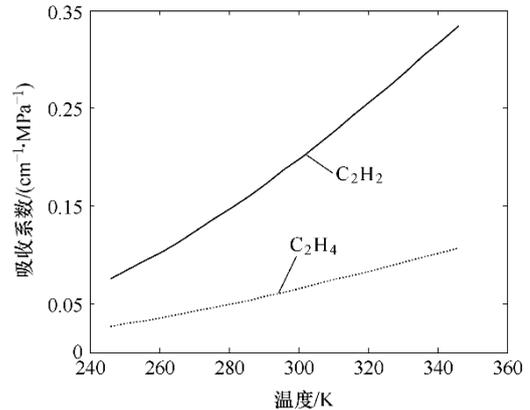


图5  $C_2H_2$ 、 $C_2H_4$  吸收谱线峰值吸收系数随温度的变化曲线

Fig.5 Temperature vs. peak absorption coefficient of  $C_2H_2$  and  $C_2H_4$  absorption line

同时, 温度的变化还会造成气体谱线线宽的改变。图 6 给出了压强 0.1MPa、温度 246~346K 下  $C_2H_4$  和  $C_2H_2$  吸收谱线全线宽 (FWHM) 随温度的变化曲线。在一定的温度范围内, 气体的全线宽随温度的升高而升高。全线宽的增大, 必然使谱线间的重叠现象加重, 这说明通过减小温度也可以提高光谱的分辨率。

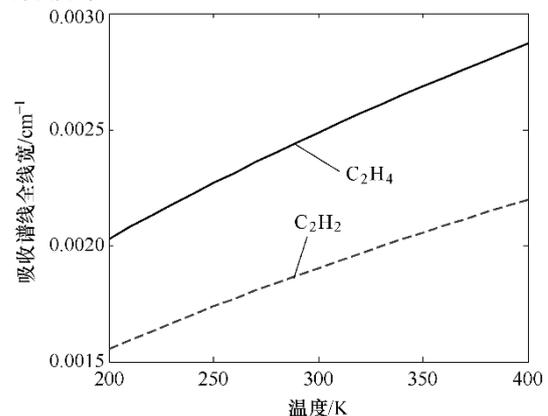


图6  $C_2H_2$ 、 $C_2H_4$  吸收谱线全线宽 (FWHM) 随温度的变化曲线

Fig.6 Temperature vs. FWHM of  $C_2H_2$  and  $C_2H_4$  absorption line

下表是本文通过逐线积分方法计算得到的变压器油中  $C_2H_4$ 、 $C_2H_2$  等 6 种气体在温度 246K、296K、346K，压强 0.1MPa 下的峰值吸收系数。可见，各气体峰值吸收系数均受温度的影响较大。因此，在利用吸收系数反演气体浓度的计算中，必须考虑到温度对吸收系数的影响，若仅根据一定温度下的吸收系数计算任何情况下的气体浓度，必然产生较大的误差，应根据参考温度和实测温度的差值对参考温度下的吸收系数进行修正。

表 各气体吸收谱线在不同温度下的峰值吸收系数

Tab. Peak absorption coefficients of the absorption line of each gas at various temperatures  
(单位:  $cm^{-1} \cdot MPa^{-1}$ )

气体	温度/K		
	246	296	346
$CH_4$	$2.57 \times 10^{-5}$	$7.52 \times 10^{-5}$	$1.53 \times 10^{-5}$
$C_2H_6$	$1.77 \times 10^{-5}$	$5.05 \times 10^{-4}$	$4.91 \times 10^{-3}$
$C_2H_4$	$3.08 \times 10^{-2}$	$6.18 \times 10^{-2}$	$9.42 \times 10^{-1}$
$C_2H_2$	$8.66 \times 10^{-2}$	$1.87 \times 10^{-1}$	$2.97 \times 10^{-1}$
CO	$2.24 \times 10^{-6}$	$5.52 \times 10^{-6}$	$1.01 \times 10^{-5}$
$CO_2$	0.550	1.0085	1.4563

需要说明的是，虽然本文研究的各气体吸收谱线的峰值吸收系数在温度 246~346K 下随温度的升高而增大，但不能将这一结论推广到任意温度及所有气体分子吸收谱线。这是因为，吸收系数是气体分子在外界能量激发下分子中原子振动、分子转动等状态发生改变的外在表征；与分子结构、温度等因素密切相关。讨论吸收系数与温度的关系时，必须给出具体的分子吸收谱线和温度范围。

## 5 变压器油中乙炔气体光声光谱检测温度特性研究

根据前文对光声光谱检测的温度影响分析可知，温度是影响气体光声光谱检测的一个重要因素。随着温度的升高，声波在气体中传播速度增大，从而导致光声池的谐振频率增大；同时温度升高，会使池常数减小，气体吸收系数增大，气体吸收全谱宽也增大。最终导致光声信号发生改变。

本文以变压器油中重要特征气体  $C_2H_2$  为代表，就温度对光声光谱检测的影响进行实验分析，将标准浓度为  $400\mu L/L$  的  $C_2H_2$  气体缓慢流入光声池中，保持光声池内气压为 0.1MPa，设置锁相放大器积分时间为 1s，调节 DFB 激光器电流为 45.30mA，

功率为 13.7mW，并调节激光器温控电阻，使其辐射波长为 1520.09nm；然后，调节并保持斩波器的斩波频率为 1442Hz，通过温度控制器改变光声池内气体的温度在 289~313K 范围变化，为了减小测量误差，采用多次测量取平均的方法记录下  $C_2H_2$  在保持斩波频率不变时，不同温度下对应的光声信号；改变斩波器的斩波频率，仍然采用取平均值的方法记录下  $C_2H_2$  在不同温度下的光声信号最大值。得出乙炔气体光声信号与温度的关系曲线，如图 7 所示。

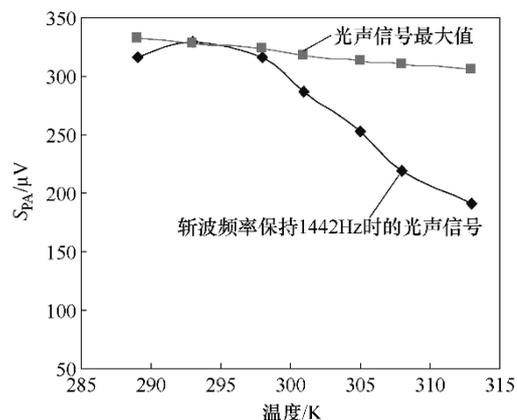


图 7 温度对乙炔气体光声光谱检测的影响

Fig.7 The influence of temperature on acetylene PAS detection

由图可看出，在综合考虑了多种因素的情况下，温度对气体光声光谱检测影响仍然很大，在图 7 所示的温度范围内， $C_2H_2$  光声信号最大值随温度升高反而减少。这是因为，虽然温度升高，乙炔的吸收系数增大，但其粘滞系数和热传导也随之增大，减少了谐振腔中声能量的存储，使得品质因数下降，同时在气体中的声传播速度增大，这使得光声池池常数减小，故光声信号值下降。从图中还可发现若调制频率保持 1442Hz 不变，随着温度的升高乙炔光声信号值发生了先增大后减小的改变。这也验证了前面提出的结论，即在气体的光声光谱检测中，应根据环境温度因素调整光源的调制频率，确保光声信号值最大。

## 6 结论

(1) 随着温度上升，由于品质因数和声传播速度的改变使得光声池池常数减小；反之，温度降低，池常数增加。因此，在光声光谱检测时应注意池常数的温度影响修正。

(2) 温度对气体光声光谱检测的谐振频率影响显著。在进行气体检测的时候,应根据环境温度因素及时调整光源的调制频率,以确保光声信号值最大。

(3) 温度对峰值吸收系数及吸收谱线全线宽的影响较大,利用吸收系数反演气体浓度时,必须用气体测量时的温度和吸收系数计算时的温度的差值修正吸收系数才能得到气体浓度的准确结果。

(4) 通过实验,得到了乙炔气体光声信号与温度的关系曲线。表明在综合考虑多方因素影响的情况下,光声信号最大值随温度升高而减少。若保持调制频率 1442Hz 不变,随着温度的升高乙炔光声信号先增大后减小。

### 参考文献

- [1] 孙才新,陈伟根,李俭,等. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 孔英会,苑津莎,李新叶,等. 基于时序特征和参数估计的变压器故障诊断方法 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 48-54.  
Kong Yinghui, Yuan Jinsha, Li Xinye, et al. A fault diagnosis method for power transformer based on temporal characteristics and parameter estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(12): 48-54.
- [3] 李俭,孙才新,陈伟根,等. 基于灰色聚类分析的充油电力变压器绝缘故障诊断的研究 [J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 80-83.  
Li Jian, Sun Caixin, Chen Weigen, et al. Study on fault diagnosis of insulation of oil-immersed transformer based on grey cluster theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(4): 80-83.
- [4] 陈伟根,云玉新,潘翀,等. 光声光谱技术应用于变压器油中溶解气体分析 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 94-98.  
Chen Weigen, Yun Yuxin, Pan Chong, et al. Gas-in-oil analysis in transformers based on photoacoustic spectroscopy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 94-98.
- [5] Wan J K S, Ioffe M S, Depew M C. A novel acoustic sensing system for on-line hydrogen measurements[J]. IEEE Transactions: 1995, 32(3): 233-237.
- [6] 张川,王辅. 光声光谱技术在变压器油气分析中的应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 84-86.  
Zhang Chuan, Wang Fu. Application of photoacoustic spectroscopy technology to dissolved gas analysis in oil of oil-immersed power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 84-86.
- [7] 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.  
Yun Yuxin, Chen Weigen, Sun Caixin, et al. Photoacoustic detection of methane dissolved in transformer oil[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 40-46.
- [8] Pao Y H. Photoacoustic spectroscopy and detection[M]. New York: Academic Press, 1977.
- [9] Kanta P, Civis S. Application of InAsSb/InAsSbP and lead chalcogenide infrared diode lasers for photoacoustic detection in the 3.2 and 5 $\mu$ m region[J]. Spectrochimica Acta Part A, 2003, 59(13): 3063-3074.
- [10] Miklos A. Application of acoustic resonators in photoacoustic trace gas analysis and metrology[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(4): 1937-1955.
- [11] Wakatsuki K, Fuss S P, Hamins A, et al. A technique for extrapolating absorption coefficient measurements[C]. Proceedings of the Combustion Institute- Thirtieth International Symposium on Combustion, 2005, 31: 1565-1573.
- [12] Sparks L. Efficient line-by-line calculation of absorption coefficients to high numerical accuracy[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1997, 57(5): 631-650.
- [13] Bernath P F. Spectra of atoms and molecules[M]. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- [14] Vandaele A C, Hermans C, Fally S, et al. Absorption cross-sections of NO<sub>2</sub>: simulation of temperature and pressure effects[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2003, 76(3): 373-391.

---

作者简介:陈伟根 男,1967年生,教授,博士生导师,主要从事电气设备在线智能检测及诊断技术研究。刘冰洁 女,1986年生,硕士研究生,主要从事电气设备在线智能检测及诊断技术研究。