

文章编号:1000-582X(2011)02-007-07

微弱气体光声光谱监测光声信号影响因素分析

陈伟根¹, 刘冰洁¹, 胡金星², 周恒逸¹, 李 剑¹

(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 400044;

2. 重庆市电力公司城区供电局, 重庆 400014)

摘 要: 气体光声光谱检测技术灵敏度高, 不消耗被测气体, 能很好地应用于变压器油中溶解微弱气体的在线监测。检测中, 麦克风输出的光声信号是进行气体浓度分析的唯一特征量。基于光声光谱技术的基本原理, 构建了一种便携式、可调谐的光声光谱装置。在分析气体光声信号激发机理的基础上, 结合实验深入探讨了影响气体光声信号的多种因素, 获得气体光声信号与压力、温度、激光功率、气体浓度、背景气体、斩波频率及谐振频率漂移之间的关系曲线, 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提供了技术参照和支撑。

关键词: 微弱气体; 光声光谱; 气体检测; 影响因素

中图分类号: TM406

文献标志码: A

Influential factors analysis on photoacoustic signal of photoacoustic spectroscopy monitoring trace gases

CHEN Wei-gen¹, LIU Bing-jie¹, HU Jin-xing², ZHOU Heng-yi¹, LI Jian¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Chengqu Power Supply Bureau, Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, P. R. China)

Abstract: Photoacoustic spectroscopy (PAS) is a highly sensitive gas analyzing method without the short-coming of gas consumption, which can be used in transformer oil trace gases dissolved in on line monitoring. The photoacoustic signal is detected with a microphone, which is the only feature in gas concentration analysis. A portable and tunable experimental setup has been developed based on the photoacoustic spectroscopy fundamental. Through the photoacoustic signal stimulate mechanism analysis, this paper thoroughly discusses the influences of gas pressure, temperature, laser power, gas concentration, background gas, chopped frequency and the resonant frequency drift on the gas photoacoustic signal. The theoretical and experimental results supply reference and technical support for further improvements in oil gas photoacoustic spectroscopy of on-line monitoring system.

Key words: trace gases; photoacoustic spectroscopy; gas detection; influence factors

油中溶解气体分析是判断油浸式电力变压器早期潜伏性故障最方便、最有效的方法之一^[1-2], 在国

内外得到了广泛应用^[1-5]。快速、准确地对油中溶解气体的成分和含量进行分析是该方法的前提和关

收稿日期: 2010-07-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA04Z416)

作者简介: 陈伟根(1967-), 男, 重庆大学教授, 博士, 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, (E-mail) weigench@cqu.edu.cn.

键。气体光声光谱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分析技术的不足,并具有不消耗气样、长期稳定性好、灵敏度更高、便于现场检测等优点^[6];在变压器油中溶解气体在线监测领域具有巨大的应用潜力^[6-9]。

近年来,国内外学者对气体光声光谱检测技术开展了大量的工作,并取得了长足的进步。研究中, J. Reuss 等设计了基于 CO₂ 激光器的腔内吸收光声光谱仪,对乙烯的检测灵敏度达到 $2 \times 10^{-5} \mu\text{L/L}$ ^[6];国内王书涛等将光声光谱技术与光纤技术相结合研制出基于光声光谱法的光纤气体传感器,对 SO₂ 气体的最低检测灵敏度达到了 1.2×10^{-10} ^[7]。文献^[6]则较为全面的综述了近期国内外的气体光声光谱检测成果。就目前的研究现状来看,气体光声光谱检测技术在灵敏度、检测范围等指标上已基本满足现场需要;但是在进一步的测试中却发现,检测得到的光声信号值极易受外界因素的干扰,导致现场应用效果不甚理想。因此,非常有必要对影响气体光声信号的多种因素展开深入分析。

笔者基于光声光谱技术的基本原理,利用半导体激光器构建了一种便携式、可调谐的光声光谱装置;运用该装置,在分析气体光声信号激发机理的基础上,结合实验深入探讨了影响气体光声信号的多种因素,得到了气体光声信号与压力、温度、激光功率、气体浓度、背景气体、斩波频率及谐振频率漂移之间的关系曲线,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提供了技术参照和支撑。

1 实验装置及原理

气体光声光谱检测系统的结构图如图 1 所示。整个检测系统主要由激光光源、激光控制器、光声池、调制斩波器、以及信号检测等单元组成的。

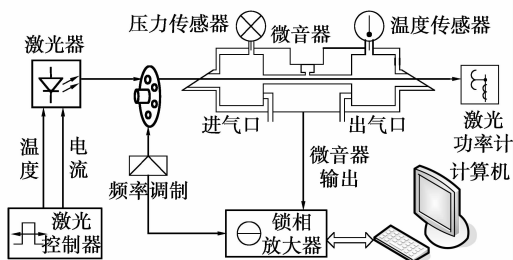


图 1 气体光声光谱检测结构图

其中光声池作为光声光谱检测的核心部分,它的性能直接决定了整个系统检测的精度。笔者采用

热传导性能良好的黄铜材料自行设计了光声池,其纵剖面如图 2 所示。

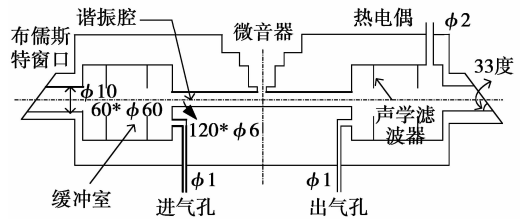


图 2 光声池纵剖面图

光声池内壁表面采用超声波工艺进行抛光处理,池外端使用透过率大于 90% 的石英窗片按布儒斯特角进行密封,工作模式设计为纵向谐振;中部的谐振腔是长 120 mm、直径 6 mm 的圆柱型腔体;谐振腔两端的腔体称为缓冲室,它们用来隔离窗口片对光吸收而产生的噪声。表 1 给出了按设计尺寸计算得到的光声池特性参数的理论值,可见各参数设计能满足笔者要求。

表 1 光声池特性参数的理论值

谐振腔长度/mm	谐振腔半径/mm	品质因数 (Pa·cm·W ⁻¹)	池常数/	谐振频率/Hz
120	3	36.6	7 240.4	1 396

2 气体光声信号的激发机理

气体光声信号的产生是一个复杂的光、热、声、电有机结合的能量转换过程,如图 3 所示,其中热的产生和声的激发是这个过程中最重要的 2 个环节。

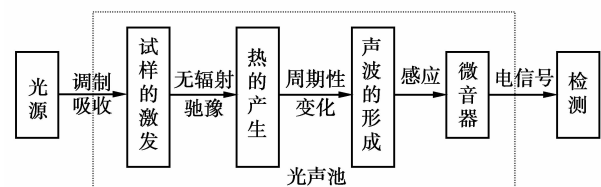


图 3 气体光声信号的激发过程

根据气体分子能级跃迁理论,气体分子受激发后的无辐射弛豫产生的热可用热功率密度 $H(r, t)$ 来表示,当全部激发态能量都通过无辐射弛豫过程回到基态时,令人射光光强为 $I(r, t)$,则

$$H(r, t) = \alpha I(r, t). \quad (1)$$

式中: $\alpha = c\sigma$ 为气体分子的吸收系数,在入射光波长

一定的情况下,如果试样的分子吸收截面 σ 为已知,则可由 $H(\mathbf{r}, t)$ 的强弱来确定吸收分子的浓度 c 。

由气体定律可知:在光声池内,试样气体吸收调制光能后产生的热将在池中激发出声波。若池内气体近似为理想气体,则声波的波动方程为^[8-9]

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

其中: \mathbf{r} 为位移矢量, γ 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, $p(\mathbf{r}, t)$ 为声压。

在频域内,根据式(2)和边界条件, $P_j(\mathbf{r}, \omega)$ 可以表示为多种声场分布 $P_j(\mathbf{r})$ 的叠加^[10]

$$p(\mathbf{r}, \omega) = \sum_j A_j(\omega) p_j(\mathbf{r}) \quad (3)$$

式中: $P_j(\mathbf{r})$ 取决于光声池的形状,称为声振动的简正模式, $A_j(\omega)$ 为声波振幅, ω 为声波的角频率。

对于长为 L_c , 半径为 R_c 的两端开口圆柱型光声池,利用分离变量法求解 Helmholtz 方程可得简正模式下 $P_j(\mathbf{r})$ 的解^[10]

$$p_j(\mathbf{r}) = \frac{\cos}{\sin} (m\theta) [AJ_m(k_r r) + BN_m(k_r r)] * [C \sin(k_z z) + D \cos(k_z z)] \quad (4)$$

其中: J_m 和 N_m 分别是第一类和第二类贝塞尔函数。由于光声池为圆柱形, $N_m(0) = \infty$; 因此系数 $B=0$, 而其他参数 K_r 、 K_z 和 m 的取值则由边界条件决定。

在柱坐标系中,由以上各式可求得简正模式 j 下的声波振幅 $A_j(\omega)$ 为

$$A_j(\omega) = -\frac{i\omega}{\omega_j^2} \frac{(\gamma-1)N_{tot}\sigma P_0 c \int_{V_c} p_j^* g dV}{V_c \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_j^2} - \frac{i\omega}{\omega_j Q_j}\right)} \quad (5)$$

式中: ω_j 为简正模式 j 的谐振角频率, P_j^* 为 P_j 的复共轭, V_c 为谐振腔的体积, 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 $I_j = \int_{V_c} p_j^* g dV$ 表示光强分布与简正模式的耦合程度。

将式(4)、(5)代入式(3)中,并通过合理地设计光声池,使光声池工作在一个简正模式 $P_j(\mathbf{r})$ 上,即保证 $\omega = \omega_j$ 。此时,在光声池中的 \mathbf{r}_M 处声压为^[11]

$$p(\mathbf{r}_M, \omega_j) = -(\gamma-1) \frac{Q_j L_c}{\omega_j V_c} I_j p_j(\mathbf{r}_M) \alpha P_0 \quad (6)$$

式中, $-(\gamma-1) \frac{Q_j L_c}{\omega_j V_c} I_j p_j(\mathbf{r}_M)$ 与光声池的体积、谐振角频率、品质因数等因素有关,而与气体吸收系数、

光功率无关,因此,可把这部分看成是光声池系统的一个特性参数,称为池常数^[12],记作 C_{cell} 。

因而,池内激发的光声信号 S_{pA} 可表示为:

$$S_{pA} = p(\mathbf{r}_M, \omega_j) = C_{cell} \alpha P_0 \quad (7)$$

上式表明,光声信号 S_{pA} 与气体的吸收系数 α 及光功率 P_0 成正比,而池常数 C_{cell} 反映出系统吸收光能转化为声能的能力,式(7)不仅是光声信号的激发公式,同时也是进行气体光声光谱检测的理论依据。

3 气体光声信号影响因素分析

3.1 压力对光声信号的影响

光声池是密闭的,因此谐振腔内气体压力的变化将直接导致气体光声信号随之发生改变。气体压力对光声信号的影响主要体现在对气体分子吸收系数的改变上^[13-14]。图 4 给出了在 296 K 温度下,相同数量级的 C_2H_4 和 C_2H_2 气体吸收谱线的峰值吸收系数^[15-16] 随着压强的变化而改变的趋势,其它气体与之有着相似的结果。从图中我们可看出,当压强由 10^{-4} MPa 向 0.1 MPa 增大时,气体吸收系数随之增大,而从 0.1 MPa 起始再继续增大压强,气体吸收系数的变化则趋于稳定。这是由于不同的压强下,气体分子吸收谱线的增宽机制的不同所导致的。因此,我们在利用近红外光谱分析气体浓度时,如果能控制被测气体的压强 $P \geq 0.1$ MPa, 那么检测得到的结果将基本不受压强的影响,而且灵敏度也较高。

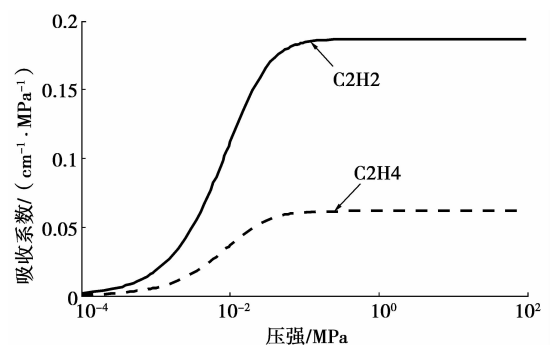


图 4 压强对气体吸收谱线峰值吸收系数的影响

以 C_2H_2 为代表实验研究了气体压力对光声信号的影响。具体实验条件为:分布反馈 (Distributed feedback, DFB) 半导体激光器激光功率为 13.7 mW, 调节温控电阻使其辐射波长为 1520.09 nm; 控制室温为 20 °C; 乙炔气体浓度为 400 μ L/L; 斩波频率为光声池的一阶纵向谐振频率

值。在以上实验条件下,采用多次测量取平均读数得到 C_2H_2 在不同气压下的光声信号值如图 5 所示,图中展现的趋势与气体吸收系数的分析体现了良好的一致性。

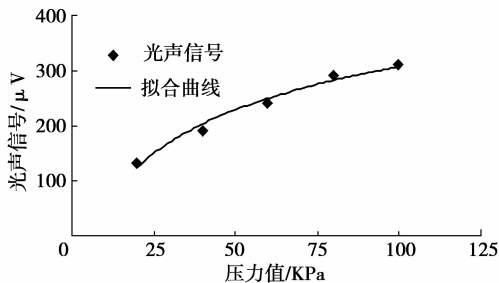


图 5 气体压力的变化对 C_2H_2 气体光声信号的影响

3.2 温度对光声信号的影响

温度是影响气体光声光谱检测信号值的另一个重要因素,理论分析发现温度对光声池品质因素、池常数、谐振频率、气体吸收系数及气体中传播声速等光声检测特性参数的影响非常大。

实验中,首先以流动法将浓度为 $400 \mu\text{L/L}$ 的标准 CH_4 和 C_2H_2 气体充入到光声池内,保持池内的压强为 0.1 MPa ,将锁相放大器的积分时间设置成 1 s ,DFB 激光器功率设为 13.7 mW ,并通过调节激光器的温控电阻,使激光辐射波长分别校准两种气体的特征波长;然后,调节并保持斩波器工作频率为一阶纵向谐振频率值,通过温度控制器改变光声池内气体的温度在 285 K 到 317 K 范围变化,为了减小测量误差,采用多次测量取平均(每个点测量 10 次)记录下 C_2H_2 气体在保持斩波频率不变时,不同温度对应的光声信号;改变斩波频率,仍然采用取平均值的方法记录下 CH_4 和 C_2H_2 在不同温度下的光声信号最大值,得到 CH_4 和 C_2H_2 光声信号与温度的关系曲线,如图 6 所示。

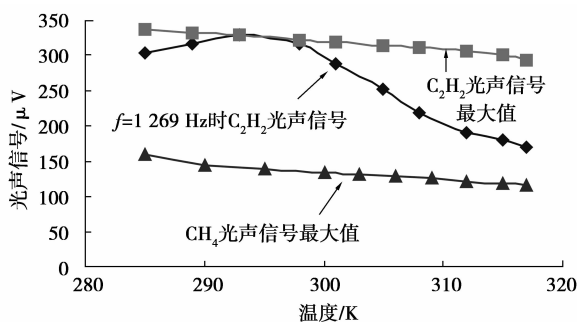
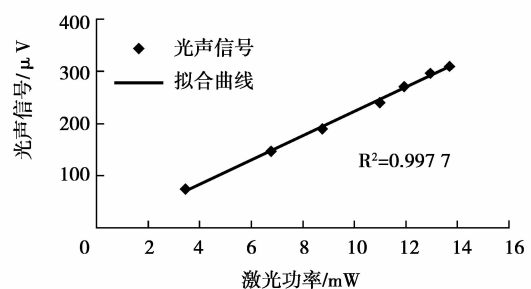


图 6 温度对 CH_4 、 C_2H_2 气体光声信号值的影响

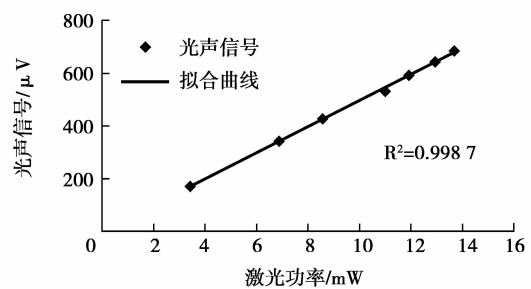
由图 6 可看出,温度对气体光声信号检测的影响非常大,在图中的温度范围内,随着温度的上升, CH_4 和 C_2H_2 气体光声信号的最大值反而减少,其原因是:虽然温度的上升会使气体吸收系数增大,但同时也会导致气体粘滞系数和热传导随之增大,从而使得品质因素下降;另外,气体中的声传播速度增大会使光声池的池常数减小,故导致最终的光声信号最大值下降。从图 6 中还可发现,如果不随温度的改变而及时调整斩波频率,乙炔气体光声信号值将会发生先增大后减小的变化。因此我们在进行气体光声光谱检测中,应根据环境温度调整斩波器的斩波频率,确保光声信号值最大。

3.3 激光功率对光声信号的影响

将浓度为 $1000 \mu\text{L/L}$ 的标准 CH_4 气体以流动法充入到光声池中,调节斩波频率为一阶纵向谐振频率;锁相放大器的积分时间设置为 1 s ;将 DFB 激光器设为恒功率工作模式,记录下不同激光器功率下的光声信号值,得到图 7(a)所示 CH_4 气体光声信号与激光功率的关系曲线。同理,配置不同浓度的 C_2H_2 气体,得到图 7(b)所示 C_2H_2 气体光声信号与激光功率的关系曲线。由图 7 可见,当激光器输出功率在 $3 \sim 14 \text{ mW}$ 范围内时,气体光声信号随激光功率的变化而线性规律变化,用一元线性回归方法拟和图中的结果,得到的拟和优度分别为 $R^2 = 0.9977$ 和 $R^2 = 0.9987$,这与式(7)得出的光声信号与激光功率呈线性关系的结论是一致的。



(a) CH_4 光声信号与激光功率的关系



(b) C_2H_2 光声信号与激光功率的关系

图 7 激光功率与 CH_4 、 C_2H_2 气体光声信号的关系曲线

同时图7也说明了,通过适当的增大激光光源的功率可有效的增大检测到的光声信号,从而提高检测灵敏度。但是需要说明的是:由于气体光声效应是由气体分子的无辐射弛豫将吸收的光能转变为热能所产生的,当气体浓度一定时,可被激发的气体分子数是有限的,因此,当激光的输出功率增大到一定数值时,气体光声信号将呈现饱和的状态,而不再随功率增大而线性增大。

3.4 背景气体对光声信号的影响

虽然气体的光声效应是由气体分子吸收红外光能而引发的无辐射弛豫过程所导致的,但是这并不代表气体光声信号只与吸收气体有关,实际中它还与光声池内的背景气体有一定的关联。背景气体对光声信号的影响可以由以下3个方面来解释。

1)混合气体的气体物理常数是由其各个组分共同决定的,而这些常数又与光声池的谐振频率、池常数及品质因数等特性参数密切相关。

2)由于光声池中绝大部分的气体是背景气体,因此背景气体是影响吸收气体分子碰撞增宽的重要因素,而碰撞增宽系数又将直接影响到气体分子的吸收谱线。

3)在气体分子间相互碰撞的过程中,入射光能的一部分会传递给背景气体,对于一些特殊混合气体,这种传递将引起气体的动力学冷却效应^[17]。

目前研究中,光声池内选用的背景气体多为 N_2 和He。理论分析发现,使用 N_2 作为背景气体时,可获得较高的池常数和品质因数,从而利于增大光声信号值。而使用He时会得到较低的谐振频率,进而降低了系统噪声水平。图8通过实验给出了不同的背景气体下 CH_4 气体光声信号的变化趋势图。

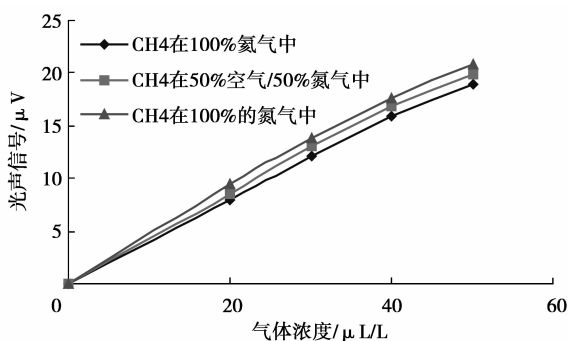


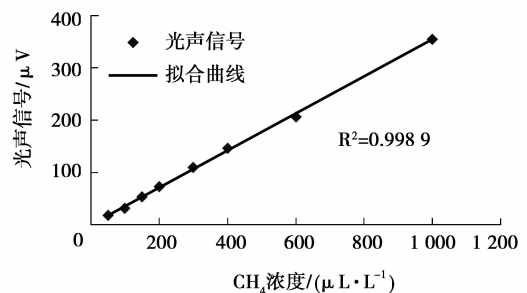
图8 不同背景气体下的 CH_4 气体光声信号

由图8可见,随着 N_2 浓度的升高,气体光声信号得到了一定程度的增大,因此,在光声光谱检测之

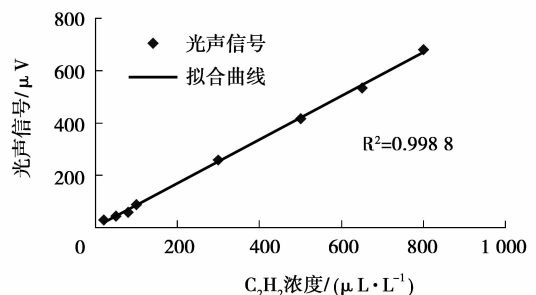
前首先应充入尽可能高浓度的 N_2 ,排净光声池内空气。需要指出的是,图8中充入100%He时,气体光声信号值有所降低,但是这并不代表真实的信号值被削弱了,而表现在系统噪声被减弱的前提下,总体得到的信号值有所下降。

3.5 气体浓度对光声信号的影响

通过计算机配气系统制备不同浓度的 CH_4 、 C_2H_2 标准气体,研究两种气体的光声信号与气体浓度之间的关系,具体实验步骤为:设置锁相放大器的积分时间为1s;调节并保持斩波器的斩波频率至光声池的一阶纵向谐振频率;将DFB激光器设为恒功率工作模式,并将其输出功率设置为13.7mW,调节激光器的工作温度,使其辐射波长分别校准 CH_4 和 C_2H_2 气体的特征波长;然后对不同浓度的 CH_4 、 C_2H_2 气体的光声信号进行测量,得到的实验结果如图9所示。显然,在图9的浓度范围内,2种气体的光声信号与其气体浓度之间均遵循着良好的线性关系。



(a) CH_4 的光声信号与气体浓度的关系



(b)光声信号与 C_2H_2 浓度的关系

图9 气体光声信号与浓度之间的关系

从增大光声信号的角度出发,可以推断出:气体浓度越高时,检测得到的光声信号值必然越大,气体浓度的变化会直接导致光声信号的改变。

3.6 其他因素影响

3.6.1 斩波频率对气体光声信号的影响

保持激光器输出的功率、波长不变,将光声池内充入浓度恒定的标准 CH_4 气体,调节斩波器的斩波频率由 500 Hz 缓慢增大至 1 900 Hz,记录下此过程中气体光声信号值发生的变化,得到气体光声信号的频率响应曲线,如图 10 所示。

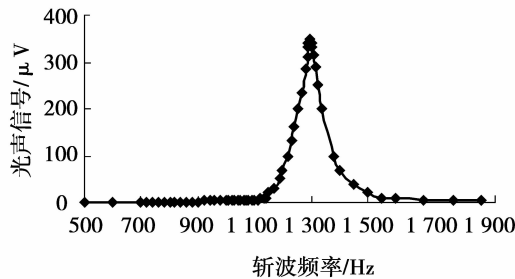


图 10 不同斩波频率下的光声信号

由图中可见,气体光声信号受斩波频率的影响非常大,斩波频率越接近于一阶纵向谐振频率,光声信号便越强;图中信号较强峰的出现正是因为声波在光声池内发生了一阶纵向谐振而导致的。

3.6.2 谐振频率漂移对光声信号的影响

品质因数 Q 是光声池的一个重要特性参数,一般用它来表征光声池内声能量的积累与散失的对比关系。在光声池的设计中虽然较高的品质因数 Q 对提高光声池的驻波放大能力有一定的帮助,但随着品质因数 Q 值的增大,谐振频率漂移对气体光声信号的影响也将会持续增大,这是因为:依据式(6),当光源的调制频率 f 恰好等于谐振频率 f_{res} 时,光声池内激发的声信号的振幅为最大值,用 $A(f_{\text{res}})$ 表示,假设调制频率 f 偏离谐振频率 δ ($|\delta| \ll 1$) 倍,即 $f = (1 + \delta)f_{\text{res}}$,则有:

$$\left| \frac{A(f)}{A(f_{\text{res}})} \right| \approx (1 + Q^2 [1 - (1 + \delta)^2]^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

利用上式可得到不同 Q 值下光声信号受谐振频率漂移的影响曲线,如图 11 所示。从图中可见,品质因数 Q 值越小,光声信号振幅受谐振频率漂移的影响就越小,当 Q 为 20 时, $\delta = 0.012$ 的频率漂移将使光声信号的振幅降低约 10%。因此,我们在设计光声池时,应注意不使品质因数过大,以保证整个检测系统的稳定性。

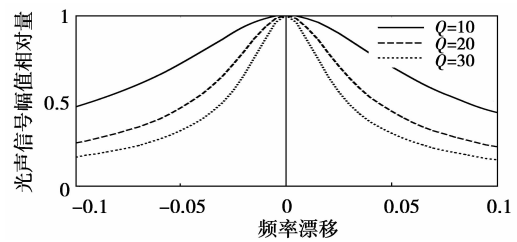


图 11 气体光声信号受谐振频率漂移的影响

4 结 论

1) 气体吸收谱线的峰值吸收系数在 296 K 温度下随着压强的增大而增大,并在压强增大至 0.1 MPa 以后,变化的趋势逐渐稳定。气体光声信号的最大值随温度升高而减少。

2) 当激光器输出功率在 3~14 mW 范围内时,气体光声信号随激光功率线性规律增加。

3) 背景气体浓度在一定程度上能增加光声信号输出。被测气体浓度与气体光声信号之间存在着良好的线形关系。

4) 品质因数 Q 对提高光声池的驻波放大能力有影响,但随着品质因数 Q 值的增大,谐振频率漂移对气体光声信号的影响也将会持续增大。

参考文献:

- [1] 孙才新,郭俊峰,廖瑞金,等. 变压器油中溶解气体分析中的模糊模式多层聚类故障诊断方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(2):37-41.
SUN CAI-XIN, GUO JUN-FENG, LIAO RUI-JIN, et al. Study on fault diagnose method of transformer DGA with fuzzy model hierarchy classification [J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(2):37-41.
- [2] 熊浩,孙才新,廖瑞金,等. 基于核可能性聚类算法和油中溶解气体分析的电力变压器故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):162-166.
XIONG HAO, SUN CAI-XIN, LIAO RUI-JIN, et al. Study on kernel-based possibilistic clustering and dissolved gas analysis for fault diagnosis of power transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (20):162-166.
- [3] 李俭,孙才新,陈伟根,等. 灰色聚类与模糊聚类集成诊断变压器内部故障的方法研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(2):112-115.

- LI JIAN, SUN CAI-XIN, CHEN WEI-GEN, et al. A method of synthesis based on the grey cluster and fuzzy cluster about internal fault diagnosis of transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 112-115.
- [4] 董明, 屈彦明, 周孟戈, 等. 基于组合决策树的油浸式电力变压器故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 35-41.
- DONG MING, QU YAN-MING, ZHOU MENG-GE, et al. Fault diagnosis of oil-immersed power transformer using combinatorial decision tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 35-41.
- [5] 彭宁云, 文习山, 王一, 等. 基于线性分类器的充油变压器潜伏性故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 147-151.
- PENG NING-YUN, WEN XI-SHAN, WANG YI, et al. A potential fault diagnosis method based on linear classifier for oil-immersed transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 147-151.
- [6] 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 WEI-GEN, YUN YU-XIN, 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.
- [7] WAN J K S, IOFFE M S, DEPEW M C. A novel acoustic sensing system for on-line hydrogen measurements [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1996, 32(3): 233-237.
- [8] 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.
- [9] 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.
- YU 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.
- [10] PAO Y H. Photoacoustic spectroscopy and detection [M]. New York: Academic Press, 1977.
- [11] KANTA P, CIVIS S. Application of InAsSb/InAsSbP and lead chalcogenide infrared diode lasers for photoacoustic detection in the 3.2 and 5 μm region [J]. Spectrochimica Acta Part A, 2003, 59(13): 3063-3074.
- [12] MIKLOS A. Application of acoustic resonators in photoacoustic trace gas analysis and metrology [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(4): 1937-1955.
- [13] WAKATSUKI K, FUSS S P, et al. A technique for extrapolating absorption coefficient measurements [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 1565-1573.
- [14] 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.
- [15] A ROTHMAN L S, JACQUEMART D, BARBE A, et al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2005, 96(2): 139-204.
- [16] BERNATH P F. Spectra of atoms and molecules [M]. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- [17] VANDAELE A C, HERMANS C, FALLY S, et al. Absorption cross-sections of NO_2 : simulation of temperature and pressure effects [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2003, 76(3): 373-391.

(编辑 张小强)