

# 基于微型光声传感器的油中溶解气体检测技术

马凤翔<sup>1</sup>, 田宇<sup>2</sup>, 陈珂<sup>3\*</sup>, 靳丰<sup>3</sup>, 张望<sup>4</sup>, 祁炯<sup>1</sup>, 于清旭<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国家电网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601;

<sup>2</sup>国家电网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230061;

<sup>3</sup>大连理工大学光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024;

<sup>4</sup>大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026

**摘要** 为满足油浸式变压器在线监测的需求,根据非共振光声光谱和无孔膜油气分离理论,将直径为40 mm的聚全氟乙丙烯(FEP)高分子膜与体积仅为0.3 mL的光声气室结合,设计了集成光声气体传感器和油气分离膜的微型传感模块,该模块具有体积小、油气分离时间短及可实时在线检测的优点。油中溶解的故障特征气体扩散进入气室中,利用近红外激光光声光谱技术、波长调制和二次谐波检测技术对气室中的气体进行高灵敏度检测。对特征气体C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>检测的实验结果表明,在油温为60 °C时,油中溶解气体传感系统可在3 h内实现油气分离平衡,其中对于体积分数为10<sup>-6</sup>的油中溶解C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>气体的体积分数测量误差在±30%之内。

**关键词** 光谱学; 光声光谱; 微量气体检测; 波长调制; 高电压与绝缘; 油气分离

中图分类号 O433.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0730003

## Technique for Detection of Dissolved Gas in Oil Based on Miniature Photoacoustic Sensor

Ma Fengxiang<sup>1</sup>, Tian Yu<sup>2</sup>, Chen Ke<sup>3\*</sup>, Jin Feng<sup>3</sup>, Zhang Wang<sup>4</sup>, Qi Jiong<sup>1</sup>, Yu Qingxu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Electric Power Research Institute, Anhui Electric Power Co., Ltd., State Grid, Hefei, Anhui 230601, China;

<sup>2</sup>Anhui Electric Power Co., Ltd., State Grid, Hefei, Anhui 230061, China;

<sup>3</sup>School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

<sup>4</sup>School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China

**Abstract** Based on the non-resonant photoacoustic spectroscopy and the non-porous membrane oil-gas separation theory, we design a miniature detection module by integrating a photoacoustic gas sensor with an oil-gas separation membrane to satisfy the demand for online monitoring of the oil-immersed power transformer. This design can be realized by combining a polytetrafluoroethylene propylene (FEP) polymer membrane with a diameter of 40 mm with a photoacoustic chamber with a volume of only 0.3 mL. The designed module exhibits a small size, short oil-gas separation time, and real-time online detection. When the fault characteristic gas dissolved in the oil diffuses into the gas chamber, the techniques such as near-infrared laser photoacoustic spectroscopy, wavelength modulation, and second-harmonic detection are used to achieve high-sensitivity gas detection. The experimental detection results of the characteristic C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> gas prove that an oil-gas separation balance in the oil sensing system with dissolved gas can be realized within 3 h at an oil temperature of 60 °C. Furthermore, the measurement error is within ±30% for the C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> gas dissolved in oil with a volume fraction of 10<sup>-6</sup>.

**Key words** spectroscopy; photoacoustic spectroscopy; trace gas detection; wavelength modulation; high voltage and insulation; oil-gas separation

**OCIS codes** 300.1030; 280.4788; 300.6170

收稿日期: 2019-11-20; 修回日期: 2019-12-05; 录用日期: 2019-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61905034, 51277021)、国家电网有限公司科技项目(521205190014)、辽宁省自然科学基金(2019-MS-054)

\* E-mail: chenke@dlut.edu.cn

# 1 引 言

大型电力变压器普遍采用绝缘油进行绝缘和散热,而绝缘油是由不同种类的C—H化合物构成的。变压器在长时间运行后,其内部会存在过热和放电等现象,导致绝缘油和内部绝缘纸板中的某些化合物分子中的C—H键和C—C键发生裂解,从而产生多种特征性气体,如 $H_2$ , $CO$ , $CO_2$ 及 $CH_4$ , $C_2H_2$ , $C_2H_4$ , $C_2H_6$ 等小分子烃类气体,这些气体会部分溶解到绝缘油中<sup>[1-2]</sup>。其中, $C_2H_2$ 是判断油浸式变压器放电性故障的标志性气体<sup>[3]</sup>。通过监测特征气体组分的含量,可以分析出变压器运行中出现的故障类型<sup>[4]</sup>。

目前最常用的油气分离方法有薄膜透气、动态顶空分离、真空脱气及机械振荡脱气等<sup>[5]</sup>,后三种方法存在机械结构复杂、离线监测的问题,且需要将变压器中的油样抽取出来进行检测。而薄膜透气法具有结构简单、维护方便、性能稳定等诸多优点,目前使用较多的是高分子膜。常用的聚四氟乙烯(PTFE)高分子膜<sup>[6]</sup>对小分子气体 $H_2$ 有较好的透气性,但对其他特征气体,油气分离效果较差,为了克服这一缺点,可采用聚全氟乙丙烯(FEP),它是一种由四氟化碳和六氟化碳聚合而成的高分子膜。相比PTFE高分子油气分离膜,FEP膜对 $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_2$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_6$ 六种气体的透气性较好<sup>[7]</sup>。

变压器油中溶解 $C_2H_2$ 气体的检测方法主要有气相色谱法、气敏传感器法、红外吸收光谱法、拉曼光谱法及光声光谱法。激光光声光谱技术以其灵敏度高、气体间交叉干扰小、取样量少及便于维护等显著优势<sup>[8-10]</sup>,有望发展成为变压器油中溶解气体监测的主要技术方案<sup>[11-12]</sup>。2012年,Cao等<sup>[13]</sup>将QEPAS技术用于 $C_2H_2$ 气体检测中,获得了 $2 \times 10^{-6}$ 的检测灵敏度。2014年,Bauer等<sup>[14]</sup>将分布反馈(DFB)激光二极管与3D打印微型光声池结合,该设备对 $C_2H_2$ 气体的检测极限灵敏度达到 $250 \times 10^{-9}$ 。此外,本课题组<sup>[15]</sup>在前期工作中采用将光纤放大器与共振式光声池结合的方法,使 $C_2H_2$ 气体的检测灵敏度提高到 $0.37 \times 10^{-9}$ 。然而,光声光谱油中溶解气体分析仪通常需要将油样抽取到系统中,经油气分离处理后再将气样注入体积较大的光声池中,存在结构复杂、体积较大及油样易被空气污染等问题。

本文设计了一种基于光声传感器的小型油中溶

解气体检测系统。将直径为40 mm的FEP高分子膜与体积仅为0.3 mL的光声气室进行一体化设计,实现对油中溶解气体的快速分离;采用近红外激光光声光谱技术、波长调制和二次谐波技术对分离气体中的特征性故障气体 $C_2H_2$ 进行高灵敏度检测。该系统没有油泵、气泵等部件,且不会污染油样,为变压器的在线监测提供了一种新的解决方案。

## 2 基本原理

### 2.1 光声光谱原理

气体光声光谱是一种无背景的非吸收光谱测量方法<sup>[16-17]</sup>。气体分子在密闭气室中吸收特定波长的光能并产生压力波信号,利用微音器对声波信号进行检测,进而获得所测气体的体积分数。根据入射光的不同调制频率,光声检测气室可分为共振式和非共振式光声池,非共振式光声池具有体积小的优点。对于非共振式光声检测系统,激发产生的光声信号的幅度<sup>[18]</sup>可以表示为

$$P_{PA}(r, f) = \frac{\alpha(\gamma - 1)P_0L}{V} \times \frac{\tau(r)}{\sqrt{1 + [2\pi f\tau(r)]^2}}, \quad (1)$$

式中: $L$ 为激光吸收程的长度; $V$ 为光声气室的体积; $r$ 为光声气室的内径; $f$ 为激光调制频率; $\alpha$ 为待测气体的吸收系数; $\gamma$ 为载气的比热容; $P_0$ 为光声信号激发光功率; $\tau(r)$ 为热阻尼时间。 $\tau(r)$ 可以表示为

$$\tau(r) = \frac{r^2}{5.78D_T}, \quad (2)$$

式中: $D_T$ 为气体分子的热扩散率。(1)式表明,在吸收程一定的情况下,减小光声气室的体积有助于提高光声信号的强度。光声信号被微音器探测后,转换成电压信号的幅度为

$$A(r, f) = P_{PA}(r, f)S \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f_0}{2\pi f}\right)^2}}, \quad (3)$$

式中: $S$ 为微音器的灵敏度; $f_0$ 为微音器响应的低频截止频率,本系统 $f_0$ 为25 Hz。根据(1)~(3)式,模拟的幅频响应如图1(a)所示。随着频率的增加,光声信号幅度减小。低频区的噪声主要为 $1/f$ 噪声,计算的信噪比(SNR)如图1(b)所示。在100~200 Hz范围内,信噪比较高。考虑到50 Hz及其谐波处的工频干扰,系统选择120 Hz作为工作频率。

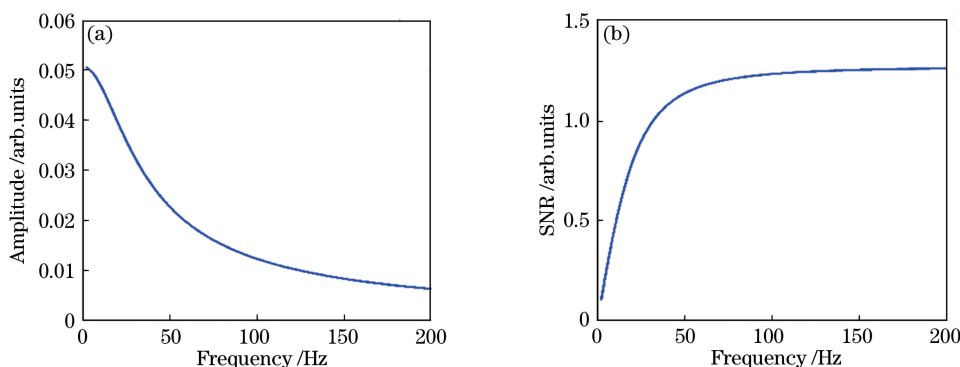


图 1 模拟曲线图。(a)幅频响应;(b) SNR 随频率变化的关系

Fig. 1 Simulaed curves. (a) Response between amplitude and frequency; (b) relation between SNR and frequency

## 2.2 高分子无孔膜的分离机理

高分子无孔膜通过溶解-扩散过程来实现油和气的分离。在分离过程中,高分子膜一侧与变压器中的油直接接触,油中溶解的故障特征气体会向分离膜方向扩散,与膜表面接触并溶解到膜的分子内,此时在油气分离膜两侧气体压力差的推动下,膜内的气体分子会向膜的另外一侧方向扩散,并随后向气室扩散,此时气体处于非稳定平衡状态。当膜中气体分子的体积分数梯度保持不变时,油气分离处于动态平衡状态。

假设变压器油中溶解气在分离膜中的溶解-扩散过程中处于理想状态,设气室中气体的总压为常压( $10^5$  pa),用气体体积分数( $10^{-6}$ )代替气体的分压,则气室中某种气体的体积分数<sup>[6]</sup>为

$$c_g = 9.87kc_0(1 - e^{-\frac{10^5 HA}{Vd}t}), \quad (4)$$

式中: $k$ 为亨利系数; $H$ 为分离膜的渗透系数; $A$ 为变压器中油与分离膜的有效接触面积; $d$ 为分离膜的厚度; $c_0$ 为变压器油中溶解气体的体积分数。设气室中气体的体积分数比值  $P_r = c_g / (9.87kc_0)$ , 则(4)式可表示为

$$P_r = 1 - e^{-\frac{10^5 HA}{Vd}t}. \quad (5)$$

在实际应用过程中,当  $c_g$  达到气体体积分数极限值  $c_{\max} = 90\%$  时,即可认为油气分离达到动态平衡,其时间为  $t_{90}$ <sup>[6]</sup>,可表示为

$$t_{90} = \frac{2.3Vd}{10^5 HA}. \quad (6)$$

从(6)式可以看出,减小气体体积或膜厚,增大渗透系数或分离膜面积,有利于减小油气分离的平衡时间。

## 3 实验系统设计

### 3.1 油中溶解气探头的设计

为了满足变压器在线监测的需求,设计了可直

接安装到变压器上的油中溶解气探头。图 2(a)是油气分离与气体传感一体化探头的结构示意图,将直径为 40 mm 的 FEP 膜(厚度为  $12.5 \mu\text{m}$ )紧贴于多孔不锈钢片的表面,起到支撑分离膜的作用。分离膜的结构如图 2(b)所示。气室体积约为 0.3 mL。调制后的激光通过单模光纤进入到光声微腔中,激发产生的光声压力波信号通过微机电系统(MEMS)的微音器进行检测。为了避免环境噪音的干扰,在 MEMS 传感器上安装了不锈钢隔音罩。FEP 膜以多孔不锈钢膜片作为支撑时,气体通过分离膜的渗透面积将有所减小,通过计算可得实际气体渗透面积约为  $5 \text{ cm}^2$ 。当油温为  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  时,根据(4)式气室中气体的体积分数与油气分离时间的关系进行仿真,结果如图 3 所示, $\text{C}_2\text{H}_2$  气体的体积分数在经过 3.4 h 后达到最终值的 90%。

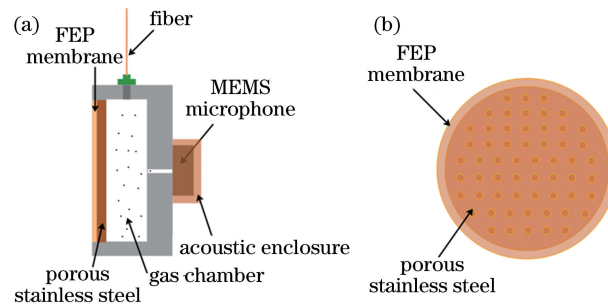


图 2 光声探头结构图。(a)油气分离与传感一体化探头示意图;(b)油气分离膜的结构

Fig. 2 Structure of photoacoustic probe. (a) Schematic of oil-gas separation and integrated sensor probe; (b) structure of oil-gas separation membrane

### 3.2 激光谱线的选择

对油浸式电力变压器,变压器中油内会有少量的水分子存在,内部的固体绝缘材料过热、放电均能产生大量的 CO 和  $\text{CO}_2$ , 这些气体可能会因吸收光谱重叠而对  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体的检测产生影响。图 4 是根

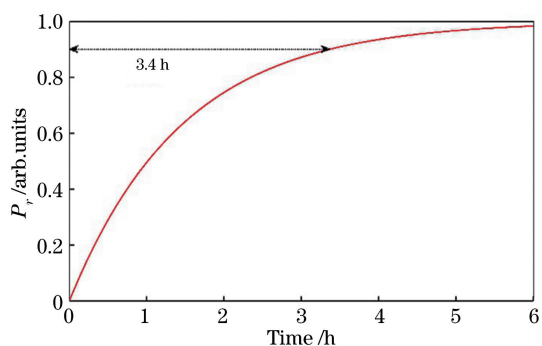


图 3 FEP 膜气体渗透仿真

Fig. 3 Simulation of gas permeation through FEP membrane  
 据 HITRAN 数据库绘制出的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  及  $\text{C}_2\text{H}_2$  分子在 1526~1534 nm 内的吸收系数谱线。为保证  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体吸收线较强,应尽量减小其余四种气体的干扰, $\text{C}_2\text{H}_2$  气体的检测谱线波长选择 1531.6 nm。

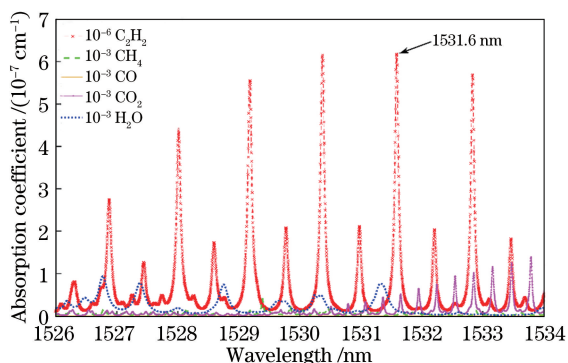


图 4  $\text{C}_2\text{H}_2$  和干扰气体的近红外吸收系数

Fig. 4 Absorption coefficients of  $\text{C}_2\text{H}_2$  and interfering gases in the near-infrared region

### 3.3 光声光谱监测系统的设计

基于激光光声光谱的油中溶解气体检测系统结构如图 5 所示。为了对油中溶解气体进行测试,在油气分离与传感一体化探头的一侧连接一个体积约为 200 mL 的气室,用于放置待检测的油样,并采用温控装置对油室进行恒温控制。在实际应用中考虑到变压器油温一般为 40~80 °C,于是利用温控加热装置保持油温在 60 °C 左右。基于现场可编程门阵列(FPGA)的锁相放大器产生正弦波和锯齿波信号,调制波长为 1531.6 nm 的 DFB 激光器产生二次谐波-波长调制光谱信号,锯齿波信号的电流扫描范围为 60~100 mA,对应的波长扫描间隔约为 0.25 nm。激光经单模光纤入射到掺铒光纤放大器(EDFA),放大后的激光功率约为 100 mW,功率放大后的激光入射到油气分离与传感一体化探头的气室中,待测的  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体吸收光能后产生光声信号。

由光声探头上 MEMS 的微音器探测到的信号经屏蔽线输入到锁相放大器,锁相放大器提取出光声信号的二次谐波分量,然后根据测量的光声信号的幅度计算出待测气体的体积分数。

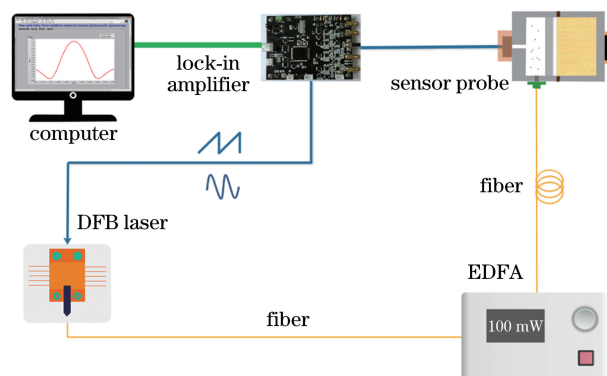


图 5 基于激光光声光谱的油中溶解气体检测系统示意图  
 Fig. 5 Diagram of detection system with gas dissolved in oil based on laser photoacoustic spectroscopy

## 4 实验结果与分析

### 4.1 激光器调制参数优化

在光声光谱气体检测中,光声信号的幅值与气体体积分数呈正比,通过优化调制深度可以提高基于激光波长调制和二次谐波所产生的的光声信号幅值。实验中,在一个标准大气压下,向放置气体传感头的容器中充入体积分数为  $10^{-4}$  的  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体,然后密封容器。对 DFB 激光器进行恒温控制并将波长锁定为 1531.6 nm,将调制电流的幅值从 7.5 mA 增加到 25 mA,测量光声信号的输出。如图 6 所示,当光声信号电压值最大时,调制电流的最佳幅值约为 15 mA。

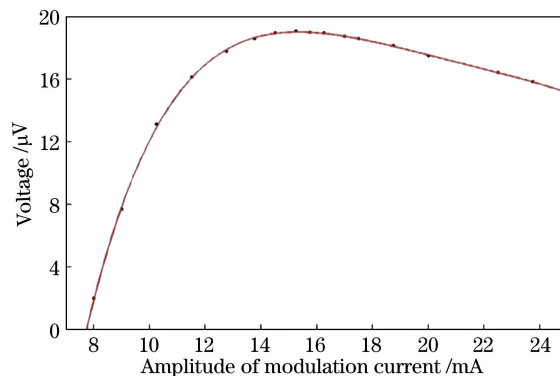


图 6 不同调制电流下的光声信号电压值

Fig. 6 Photoacoustic signal voltage under different modulation currents

### 4.2 油中溶解气体检测实验

实验中,将体积为 10 mL 的体积分数为  $10^{-4}$  的

C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>气体溶解到体积为 40 mL 变压器油中,并注入到油室内,每隔 10 s 记录 1 次数据点,实验结果如图 7 所示。由图 7 可知,C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>气体体积分数在 4.5 h 左右基本达到完全平衡,当油气分离时间约为 3 h 时,光声信号的电压值(16.3 μV)已经达到了平衡时电压值(17.9 μV)的 90% 左右,基本满足了变压器在线监测对响应时间的要求。图 7 中通过实验得到的平衡时间(3 h)稍短于图 3 中通过仿真得到的平衡时间(3.4 h),可能的原因是 FEP 膜的厚度比标称值小或者气体渗透面积比计算值大。3 h 的响应时间已经基本满足电力变压器的在线监测需求。为进一步提高响应速度,可定制更薄厚度的 FEP 膜或者增加气体的渗透面积。

将激光调制频率设置为 60 Hz 时,探测到的二次谐波信号有极大值。当溶解 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>气体体积分数分别为  $4.25 \times 10^{-6}$ ,  $10.62 \times 10^{-6}$ ,  $17.00 \times 10^{-6}$ ,  $21.23 \times 10^{-6}$  时,所测得的油中溶解 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>气体的光声二次谐波信号如图 8(a) 所示,激光波长的扫描电

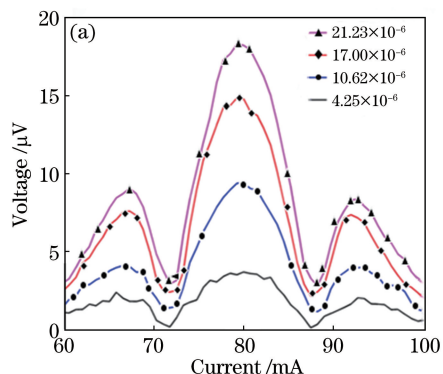


图 8 不同体积分数下 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 的信号。(a)二次谐波信号;(b)二次谐波光声信号的峰值电压

Fig. 8 Signals of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> under different volume fractions. (a) Second harmonic signal;

(b) peak voltage of second harmonic photoacoustic signal

为了评估本系统的长期稳定性和检测极限,对配置的油中溶解 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体(体积分数为 10<sup>-6</sup>)进行测试。采用 Allan-Werle 方差分析法对测量值进行分析<sup>[19-20]</sup>,如图 9 所示。图 9 内插图显示了油气分离平衡后记录的 2000 s 内的光声信号电压值,FPGA 锁相的积分时间设置为 2 s。Allan 方差随着平均时间的增加而减小,这表明光声系统在 2000 s 的测量时间内具有较好的稳定性。当平均时间为 100 s 时,Allan 方差为 0.024 μV,根据图 8(b)得到的响应度 0.86 μV/(μL · L<sup>-1</sup>),可计算出系统对油中溶解 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体体积分数的检测极限为 0.03 μL/L。

配置油中溶解 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体体积分数分别为

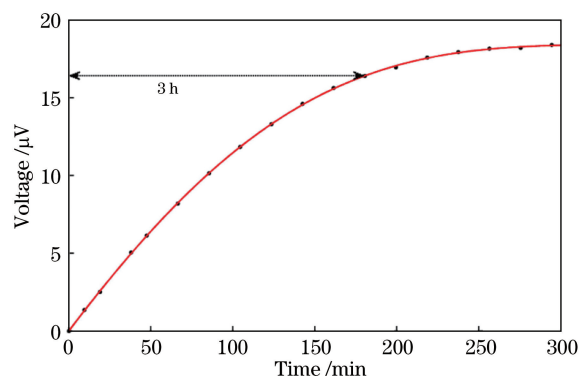
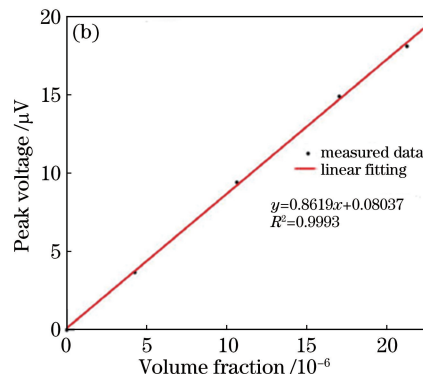


图 7 光声信号电压值随油气分离时间的变化

Fig. 7 Photoacoustic signal voltage versus oil-gas separation time

流范围为 60~100 mA。从图 8(a)中可以发现,随着油中溶解的 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 体积分数的增大,二次谐波信号的峰值电压呈明显的升高趋势。对不同体积分数的油中溶解 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体测量所得的二次谐波光谱最大值进行线性拟合,如图 8(b) 所示,可以发现光声信号的峰值电压与气体体积分数具有良好的线性关系。



$1 \times 10^{-6}$ ,  $3.3 \times 10^{-6}$ ,  $9.9 \times 10^{-6}$ ,  $19.6 \times 10^{-6}$  的变压器油样,测量的体积分数平均值分别为  $0.86 \times 10^{-6}$ ,  $3.42 \times 10^{-6}$ ,  $10.22 \times 10^{-6}$ ,  $19.17 \times 10^{-6}$ ,如图 10 所示。油中溶解 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体(体积分数为 10<sup>-6</sup>)的体积分数的测量误差在 ±30% 之内,满足了变压器在线监测对油中溶解 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体的检测要求。

## 5 结 论

设计了集油气分离、光声激发、光声检测于一体的油气分离检测系统。采用直径为 40 mm 的 FEP 高分子膜与体积为 0.3 mL 的气室结合的方法进行油气分离,采用近红外激光光声光谱技术对分离气体中的特征性故障气体 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 进行高灵敏度检测。

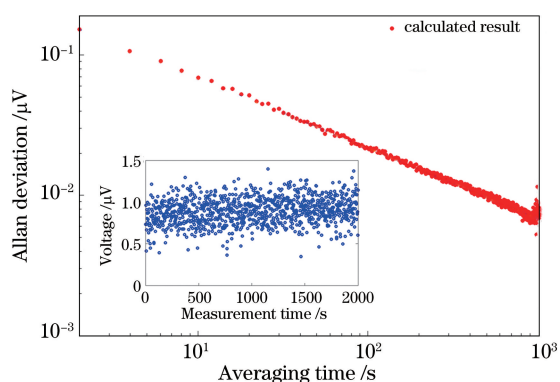


图9 Allan方差分析结果。内插图是体积分数为 $10^{-6}$ 的油中溶解 $C_2H_2$ 气体的长时间测量结果

Fig. 9 Result of Allan deviation analysis. Inset is continuous measurement results of  $C_2H_2$  gas dissolved in oil with volume fraction of  $10^{-6}$

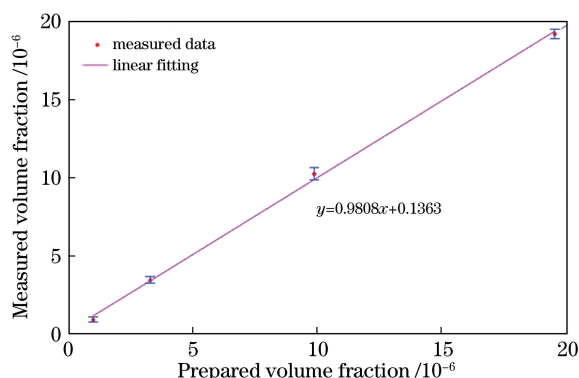


图10 测量的油中溶解 $C_2H_2$ 气体的体积分数

Fig. 10 Measured volume fraction of  $C_2H_2$  gas dissolved in oil

DFB激光器的调制电流的优化幅值为15 mA。在油温为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,油中溶解 $C_2H_2$ 气体可以在4.5 h内达到分离平衡,并在3 h内实现了90%气体的分离,与理论仿真结果比较接近。实验结果表明,油中溶解 $C_2H_2$ 气体(体积分数为 $10^{-6}$ )的体积分数的测量误差在 $\pm 30\%$ 之内,满足了变压器在线监测对变压器油中 $C_2H_2$ 气体体积分数的检测要求。设计的检测系统的油气分离时间短、重复性好,且没有油泵、气泵等部件,不会污染油样,为变压器的实时在线监测提供了一种新的解决方案。

### 参 考 文 献

[1] Baka N A, Abu-Siada A, Islam S, et al. A new technique to measure interfacial tension of transformer oil using UV-Vis spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 1275-1282.

[2] Duval M, Dukarm J. Improving the reliability of

transformer gas-in-oil diagnosis[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(4): 21-27.

- [3] Ying G L, Xu K J. Analysis of acetylene in non-fault transformer oil[J]. Electric Engineering, 2011(4): 66, 69.
- 应高亮, 徐康健. 非故障变压器油中出现乙炔原因分析[J]. 电工技术, 2011(4): 66, 69.
- [4] Jiang J, Wang Z W, Han X, et al. Multi-gas detection in power transformer oil based on tunable diode laser absorption spectrum [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 153-161.
- [5] He P, Zhao X Z, Li Y L. Study on influence of temperature to oil-gas separation in transformer on-line monitoring based on membrane separation[J]. Transformer, 2011, 48(7): 45-49.
- 何鹏, 赵学增, 李洋流. 基于膜分离的变压器在线监测中温度对油气分离影响的研究[J]. 变压器, 2011, 48(7): 45-49.
- [6] Han Y W, Ding F, Hao C X, et al. The oil-gas separation characteristics of ceramic/Teflon AF2400 composite membrane[J]. Separation and Purification Technology, 2012, 88: 19-23.
- [7] Jia R J. Application of polymer film to on-line monitoring of dissolved gases in transformer oil[J]. Transformer, 2001, 38(10): 37-40.
- 贾瑞君. 高分子薄膜在变压器油中溶解气体在线监测中的应用[J]. 变压器, 2001, 38(10): 37-40.
- [8] Chen K, Yu Q X, Gong Z F, et al. Ultra-high sensitive fiber-optic Fabry-Perot cantilever enhanced resonant photoacoustic spectroscopy[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 268: 205-209.
- [9] Mao Z X, Wen J Y. Detection of dissolved gas in oil-insulated electrical apparatus by photoacoustic spectroscopy [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2015, 31(4): 7-14.
- [10] Chen K, Deng H, Guo M, et al. Tube-cantilever double resonance enhanced fiber-optic photoacoustic spectrometer[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 123: 105894.
- [11] Chen K, Yuan S, Gong Z F, et al. Ultra-high sensitive photoacoustic spectrometer for trace gas detection based on fiber-optic acoustic sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328015.
- 陈珂, 袁帅, 宫振峰, 等. 基于光纤声波传感的超高灵敏度光声光谱微量气体检测[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328015.
- [12] Chen Y, Gao G Z, Cai T D. Detection technique of ethylene based on photoacoustic spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0511001.
- 陈颖, 高光珍, 蔡廷栋. 基于光声光谱的乙烯探测技

- 术[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0511001.
- [13] Cao Y, Jin W, Ho H L, et al. Acetylene detection based on diode laser QEPAS: combined wavelength and residual amplitude modulation [J]. Applied Physics B, 2012, 109(2): 359-366.
- [14] Bauer R, Stewart G, Johnstone W, et al. 3D-printed miniature gas cell for photoacoustic spectroscopy of trace gases[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4796-4799.
- [15] Chen K, Gong Z F, Yu Q X. Fiber-amplifier-enhanced resonant photoacoustic sensor for sub-ppb level acetylene detection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 274: 184-188.
- [16] Wu H P, Dong L, Zheng H D, et al. Beat frequency quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy for fast and calibration-free continuous trace-gas monitoring[J]. Nature Communications, 2017, 8: 15331.
- [17] Chen K, Zhang B, Liu S, et al. Parts-per-billion-level detection of hydrogen sulfide based on near-infrared all-optical photoacoustic spectroscopy [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 283: 1-5.
- [18] Kuusela T, Kauppinen J. Photoacoustic gas analysis using interferometric cantilever microphone [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2007, 42(5): 443-474.
- [19] Werle P, Mücke R, Slemr F. The limits of signal averaging in atmospheric trace-gas monitoring by tunable diode-laser absorption spectroscopy (TDLAS) [J]. Applied Physics B, 1993, 57(2): 131-139.
- [20] Chen K, Yu Z H, Gong Z F, et al. Lock-in white-light-interferometry-based all-optical photoacoustic spectrometer[J]. Optics Letters, 2018, 43(20): 5038-5041.