

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.04.019

基于光纤光声传感的油中溶解气体分析系统

马凤翔¹, 赵跃¹, 李辰溪², 安冉², 朱峰¹, 杭忱¹, 陈珂^{2*}

(1 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601;

2 大连理工大学光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对目前变压器油中溶解气体分析装置体积庞大、抗电磁干扰能力弱、油路复杂等问题, 将光纤传感和光声光谱技术结合, 设计了一种基于光纤光声传感的变压器油中溶解气体分析系统, 用于检测油中溶解的微量乙炔气体。通过谱线分析优化激光波长, 并设计了恒温激光驱动模块。采用两根单模光纤分别将泵浦激光和探测光传输到光声探头中, 气体吸收光能产生的光声信号由法布里-珀罗干涉型悬臂梁探测, 并利用设计的光谱测量和信号处理模块进行解调。实验结果表明, 设计的光纤光声传感系统可有效探测出变压器油中溶解的乙炔气体的光声信号, 检出限达到0.5 $\mu\text{L/L}$ 。

关键词: 光谱学; 油中溶解气体; 光声光谱; 变压器; 光纤传感

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)04-00597-09

Analysis system of dissolved gas in oil based on optical fiber photoacoustic sensing

MA Fengxiang¹, ZHAO Yue¹, LI Chenxi², AN Ran², ZHU Feng¹, HANG Chen¹, CHEN Ke^{2*}

(1 Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230601, China;

2 School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In view of the problems existed in the traditional analysis devices of dissolved gas in transformer oil, such as large size, complicated oil circuit and susceptibility to electromagnetic interference, an analysis system based on optical fiber photoacoustic sensing is designed to detect trace acetylene gas dissolved in transformer oil. In the system, the laser wavelength is optimized through spectral line analysis, and a thermostatically controlled laser driving module is designed. The pump laser and probe light are transmitted into the photoacoustic sensor probe by two single-mode fibers. The photoacoustic signal generated by gas molecules absorbing the pump laser energy is detected by a Fabry-Perot interference cantilever, and then demodulated by a self-designed spectral measurement and signal processing module. Experimental results show that the designed optical fiber photoacoustic sensor system can effectively detect photoacoustic signal of acetylene gas dissolved in transformer oil, with a detection limit of 0.5 $\mu\text{L/L}$.

Key words: spectroscopy; dissolved gas in oil; photoacoustic spectroscopy; transformer; optical fiber sensing

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (52120520005C)

作者简介: 马凤翔 (1987 -), 安徽合肥人, 研究生, 高级工程师, 主要从事高压电气设备状态检测技术等方面的研究。Email: njumfx@foxmail.com

导师简介: 陈珂 (1988 -), 湖北荆门人, 博士, 副教授, 主要从事光声光谱微量气体检测和光纤传感技术等方面的研究。

Email: chenke@dlut.edu.cn

收稿日期: 2021-10-13; 修改日期: 2021-11-16

*通信作者。

0 引言

特高压具有电力输送距离远、容量大、损耗低和效率高等技术优势,但电压等级的提高给高压电气设备的可靠运行带来了挑战^[1]。大型油浸式变压器发生过热、放电等故障会使绝缘油分子裂解,从而产生各种特征气体^[2,3]。分析溶解于油中的特征气体成分和含量,是目前判断变压器内部故障类型、程度及发展趋势的重要手段^[4]。在众多油中溶解特征气体中,乙炔(C_2H_2)是重要特征气体之一。

目前,变压器油中溶解气体在线监测装置主要采用色谱检测原理^[5,6]法。但色谱装置需要消耗载气、更换色谱柱,维护量较大^[7],不能很好地满足特高压设备故障预警要求。而光声光谱技术以其无需载气、灵敏度高等优点,近年来替代传统色谱法被广泛应用^[8]。2013年, Ma等^[9]设计了一种基于石英音叉的光声光谱多组分气体检测系统,对CO和NO₂的检测极限分别达到0.34 nL/L和4 nL/L。2005年,英国凯尔曼有限公司上海分理处研制出基于红外热辐射光源的光声光谱油中溶解气分析设备,可对变压器油中多种特征气体进行在线监测^[10]。但现有的光声光谱溶解气体分析仪存在易受到变压器产生的强电磁干扰^[11,12],交叉干扰严重、测量精度不高^[13,14],脱气过程中存在漏油的安全隐患等问题^[15],严重阻碍了光声光谱技术在该领域的广泛应用。

光纤光声传感是一种全新的高灵敏度微量气体检测技术。基于光声光谱原理,采用激光光源结合光学微音器,检测灵敏度实现大幅提升^[16,17]。本研究团队于2018年提出了光纤悬臂梁增强光声光谱技术^[18],对 C_2H_2 气体的检测限达到0.07 nL/L。然而,过大的光声气室体积(~500 mL)难以与膜分离技术结合使用。为了减少气样量,又设计了一种基于小体积非共振光声池的全光学多气体分析仪,气室的体积仅为2 mL^[19]。实现了对CH₄、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、CO和CO₂等气体的高灵敏度测量。但是,这些系统需要气泵将气体送入光声气室,然后关闭气阀进行测量。本研究团队于2019年设计了一种用于监测气体泄漏的光纤光声传感器,传感器中气室的体积仅为70 μ L^[20],气体通过一个小孔和悬臂周围的缝隙扩散到气室中, C_2H_2 气体的检测限达到20 nL/L。

基于前期研究基础,设计了新的光纤光声传感油中溶解气体分析系统,采用两根单模光纤分别将泵浦激光和探测光传输到光声探头中,使其具有无源和抗电磁干扰的特点。产生的信号由法布里-珀罗干涉型悬臂梁探测,并利用设计的光谱测量和信号处理模块解调出光声信号。采用该技术方案后,变压器油不与周围空气接触,无需抽油,不存在变压器漏油的安全隐患。该方法无需载气、不损耗样品、体积小,可实现对油中溶解气体的连续检测。

1 技术原理

1.1 光声光谱原理

光声效应的基本原理是:处于基态的待测目标气体分子选择性吸收光源出射光子能量,从而被激发到高能级。通常,辐射跃迁和无辐射跃迁(主要是碰撞弛豫)是高能级分子释放能量的两种主要途径。但是,辐射跃迁的弛豫时间很长,在分子退激发的过程中作用不大。因此,激发态分子主要通过碰撞弛豫损失能量。

在此过程中,被吸收的这部分光能主要转换为气体分子的动能,表现为气室内气体体积周期性收缩膨胀,进而产生光声压力波^[21,22]。对于非共振式光声池而言,光声池内部声场分布均匀^[23]。光声信号由光声池

内安装的微音器来探测,微音器将光声信号转化为电压信号,然后通过放大和信号处理转换成气体浓度信息。由微音器转化输出的光声信号幅值可表示为

$$S_{PA} = s_m P(\vec{r}, \omega) = s_m F C \alpha P_0, \quad (1)$$

式中: s_m 表示声波传感器的灵敏度, F 表示池常数, C 表示气体浓度、 α 表示气体吸收系数、 P_0 为入射光源的功率。由(1)式可得,光声信号强度分别与入射光功率和气体浓度成正比。

1.2 光纤声波传感原理

光纤声波传感器中光纤法布里-珀罗干涉结构的两个光学平面分别为光纤端面 and 声波敏感元件内表面。当光束由光纤耦合到法布里-珀罗腔内时,首先会在光纤端面发生一次反射,部分透射光照射到声音敏感膜片上发生第二次反射,反射光的一部分会重新耦合进入光纤。当两次反射的反射光满足干涉条件并发生法布里-珀罗干涉,形成法布里-珀罗干涉谱。当声波作用于声波敏感元件时,元件发生振动,导致法布里-珀罗腔长发生变化,进而导致法布里-珀罗干涉谱的变化,通过解调法布里-珀罗干涉谱即可得到声波信息^[24,25]。

2 系统设计

基于光纤光声传感的油中溶解气体分析系统结构如图1所示。系统为非共振系统,主要由激光器(DFB)及驱动模块(signal generation)、双芯光纤(fiber)、光纤光声传感探头(sensor)、光纤光声传感解调模块(SLED、circulator、spectrometer)、数字信号发生器(DDS)和工控机(computer)组成。其中,光纤光声传感探头为外径15 mm、高20 mm的圆柱体,微型光声气室与油气分离膜集成为一体。油气分离膜采用FEP膜,对 C_2H_2 气体的渗透吸收为 $5 \times 10^{-18} \text{ m}^2/(\text{s} \cdot \text{Pa})$ 。油中溶解气体经分离膜的溶解再扩散,达到平衡后,气室内气体体积分数与油中溶解气体的体积分数呈正比。同时,为了控制油中溶解气体脱出并在气室内达到平衡状态的时间,气室体积设计极小,当测量温度为 50°C 时,系统响应时间为1.8 h,具有较快的响应速度。近红外激光通过光纤导入到光声气室,结合基于光纤法布里-珀罗干涉的悬臂梁声波探测技术,构成新的变压器油中溶解气体分析系统。将光纤光声气体传感探头安装到变压器出油口,利用光纤传输光声激发光和光声信号光,实现对微量油中溶解气体的全光纤感测。

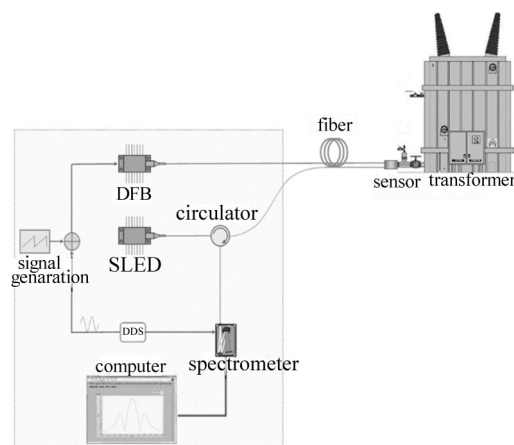


图1 基于光纤光声传感的油中溶解气体分析系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of a dissolved gas analysis system in oil based on optical fiber photoacoustic sensing

基于光纤光声传感的油中溶解气体分析系统的工作模式为:油中溶解气体经油气分离膜进入光声气室中,激光激发气体产生光声压力波信号。近红外分布反馈(DFB)激光器的电流由正弦信号调制,该信号由直接数字合成器提供。

同时,使用信号发生器提供锯齿波信号来驱动激光器进行波长扫描。激发的光声信号由悬臂梁型传感器探测,转换成悬臂梁自由端的挠度。光声信号与悬臂梁自由端挠度关系为

$$A(\omega) = \frac{S_{PA}}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega\beta}{m}\right)^2}}, \quad (2)$$

式中: m 和 ω_0 分别是悬臂的质量和一阶谐振频率, S_{PA} 是光声信号的幅值, β 是由气体和热流引起的阻尼系数。通过检测光声信号的幅度,根据标定系数反演出油中溶解气体浓度。

2.1 激光器及驱动模块

选择合适的气体吸收谱线有助于增强光声信号强度,进而提高光声光谱气体检测系统的检测灵敏度。利用 HITRAN 数据库可以得到 1525~1535 nm 波段下乙炔气体的吸收系数,如图 2 所示。从图 2 可以看到,乙炔气体在该波段存在多个较强的吸收谱线,其中在 1531.6 nm 波长处具有最强的吸收系数,因此系统采用中心波长为 1531.6 nm 的分布反馈(DFB)激光器作为光声系统的激发光源,通过单模光纤传输到光声探头中。同时,图中分析了 1000 $\mu\text{L/L}$ 的水气在该波段的吸收,可以看出,1000 $\mu\text{L/L}$ 的水气在 1531.6 nm 处几乎没有吸收。由于该系统结构使环境空气无法进入气室,只有变压器油中水分子可以进入气室。变压器油中水分子浓度通常不超过 100 $\mu\text{L/L}$,因此可以很好地避免水气对乙炔气体检测的干扰。

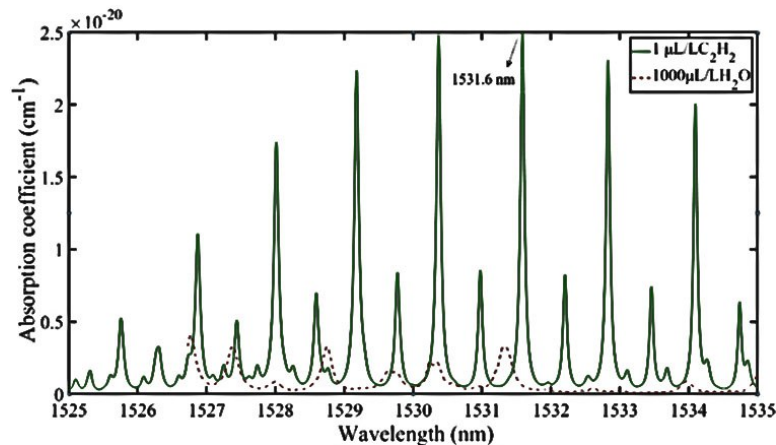


图2 乙炔气体的吸收光谱^[26]

Fig. 2 Absorption spectrum of acetylene gas^[26]

图3为激光驱动电路模块,实现对DFB激光器的恒温控制和电流调制。采用MAX1978集成温控芯片对激光器的温度进行调节,温度设置为25 $^{\circ}\text{C}$ 。利用功率三极管将输入的电压信号转换为电流信号,用来驱动激光二极管,实现电流控制。由于激光器的波长与电流有关,因此可通过改变驱动电流实现对波长的调节。通过调节激光器偏置电流为112 mA,使激光器出光波长为1531.6 nm,此时激光功率约15 mW。为了实现对系统的二次谐波信号进行检测,通过给激光器特定频率的正弦信号做波长调制,使激光器出光波长围绕中心波长波动,激光调制频率为600 Hz,是系统工作频率的一半。

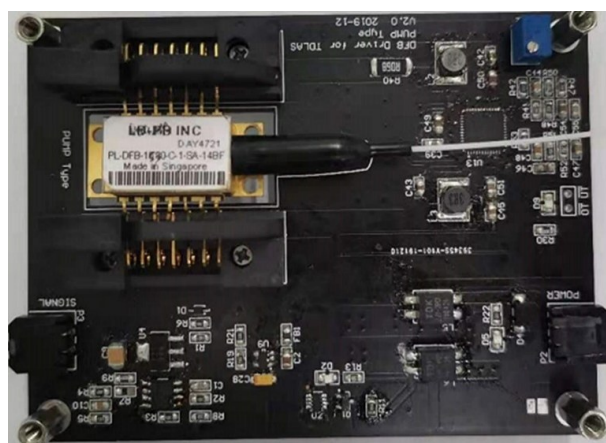


图3 激光驱动电路模块实物图

Fig. 3 Physical image of the laser drive circuit module

2.2 光纤光声传感解调模块

为了探测法布里-珀罗干涉光谱以实现微弱光声信号的高速探测, 设计了如图4所示的光纤光声传感解调模块。中心波长为 1540 nm 的超辐射发光二极管用作探测光源, 发射宽谱光经过光纤环形器入射到传感探头中, 法布里-珀罗干涉光谱由微型光纤光谱模块采集。光谱模块主要由光谱分析元件、图像传感器和信号采集单元组成。透射体相位光栅用作光谱元件, 这种无机械运动部件的结构设计可以实现高速光谱信号探测。

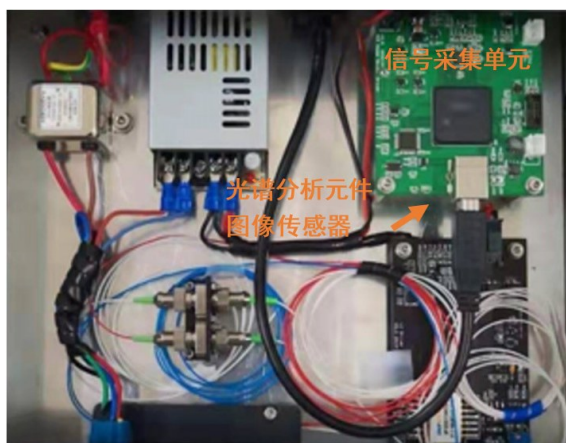


图4 光纤光声传感解调模块实物图

Fig. 4 Physical image of optical fiber photoacoustic sensor demodulation module

2.3 FPGA 光谱信号采集电路

为了实现法布里-珀罗干涉光谱信号的高速采集, 设计了如图5所示的FPGA 光谱信号采集电路板, 主要由EP4CE115F23型FPGA芯片、LTC2225型模数转换芯片、FT232型USB通信芯片、电源芯片、有源晶振等组成。FPGA将光谱信号采集后, 通过USB接口将数据高速传输到工控机。

2.4 LabVIEW 信号处理软件

在工控机中开发了基于LabVIEW语言的信号处理软件, 实现对激光控制参数的设置、光谱信号的高速解调和油中溶解气体浓度计算等功能。通过此软件, 实现利用光谱解调法实时计算法布里-珀罗腔长, 通过高通滤波得到光声信号。最终根据光声信号幅度和标定系数计算出油中溶解乙炔气体的浓度。

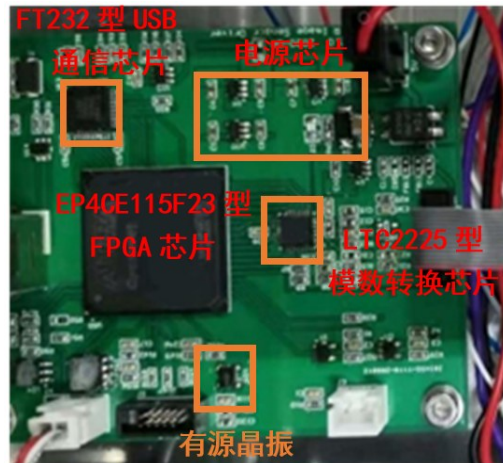


图5 FPGA 光谱信号采集电路板实物图

Fig. 5 FPGA spectrum signal acquisition circuit board physical image

3 实验结果与分析

工控机采集的干涉光谱如图6所示, 具有约7.5个周期, 解调的法布里-珀罗腔长为 $211.5 \mu\text{m}$ 。

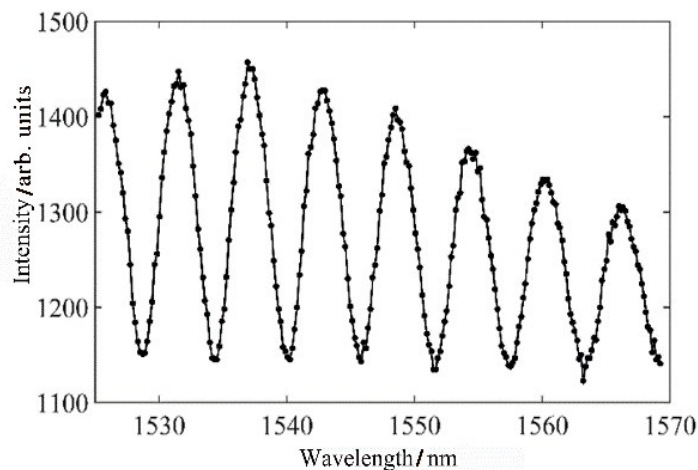


图6 干涉光谱

Fig. 6 Interference spectra

通过更换油样, 依次测试不同浓度的油中溶解微量乙炔气体。乙炔气体吸收线附近的二次谐波信号是通过扫描DFB激光器的电流进行测量的, 如图7所示。根据各个二次谐波信号峰值与溶解乙炔气体的浓度关系, 利用线性拟合得到浓度响应度为 $2.1 \text{ pm}/(\mu\text{L}/\text{L})$ 。

为进一步确定分析系统的测量精度, 对配置的不同浓度油样中的溶解乙炔气体浓度进行了测试。测试结果见表1。当浓度高于 $10 \mu\text{L}/\text{L}$ 时, 测量误差在 $\pm 15\%$ 以内。 $0.5 \mu\text{L}/\text{L}$ 油中溶解 C_2H_2 气体测量值误差在 $\pm 30\%$ 以内, 根据DL/T 1498《变电设备在线监测装置技术规范》中规定的变压器油中溶解 C_2H_2 气体测量A级误差要求为 $\pm 30\%$, 此分析测量系统满足变压器油中溶解 C_2H_2 气体的检测要求。

为提高系统的稳定性, 选用 1200 Hz 处作为系统的工作频率, 该频段远离变压器设备的低频振动, 减小对悬臂梁响应的影响和工频干扰。同时, 利用基于锁相放大的超窄带滤波技术提取和系统工作频率同频的信

号, 以测量二次谐波光声信号, 进一步提高系统稳定性和抗干扰能力。未来, 为进一步减小外界干扰, 拟在今后的研究工作中尝试采用双悬臂主动降噪技术。

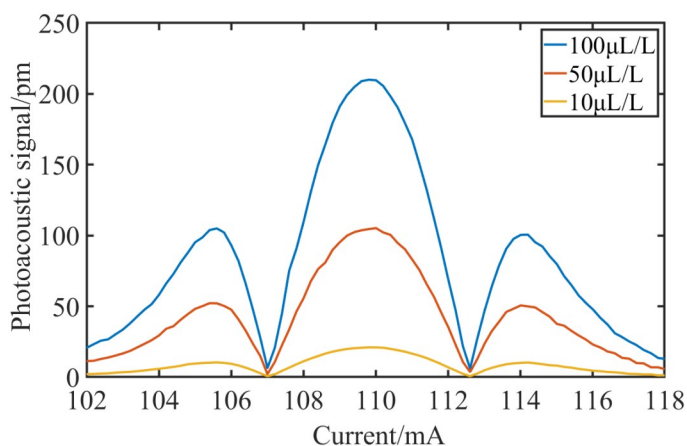


图 7 不同浓度油中溶解乙炔气体的二次谐波信号

Fig. 7 Second harmonic signal of dissolved acetylene gas in oil of different concentration

表 1 不同浓度油中溶解乙炔气体的测量结果

Table 1 Measurement results of dissolved acetylene gas in different concentrations of oil

Oil sample concentration/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	Test result 1 $/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	Test result 2 $/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	Test result 3 $/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	Relative error	Absolute error/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$
100	101.3	95.4	97.6	4.6%	4.6
50	47.1	48.9	49.3	5.8%	2.9
10	11.3	10.4	9.7	13%	1.3
0.5	0.38	0.59	0.46	24%	0.12

4 结 论

本研究设计了一种基于光纤光声传感的油中溶解气体分析系统, 将光纤传感和光声光谱技术结合, 采用两根单模光纤分别将泵浦激光和探测光传输到光声探头中, 实现了对油中溶解乙炔气体的高灵敏度测量。通过谱线分析选择激光波长 1531.6 nm, 设计了用于控制 DFB 激光器温度和电流的恒温激光驱动电路模块。气体吸收激光产生的光声信号由法布里-珀罗干涉型悬臂梁感测。为了探测干涉光谱以实现微弱光声信号的高速探测, 设计了光纤光声传感解调模块。利用 FPGA 光谱信号采集电路板将干涉光谱信号高速传输到工控机, 开发了 LabVIEW 信号处理软件, 实现了对激光控制参数的设置、光谱信号的高速解调和油中溶解气体浓度计算等功能。实验结果表明, 设计的光纤光声传感系统可实现对干涉光谱信号的高速测量, 并能有效探测出油中溶解乙炔气体吸收产生的二次谐波信号, 对乙炔气体的检出限达到 0.5 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。该系统方案具有抗电磁干扰、灵敏度高、体积小和无需抽油等优点, 有望大幅提升变压器状态监测的技术水平。

参考文献:

- [1] Jiang J, Wang Z W, Ma G M, *et al.* Direct detection of acetylene dissolved in transformer oil using spectral absorption [J]. *Optik*, 2019, 176(1): 214-220.
- [2] GB/T 17623-2017. 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法 [S].
GB/T 17623-2017. *Determination of componental contents of gases dissolved in insulating oil by gas chromatography method* [S].
- [3] GB/T 7252-2001. 变压器油中溶解气体分析和判断导则 [S].
GB/T 7252-2001. *Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil* [S].
- [4] Ma G M, Wang Y, Qin W Q, *et al.* Optical sensors for power transformer monitoring: A review [J]. *High Voltage*, 2021, 6(3): 367-386.
- [5] Fan J M, Liu Z, Meng A B, *et al.* Characteristics of Tin oxide chromatographic detector for dissolved gases analysis of transformer oil [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 94012-94020.
- [6] Sun C, Ohodnicki P R, Stewart E M. Chemical sensing strategies for real-time monitoring of transformer oil: A review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(18): 5786-5806.
- [7] Zhou S, Iannuzzi D. Immersion photoacoustic spectrometer (iPAS) for arcing fault detection in power transformers [J]. *Optics letters*, 2019, 44(15): 3741-3744.
- [8] Zhou Y, Liu K, Gao X M. Detection of carbon dioxide based off-beam quartz enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2019, 36(2): 137-142.
周 彧, 刘 锬, 高晓明. 离轴石英谐振光声光谱 CO₂ 传感研究 [J]. 量子电子学报, 2019, 36(2): 137-142.
- [9] Ma Y F, Lewicki R, Razeghi M, *et al.* QEPAS based ppb-level detection of CO and N₂O using a high power CW DFB-QCL [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 1008-1019.
- [10] Zhang C, Wang F. Application of photo-acoustic spectroscopy technology to dissolved gas analysis in oil of oil-immersed power transformer [J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(2): 84-86.
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.
- [11] Zha S L, Liu K, Tan T, *et al.* Application of photoacoustic spectroscopy in multi-component gas concentration detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(6): 14-19.
查申龙, 刘 锬, 谈 图, 等. 光声光谱技术在多组分气体浓度探测中的应用 [J]. 光子学报, 2017, 46(6): 14-19.
- [12] Cao Y, Peng J, Wang R F, *et al.* Research progress of photoacoustic spectroscopy for aerosol optical absorption measurement [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2021, 38(5): 593-607.
曹 渊, 彭 杰, 王瑞峰, 等. 光声光谱测量气溶胶光吸收研究进展 [J]. 量子电子学报, 2021, 38(5): 593-607.
- [13] Yuan S, Wang G Z, Fu D H, *et al.* Cross interference characteristics of photoacoustic spectroscopy multi-gas analyzer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(04): 206-214.
袁 帅, 王广真, 付德慧, 等. 光声光谱多组分气体分析仪的交叉干扰特性研究 [J]. 光子学报, 2021, 50(4): 206-214.
- [14] Chen K, Liu S, Zhang B, *et al.* Highly sensitive photoacoustic multi-gas analyzer combined with mid-infrared broadband source and near-infrared laser [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 124: 105844.
- [15] Ma F X, Tian Y, Chen K, *et al.* Technique for detection of dissolved gas in oil based on miniature photoacoustic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 207-213.
马凤翔, 田 宇, 陈 珂, 等. 基于微型光声传感器的油中溶解气体检测技术 [J]. 光学学报, 2020, 40(7): 207-213.
- [16] Hu Y Q, Qiao S D, He Y, *et al.* Quartz-enhanced photoacoustic-photothermal spectroscopy for trace gas sensing [J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5121-5127.

- [17] Lin H Y, Huang Z, Kan R F, *et al.* Application of micro quartz tuning fork in trace gas sensing by use of quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. *Sensors*, 2019, 19(23): 5240.
- [18] Chen K, Yu Z H, Yu Q X, *et al.* Fast demodulated white-light interferometry-based fiber-optic Fabry-Perot cantilever microphone [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3417-3420.
- [19] Chen K, Zhang B, Guo M, *et al.* All-optical photoacoustic multigas analyzer using digital fiber-optic acoustic detector [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69 (10): 8486-8493.
- [20] Chen K, Guo M, Liu S, *et al.* Fiber-optic photoacoustic sensor for remote monitoring of gas micro-leakage [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4468-4659.
- [21] Ma Y F, Qiao S D, He Y, *et al.* Highly sensitive acetylene detection based on multi-pass retro-reflection-cavity-enhanced photoacoustic spectroscopy and a fiber amplified diode laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14163-14172.
- [22] 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): 185-190.
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): 185-190.
- [23] Zhang C, Pan H, Yin X Y, *et al.* Design and performance evaluation of ellipsoidal resonant photoacoustic cell [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2021, 38(5): 641-647.
张楚, 潘浩, 尹翔宇, 等. 椭球形共振光声池设计及性能评估 [J]. *量子电子学报*, 2021, 38(5): 641-647.
- [24] Kuusela T, Kauppinen J. Photoacoustic gas analysis using interferometric cantilever microphone [J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2007, 42(5): 443-474.
- [25] Wei C, Wang Y L, Shi J H, *et al.* Membrane-free all-fiber acoustic sensor [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2019, 36(2): 243-247.
魏常, 王玉莲, 时金辉, 等. 非膜片式全光纤结构音频传感器 [J]. *量子电子学报*, 2019, 36(2): 243-247.
- [26] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, *et al.* The HITRAN2012 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130: 4-50.