

文章编号: 1001-3806(2022)06-0829-06

变压器油中溶解一氧化碳气体的光纤传感技术

马凤翔¹, 赵跃¹, 李辰溪², 郭珉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, 合肥 230601; 2. 大连理工大学 光电工程与仪器科学学院, 大连 116024)

摘要: 为了满足变压器中绝缘纸板因过热或者放电故障产生的一氧化碳气体的在线监测需求, 提出了一种基于光纤光声传感的油中溶解一氧化碳气体检测技术。采用光声光谱气体检测技术, 并结合光纤传感和膜分离技术, 设计了集成油气分离和气体检测功能于一体的光纤光声传感探头, 油中溶解的一氧化碳气体通过油气分离膜进入到光纤探头中的微型气腔; 采用两根光纤将探头连接到解调仪器, 分别传输近红外激发光和探测光; 气体吸收光能产生的光声信号被光纤法布里-珀罗传感器探测, 并被设计的光纤光声解调模块进行信号处理, 获得系统对一氧化碳气体体积分数的检测灵敏度为 $0.345\text{pm}/10^{-6}$ 。结果表明, 所设计的光纤传感系统对油中溶解一氧化碳气体体积分数检出限达到 5×10^{-6} 。该研究具有精度高、抗电磁干扰、脱气简单的优势, 为变压器油中溶解一氧化碳气体的检测提供了新方法。

关键词: 传感器技术; 微量气体检测; 光声光谱; 变压器; 油中溶解气体分析

中图分类号: O433.4; TP212.1⁺4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2022.06.019

Optical fiber sensing technology for detection of dissolved carbon monoxide gas in transformer oil

MA Fengxiang¹, ZHAO Yue¹, LI Chenxi², GUO Min², ZHU Feng¹, HANG Chen¹, CHEN Ke²

(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 order to realize the online monitoring of carbon monoxide gas generated by overheating or discharge failure of insulating paperboard in transformers, a detection technology of carbon monoxide gas dissolved in oil based on optical fiber photoacoustic sensing was proposed. Combining photoacoustic spectroscopy, optical fiber sensing, and membrane separation technology, a fiber optic photoacoustic sensing probe that integrates oil and gas separation and gas detection functions was designed. The carbon monoxide gas dissolved in the oil enters the miniature air cavity in the optical fiber probe through the oil and gas separation membrane. Two optical fibers were used to connect the probe to the demodulation instrument, and transmit near-infrared excitation light and probe light respectively. The photoacoustic signal generated by the absorption of light energy by the gas was detected by the optical fiber Fabry-Perot sensor and processed by the designed optical fiber photoacoustic demodulator. The detection sensitivity of the system for volume fraction of carbon monoxide gas was $0.345\text{pm}/10^{-6}$. The experimental results show that the designed optical fiber sensing system has a detection limit of 5×10^{-6} for the volume fraction of dissolved carbon monoxide gas in oil. This research has the advantages of high accuracy, anti-electromagnetic interference, and simple degassing, and provides a new method for detecting carbon monoxide gas dissolved in transformer oil.

Key words: sensor technology; trace gas detection; photoacoustic spectroscopy; transformer; analysis of dissolved gas in oil

引言

近几年来, 国民经济飞速发展, 社会用电量日益增大, 对电力安全的要求也越来越高。变压器是电网运

行的核心器件, 作用是承载和连接不同的电压等级, 其运行可靠性对电力系统的稳定与安全至关重要^[1]。目前, 大型电力变压器通常采用高介电常数的绝缘油或者绝缘纸板以减小变压器的体积。然而, 随着变压器运行时间的增长, 绝缘油和绝缘纸板的大分子因过热、放电等绝缘故障发生裂解, 进而产生相应的故障特征气体。其中, 绝缘纸板裂解主要产生一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO₂)等故障特征气体^[2-3]。通过对油中溶解故障特征气体的体积分数进行定期检测, 监测长

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-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事高压电气设备状态检测技术等方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: chenke@dlut.edu.cn

收稿日期: 2021-10-12; 收到修改稿日期: 2021-12-07

期变化情况,可有效对变压器出现的故障类型和故障的严重程度进行判断,实现故障早期预警。

油中溶解的故障特征气体的检测手段主要有气相色谱法^[4]、喇曼光谱法^[5]、红外吸收光谱法以及光声光谱法^[6-7]。其中,光声光谱溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)检测技术因其具有的无需载气、无需频繁标定和灵敏度高等优点,适用于变压器的在线监测^[8]。近年来,光声光谱仪取得了广泛关注,正逐步成为主流 DGA 检测装置。然而,现有基于光声光谱技术的油中溶解气体分析仪应用过程中暴露了很多问题。比如,实际测量精度不高,这是因为分析仪使用红外热辐射光源与带通滤波器相结合,导致多种气体成分之间存在明显的交叉干扰^[9]。半导体激光技术近年来得到了快速的发展,激光取代传统非相干光源作为激发光,其光谱功率密度高于传统非相干光源几个数量级,激光光声光谱技术应运而生,具有高灵敏度、低交叉干扰的优势^[10]。同时,光声光谱结合二次谐波检测技术和波长调制技术,消除了因光声池壁和入射窗片吸收而产生的基频本底干扰,大大提高了目标气体的检测灵敏度^[11]。

传统的光声光谱油中溶解气体分析装置在现场运行中存在抗电磁干扰能力差等问题。为了解决这一问题,光纤声波传感器因其具有的自身不带电、灵敏度高和本质安全等特点被用于光声信号的探测。近年来,本研究团队借鉴传统电容式微音器的结构,设计了基于非本征法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI)的膜片式光纤声波传感器。光纤端面与有机膜片构成一个微型光纤 F-P 腔。当声波作用于敏感膜片时,膜片振动引起 F-P 腔的腔长变化,干涉仪通过检测光程差的改变实现对声波信号的检测。光纤 FPI 结构使得声波传感探头体积较小,易于和光声池进行结构匹配。目前,基于悬臂梁的光纤 FPI 声波传感器已应用于光声光谱测量中,对乙炔气体的检测极限达到 0.08×10^{-9} ^[12]。此外,香港理工大学、安徽大学和华中科技大学也开展了基于膜片式光纤声波传感的光声光谱技术的研究工作。其中,香港理工大学的 JIN 小组制作了基于多层石墨烯薄膜的光纤声波传感器,声压响应度达到 1.1 nm/Pa ,对乙炔气体的检测极限为 119.8×10^{-9} ^[13]。为了实现远距离气体测量并进一步提高全光学光声探头的气体检测灵敏度,荷兰的 ZHOU 等人于 2017 年报道了一种新的微型全光学光声气体传感器,悬臂梁通过微镜的受迫运动感测光声信号,微镜连接到悬臂梁的自由悬挂端,悬臂

梁宽度仅为 $14 \mu\text{m}$ ^[14],这种结构可以大幅减少气体的粘性阻力损耗,对乙炔气体的检测极限可达 15×10^{-9} ,但这种细长型悬臂梁结构的稳定性较差。本研究团队于 2019 年设计了一种用于监测远距离气体泄漏的光纤光声传感器,传感器中气室的体积仅为 $70 \mu\text{L}$ ^[15],气体通过小孔和缝隙扩散进入到探头中的微型气室中,采用高稳定性和高灵敏度的光谱解调技术,对乙炔气体的检出限达到 2×10^{-8} 。

在前期研究的基础上,本文作者提出了一种基于光纤光声传感的变压器油中溶解一氧化碳气体检测技术。将光声光谱、光纤传感和膜分离技术结合,设计了集成油气分离和气体检测功能于一体的光纤光声传感探头。油中溶解的一氧化碳气体通过油气分离膜进入到光纤探头中的微型气腔。采用两根光纤将探头连接到激光器和解调仪,分别传输激发光和探测光。气体吸收光能产生的光声信号被光纤 F-P 传感器探测,并被设计的新型光纤光声解调仪进行信号处理。该技术方案抗电磁干扰能力强、无需抽油、无需载气,可实现对油中溶解一氧化碳气体的连续监测。

1 光声光谱原理

一部分气体分子在吸收了激光的能量后被激发到高能级。一般来说,自发辐射和碰撞弛豫是吸收能量释放的两种主要方式。然而,振动能级辐射弛豫时间太长抑制了能量的释放。因此,激发态气体分子主要通过碰撞弛豫释放能量,转化为气体分子的平动能,引起气体的周期性振动,产生光声压力波。在非共振圆柱形光声管中,光声声波处处均等,光声(photoacoustic, PA)压力波 p_{PA} 的振幅可表示为:

$$p_{\text{PA}}(f) = \frac{(\gamma - 1)P_0\alpha(\lambda)l}{V} \frac{\tau}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}} \quad (1)$$

式中, p_{PA} 是频率 f 的函数,用 $p_{\text{PA}}(f)$ 表示; γ 为气体的质量热容比; P_0 为激光功率; $\alpha(\lambda)$ 为气体吸收系数,是吸收光波长 λ 的函数; l 为光声管的长度; V 为光声管的体积; τ 表示气体的热阻尼,是一个随温度变化的函数, τ 越大,光声压力波越大。光声管产生的光声压力波通过光纤 FPI 声波传感器检测,通过检测 F-P 腔变化量获得光声信号大小。

2 光纤传感系统设计

2.1 传感器设计

用于测量油中溶解一氧化碳气体的光纤传感探头

的结构如图 1 所示。该结构是一个直径为 8mm、高为 15mm 的不锈钢柱体,其主要由不锈钢外壳、两根光纤、铜管、悬臂梁声波探测元件和油气分离膜组成。

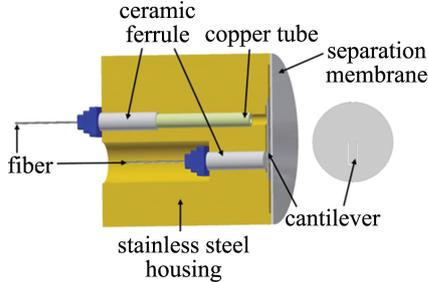


Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the sensor probe for dissolved gas in fiber optic oil

溶解在油中的一氧化碳气体分子可以通过分离膜扩散到铜管气室中,而较大的油分子则不能通过。由于无孔有机膜分离效率高,对油分子截留效果好,因此采用分离速度较快的聚全氟乙丙烯膜作为渗透膜^[16]。渗透膜的直径和厚度分别为 50mm 和 12.5 μm ,对 CO 气体的渗透系数为 $20 \times 10^{-18} \text{m}^2 / (\text{s} \cdot \text{Pa})$ 。为了支撑有机膜,将有机膜夹在两块厚度为 0.2mm 的不锈钢片,在不锈钢片上加工了方孔阵列。圆柱形微型气室的长度和直径分别为 10mm 和 1mm。油中溶解的 CO 气体经分离膜的分离作用脱出,进入气室并平衡后,气室内气体体积分数与油中溶解气体的体积分数呈正比。油中溶解气体脱出并在气室内达到平衡状态的时间与系统气室体积呈反比,当测量温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 时,系统响应时间约 2h,具有较快的响应速度。光声激发光通过其中一根光纤入射到微型气室中,气室中的气体吸收光能并跃迁到高能级,光能通过无辐射跃迁转化为平动能。产生的光声压力波推动不锈钢悬臂梁产生周期性偏转。悬臂的长度、宽度和厚度分别为 3mm、1mm 和 10 μm 。另一根光纤和悬臂梁形成了一个基于光纤 FPI 的声波传感单元,F-P 腔由光纤端面和悬臂梁之间的间隙构成,探测光在光纤端面和悬臂梁表面反射并形成干涉光谱。当固定频率的声压作用在悬臂梁膜片时,悬臂梁周期性振动,引起 F-P 腔长改变,导致干涉光谱移动,相位信息发生变化。通过白光干涉法解调光纤光声 FPI 的干涉光谱相位信息,获得光声压力波的大小。

2.2 系统设计

图 2 是设计的光纤油中溶解一氧化碳气体传感系统的结构示意图。变压器油中溶解的一氧化碳气体通过聚全氟乙丙烯膜进入传感探头。近红外分布反馈 (distributed feedback,DFB) 激光器发射激光,传入光

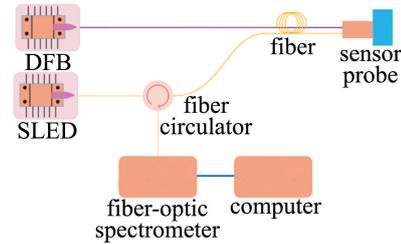


Fig. 2 Schematic diagram of the structure of the optical fiber oil dissolved gas sensing system

纤传感探头激发 CO 气体产生光声压力波。为避免由于池壁吸收造成的干扰和其它振动干扰,采用二次谐波-波长调制 ($2f$ -wavelength modulation spectroscopy, $2f$ -WMS) 技术对光声信号进行检测。使用锯齿波信号驱动 DFB 激光器进行波长扫描,现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 信号处理电路提供一个频率为 500Hz 的正弦信号做调制以产生 $2f$ -WMS 信号。产生的 $2f$ -WMS 信号由悬臂梁探测,并被基于白光干涉仪的光纤声波解调模块处理。悬臂梁的工作频率为 1000Hz,该频率正好为 $2f$ -WMS 信号的频率。中心波长 1535nm、带宽 45nm 的超辐射发光二极管 (superluminescent light-emitting diode, SLED) 作为探测光源,发射的宽谱光经过光纤环形器传输到基于 FPI 的悬臂梁传感单元产生干涉光谱。F-P 干涉光谱由微型光纤光谱仪采集。为了实现光声信号的窄带检测,采用数字锁相放大技术。光谱采集由信号处理电路提供的方波信号进行同步触发。由于 F-P 腔的腔长是通过光谱解调法实时测量的,光声压力信号通过对连续测量的腔长进行高通滤波得到。解调的数字光声信号通过通信接口传输到工控机,利用基于 LabVIEW 的虚拟锁相放大器测量 $2f$ -WMS 光声光谱信号。

2.3 激光光源

根据光声光谱原理,光声信号的强度与待测气体的吸收系数成正比。为了提高气体的检测灵敏度,通常选择强吸收系数对应的激光波长。对于一氧化碳气体,其基频吸收带位于 4.6 μm 附近。然而,中红外波长的激光在石英光纤中的传输损耗极大,因此,对一氧化碳的近红外泛频吸收带进行分析^[17]。根据 HIT-RAN2012 数据库,得到一氧化碳气体在 2300nm ~ 2400nm 波长范围内的吸收光谱,如图 3 所示。一氧化碳气体在该波段存在多根较强的吸收谱线,其中在 2331.9nm 波长处具有最强的吸收系数。因此,采用中心波长为 2331.9nm 的 DFB 激光器作为光纤传感系统的光声激发光源,通过石英光纤传输到光声探头中。

DFB 激光器的发光原理是沿纵向等间隔分布的

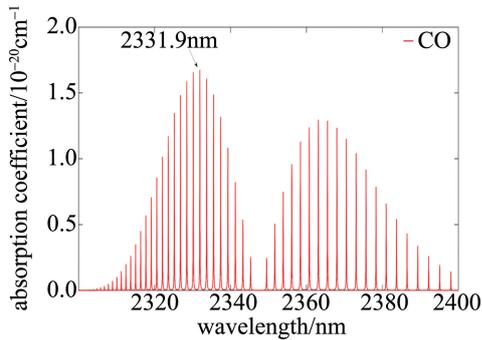


Fig. 3 Near-infrared absorption spectrum of CO

光栅所形成的光耦合实现激光振荡。通过光栅实现波长选择和光反馈,得到稳定的单模输出,并使其有较好的频率稳定性。通过改变光栅折射率可实现波长调谐,温度和驱动电流变化都可以改变光栅的折射率。改变温度的方式可实现慢速调谐,而改变驱动电流可实现快速调谐^[10,18]。通过设计的激光器驱动电路对DFB激光器进行恒温控制并将电流设置到95.5mA,使波长调节到2331.9nm处。

2.4 光纤光声解调模块

为了实现对F-P干涉光谱的高速采集和处理,设计了光纤光声传感解调模块。光纤光声解调模块主要由SLED光源、微型光纤光谱仪、光谱采集与处理电路构成。中心波长为1535nm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,F-P干涉光谱由微型光纤光谱模块采集。光谱仪由分光元件、光检测单元和电子处理单元组成。透射型体相位光栅用作光谱元件,并利用光电二极管阵列型图像传感器作为光检测单元,可实现对光谱信号的高速探测^[19]。为了实现对光谱信号的高速采集,设计了如图4所示的FPGA光谱信号采集电路板,主要由FPGA芯片、高速模数转换芯片、通用串行总线通信芯片和电源芯片等组成。FPGA将采集到的光谱信号通过USB接口高速地传输到工控机。

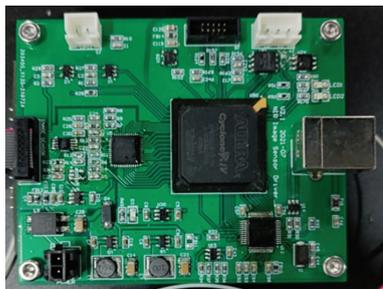


Fig. 4 Physical map of the spectrum acquisition and processing circuit board

利用LabVIEW软件对采集的光谱信号进行实时处理,利用全相位解调法将光声信号从光谱信号中提

取出来。信号处理过程主要由归一化光谱、插值、快速傅里叶变换、频率估计、全相位信号处理等组成。归一化光谱是为了消除宽谱光源包络的影响;插值过程将信号从光谱域转换到光频域;快速傅里叶变换和频率估计过程可初步解调出F-P腔长;利用全相位信号处理过程可实现超高分辨的F-P腔长解调。工控机采集的干涉光谱如图5所示,具有约7.5个周期,解调的F-P腔长为211.5 μm 。

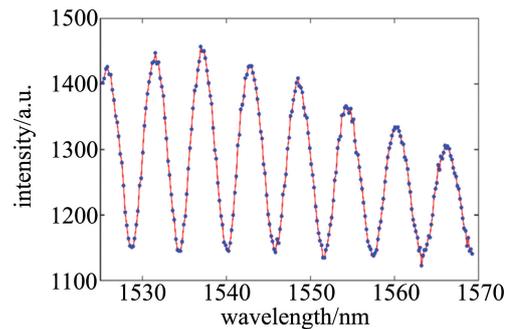


Fig. 5 F-P interference spectrum

3 结果与分析

3.1 激光器调制参数优化

为实现 $2f$ -WMS检测,对激光器提供一个频率为500Hz的正弦信号进行调制,根据波长调制光谱技术原理,二次谐波信号的幅度随调制深度变化,通过优化激光器的调制深度,可以提高信噪比。首先对体积分数为 250×10^{-6} 的CO气体进行测试,控制激光器在中心波长2331.9nm处扫描,该波长对应CO气体一个吸收峰。改变正弦激光调制电流的有效值从1mA~6mA,记录光声信号的输出值,图6所示为信号幅度随调制电流的变化关系。从实验结果看出,调制电流为3.25mA时,光声信号的二次谐波幅度最大,即最佳调制电流为3.25mA。

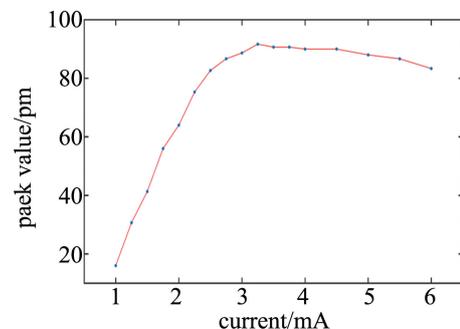


Fig. 6 Relationship between PA signal and modulation current amplitude

3.2 一氧化碳气体测试

为了测试所设计的光纤光声气体传感器的一氧化碳体积分数的响应特性,将不同气体体积分数的的一氧

化碳/高纯氮气混合气体依次通入测试气室,并且记录二次谐波信号。使用质量流量控制器(S48-300, HORIBA)控制气体流速,对气体体积分数进行稀释。将高纯氮气与气体体积分数为 1000×10^{-6} 的一氧化碳标准气体安装一定比例混合,得到气体体积分数分别为 1000×10^{-6} , 500×10^{-6} , 250×10^{-6} , 100×10^{-6} , 50×10^{-6} 和 25×10^{-6} 的测试气体。设定锁相积分时间为1s,将DFB激光器的偏置电流调制范围为90mA~100mA,实现在2331.9nm附近的波长扫描。为进一步提信噪比,采用小波去噪法对2f-WMS进行去噪。测量的2f-WMS光谱光声信号如图7所示。提取测得的波长调制光谱信号的峰值,分析信号峰值随气体体积分数的变化,所得结果如图8所示。通过线性拟合,估算了设计的光纤光声气体传感器对一氧化碳气体体积分数的检测灵敏度为 $0.345 \text{ pm}/10^{-6}$,计算线性拟合的 $R^2 \approx 0.996$ 。这表明该传感器对气体体积分数小于 1000×10^{-6} 的一氧化碳气体具有良好的线性响应。

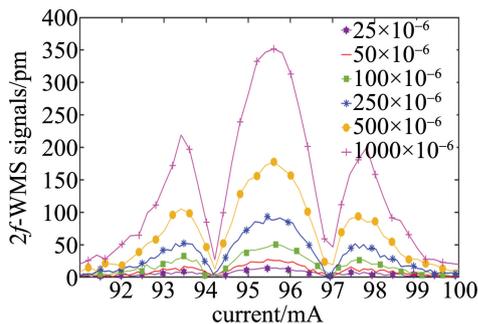


Fig. 7 2f-wavelength modulation PA signal

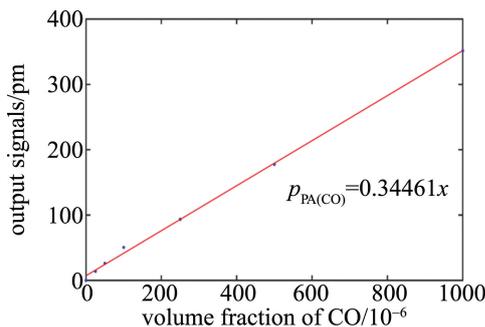


Fig. 8 Linearity fitting of the measured value of PA signal with different gas volume fraction

3.3 油中溶解气体测试

为进一步确定设计的光纤光声传感器对油中溶解一氧化碳气体的测量精度,分别配置了油中溶解气体体积分数为 5×10^{-6} , 10×10^{-6} , 50×10^{-6} 和 100×10^{-6} 的油样各3份进行测试。将溶解不同气体体积分数CO的油样充入油室,控制锁相积分时间为5s,脱气温度为 50°C ,为保证脱气充分平衡,等待2.5h后对CO进

行检测。结合CO气体响应度和气室油室的气体体积分数比,对测得的光声信号测量值进行标定获得油中溶解气体体积分数,测试结果如表1所示。当油中溶解一氧化碳气体体积分数大于 10×10^{-6} 时,测量值误差均在 $\pm 15\%$ 以内,并且最低检出限达到 5×10^{-6} ,完全满足《变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范》中对一氧化碳的A级误差要求^[20]。

Table 1 Measurement results of dissolved carbon monoxide gas in oil with different gas volume fraction

oil sample volume fractions	test result 1	test result 2	test result 3	absolute error
100×10^{-6}	101.9×10^{-6}	100.8×10^{-6}	105.6×10^{-6}	5.6×10^{-6}
50×10^{-6}	53.7×10^{-6}	48.8×10^{-6}	53.9×10^{-6}	3.9×10^{-6}
10×10^{-6}	9.3×10^{-6}	11.3×10^{-6}	10.1×10^{-6}	1.3×10^{-6}
5×10^{-6}	6.5×10^{-6}	4.6×10^{-6}	5.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}

4 结论

设计了用于测量变压器油中溶解一氧化碳气体的光纤传感系统,将光声光谱、光纤传感和膜分离技术结合,设计了集成油气分离和气体检测功能于一体的光纤光声传感探头,结合光纤光声解调技术,实现了对油中溶解一氧化碳气体的高灵敏度检测。通过吸收谱线分析,激光波长选择为2331.9nm。利用光学干涉型悬臂梁和光纤光声传感解调模块实现对微弱光声信号的高灵敏度探测。通过优化激光参数,将调制电流设置为3.25mA。实验结果表明,设计的光纤传感系统对一氧化碳气体体积分数具有良好的线性响应,对一氧化碳气体体积分数的检测灵敏度为 $0.345 \text{ pm}/10^{-6}$;对油中溶解一氧化碳气体体积分数的检出限达到 5×10^{-6} 。该系统具有抗电磁干扰、灵敏度高和无需抽油等优点,为变压器中溶解气体的在线监测需求提供了一种新的技术方案。

参考文献

- [1] MA G, WANG Y, QIN W, *et al.* Optical sensors for power transformer monitoring: A review[J]. High Voltage, 2021, 6(3): 367-386.
- [2] GENERAL ADMINISTRATION OF QUALITY SUPERVISION, INSPECTION AND QUARANTINE OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. GB/T 7252-2001 Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil[S]. Beijing: China Standard Press, 2001: 1-25(in Chinese).
- [3] GENERAL ADMINISTRATION OF QUALITY SUPERVISION, INSPECTION AND QUARANTINE OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. GB/T 17623-2017 Determination of componential contents of gases dissolved in insulating oil by gas chromatography method[S]. Beijing: China Standard Press, 2017: 1-24 (in Chinese).

- [4] SUN C, OHODNICKI P R, STEMART E M. Chemical sensing strategies for real-time monitoring of transformer oil: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(18): 5786-5806.
- [5] YAO Zh Y, XIONG D Sh, BAI Y S, *et al.* Cavity-enhanced Raman spectroscopy of blue-violet light[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(02): 217-220 (in Chinese).
- [6] JIANG J, WANG Zh W, MA G M, *et al.* Direct detection of acetylene dissolved in transformer oil using spectral absorption[J]. *Optik*, 2019, 176: 214-220.
- [7] ELEFANTE A, GIGLIO M, SAMPAOLO A, *et al.* Dual-gas quartz-enhanced photoacoustic sensor for simultaneous detection of methane/nitrous oxide and water vapor[J]. *Analytical chemistry*, 2019, 91(20): 12866-12873.
- [8] MAO X, ZHOU X, ZHAI L, *et al.* Dissolved gas-in-oil analysis in transformers based on near-infrared photoacoustic spectroscopy[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2015, 36(5): 940-946.
- [9] YUAN Sh, WANG G Zh, FU D H, *et al.* Cross interference characteristics of photoacoustic spectroscopy multi-gas analyzer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 0430002(in Chinese).
- [10] WANG H X, CHEN J D, CHANG T Y, *et al.* Research of modulation characteristics of distributed feedback laser[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(6): 836-840 (in Chinese).
- [11] 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: 105844-105851.
- [12] CHEN K, YU Q, GONG Zh 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.
- [13] TAN Y, ZHANG C, JIN W, *et al.* Optical fiber photoacoustic gas sensor with graphene nano-mechanical resonator as the acoustic detector[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 23(2): 199-209.
- [14] ZHOU Sh, SLAMAN M, IANNUZZI D. Demonstration of a highly sensitive photoacoustic spectrometer based on a miniaturized all-optical detecting sensor[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17541-17548.
- [15] 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): 4648-4659.
- [16] HAN Y W, DING F, HAO Ch X, *et al.* The oil-gas separation characteristics of ceramic/Teflon AF2400 composite membrane[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 88: 19-23.
- [17] LIU X X, HAN J H, CAI H, *et al.* Review of high repetition-rate mid-infrared lasers for photoelectric countermeasures [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(3): 271-279 (in Chinese).
- [18] CUI W Ch, GUO R M, WANG D F, *et al.* Study on temperature and current control of distributed feedback laser diodes[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(4): 437-441 (in Chinese).
- [19] ZENG Y, ZENG Y A, ZHANG N Y Sh, *et al.* A novel method to improve spectral capability of imaging spectrometers [J]. *Laser Technology*, 2018, 42(2): 196-200 (in Chinese).
- [20] NATIONAL ENERGY BOARD. DL/T 1498. 2-2016 Technical specification for on-line monitoring device of transformation equipment-Part 2: On-line monitoring device of gases dissolved in transformer oil[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 1-8(in Chinese).