

基于光纤声波传感的超高灵敏度光声光谱 微量气体检测

陈珂¹, 袁帅², 官振峰¹, 于清旭^{1*}

¹大连理工大学光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024;

²中国电力科学研究院高电压研究所, 北京 100192

摘要 结合光纤声波传感技术、纵向共振式光声探测技术、波长调制技术和二次谐波检测技术, 提出了一种基于光纤法布里-珀罗干涉传感器的悬臂梁增强型光声信号检测方法。针对光纤耦合近红外激发光的特点, 对共振式光声池进行了优化设计, 搭建了一套超高灵敏度的激光光声光谱微量乙炔气体检测系统。实验结果表明, 当测量时间为 60 s 时, 该系统对乙炔气体的检测极限达到 8×10^{-10} 。

关键词 传感器; 光纤声波传感; 光声光谱; 波长调制; 微量气体检测

中图分类号 O433.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328015

Ultra-High Sensitive Photoacoustic Spectrometer for Trace Gas Detection Based on Fiber-Optic Acoustic Sensors

Chen Ke¹, Yuan Shuai², Gong Zhenfeng¹, Yu Qingxu¹

¹School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology,
Dalian, Liaoning 116024, China;

²High Voltage Research Institute, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

Abstract A cantilever-enhanced photoacoustic signal detection method based on fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensors is proposed, which combines the technologies of fiber-optic sensing, longitudinal resonant photoacoustic spectroscopy, wavelength modulation and second-harmonic detection. According to the characteristics of fiber coupling near-infrared exciting light, the resonant photoacoustic cell is optimally designed. A high-sensitivity laser photoacoustic spectrometer for trace acetylene gas detection is developed. Experimental results show that the detection limit of acetylene reaches 8×10^{-10} with the measurement time of 60 s.

Key words sensors; fiber-optic acoustic sensor; photoacoustic spectroscopy; wavelength modulation; trace gas detection

OCIS codes 280.4788; 060.2370; 120.4640

1 引 言

微量气体检测技术在大气环境监测、医学临床诊断、煤矿安全监测、电力设施在线监测等领域具有重要的应用价值^[1-3]。在众多的气体检测技术中, 激光光声光谱技术具有灵敏度高、交叉干扰小等优势, 因而得到了广泛关注^[4-6]。近年来, 随着电力系统的不断发展以及人们生活对供电可靠性要求的日益增高, 大型电力设备的维护方式已从定期检修逐步向状态监测过渡^[7]。对油中溶解气体的在线监测可为

变压器等电气设备的故障预判提供重要的数据支持, 因此已成为保障该类设备安全运行的重要技术手段之一^[8-9]。乙炔(C_2H_2)气体是区分油浸式变压器过热性和放电性故障的标志性气体^[10], 及时准确地对绝缘油中的乙炔进行检测, 可以预知电气设备中的潜伏性故障, 从而实现故障的早期诊断。此外, 油浸式变压器在投运前必须对变压器油中溶解气体进行分析^[11], 标准^[12]给出了相应的含量要求, 其中对乙炔含量的要求为 0, 因此, 超低浓度乙炔气体含量的检测具有重要意义。

收稿日期: 2017-10-26; 收到修改稿日期: 2017-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51277021)、辽宁省博士科研启动基金(201601040)

作者简介: 陈珂(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光纤传感和激光光谱方面的研究。E-mail: chenke@dlut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yuqx@dlut.edu.cn

由于光声光谱的检测灵敏度正比于声波传感器的灵敏度和信噪比,光学悬臂梁式声波传感器和光纤式传感器等多种高性能光学声波传感器逐渐取代了传统的驻极体传声器。2004年, Kauppinen等^[13]设计了一种基于迈克耳孙干涉仪的硅微悬臂梁式光学传声器,并提出了一种悬臂梁增强型光声光谱(CEPAS)检测方案。相比于膜片式传声器,光学悬臂梁传声器具有低频响应好、灵敏度高和动态响应范围大等优点。然而,传统的光学悬臂梁传声器采用的是迈克耳孙干涉仪结构,存在体积大、系统复杂和不便于与光声池进行匹配等缺点。光纤法布里-珀罗(F-P)传声器可有效解决上述不足,该传感器利用光纤端面与膜片构成F-P干涉仪^[14-15],当声波作用到膜片时产生振动,引起干涉仪光程差的改变,其优点在于膜片的声阻低,因此可以获得较高的灵敏度,并且基于F-P干涉仪结构的传声器探头体积较小,适合与光声池进行匹配,能够有效提高光声光谱检测系统的整体检测性能。

本文将基于光纤F-P干涉仪的悬臂梁结构声波传感器应用于激光光声光谱检测系统,结合优化设计的一阶纵向共振式光声池、光纤激光放大技术、激光频率调制和二次谐波检测技术,实现了对乙炔气体的超高灵敏度检测。

2 基本原理

2.1 光声光谱原理

光声光谱是一种通过直接测量物质因吸收光能而产生的热能的光谱量热技术^[5]。气体分子在光声池中吸收特定波长的光而被激发到高能态,随即以无辐射跃迁的形式将吸收的光能变为热能而回到基态。由于激发光是周期性调制的,因此密闭吸收池中的气体温度也呈周期性变化,宏观上表现为压力的变化,即产生声波。通过检测声波幅度的大小可以推断出吸收气体的含量。共振式光声系统是以声波在光声池中传播的某个本征频率来调制光源,声波在光声池中形成驻波,从而实现共振放大,提高光声检测的灵敏度,且池壁吸收对共振模式的耦合作用很小,有利于减小池壁吸收引起的噪声^[16]。

品质因数本质是能量积累和能量损耗的对比关系,能量损耗主要由粘滞损耗和热传导损耗两部分组成。对于纵向共振式圆柱形光声池,品质因数 Q ^[1-5]可以表示为

$$Q = \frac{R_c}{d_v + (\gamma - 1)d_{th} \left(1 + \frac{2R_c}{L_c} \right)}, \quad (1)$$

式中 γ 为载气的热容比, L_c 为共振管的长度, R_c 为共振管的内径, d_v 和 d_{th} 分别为粘滞损耗和热传导损耗对应的边界厚度。

当声波调制频率与共振管的共振频率相等时,光声信号输出电压 V 可表示为

$$V = \alpha F R C P_0, \quad (2)$$

式中 α 为气体分子吸收系数, R 为麦克风(声波传感器)的灵敏度, C 为气体的浓度, P_0 为入射光功率, F 为一阶共振光声池的池常数,池常数^[11]可以表示为

$$F = \frac{2(\gamma - 1)L_c^2 Q}{\pi^2 V_c v}, \quad (3)$$

式中 V_c 为光声池的体积, v 为声速。在相同条件下,池常数与光声信号的强度成正比,因此增大池常数有利于提高光声信号的强度。

由于光声池工作在共振模式时存在端部效应,在求解共振频率、品质因数和池常数时,光声池共振管的长度^[17]需修正为

$$L_{\text{eff}} = L_c + \frac{16}{3\pi} R_c. \quad (4)$$

2.2 悬臂梁式光纤声波传感器

基于光纤F-P干涉测量原理的悬臂梁式声波传感器中的F-P腔由光纤端面和悬臂梁之间的空气隙构成。当声压作用于悬臂梁时,F-P腔长会发生周期性变化。低细度F-P干涉仪的反射光强度可表示为

$$I_r = 2I_0 \left\{ 1 + \beta \cos \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} [d_0 + \Delta d \sin(\omega t)] + \pi \right\} \right\}, \quad (5)$$

式中 I_0 为探测光源的入射光强度, β 为F-P反射条纹的对比度, λ 为探测光源的波长, d_0 为F-P干涉仪的静态波长, Δd 为腔长的变化量, ω 为声波的角频率, t 为时间。

在强度解调过程中,为提高传声器的检测灵敏度,并使其工作于线性响应区,通常将探测激光的工作波长锁定在Q点(1/4 π 相位点),采用激光波长循环跟踪的方法实现Q点的稳定^[18]。该工作模式下的强度变化 ΔI_r 可表示为

$$\Delta I_r = 2I_0 \beta \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \sin(\omega t). \quad (6)$$

3 实验系统设计

3.1 共振式光声池的设计

光声池的性能主要由品质因数和池常数来表征,由(1)式和(3)式分别得到品质因数 Q 以及池常

数 F 与共振管长度 L_c 和共振管内径 R_c 的关系图,如图 1 所示。由图 1(a)可知,品质因数随共振管内径的增大而增大,而共振管长度对于品质因数的影响较小。由图 1(b)可知,共振管内径越小,池常数越大,光声信号也就越强。但是过小的内径也会增加激光器准直的难度,如果光束照射到池壁上,光束会被池壁吸收,进而增加系统的噪声;另一方面,光声池长度增大,池常数也变大,但当光声池共振管长度较长时,继续增大长度,池常数增大的幅度较小。

综合以上分析,将共振管的长度和内径分别确定为 120 mm 和 4 mm,经计算得到温度为 30 °C 时的共振频率为 1389 Hz,品质因数 Q 为 46,池常数 F 为 2692 Pa·cm·W⁻¹。

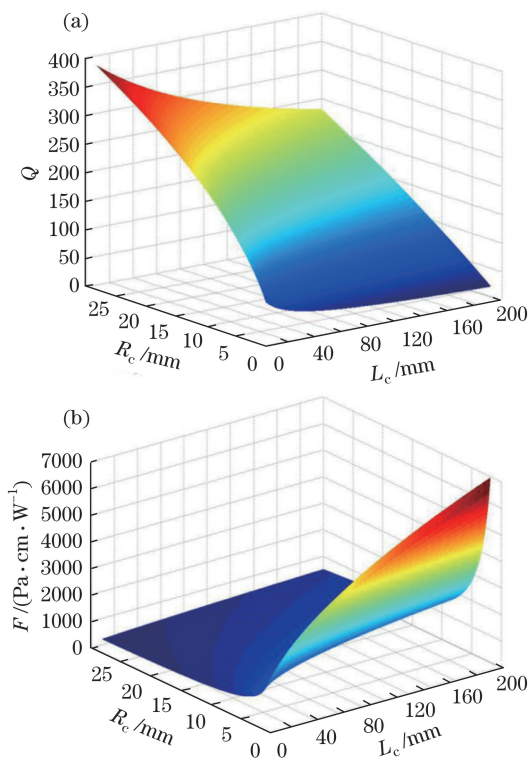


图 1 (a)品质因数和(b)池常数与声共振管几何尺寸的关系
Fig. 1 Relationship of (a) quality factor and (b) cell constant with size of resonant cell

3.2 光纤 F-P 传声器设计

光纤悬臂梁式声波传感探头采用光纤 F-P 干涉仪结构,由光纤、陶瓷插针、不锈钢外壳和不锈钢悬臂梁膜片构成。光纤端面与悬臂梁内表面之间的空气腔构成非本征 F-P 腔,腔长约为 1.3 mm。光纤 F-P 传声器探头与悬臂梁的结构示意图如图 2(a)和图 2(b)所示。矩形不锈钢悬臂梁由激光微加工技术制作,其尺寸为 2 mm×1 mm,厚度为 10 μm。

对光纤 F-P 传声器的频率响应特性进行测试,将设计的传声器和喇叭置于隔音箱中,信号发生器驱动喇叭产生 0.5 Pa 的声压,同时利用锁相放大器测量光纤传声器解调模块的输出电压值。调节信号发生器的输出正弦信号频率,记录光纤 F-P 传声器的频率响应测量值,测量结果如图 3 所示,其共振频率约为 2.4 kHz,在 1.4 kHz 附近具有较平坦的频率响应特性,可与上述光声池进行良好的频率匹配。

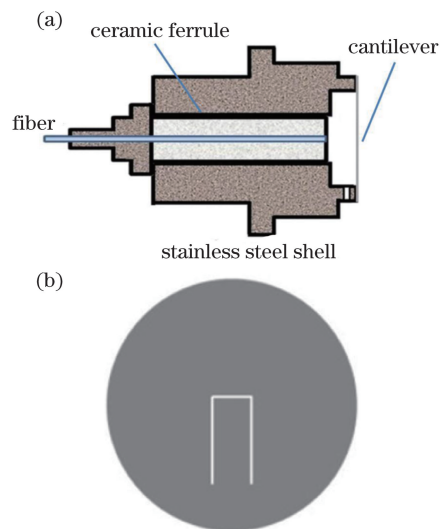


图 2 (a)光纤 F-P 传声器探头与(b)悬臂梁的结构示意图
Fig. 2 Structural diagrams of (a) fiber-optic F-P microphone probe and (b) cantilever

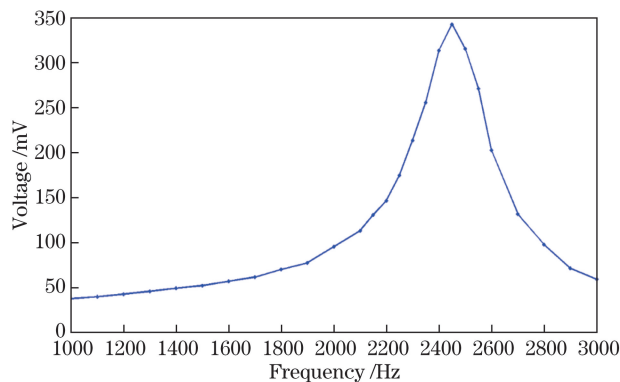


图 3 光纤 F-P 传声器的频率响应
Fig. 3 Frequency response of fiber-optic F-P microphone

3.3 吸收谱线选择

乙炔分子在近红外波段具有较大的吸收系数,而空气中的高浓度(体积分数通常大于 1%)水气在近红外波段也具有较大的吸收系数,且覆盖很宽的光谱范围。图 4 所示为乙炔和水气在 1510~1540 nm 范围内的吸收谱线,其中水气对应的系数放大了 1000 倍。在乙炔气体的多条较强吸收谱线中选择

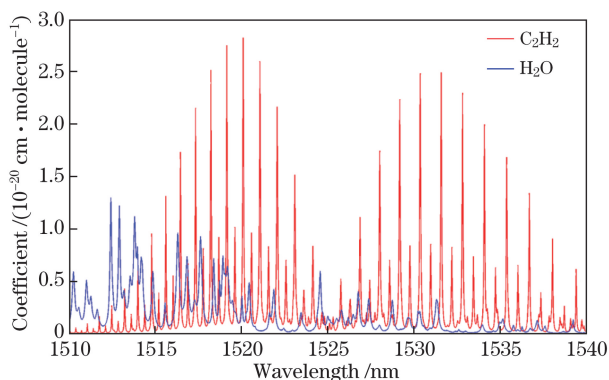


图 4 乙炔和水气的近红外吸收谱线
Fig. 4 Near-infrared absorption lines of acetylene and moisture

吸收谱线时应重点考虑避免水气吸收的干扰,该实验中吸收谱线选择为 1532.83 nm。

3.4 光声光谱系统结构

基于光纤 F-P 传声器的激光光声光谱系统的结构示意图如图 5 所示。以香港 Amonics 公司的 AEDFA-27-B-FA 型分布反馈式 (DFB) 半导体激光器级联掺铒光纤放大器 (EDFA) 的大功率可调谐激光作为光声激发光源,中心波长为 1532.8 nm,饱和输出功率为 500 mW。激光经传导光纤和准直器入射到光声池中。光声池共振管直径为 4 mm,长度为 120 mm。光声池的内壁经抛光、镀金处理,以降低池壁吸收的干扰,采用透过率大于 90% 的光学窗口片密封入射端口。为提高光声激发光的有效功率,在光声池另一端安装镀金反射镜。对于一阶纵向共振光声池,声波的波节在共振管两端,光声池的进出口设置在缓冲池两端,这样既不影响池内压力的分布,还可以避免气体流动产生的噪声。声波的波腹位于共振管的中心位置,将光纤 F-P 传声器安装在光声池的中部可获得最大的信号幅度,光声池与传声器连接处的开孔直径为 2 mm。乙炔气体吸收激光产生的声波信号被光纤 F-P 传声器接收,并被强度解调系统转换为电压信号。微弱光声信号经过自制的基于现场可编程门阵列 (FPGA) 的锁相放大器处理后,通过二次谐波检测技术,光声信号的强度值被提取出。

4 实验结果与分析

4.1 光声池共振频率的测量

对于共振式光声光谱,光声信号的频率与谐振腔的共振频率匹配时才能获得最大的信号输出。由于光声池中传声器安装引入的开口以及实际加工

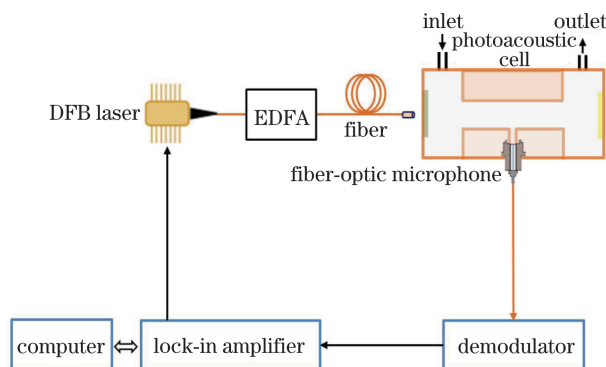


图 5 激光光声光谱系统结构示意图
Fig. 5 Structural diagram of laser photoacoustic spectroscopic system

误差等因素,实际测量的共振频率值与理论计算结果略有偏差。实验中,对 DFB 激光器进行恒温控制,并调节偏置电流,将激光器的波长锁定在 1532.83 nm,通入体积分数为 3×10^{-6} 的乙炔标准气,将激光器的调制频率从 600 Hz 调节到 800 Hz,测量的共振式光声池的频率响应如图 6 所示。通过样条插值计算得出,当调制频率为 701 Hz 时,探测到的二次谐波信号强度最大,即光声池的共振频率为 1402 Hz,品质因数为 28.6。

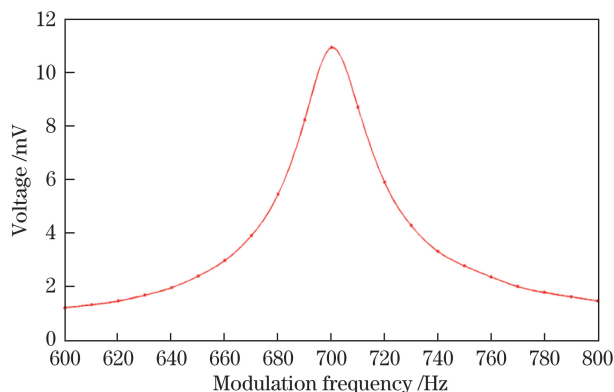


图 6 共振式光声池的频率响应

Fig. 6 Frequency response of resonant photoacoustic cell

4.2 光声光谱微量乙炔气体的测量

系统通过两个气体质量流量控制器控制气体的浓度,改变高纯度氮气和体积分数为 3×10^{-6} 乙炔标准气的流量,即可得到不同体积分数的混合气体。实验中,气体的体积分数分别调整为 1×10^{-7} , 3×10^{-7} , 5×10^{-7} , 1×10^{-6} , 3×10^{-6} ,激光波长扫描范围设置为 1532.73~1532.93 nm,并采用锁相放大器测量波长扫描时的二次谐波信号的有效值。为提高系统信噪比,采用小波去噪技术对测量的光声光谱信号进行降噪处理,处理后的不同体积分数下的二次谐波信号如图 7(a)所示。有别于传统的基于

DFB激光器的可调谐激光光谱气体检测系统中存在的由剩余幅度调制引起的光谱畸变,图7(a)所示的二次谐波信号对称分布,这是由于DFB激光器的可调谐范围较窄,且当电流调制频率较小时,经EDFA放大的饱和输出激光的光功率几乎保持不变。

通过高斯拟合方法对测量的二次谐波光谱取最大值,不同乙炔气体体积分数下的光声测量值如图7(b)所示。实验结果表明,光声测量值随体积分数呈线性变化,通过线性拟合得到,当乙炔气体的体积分数为 10^{-6} 时,光声光谱系统对乙炔气体测量的响应度为3.67 mV。

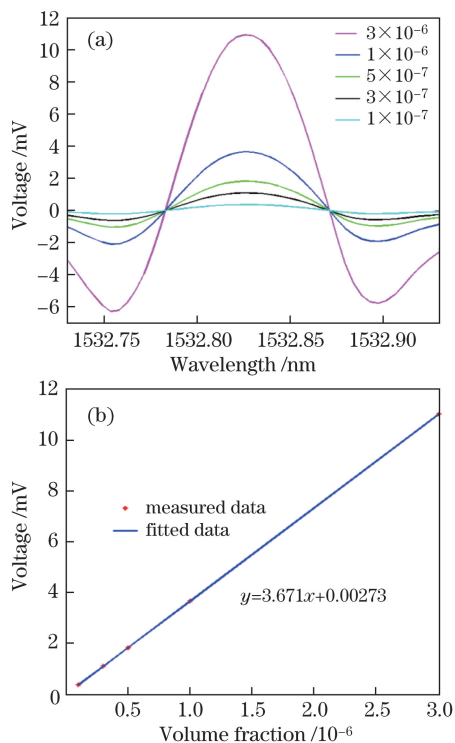


图7 不同乙炔气体体积分数下的(a)二次谐波信号和(b)光声测量值

Fig. 7 (a) Second harmonic signals and (b) photoacoustic responses under different volume fractions of acetylene

为测量系统的检测极限,在光声池中长时间通入高纯度氮气,直至残留的乙炔气体完全被氮气排出。实验中,DFB激光器和EDFA均处于正常工作状态,当单次测量时间为60 s时,系统输出的噪声电压值如图8所示。计算的噪声电压为 $3.07 \mu\text{V}$,根据测量的乙炔气体响应度,可估计出系统对乙炔气体的检测极限约为 8×10^{-10} 。

5 结 论

将基于光纤F-P干涉仪的悬臂梁式光纤传感

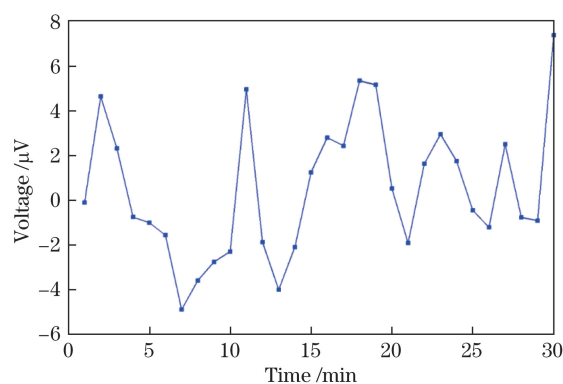


图8 光声池充高纯度氮气时的本底噪声测试

Fig. 8 Background noise measurement with photoacoustic cell filled with pure nitrogen

器用于光声光谱微量气体检测系统中,在理论研究的基础上,优化了一阶纵向共振式光声池的结构参数,共振管的长度和内径分别确定为120 mm和4 mm。通过实验得到光声池的共振频率为1402 Hz,品质因数为28.6。对微量气体检测的实验结果显示,当乙炔气体的体积分数为 10^{-6} 时,光声光谱系统对乙炔气体测量的响应度为3.67 mV,检测极限达到 8×10^{-10} 。该系统为超小体积分数的气体检测提供了新的解决方案,在大型电力变压器的早期放电性故障诊断中具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Martin P. Near-infrared diode laser spectroscopy in chemical process and environmental air monitoring[J]. Chemical Society Reviews, 2002, 31(4): 201-210.
- [2] 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.
- [3] Sigrist M W, Bartlome R, Marinov D, et al. Trace gas monitoring with infrared laser-based detection schemes[J]. Applied Physics B, 2008, 90(2): 289-300.
- [4] Yu R, Jiang Y S. Photoacoustic spectroscopy system with amplitude spectrum and phase spectrum measurement functions[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0230001. 余荣, 江月松. 一种可同时实现振幅谱与相位谱测量的光声光谱系统[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0230001.
- [5] Dong L, Ma W G, Zhang L, et al. Mid-IR ultrasensitive CO detection based on pulsed quartz enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0130002. 董磊, 马维光, 张雷, 等. 基于脉冲石英增强光声光谱的中红外超高灵敏度CO探测[J]. 光学学报,

- 2014, 34(1): 0130002.
- [6] Li Z J, Chen W G, Ji Y, *et al.* Micro gas measurement method based on dual wavelength modulation of distributed feedback laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111404.
李志军, 陈伟根, 季焱, 等. 基于分布式反馈激光器双波长调制的微量气体测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111404.
- [7] Tian L, Xing J G. Discussion on making decision about electric equipment for condition based maintenance[J]. *Power System Technology*, 2004, 28(16): 60-63.
田玲, 邢建国. 电气设备实施状态维修决策方法的探讨[J]. *电网技术*, 2004, 28(16): 60-63.
- [8] Xiong H, Li W G, Song W, *et al.* Application of density-based clustering technology in diagnosis of DGA data of transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(5): 1022-1026.
熊浩, 李卫国, 宋伟, 等. 概率聚类技术应用于变压器 DGA 数据故障诊断[J]. *高电压技术*, 2008, 34(5): 1022-1026.
- [9] Zhao W Q, Zhu Y L, Jiang B, *et al.* Condition assessment for power transformers by Bayes networks[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(5): 1032-1039.
赵文清, 朱永利, 姜波, 等. 基于贝叶斯网络的电力变压器状态评估[J]. *高电压技术*, 2008, 34(5): 1032-1039.
- [10] Zhang X X, Liu H, Zhang Y, *et al.* Quantum detection of trace acetylene gas based on the peak area of photoacoustic spectroscopy[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(3): 857-863.
张晓星, 刘恒, 张英, 等. 基于光声光谱峰面积的微量乙炔气体定量检测[J]. *高电压技术*, 2015, 41(3): 857-863.
- [11] Wang H J, Ma S J, Yu H M, *et al.* Cause analysis and corresponding countermeasures of acetylene overproof phenomenon in unused transformer oil[J]. *Lubrication Oil*, 2015, 4: 44-47.
王会娟, 马书杰, 于会民, 等. 未运行变压器油乙炔超标原因分析及对策研究[J]. *润滑油*, 2015, 4: 44-47.
- [12] National Standardization Technical Committee. Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil: GB/T 7252-2001[S]. Beijing: China Standard Press, 2001.
中华人民共和国国家标准. 变压器油中溶解气体分析和判断导则: GB/T 7252-2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [13] Kauppinen J, Wilcken K, Kauppinen I, *et al.* High sensitivity in gas analysis with photoacoustic detection[J]. *Microchemical Journal*, 2004, 76(1/2): 151-159.
- [14] Wang Q Y, Wang J W, Li L, *et al.* An all-optical photoacoustic spectrometer for trace gas detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 153(1): 214-218.
- [15] Gong Z F, Chen K, Yang Y, *et al.* High-sensitivity fiber-optic acoustic sensor for photoacoustic spectroscopy based traces gas detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 247: 290-295.
- [16] Yin Q R, Wang T, Qian M L, *et al.* Photoacoustic and photothermal technologies and their applications[M]. Beijing: Science Press, 1991.
殷庆瑞, 王通, 钱梦碌. 光声光热技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [17] Karbach A, Hess P. High precision acoustic spectroscopy by laser excitation of resonator modes[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1985, 83(3): 1075-1084.
- [18] Mao X F, Zhou X L, Yu Q X. Stabilizing operation point technique based on the tunable distributed feedback laser for interferometric sensors[J]. *Optics Communications*, 2016, 361: 17-20.