

多组分变压器油溶解气体的傅里叶变换红外光声光谱定量检测

刘丽娟^{1, 2, 3}, 宦惠庭^{1, 2}, Mandelis Andreas², 邵晓鹏^{1*}

1. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071
2. Center for Advanced Diffusion-Wave and Photoacoustic Technologies (CADIPT), Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Toronto M5S 3G8, Canada
3. 光电集团河南平原光电有限公司, 河南 焦作 454100

摘要 油中溶解气体是表征充油型变压器早期故障的重要特征量之一, 其组分和含量的高精度检测在变压器运行状态评估和故障预警中拥有重要的研究意义。光声痕量气体检测技术作为一种光学检测手段, 具有无损、高检测灵敏度、大动态范围和样品无需前处理等优点, 有望实现多种变压器油溶解气体的在线检测。基于傅里叶变换红外光谱仪, 结合高精度 T 型共振光声池, 建立傅里叶变换红外光声光谱检测系统, 选用 CO₂ 和 C₂H₂ 作为气体样品, 开展多种变压油中溶解气体定量检测研究。所设计的 T 型共振光声池主要由相互垂直的吸收腔和共振腔构成, 声探测器位于共振腔顶端远离入射光路, 避免了杂散光引起的噪声对光声信号的干扰。光声池的共振频率主要由共振腔决定, 共振腔与入射光路垂直, 其长度不受水平面的狭窄空间的影响, 故可在有限的尺寸下实现低频共振, 满足光谱仪样品空间需求。实验选用 380 μL · L⁻¹ CO₂ : 1 000 μL · L⁻¹ C₂H₂ : N₂ 的混合气体作为待测样品, 应用光谱仪中的宽谱光源, 选用 6 cm⁻¹ 空间分辨率, 采集并分析该气体样品的红外光声谱。所有气体吸收峰清晰可见, 说明该方法可完成多种气体的同时检测。在常温常压条件下, 2 349 cm⁻¹ 入射光能量仅为 12.6 μW 时, CO₂ 气体的检测精度为 4 μL · L⁻¹, 满足国家电网公司企业标准(Q/GDW 536—2010)变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范中在线监测装置技术指标对 CO₂ 气体最低监测极限值的要求; 1 360 cm⁻¹ 入射光能量为 30 μW 时, C₂H₂ 气体在的检测精度为 5 μL · L⁻¹, 达到中华人民共和国电力行业标准变压器油中溶解气体分析和判断导则(DL/T 722—2014)中对运行中 220 kV 及以下的变压器和电抗器设备油中溶解气体含量 C₂H₂ 含量上限的限定。实验结果表明基于 T 增强型光声池气体检测系统结合了傅里叶红外光谱的广谱特性和光声气体检测技术的高灵敏度, 可实现多种变压器油中溶解气体的高精度定量检测, 有望为变压器运行状态监测和故障类型分析评估提供理论依据。

关键词 多组分气体检测; T 型光声池; 宽波段光声光谱; 痕量气体探测

中图分类号: O433.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)03-0684-04

引言

电网中大型充油变压器是输电系统的枢纽设备, 其运行状态直接决定整个电网的安全性和可靠性。变压器油纸绝缘系统在电、热和机械等因素作用下会发生分解并产生 C₂H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, CO₂, CO 和 H₂ 等变压器油中溶解气。大量实例表明, 其溶解气体的种类和含量是表征变压器早期潜伏性故障的重要特征, 可用于评估变压器运行状态和预测

其工作寿命。如 CO₂ 是变压器中油和绝缘纸热解时产生的主要气体, C₂H₂ 可表征变压器油纸中火花放电、电弧放电故障^[1]。

现常用油中溶解气体分析技术主要分为离线式和在线式检测两种形式。最为常见的离线式检测方式为气相色谱法。该方法虽然具有选择性强、检测精度高和准确性好等优点, 但由于需要现场采样、实验室气体分离等复杂过程, 检测周期长且色谱柱易受到污染^[2]。光声光谱技术作为光谱式在线式检测式的重要代表^[3-6], 具有目标选择性^[7-8]、反应时间

收稿日期: 2019-01-23, 修订日期: 2019-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61805187, 61801358), 中国博士后科学基金项目(2019M653546), 陕西省自然科学基金计划青年项目(2019JQ-651), 中央高校基础研究经费(JB20190412, XJS190505)资助

作者简介: 刘丽娟, 1989 年生, 西安电子科技大学讲师 e-mail: lixianliu@xidian.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: xpshao@xidian.edu.cn

短^[9]、对样品无破坏^[10-11]等优点,可在不易接近的危险区域或难以到达的不利地形实现非接触式实时在线检测,受到了普遍关注。

变压器油中溶解气体除 H₂ 外,其他气体在中红外波段均有明显的吸收特性。因此基于傅里叶变换红外光谱仪,结合高精度 T 型光声池^[6, 12],构建傅里叶变换红外光声光谱气检测系统 (Fourier transform infrared photoacoustic spectroscopy, FTIR-PAS),以 CO₂ 和 C₂H₂ 作为气体样品,开展多种油中溶解气体定量检测研究。

1 基础理论

FTIR 光谱仪基于对 Michelson 干涉后的红外光进行傅里叶变换,可克服色散型光谱仪分辨率低、光能量输出小、光谱范围窄、测量时间长等缺点。光谱 $B(\sigma)$ 与入射光 $I(\delta)$ 满足如式(1)所示的傅里叶余弦变换关系。 σ 和 δ 分别为光谱波数和两臂之间的光程差。

$$B(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\delta) \cos(2\pi\delta\sigma) d\delta \quad (1)$$

当光谱仪工作在步进扫描模式时,动镜以设置的速度移动到指定光程差对应位置并保持静止,数据单元采集实验数据。光谱图关于零光程差点对称,此时满足离散傅里叶变换关系,如式(2)所示。其中,干涉谱图中含有 N 个数据采集点, h 为相邻两点间距离, M 为光谱波数总和。

$$B(\sigma_m) = I(0) + 2 \sum_{j=1}^{N-1} I(jh) \cos(2\pi\sigma_m jh) \quad (2)$$

$j: 1, 2, 3, \dots, N-1; m: 1, 2, 3, \dots, M$

当以共振频率 ω_0 调制系统入射光声池光时,目标气体吸收入射光所激发的光声信号 S 如式(3)所示^[13]。其中, I 为入射光能量, C 为光声池常数, R_{mic} 为麦克风灵敏度, N_{tot} 为单位体积内气体分子密度, $E(\nu)$ 为目标气体的光吸收截面, c 为目标气体浓度。

$$S = ICR_{mic}(\omega_0)N_{tot}E(\nu)c \quad (3)$$

应用 FTIR 光谱仪中宽谱光源激励气体,所得光声信号 $B_{PAS}(\sigma_m)$ 如式(4)所示。该结果证明 FTIR-PAS 痕量气体检测系统可根据单光谱傅里叶变换结果获得红外宽波段气体吸收信息,且在气体吸收峰处,其光声信号与对应气体浓度成正比,有望实现对多种痕量气体的同时高精度检测。

$$B_{PAS}(\sigma_m) = CR_{mic}(\omega_0)N_{tot}E(\nu)c \times \left[I(0) + 2 \sum_{j=1}^{N-1} I(jh) \cos(2\pi\sigma_m jh) \right] \quad (4)$$

$j: 1, 2, 3, \dots, N-1, m: 1, 2, 3, \dots, M$

2 实验部分

实验建立的 FTIR-PAS 气体检测系统如图 1 所示,采用 FTIR 光谱仪 (Bruker Verterx70) 中光源作为光声信号激励源,其可同时发射连续波数光。复色光经由透镜汇聚、斩波器以共振频调制后照射至 T 型光声池。透射光由红外探测器采集用来监测入射光源光能量的波动情况。所激发的光声信

号由前置放大器滤波放大,锁相放大器采集并输送至计算机进行数据处理。

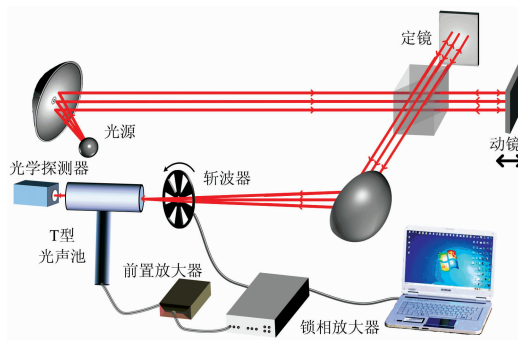


图 1 FTIR-PAS 实验系统

Fig. 1 Schematic of FTIR-PAS system

所设计的 T 型光声池主要包含吸收腔和共振腔两个部分,入射光贯穿照射吸收腔,其截面尺寸可根据入射光光斑等特性改变;共振频率主要由共振腔决定,产生的声波在共振腔的开端被反射而形成声驻波。共振腔与入射光路垂直,其长度不受水平面狭窄空间的影响,故可在有限的空间中实现低频率共振,满足机械调制的需求。微音器位于共振腔顶端远离入射光路,避免了由杂散光引起的系统噪声。经验证 T 型光声池的共振频率为 342 Hz,光声池常数为 2 063 Pa · cm · W⁻¹^[4],属于高品质光声池^[15]。

3 结果与讨论

根据 Hitran 数据库^[16], C₂H₂ 的吸收谱线理论仿真结果如图 2(a) 所示。由 ν_3 C—H 伸缩振动引起的吸收带位于 3 294 cm⁻¹ 附近; 1 302 和 1 360 cm⁻¹ 处的吸收峰是由于 ν_4 +

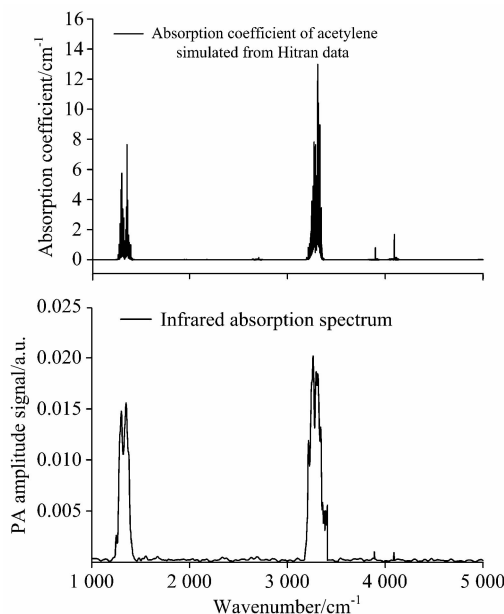


图 2 C₂H₂ 红外吸收谱仿真与实验对比
Fig. 2 The measured C₂H₂ absorption spectra vs simulated results

ν_5 联合振动引起的^[13]。为验证 FTIR-PAS 系统可靠性,测试了 C_2H_2 在 $1\ 000\sim 6\ 500\ cm^{-1}$ 的红外吸收光谱图,如图 2 所示。经对比观察,所有气体吸收峰位置与仿真结果完全吻合,证实了 FTIR-PAS 气体检测系统可精确检测目标气体吸收峰信息,具有极高的波数分辨率。

采用 $380\ \mu L \cdot L^{-1} CO_2 : 1\ 000\ \mu L \cdot L^{-1} C_2H_2 : N_2$ 混合气体作为待测气体样品,锁相放大器积分时间为 $300\ ms$,空间分辨率为 $6\ cm^{-1}$,验证 FTIR-PAS 气体检测系统多气体组分同时分析的能力,结果如图 3 所示。 CO_2 的吸收峰($2\ 349$, $3\ 620$ 和 $3\ 730\ cm^{-1}$)和 C_2H_2 的吸收峰($1\ 302$, $1\ 360$ 和 $3\ 294\ cm^{-1}$)清晰可见,证明了该技术基于宽光谱光源可实现多种变压器油中溶解气体同时检测。

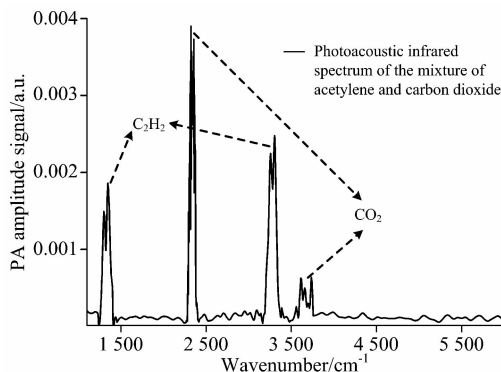


图 3 混合气体($380\ \mu L \cdot L^{-1} CO_2 : 1\ 000\ \mu L \cdot L^{-1} C_2H_2 : N_2$) FTIR-PA 谱图

Fig. 3 The FTIR-PA spectrum of the mixture($380\ \mu L \cdot L^{-1} CO_2 : 1\ 000\ \mu L \cdot L^{-1} C_2H_2 : N_2$)

FTIR 光谱仪宽光谱光源的光谱能量分布如图 4 所示。由式(4)可知,气体检测灵敏度与光声池入射光能量成正比,因此分别选用光能量较强的 $1\ 360\ cm^{-1}$ (光能量 $30\ \mu W$) 和 $2\ 349\ cm^{-1}$ ($12.6\ \mu W$) 的吸收峰信息来进一步分析 C_2H_2 和 CO_2 的检测灵敏度。

$1\ 000\ \mu L \cdot L^{-1} C_2H_2$ 在 $1\ 360\ cm^{-1}$ 处产生的吸收峰值为 1.86×10^{-3} 。对远离吸收带的波数区间($1\ 700\sim 1\ 850\ cm^{-1}$)的光声信号幅值进行线性拟合,拟合结果与实验测试

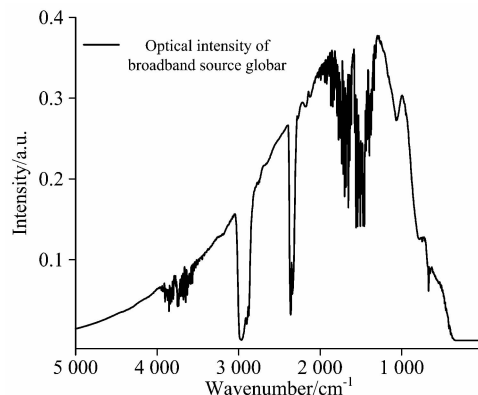


图 4 宽光谱光源碳棒光能量分布图

Fig. 4 Intensity distribution of global source

值间的标准偏差作为系统的平均噪声水平^[5],计算得噪声水平为 7.63×10^{-6} 。可得 FTIR-PAS 气体检测系统的信噪比为 $243.7(1.86 \times 10^{-3}/7.63 \times 10^{-6})$, C_2H_2 的检测灵敏度为 $5\ \mu L \cdot L^{-1}(1\ 000\ \mu L \cdot L^{-1}/243.7)$,达到中华人民共和国电力行业标准变压器油中溶解气体分析和判断导则(DL/T 722—2014)中对运行中 $220\ kV$ 及以下的变压器和电抗器设备油中溶解气体含量 C_2H_2 含量上限的限定。应用相同的方法计算可得 CO_2 的检测精度为 $4\ \mu L \cdot L^{-1}$ ^[12],满足国家电网公司企业标准(Q/GDW 536—2010)变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范中在线监测装置技术指标对 CO_2 气体最低监测极限值的要求。

4 结 论

设计了高性能 T 型光声池,使用 μW 量级红外入射光源,结合 FTIR 光谱的宽谱性和 PAS 技术的高检测精度,同时实现了 CO_2 和 C_2H_2 气体的高精度检测。 CO_2 和 C_2H_2 的探测灵敏度分别为 4 和 $5\ \mu L \cdot L^{-1}$,达到了国家/企业相关标准要求。实验证实了 T 型光声池增强型 FTIR-PAS 气体检测系统高精度多种痕量气体检测的可行性,有望为变压器运行状态监测和故障类型早期诊断提供理论支撑。

References

- [1] The People's Republic of China Electric Industry Standard DL/T 722—2014. Guide to the Analysis and Diagnosis of Gases Dissolved in Transformer Oil(中华人民共和国电力行业标准:变压器油中溶解气体分析和判断导则 DL/T 722—2014), 2014.
- [2] Liu L, Huan H, Zhang M, et al. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(2): 3900507.
- [3] MA Yu-fei, HE Ying, YU Xin, et al(马欲飞,何应,于欣,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2015, 35(9): 3001.
- [4] Liu L, Wang Y, Gao C, et al. International Journal of Thermophysics, 2015, 36(5-6): 868.
- [5] Huan H, Mandelis A, Lashkari B, et al. International Journal of Thermophysics, 2017, 38: 62.
- [6] Liu L, Mandelis A, Huan H, et al. Optics Letters, 2017, 42: 1424.
- [7] Ma Y, He Y, Zhang L, et al. Applied Physics Letters, 2017, 110: 031107.
- [8] Ma Y, Tong Y, He Y, et al. Sensors, 2018, 18: 2047.
- [9] Ma Y, Lewicki R, Razeghi M, et al. Optics Express, 2013, 21(1): 1008.

- [10] Huan H, Mandelis A, Liu L, et al. *NDT and E International*, 2019, 102: 84.
- [11] Huan H, Mandelis A, Liu L, et al. *International Journal of Thermophysics*, 2018, 39: 55.
- [12] Liu L, Mandelis A, Huan H, et al. *International Journal of Thermophysics*, 2018, 39: 64.
- [13] Liu L, Mandelis A, Huan H, et al. *Applied Physics B*, 2016, 122: 268.
- [14] Liu L, Mandelis A, Melxander A, et al. *International Journal of Thermophysics*, 2016, 37: 64.
- [15] Liu L, Mandelis A, Huan H, et al. *Vibrational Spectroscopy*, 2016, 87: 94.
- [16] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130: 4.

Multiple Dissolved Gas Analysis in Transformer Oil Based on Fourier Transform Infrared Photoacoustic Spectroscopy

LIU Li-xian^{1, 2, 3}, HUAN Hui-ting^{1, 2}, Mandelis Andreas², SHAO Xiao-peng^{1*}

1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

2. Center for Advanced Diffusion-Wave and Photoacoustic Technologies (CADIPT), Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Toronto M5S 3G8, Canada

3. Opto-Electronic Group Henan Pingyuan Optics Electronics Co., Ltd., Jiaozuo 454100, China

Abstract Trace dissolved gas in transformer oil is a key feature for monitoring the transformers' status and for estimation of early failure, therefore there is an urgent need for the development of cost-effective on line gas detection methods. As a non-destructive testing method, photoacoustic spectroscopy (PAS) technology is well-known for the advantages of high sensitivity, large dynamic range, and robustness of implementation, which has the potential for the on-line detection of trace dissolved gas detection. A T-resonator enhanced Fourier transform infrared photoacoustic spectroscopic (FTIR-PAS) system is established for the analysis of multiple trace dissolved gases in this paper. The presented T-resonator mainly consists of absorption and resonance cylinders which are perpendicular to each other. A microphone is placed on top of the resonance cylinder away from the incident light path, thus the spurious signal caused by scattered light is avoided and the noise level of the FTIR-PAS configuration is only limited by the microphone itself. The T-cell resonance frequency is determined by the dimension of the resonance cylinder, which results in a solution for the conflicting requirements of low frequency and the limited space of the FTIR compartment. The photoacoustic spectra of the mixture of $380 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \text{CO}_2 : 1\,000 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \text{C}_2\text{H}_2 : \text{N}_2$ with 6 cm^{-1} resolution are collected to verify the wavenumber accuracy and multiple trace gas detection ability of the FTIR-PAS technology. The fact that the four absorption bands of CO_2 and C_2H_2 are obviously distinguishable exhibits the good performance for simultaneous multi-dissolved gases detection of the T-resonator enhanced FTIR-PAS configuration. The results show the detection sensitivity yields $4 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ for CO_2 (light intensity $12.6 \mu\text{W}$ at $2\,349 \text{ cm}^{-1}$) and $5 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ for C_2H_2 ($30 \mu\text{W}$ at $1\,360 \text{ cm}^{-1}$) under STP conditions. The minimum detection limits of both gases match the national standards for transformers. By virtue of its broadband nature and high sensitivity, the T-resonator enhanced FTIR-PAS methodology is shown to be suitable for simultaneous multiple trace dissolved gas detection in transformer oil.

Keywords Multi-component gas detection; T-resonator; Broadband photoacoustic spectroscopy; Trace gas analysis

(Received Jan. 23, 2019; accepted Apr. 6, 2019)

* Corresponding author