

光声光谱技术在油浸式电气设备故障气体检测中的应用

毛知新, 文劲宇

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 光声光谱气体检测技术具有精度高、检测范围宽、不消耗被测气体和载气等优点, 适用于油浸式电气设备油中溶解气体的在线监测。对气体光声信号的产生机理进行了理论研究, 分析了油中溶解气体的红外光谱特性。基于顶空脱气和光声光谱监测技术, 构建了油中溶解气体在线监测平台。结合平台对标准气样和标准油样进行重复性和准确度的测试。采集实际运行的变压器中的油样, 与实验室的气相色谱仪进行对比测试, 结果都达到或优于电力系统油中溶解气体在线检测的要求, 能有效地检测油浸式电气设备油中溶解气体含量。

关键词: 油浸式电气设备; 溶解气体分析; 在线监测; 光声光谱; 动态顶空脱气; 准确度

Dissolved gas analysis in oil-immersed electrical equipment based on photoacoustic spectroscopy

MAO Zhixin, WEN Jinyu

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Photoacoustic spectroscopy (PAS) has the advantages of high precision, wide detection range, no consumption of measured gas and carrier gas. It can be applied to online monitoring dissolved gas in oil for oil immersed electrical equipment. This paper analyzes the generation mechanism of gas photoacoustic signal and the spectral characteristics of dissolved gases in insulation oil. An experimental gas detection platform is devised by coupling dynamic headspace degassing with photoacoustic spectroscopy. This platform is tested with standard gas samples and standard oil sample for repeatability and accuracy tests, and an oil sample is collected from a transformer in practical operation, and the results are compared with those of a laboratory gas chromatograph (GC) system. The results meet or exceed the standards for online detection of dissolved gas in power system. Consequently, the proposed technique effectively detects dissolved gas in oil for oil-immersed electric equipment.

Key words: oil-immersed electrical equipment; dissolved gas analysis; online monitoring; photoacoustic spectroscopy; dynamic headspace degassing; accuracy

中图分类号: TM406 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0076-07

0 引言

电力变压器和开关设备是输、配电网的关键设备, 定期检测和分析油浸式电气设备油中故障气体的含量和变化趋势能及时发现故障隐患, 预测故障发展趋势及延长设备的使用寿命^[1-3], 在电网运行中广泛应用并有效地预防了灾难性故障的发生。早期基于电化学传感器技术的混合气体检测能有效预警电气设备的潜在性故障。现在广泛应用的气相色谱技术能准确检测油中各种气体的含量。通过分析这些气体, 结合各种诊断方法, 包括大卫三角, 关键气体法, 云理论和反馈云熵模型^[4-5], 随机模糊理论^[6], 支持向量机^[7], 自组织抗体网络^[8]等, 能够诊断故障

的发展趋势。但在长期运行中发现这些方法存在明显的不足: (1)色谱柱和传感器在长期运行中性能发生变化, 需要定期标定或更换; (2)运行过程中需要消耗标准气样和载气, 维护工作量大^[9-10]。

光声光谱技术是以光声效应为基础的一种新型光谱分析检测技术。它是光谱技术与量热技术结合的产物, 是20世纪70年代初发展起来的检测物质和研究物质性能的新方法。光声技术是无机和有机化合物、半导体、金属、高分子材料等方面物理化学研究的有力手段, 在物理、化学、生物学、医学、地质学方面得到广泛应用。该技术的主要优点有: ①光声光谱法是直接测量气体吸收的能量的无背景噪音的检测技术, 具有很高的监测灵敏度; ②光声

光谱法不消耗被测气体, 以随处可得的空气为背景气, 不需高纯惰性气体为载气, 也没有易污染老化、需频繁更换的色谱柱和传感器; ③光声光谱不需要标准气体进行标定, 可真正实现免维护; ④检测范围宽, 可检测有载分接开关油箱中的高浓度气体含量^[9-11]。光声光谱由于其低漂移、高稳定性和免维护, 因而可大大提高电力系统在线测量所需要的可维护性。

本文在分析光声光谱技术特点的基础上, 搭建了结合顶空脱气和光声光谱检测的试验平台, 研究了光声光谱在油浸式电气设备油中气体含量检测中的应用。

1 光声光谱原理

光声光谱技术是基于光声效应的一种量热技术, 也是一种光谱技术^[12-14], 被测物质中气体分子吸收调制的特定波长的光后被激发, 处于激发态的分子与其他分子发生碰撞, 将吸收的光能部分转化成平动动能, 使气体温度呈现出与调制频率相同的周期性变化, 进而导致压强的周期性变化, 产生声音信号; 通过高灵敏度的微音器感知光声池中压力的变化, 并转变为与正比于气压的电信号, 供外电路分析处理。灵敏度的微音器的发展使光声光谱对痕量气体的检测具有更高的灵敏度及稳定性。

1.1 气体的光声检测

气体光声检测系统一般包括五部分: 光源、斩光盘、光声池、微音器及信号处理器, 如图 1 所示。在图示系统中, 光源的辐射波长必须包含待测气体的吸收谱线, 体积小, 功耗低, 满足设备在线长期运行。斩光盘将连续的光变成断续的光, 滤光片是根据被测气体的特征频谱选择的, 只有与被测气体波长一致的光才来通过, 其它波长的光不能通过。光声池是被测气体产生光声效应的容器, 还是光声信号发生的场所, 微音器是光声检测系统的核心。微音器检测到的微弱信号必须经外部电路放大才来被检测器检测和分析。

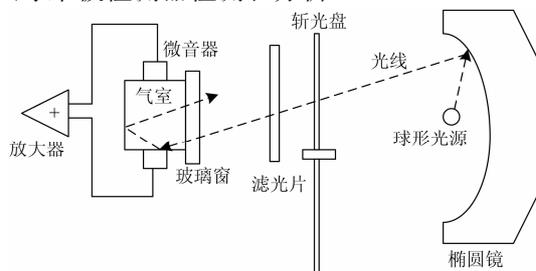


图 1 气体光声检测系统

Fig. 1 Gas photoacoustic spectroscopy system

1.2 光声信号的产生

1.2.1 入射光

如图 1, 红外光源产生的光在经过镜面精确聚焦后, 焦点处光谱强度:

$$I_v = \alpha T_f \pi L_v \sin^2 \theta \Delta \nu \quad (1)$$

式中: I_v 是光谱强度; L_v 是根据普朗克辐射定律的红外光谱辐射亮度; θ 是光锥的半锥角; $\Delta \nu$ 是光的带宽; T_f 滤光片的传输时间; α 是一个系数, 代表所有其他损失。

这个公式描述的非间歇光照强度, 但对间歇光照强度更感兴趣。在斩波频率下, 对应光强度的正弦分量为

$$I(t) = I_0 e^{i\omega t} \quad (2)$$

和

$$I_0 = 2\alpha T_f L_v \sin^2 \theta \Delta \nu \quad (3)$$

其中: I_0 是 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时非间歇光照强度。

1.2.2 吸收光能

根据贝尔定律, 气体吸收的光能为

$$I(l) = I(0) e^{-ckl} \quad (4)$$

式中: c 是气体浓度; k 是气体的吸收系数; l 是光的路径长度。气体吸收光后, 强度减为

$$I(0) - I(l) = I(0)(1 - e^{-ckl}) \approx cklI(0) \quad (5)$$

我们发现 PAS 气室每单位体积中的吸收功率 $W(t)$ 与光通过气室的长度, 由于端反射光的路径的长度大约是气室长度的两倍, 用 $I(t)$ 代替 $I(0)$ 表示进入气室的光强度, 得到:

$$W(t) = 2ckI(t) = W_0 e^{i\omega t} \quad (6)$$

结合式(2)、式(3), 我们可以得到:

$$W_0 = 2ckI_0 = 4\alpha T_f L_v \sin^2 \theta ck \Delta \nu \quad (7)$$

1.2.3 光声信号的产生

光声效应的产生可以描述为二个步骤: 第一步是气体分子吸收光能后产生热能; 第二步是由于气体的热膨胀产生声波。

1.2.3.1 热能产生

气体的热效应可以通过气体的能级分子数密度来分析, 若分子数为 N_m 的分子被激发到 E_m , 则处于基态 E_0 的分子数为 $N - N_m$, 激发态 E_m 的分子密度为

$$\frac{dN_m}{dt} = (N - N_m)\sigma\phi - N_m(\sigma\phi + \frac{1}{\tau_m}) \quad (8)$$

式中: σ 为气体的吸收截面; ϕ 为光子通量; τ_m 为激发态分子总寿命。

激发态分子的总寿命 τ_m 与无辐射跃迁寿命 τ_n

和辐射跃迁寿命 τ_r 的关系为

$$\tau_m = \frac{1}{\tau_n^{-1} + \tau_r^{-1}} \quad (9)$$

在空气中, 辐射跃迁可以忽略, 这样式(8)可以简化为

$$\frac{dN_m}{dt} = N\sigma\phi - N_m \frac{1}{\tau_m} \quad (10)$$

若只检测基频入射光引起的光声信号, 则光通量为

$$\phi = \phi_0(1 + e^{i\omega t}) \quad (11)$$

式中, ω 是光束调制的角频率。式(10)的解为

$$N_m = \frac{N\phi_0\sigma\tau_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau_m)^2}} e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (12)$$

式中 $\varphi = \arctan(\omega\tau_m)$ 表示 N_m 与 ϕ 之间的相位延迟。

气体中分子因无辐射弛豫产生的热功率密度 H 可以表示为

$$H = N_m \frac{hc\Delta\nu}{\tau_r} \quad (13)$$

假设气体分子激发态的能量都通过无辐射弛豫回到基态, 则 $\Delta\nu$ 近似等于入射光波数 ν_{in} , 又因为 $\tau_m \approx \tau_r$, 所以, 产生的热可以表示为

$$H = N_m \frac{hcn\nu_{in}}{\tau_m} \quad (14)$$

将 N_m 代入上式得到光声学中通常条件下热产生的基本公式:

$$H = \frac{N\sigma I_0}{\sqrt{1 + (\omega\tau_m)^2}} e^{j(\omega t - \varphi)} \quad (15)$$

式中 I_0 为入射光束的强度, $I_0 = \phi_0 hcn\nu_{in}$, 简化式(15), $H_0 = \frac{N\sigma I_0}{\sqrt{1 + (\omega\tau_m)^2}}$, 在较低的调制频率下,

$\omega\tau_m$ 项远远小于 1, 进一步简化得到:

$$H_0 = N\sigma I_0 = \alpha I_0 = \alpha_0 I_0 C_{gas} \quad (16)$$

式中: α 为气体分子的吸收系数; C_{gas} 是气体的有效浓度。

由此可以得到气室中气体的热能与气体的浓度有精确的线性关系。

1.2.3.2 光声信号的产生

气体分子由于周期性的热运动产生光声信号是牵涉到气体密度 ρ , 压力 P , 温度 T 和流速 v 的复杂过程我们假设气体为理想气体对其进行近似处理。

气体吸收光能后产生光声信号, 决定于差分方程:

$$k\nabla^2 T = \rho_0 C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} - W(t) \quad (17)$$

式中: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 为拉普拉斯运算符;

k, ρ_0, C_p 是气腔内混合气体的热导、物质密度和热容; T 为气体温度信号; P 为光声压力信号。

为了解这个方程, 我们将使用尽可能简单的几何形状, 假设一个内半径为 R 的球形空腔。我们得到光声信号的振幅:

$$P_0 = \frac{W_0(\gamma - 1)}{\omega} e^{-j\frac{\pi}{2}} S \quad (18)$$

其中

$$S = \frac{1 - \frac{3}{\lambda R} [\coth(\lambda R) - \frac{1}{\lambda R}]}{1 + \frac{3(\gamma - 1)}{\lambda R} [\coth(\lambda R) - \frac{1}{\lambda R}]} \quad (19)$$

因子 $e^{-j\frac{\pi}{2}}$ 代表相位滞后 $\frac{\pi}{2}$ 。

压力信号的均方根值变为

$$P_{RMS} = \frac{\sqrt{2} W_0(\gamma - 1)}{2 \omega} |S| \quad (20)$$

参数 S 描述的是低频时的现象。如果在气体混合物的热扩散长度比 R 小得多, 然后 S 将接近 1。热扩散长度 μ 等于:

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega\rho_0 C_p}} \quad (21)$$

2 油中故障气体光谱特性分析

油浸式电气设备在运行过程中, 在电和热的作用下, 油可能会劣化产生特征气体并直接溶解于油中, 这些特征气体有: 氢气 H_2 , 一氧化碳 CO , 二氧化碳 CO_2 , 甲烷 CH_4 , 乙烷 C_2H_6 , 乙烯 C_2H_4 和乙炔 C_2H_2 等。这些气体除氢气外其他气体对红外光都有吸收。

由于光声光谱检测油中气体含量是以空气为背景气, 通常空气中主要含有水蒸气、二氧化碳等气体, 这些气体会在一定的光谱范围内严重影响被测气体的测量, 首先, 分析空气的光谱特性, 根据 HITRAN2012 数据库^[15]计算出在温度 20 °C、压强为标准大气压下空气的红外吸收光谱如图 2 所示。

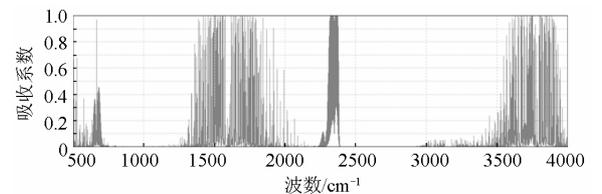


图 2 空气的红外吸收光谱

Fig. 2 Infrared spectra of air

从图 2 可以发现, 从 500 cm^{-1} 到 $4\,000\text{ cm}^{-1}$ 的中红外范围内, 可用来监测油中溶解气体的区域只有 (1) $700\sim 1\,300\text{ cm}^{-1}$; (2) $2\,000\sim 2\,300\text{ cm}^{-1}$; (3) $2\,400\sim 3\,500\text{ cm}^{-1}$ 。

同样可得油中溶解气体的光谱特性如图 3 所示。

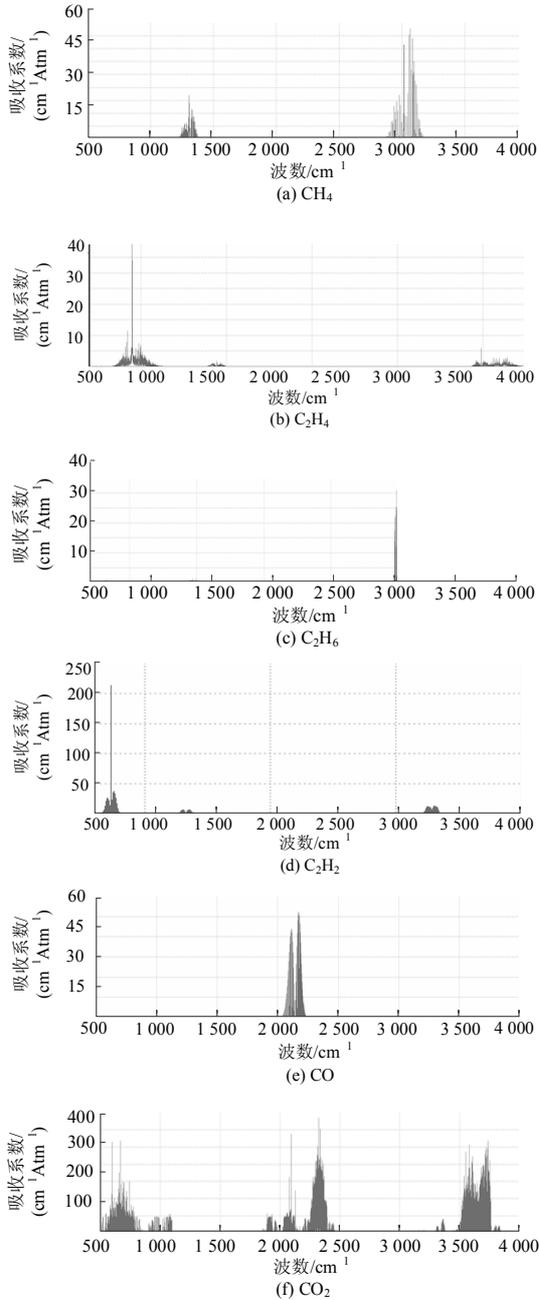


图 3 油中溶解气体的红外吸收光谱

Fig. 3 Infrared spectra of gas dissolved in oil

综合分析, 本文选取的用于油浸式电气设备的油中溶解气体的特征频谱如表 1 所示。

表 1 油中溶解气体的特征频谱

Table 1 Characteristic spectra of gas dissolved in oil			
气体组分	分子量	特征波数/ cm^{-1}	特征波长/ μm
CO	28	2143	4.666
CO ₂	44	2349	4.257
CH ₄	16	1251	7.994
C ₂ H ₄	28	1056	9.470
C ₂ H ₆	30	836	11.962
C ₂ H ₂	26	735	13.605

3 试验及结果分析

3.1 试验设计

由于过去长期使用气相色谱作为油浸式电力设备油中溶解气体含量的实验室检测器, 于是开展研究来确认基于光声光谱系统具有在同样介质中检测相同气体的能力。实验装置如图 2 所示。在实验中, 采用 IEC 标准推荐的动态顶空脱气来进行油中溶解气体的分离, 采用光声光谱来检测油中溶解气体的含量。

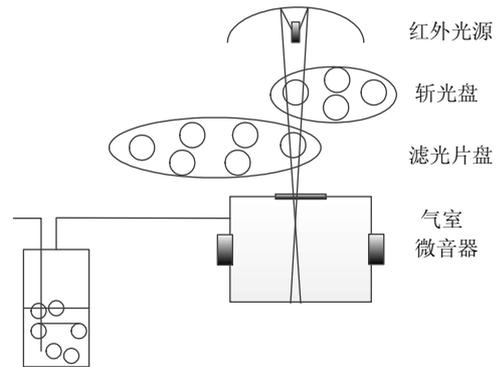


图 4 油中溶解气体检测试验示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental for dissolved gas detection

采用标准 5PPM 的标准气样由光声光谱检测器测试 3 次, 计算平均值与标准值对比。

配备低、中、高三种不同浓度的标准油中气体样本进行测试。对五种样本进行分析, 计算其检测的重复性, 并与标准气体量进行对比。在气体级别都已知的前提下, 可以评估这个测量油中气体检测器的能力。

收集取自于现场变压器的油样, 并使用相同的装置对油样进行分析, 同样的样本再由实验室 GC 进行分析。这可得到在处理实际情况时, 设备的测量能力。

3.2 实验结果及分析

3.2.1 标准气样测试

连接标准气样气瓶和光声光谱检测器，直接测量已知浓度的标准气样，测试结果如表 2 所示。

表 2 混合气体样本分析的结果

Table 2 Result of mixed gas sample analysis

气体	已知浓度/	光声光谱测量/PPM				偏差/
	PPM	测量 1	测量 2	测量 3	均值	
CO	5.0	5.1	4.7	4.9	4.9	-2
CO ₂	5.0	5.2	5.1	5.0	5.1	2
CH ₄	5.0	4.8	4.9	4.6	4.8	-4.67
C ₂ H ₄	5.0	5.1	5.0	5.1	5.1	1.33
C ₂ H ₆	5.0	4.6	4.9	4.7	4.7	-5.33
C ₂ H ₂	5.0	4.9	5.0	4.9	4.9	-1.33

从实验数据可以看出，光声光谱在测试低浓度气样时有较高的测量精度，与标准气样浓度的偏差均小于 10%。

3.2.2 标准油中气体样本

用已知浓度的标准气样配备如表 3 所示低、中、高三不同浓度的油样。

表 3 标准油样浓度

Table 3 Standard gas-in-oil sample

气体	低浓度/PPM	中浓度/PPM	高浓度/PPM
CO	17.9	50.4	264.1
CO ₂	577.1	995.8	3307
CH ₄	3.0	20.3	75.6
C ₂ H ₄	2.6	25.0	75.6
C ₂ H ₆	3.1	29.1	79.6
C ₂ H ₂	2.5	20.1	69.4

低浓度油样测试结果如表 4 所示。

表 4 低浓度的油中气体结果

Table 4 Low concentration gas-in-oil result

气体	已知	光声光谱测量/PPM					偏	重
	浓度/	测量	测量	测量	测量	测量		
	PPM	1	2	3	4	5	%	性
CO	17.9	17.8	17.9	17.9	20.5	19.7	4.7	6.8
CO ₂	577.1	557.8	551.9	537.8	581.6	570.4	-3	3.0
CH ₄	3.0	3.2	3.2	2.6	2.9	3.1	0.6	8.5
C ₂ H ₄	2.6	2.5	2.6	2.5	2.5	2.6	-0.8	2.2
C ₂ H ₆	3.1	2.8	3.1	3.1	3.0	3.1	-3.9	4.3
C ₂ H ₂	2.5	2.5	2.4	2.5	2.7	2.9	3.3	7.7

中浓度油样测试结果如表 5 所示。

表 5 中浓度的油中气体结果

Table 5 Medium concentration gas-in-oil result

气体	已知	光声光谱测量/PPM					偏	重
	浓度/	测量	测量	测量	测量	测量		
	PPM	1	2	3	4	5	%	性
CO	50.4	48.8	50.8	50.3	50.8	58.8	2.9	7.6
CO ₂	995.8	926.2	948.1	938.4	927.8	939.2	-6	1
CH ₄	20.3	21.6	22.4	22.3	22.2	22.1	9.1	1.4
C ₂ H ₄	25.0	23.3	24.6	24.2	24.2	24.6	-3.3	2.2
C ₂ H ₆	29.1	25.7	26.9	26.4	26.5	26.0	-9.7	1.8
C ₂ H ₂	20.1	19.4	20.4	20.4	20.8	20.7	1.4	2.7

高浓度油样测试结果如表 6 所示。

表 6 高浓度油中气体的结果

Table 6 High concentration gas-in-oil result

气体	已知	光声光谱测量/PPM					偏	重
	浓度/	测量	测量	测量	测量	测量		
	PPM	1	2	3	4	5	%	性
CO	264.1	273.2	276.0	289.5	284.1	288.4	6.9	2.6
CO ₂	3307	3082	3420	3568	3674	3616	5	6.8
CH ₄	75.6	69.9	81.4	84.3	88.2	86.6	8.6	8.9
C ₂ H ₄	75.6	69.3	74.9	77.8	80.8	79.3	1	5.9
C ₂ H ₆	79.6	72.8	77.6	80.7	84.2	82.1	-0.1	5.6
C ₂ H ₂	69.4	61.7	68.3	71.0	73.6	72.3	-0.1	6.8

总的来说，给定浓度下的测试结果的重复性是很好的，均小于 10%。所有含量的精度均在标准的 10% 误差范围内。

3.2.3 对运行中的变压器油对比测试

通过顶空脱气与光声光谱的检测和实验室振动脱气与气相色谱检测对采样于运行中的变压器的油的随机样本进行对比分析。使用不同技术对同一样本油进行的测试结果在表 7 和表 8 中。给出以 ppm 为标准偏差，以及所获读数的平均值百分比的标准偏差。

由于实际运行的变压器特别是新投运的变压器，油中气体含量都很低，在烃类气体浓度低于 2PPM 时，光声光谱与气相色谱的偏差均小于 0.5PPM，高于 2PPM 时偏差低于 10%。达到了 IEC 和国家相关标准的要求。

表7 取自现场变压器油中气体进行的分析

Table 7 Result of gas-in-oil samples from field transformer

气体	GC	光声光谱测量/PPM					误差	偏差/%
	测量/	测量	测量	测量	测量	测量		
	PPM	1	2	3	4	5		
CO	2.1	1.8	1.8	1.7	1.7	1.9	-0.2	-9.5
CO ₂	320.5	300.0	339.4	312.8	318.1	317.3	-3.2	-1.0
CH ₄	0.9	1.2	1.3	1.1	1.3	1.1	0.2	22.2
C ₂ H ₄	1.9	2.1	2.2	2.2	2.1	2.1	0.2	10.5
C ₂ H ₆	3.7	4.3	4.3	4.4	3.8	3.9	0.2	5.4
C ₂ H ₂	0.5	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7	0.2	40.0

表8 取自现场变压器油中气体进行的分析

Table 8 Result of gas-in-oil samples from field transformer

气体	GC	光声光谱测量/PPM					误差	偏差/%
	测量/	测量	测量	测量	测量	测量		
	PPM	1	2	3	4	5		
CO	125	128.9	128.1	130.3	129.9	126	3.6	2.9
CO ₂	721	715	708	714	714	711	-8.6	-1.2
CH ₄	6.5	7.1	6.7	6.6	7.2	6.7	0.4	5.5
C ₂ H ₄	0.94	1	1.2	1.1	1.1	1	0.1	15
C ₂ H ₆	1.34	1.5	1.8	1.6	1.2	1.7	0.2	16
C ₂ H ₂	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.7	0	3

4 结论

油浸式电气设备油中特征气体含量在线监测是保障设备可靠运行和延长其使用寿命的主要手段之一, 在分析目前主要技术的基础上, 研究分析了光声光谱技术应用于油浸式电气设备油中特征气体含量在线检测的技术优势, 根据油中溶解气体的光谱特性设计了基于动态顶空脱气和光声光谱检测结合的试验平台, 并对标准气样和标准油样进行了重复性和准确度的测试, 并采集实际运行的变压器中的油样, 与实验室的气相色谱仪进行了对比测试。结果都达到了电力系统油中溶解气体在线检测的要求。具有很好的推广价值。

参考文献

[1] 赵笑笑, 云玉新, 陈伟根. 变压器油中溶解气体的在线监测技术评述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 187-191.
ZHAO Xiaoxiao, YUN Yuxin, CHEN Weigen. Comment on on-line monitoring techniques for dissolved gas in transformer oil [J]. Power System Protection and Control,

2009, 37(23): 187-191.

- [2] 孙才新. 输变电设备状态在线监测与诊断技术现状和前景[J]. 中国电力, 2005, 38(2): 1-7.
SUN Caixin. Present situation and development of condition on-line monitoring and diagnosis technology for power transmission and transformation equipment[J]. Electric Power, 2005, 38(2): 1-7.
- [3] 许坤, 周建华, 茹秋实, 等. 变压器油中溶解气体在线监测技术发展展望[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 30-35.
XU Kun, ZHOU Jianhua, RU Qiushi, et al. Development and prospect of transformer oil dissolved gas on-line monitoring technology[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 30-35.
- [4] 张轶议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.
ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [5] 许惠君, 王宗耀, 苏浩益. 基于DGA的反馈云熵模型电力变压器故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 115-119.
XU Huijun, WANG Zongyao, SU Haoyi. Dissolved gas analysis based feedback cloud entropy model for power transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 115-119.
- [6] 栗然, 韩彪, 卢云, 等. 基于随机模糊理论的变压器经济寿命评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 9-16.
LI Ran, HAN Biao, LU Yun, et al. Transformer's economic life assessment based on random and fuzzy theory[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 9-16.
- [7] 司马莉萍, 舒乃秋, 左婧, 等. 基于灰关联和模糊支持向量机的变压器油中溶解气体浓度的预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 41-46.
SIMA Liping, SHU Naiqiu, ZUO Jing, et al. Concentration prediction of dissolved gases in transformer oil based on grey relational analysis and fuzzy support vector machines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 41-46.
- [8] 李中, 苑津莎, 张利伟. 基于自组织抗体网络的电力

- 变压器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 200-206.
- LI Zhong, YUAN Jinsha, ZHANG Liwei. Fault diagnosis for power transformer based on the self-organization antibody net[J]. Transactions China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 200-206.
- [9] 刘先勇, 周方洁, 胡劲松, 等. 光声光谱在油中气体分析中的应用前景[J]. 变压器, 2004, 41(7): 30-33.
- LIU Xianyong, ZHOU Fangjie, HU Jinsong, et al. Prospect to apply photoacoustic spectroscopy in dissolved gases in oil analysis[J]. Transformer, 2004, 41(7): 30-33.
- [10] 陈伟根, 云玉新, 潘翀, 等. 光声光谱技术应用于变压器油中溶解气体分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 94-98.
- CHEN Weigen, YUN Yuxin, PAN Chong, et al. Gas-in-oil analysis in transformers based on photoacoustic spectrometry[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 94-98.
- [11] 李洋流, 赵学增. 基于光声光谱的变压器油中溶解气体监测系统[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(6): 103-105.
- LI Yangliu, ZHAO Xuezheng. Monitoring system for dissolved gases in transformer oil based on photoacoustic spectroscopy[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(6): 103-105.
- [12] ROSENCWIG A. Photoacoustics and photoacoustic spectroscopy[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1980.
- [13] 云玉新, 陈伟根, 孙才新, 等. 变压器油中甲烷气体的光声光谱检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 40-46.
- YUN Yuxin, CHEN Weigen, SUN Caixin, et al. Photoacoustic detection of methane dissolved in transformer oil[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 40-46.
- [14] 陈伟根, 刘冰洁, 周恒逸, 等. 变压器油中溶解气体光声光谱检测的温度特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 15-20.
- CHEN Weigen, LIU Bingjie, ZHOU Hengyi, et al. The temperature characteristics of photoacoustic spectroscopy detection for dissolved gases in transformer oil[J]. Transactions China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 15-20.
- [15] ROTHMAN L S, GORDON I E, BARBE A, et al. The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2013, 130: 4-50.

收稿日期: 2014-06-24; 修回日期: 2014-08-30

作者简介:

毛知新(1972-), 男, 博士研究生, 主要从事电气设备智能在线监测技术研究; Email: mzx699@vip.sina.com

文劲宇(1970-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电能存储与电力安全等。

(编辑 张爱琴)