

变压器油中溶解气体的在线监测技术评述

赵笑笑¹, 云玉新^{1,2}, 陈伟根²

(1. 山东电力研究院, 山东 济南 250002; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400030)

摘要: 油中溶解气体在线监测是获取变压器运行状态的重要手段之一。该文在概括变压器油中溶解气体在线监测技术一般方法的基础上, 从油气分离和气体在线检测两个方面对其研究现状及工程应用进行了回顾。通过对多种油气分离技术的分析比较, 认为薄膜透气法具有良好的性价比, 更适合于变压器油中溶解气体在线监测。通过分析现有气体在线检测技术原理及特点, 阐述了色谱柱和气体传感器阵列技术的不足在于消耗气样、长期稳定性差、交叉敏感等; 对傅立叶红外光谱与光声光谱技术的比较表明, 光声光谱在气体检测量、检测灵敏度等方面更有优势, 其在油中溶解气体在线监测中具有良好的应用前景。

关键词: 变压器; 油中溶解气体; 在线监测; 气体分离; 气体检测

Comment on on-line monitoring techniques for dissolved gas in transformer oil

ZHAO Xiao-xiao¹, YUN Yu-xin^{1,2}, CHEN Wei-gen²

(1. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: On-line monitoring of dissolved gas in oil is one of effective methods of estimating the running states of transformers. This paper generalizes the conventional method of on-line monitoring of dissolved gas in transformer oil, and reviews the application and current situation of on-line monitoring techniques for dissolved gas in transformer oil in the aspects of oil-gas separation and on-line gas detection. By comparing several oil-gas separation techniques, permeable membranes are thought to be with high cost performance and be more fit for on-line monitoring of dissolved gas in transformer oil. By analyzing the principles and the characteristics of current on-line detection techniques of gas, the shortcomings of chromatographic columns and gas sensors are regarded as consuming gas, poor long-term stability, cross-sensitivity, et al. Compared with Fourier infrared spectrometry, photoacoustic spectrometry has some advantages such as small gas demand and high sensitivity, which makes it suit to be used in on-line monitoring of dissolved gas in transformer oil.

Key words: transformer; dissolved gas in transformer oil; on-line monitoring; gas separation; gas detection

中图分类号: TM406 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)23-0187-05

0 引言

油中溶解气体分析 DGA (Dissolved gas analysis) 因不受外界电场和磁场的影响, 且能够在无需停电的情况下进行, 已成为诊断油浸电力变压器早期故障及预防灾难性事故的最有效的方法之一^[1]。自预防性维修体制建立以来, 对变压器的油中溶解气体分析采用离线的色谱检测技术, 即定期从变压器运行现场采集油样后, 在实验室中使用气相色谱仪检测出油中溶解气体, 进而诊断变压器的故障类型, 但这种方式存在检测程序复杂、周期长等缺点, 其检测结果难以及时反映设备的当前工作状态。作为离线色谱检测技术的发展, 在线监测技术直接利用安装在运行变压器上的装置或设备对油中溶解气体进行检测与分析, 因而, 能够实时地获

取变压器的状态信息, 为设备的维修决策提供准确判据^[2,3]。

油中溶解气体的在线监测技术已经过了几十年的发展, 国内外许多公司推出了很多种在线监测装置^[4,5], 然而, 大多数的在线监测装置, 不管是检测的气体种类, 还是检测指标仍不能满足电力运行部门的需求。近年来, 一些新型的气体传感技术开始应用于油中溶解气体在线监测, 以期满足实际工程的需要^[6,7]。本文在概括在线监测技术一般方法的基础上, 从油气分离和气体在线检测两个方面对现有在线监测技术进行了综述, 分析了目前广泛应用的色谱柱技术和气体传感器阵列技术的不足, 并对新型气体红外检测技术——傅里叶红外光谱技术和光声光谱技术, 进行了比较。

1 在线监测的一般方法

油中溶解气体在线监测的一般方法如图 1 所示,即:变压器本体油经循环管路循环(或经传感器)进入脱气装置,油气分离后,根据气体检测单元的需要进行气体分离,处理后的气体由检测器检测并转换为与气体含量成正比的电信号,经模数转换后将气体的组分与浓度信息存储在终端计算机的存储单元内,供就地分析或远程调用。

虽然,油中溶解气体的在线监测仍以油中溶解气体为反映故障的特征量,但它是直接在变压器运行现场实现的在线智能化监测,这样,不仅可以及时掌握变压器的运行状况,发现和跟踪存在的潜伏性故障,而且,以它为基础的故障诊断技术也可以及时对故障自动进行诊断,提高了故障诊断的可靠性。另外,从变压器运行可靠性的重要性和变压器与油中溶解气体在线监测装置的价格比来看,采用在线监测技术,在经济上也有显著的优势。

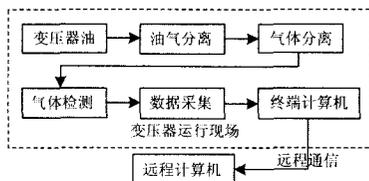


图 1 油中溶解气体在线监测的一般方法

Fig.1 General method for on-line monitoring of dissolved gas in transformer oil

2 在线监测技术的研究与应用现状

由图 1 所示的油中溶解气体在线监测一般方法可以看出,油中溶解气体在线监测的技术关键是油气分离和气体在线检测。

2.1 油气分离技术

迄今,国内外都不具有在变压器油中直接检测溶解气体的技术,无论油中溶解气体的离线检测还是在线监测,都必须首先将溶解气体从变压器油中脱出。变压器油中溶解气体在线监测装置常用的油气分离技术是薄膜透气法和抽真空取气法。

1) 薄膜透气法:该法基于气体的扩散原理,使用只渗透气体分子而不能渗透油的高分子膜,利用膜两侧(变压器油和气室)气体压力的不平衡性,使气体自动从油中向气室扩散而实现油气分离。目前,人们研究出的能够用于油气分离的渗透膜主要是高分子聚合物分离膜,有聚酰亚胺、聚六氟乙烯、聚四氟乙烯等^[8,9]。近来,清华大学研制出一种新型的利用高性能玻璃态高聚物构成的分离膜,该膜的渗透率很高,可以在 12 小时内实现 H₂ 等七种变压器

故障特征气体的油气分离^[10]。

2) 抽真空取气法:用于变压器油中溶解气体在线监测装置中的抽真空取气法主要有两种方式:波纹管法和真空泵脱气法^[11];前者利用小型电机带动波纹管反复压缩,多次抽真空而将油中溶解气体抽出来,其缺点是积存在波纹管空隙里的残油很难完全排出,将污染下一次检测时的油样;后者利用离线色谱分析中的抽真空脱气原理,用真空泵抽空气来抽取油中溶解气体,由于受现场条件的限制,目前利用该方法只能做到检测四种气体,而且真空泵的磨损使抽气效率降低,导致测试结果偏低。

3) 其他脱气方法:除上述方法外,用于在线监测装置的脱气方法还有空气循环法^[11]、毛细管柱法^[12]等。

由于各种油气分离技术所采用的脱气原理不同,所研制的脱气装置在平衡时间、复杂程度及造价等方面差异较大。表 1 对几种油气分离技术进行了对比,可作为油气分离系统设计的参考。

表 1 几种油气分离技术的对比

Tab.1 Comparison of several gas-oil separation techniques

油气分离技术	平衡时间	复杂程度	造价
薄膜透气	长	简单	低
波纹管	短	复杂	较高
真空泵	短	复杂	高
空气循环	短	复杂	较高
毛细管柱	短	简单	高

2.2 气体在线检测技术

根据气体检测组分的不同,油中溶解气体在线监测可分为单组分和多组分在线监测两大类。单组分气体在线监测主要检测 H₂、C₂H₂ 等某一特征气体或总的可燃气体含量。由于单组分气体在线监测可提供的气体组分信息有限,它只适合在现场做初步的故障分析;而多组分气体在线监测能够为变压器故障的在线诊断提供足够的气体组分浓度信息,是在线监测装置发展的方向。

1) 单组分气体在线监测

无论是变压器的热性故障还是电性故障,绝缘材料的劣化都会产生大量 H₂,因此,H₂ 成为单组分气体在线监测装置中检测较多的一种气体。早在 20 世纪 70 年代,加拿大 Syprotec 公司就研制出了基于电化学传感器的氢气在线检测仪,我国北京电子管厂也在 90 年代推出了基于钯栅场效应管的 BGY 型变压器氢气在线检测仪^[13]。由于 C₂H₂ 是区分过热和放电两种故障性质的重要标志,美国 GE

能源公司研制出用燃料电池型传感器检测 C_2H_2 的监测装置^[14]。此外, 日本三菱电力公司还研制了能够检测包括 H_2 、 CO 和各种气态烃类在内的总可燃气体含量(TCG)的在线监测装置。

2) 多组分气体在线监测

纵观目前国内外已开发出的多组分气体在线监测装置^[15~18], 大体上可把它们分为三类: 其一, 是用色谱柱分离气体后, 使用单一的广谱型传感器依次检测被分离出的气体; 其二, 是不分离气体, 应用具有对单一气体敏感的传感器组成传感器阵列来检测混合气体; 其三, 是不分离气体, 采用新型传感技术直接对油气分离后的气体进行检测。

对于第一类需要分离气体的在线监测装置可以上海交通大学研制的变压器在线监测系统为代表^[19]。该装置首先采用带微孔的聚四氟乙烯薄膜从油中脱出 CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 和 C_2H_6 六种气体, 然后由气体分离单元分离出各气体组分, 最后, 用广谱型气体传感器按气体分离出的先后顺序检测气体含量。该装置的气体分离单元由两根色谱柱组成, 采用的气体传感器为热线型半导体传感器。

对于第二类不需要分离气体, 使用气敏传感器阵列检测混合气体的在线监测装置可以重庆大学输电装备及系统安全与新技术国家重点实验室开发的在线监测装置为代表^[20]。该装置的油气分离采用自行设计的四氟乙烯-六氟乙烯混合膜(F46 膜)来完成, 可高效地从油中自动脱出 H_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_2 和 C_2H_6 六种气体。脱出的气体不需要经过色谱柱等气体分离装置的分离, 而是直接使用自行研制的MQ 系列气敏传感器形成的传感器阵列来检测。

现阶段, 应用于油中溶解气体在线监测中的新型传感技术主要是红外光学传感技术, 包括傅立叶红外光谱和光声光谱技术。利用傅立叶红外光谱技术检测气体的基本原理如图 2 所示, 该法基于光的干涉原理, 将待测气体置于迈克尔逊干涉光路中, 动镜移动时, 探测器上将得到强度不断变换的干涉波。分别对样品和背景的干涉图进行傅立叶变换, 并进行除法运算, 可以得到样品的透射光谱; 再将得到的透射光谱取对数即可获得样品的吸收光谱, 分析该光谱就可判断出样品的成分及含量。应用傅立叶红外光谱技术进行油中溶解气体在线监测的典型装置可以加拿大 Syprotec 公司的法拉第变压器在线监测与诊断系统(TNU)为代表。TNU 内部集成的快速傅立叶变换红外光谱仪根据不同气体在特定波长处的红外吸收量, 可以检测出 C_2H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 、 C_2H_6 、 CO 、 CO_2 和 H_2O 七种红外活性气体, 其中, 对 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 的检测灵敏度分别达到

1、20、3、 $1\mu L/L$, 由于 H_2 不具有红外活性, TNU 使用 HYDRAN 传感器对其检测^[21]。

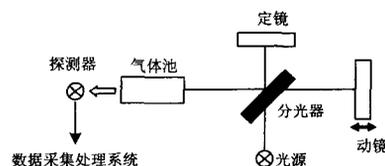


图2 傅立叶红外光谱技术检测气体的基本原理
Fig.2 Principle of gas detection by Fourier infrared spectrometry

光声光谱技术是基于光声效应来检测气体浓度的一种光谱技术, 其基本原理如图 3 所示。密闭于光声池中的气体分子吸收特定波长的电磁辐射后, 引起气体分子的无辐射弛豫过程, 由于光声池的体积一定, 如果对光源进行周期性调制, 那么将导致池中压力的周期性变化(即引起声波)。气体的光声光谱检测就是利用光吸收和声激发之间的对应关系, 通过对声信号的检测来了解气体对光的吸收过程。由于声波的频率与光源的调制频率相同, 而其强度则与吸收气体的浓度有关, 因此, 建立气体浓度与声波强度的定量关系, 就可以准确计量光声池中各气体成分的浓度。目前, 已获得现场应用的基于光声光谱技术的变压器油中溶解气体在线监测装置是英国 Kelman 公司的便携式及在线式变压器油中故障气体装置。该装置用宽带光源与对应于特定气体组分的窄带滤光片来获得激发气体光声效应的单色光源, 并用高灵敏度和长期稳定的电容型驻极微音器来检测光声信号。据报道, Kelman 公司的光声光谱在线式检测装置可检测出包括 H_2 在内的 7 种气体, 其中对 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 的检测灵敏度分别达到 6、1、 $0.8\mu L/L$ ^[22]。

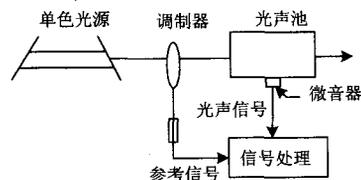


图3 光声光谱技术检测气体的基本原理

Fig.3 Principle of gas detection by photoacoustic spectrometry

3 现有油中溶解气体在线监测技术分析

目前, 我国电力部门广泛使用的油中溶解气体在线监测装置是第一类和第二类监测装置, 虽然它们一定程度上满足了电力系统对油中溶解气体在线监测的应用要求, 但仍然存在一些不足:

①大多数在线监测装置需要使用净化空气、 N_2 等做载气, 并且消耗脱出的油中溶解气体, 这一方

面增加了系统的复杂性, 另一方面使得检测只能间断进行, 且不能对同一气样进行反复检测, 无法减小检测器及检测环境所带来的测量误差。

②受检测器(如钨栅场效应管等)气敏特性的限制, 许多在线监测装置所能检测的故障特征气体种类不够齐全, 这必然影响到变压器故障诊断的准确率。

③很多在线监测装置所用的气体检测器为广谱型, 它们对所有气体组分均敏感, 因而需要使用色谱柱对待测气体进行分离后才能再检测, 而色谱进样的特性不仅延长了检测时间, 而且温度对色谱柱分离效果的影响以及色谱柱使用一段时间后需要清洗等固有特性也在一定程度上限制了色谱柱技术在现场在线监测中的应用。

④虽然部分在线监测装置不需要分离气体, 而是直接使用气体传感器阵列检测从油中脱出的溶解气体, 但由于存在气体传感器间的交叉敏感性, 尤其是对于性质相近的气体组分, 其交叉敏感程度较深, 这影响了气体检测的准确度。

⑤电化学传感器、催化燃烧传感器、热导检测器等气体检测器在长期使用中, 其性能会逐渐发生变化, 以至需要定期校准或更换, 这增加了在线监测装置的运行成本。

⑥受载气纯度、气体检测器的限制, 气体检测灵敏度及精度不够高。

由于红外检测技术具有非接触性检测特点, 将其用于油中溶解气体在线监测不需要消耗样气和载气, 也不需要分离气体, 检测准确度高、速度快, 具有重复性和再现性, 可实现免维护, 能够克服第一、二类在线监测技术的诸多不足, 近年来成为研究的热点。傅立叶红外光谱与光声光谱虽同为红外检测技术, 但两者用于在线监测时有较大不同。首先, 在光源的选择上, 傅里叶红外光谱技术采用宽带光源获取吸收气体的吸收光谱, 而光声光谱技术则使用窄带光源或单色光源激发吸收气体的光声效应; 其次, 在气池的体积上, 傅里叶红外光谱技术所用气池的最小体积在百毫升量级, 而光声光谱技术的气池体积则为几毫升^[23]; 再次, 所使用的检测设备不同, 傅里叶红外光谱技术使用红外探测器检测光强的变化, 而光声光谱技术则用微音器检测光声效应所激发出的声波强度。由傅里叶红外光谱技术和光声光谱技术的比较, 可以看出, 将光声光谱技术用于油中溶解气体在线监测更有优势, 这是由于: 气池的体积越小, 必然导致样气检测量的减少, 这就降低了油气分离的难度并缩短了气体的平衡时间; 为了获得足够的检测灵敏度, 傅立叶红外光谱技术必须在较强的气体特征吸收处进行检测, 这样,

在检测多组分气体时, 有时难以避免气体间的交叉吸收干扰, 而光声光谱在极弱的吸收处进行检测也能获得足够的灵敏度, 这就放宽了气体特征吸收谱线的选择范围, 能够降低甚至避免气体间的交叉吸收干扰; 由于红外探测器和微音器的检测原理不同, 前者是依靠对光子的检测和分析, 而后者根据直接测量物质与光束相互作用后所吸收的能量, 这样, 在弱吸收情况下, 很小的吸收能也能被高灵敏度的微音器检测出来, 这就突破了红外探测器对弱吸收光强变化不敏感的限制, 因而具有更高的检测灵敏度和稳定性。

4 结论

油中溶解气体在线监测的最终目标是快速、准确、实时地检测出运行变压器的油中气体成分与含量, 以便为变压器运行状态的在线评估及剩余寿命的在线预测提供可靠的数据支持。在线监测技术的关键是油气分离和气体的在线检测。从复杂程度、造价等方面考虑, 薄膜透气法能够较好地满足在线监测的应用要求, 因而其应用较多。目前, 广泛应用的气体在线检测技术是色谱柱和气体传感器阵列技术, 但它们存在长期稳定性欠佳、灵敏度不理想等不足, 近年来, 一些新型气体传感技术开始应用于油中溶解气体在线监测。光声光谱技术与傅里叶红外光谱技术作为非接触性的光学检测技术, 能够自然地克服传统在线监测技术的诸多缺点, 现推出的基于这两种技术的在线监测装置的多项检测指标也已超过了传统在线监测装置。从理论上讲, 光声光谱技术较傅里叶红外光谱技术在所需的样气检测量、检测灵敏度等方面更有优势, 可以预期, 基于光声光谱技术的在线监测装置有望成为理想的换代产品。

参考文献

- [1] 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 Diagnosis of Gases Dissolved in Transformer Oil[S].
- [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 Cai-xin. 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] 赵学民, 王鑫, 赵哲军, 等. 油中溶解气体在线色谱监测技术在变压器运行中的应用[J]. 华北电力技术, 2007, 10: 29-31.
ZHAO Xue-min, WANG Xin, ZHAO Zhe-jun, et al. Application of On-line Chromatograph Monitoring of Dissolved Gases in Oil on Transformer Operation[J]. North China Electric Power, 2007, 10: 29-31.

- [4] 张健壮, 南春雷, 韩金华. 变压器在线监测技术的现状及在我省的应用情况[J]. 河南电力, 2007, 4: 31-33.
ZHANG Jian-zhuang, NAN Chun-lei, HAN Jin-hua. The Status of Monitoring On-line Technology of Transformer in Henan Province[J]. Henan Electric Power, 2007, 4: 31-33.
- [5] 乐莉, 周方洁, 胡劲松, 等. 油中气体在线分析技术[J]. 变压器, 2003, 40(10): 41-45.
YUE Li, ZHOU Fang-jie, HU Jin-song, et al. Online Analysis Technique for Dissolved Gases in Oil[J]. Transformer, 2003, 40(10): 41-45.
- [6] LIU Xian-yong, ZHOU Fang-jie, HUANG Feng-lei. Research on On-line DGA Using FTIR Power Transformer Insulation Testing[A]. in: International Conference on Power System Technology Proceedings[C]. 2002.1875-1880.
- [7] LIU Xian-yong. Research on Photoacoustic Sensing of Transformer Fault Gases[A]. in: Proceedings of the SPIE- Advanced Materials and Devices for Sensing and Imaging II[C]. 2005, 5633: 356-362.
- [8] 贾瑞君. 高分子薄膜在变压器油中溶解气体在线监测中的应用[J]. 变压器, 2001, 38(10): 37-40.
JIA Rui-jun. Application of Polymer Film to On-line Monitoring of Dissolved Gases in Transformer Oil[J]. Transformer, 2001, 38(10): 37-40.
- [9] 杨荆林, 肖登明, 徐欣, 等. 变压器在线监测中油气分离高分子膜的研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(3): 38-40.
YANG Jing-lin, XIAO Deng-ming, XU Xin, et al. Study on Permeability of High Polymer Membranes for Gas-oil Separate of the Chromatography of the Transformer Incipient Faults[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(3): 38-40.
- [10] 李红雷, 张光福, 刘先勇, 等. 变压器在线监测用的新型油气分离膜[J]. 清华大学学报, 2005, 45(10): 1301-1304.
LI Hong-lei, ZHANG Guang-fu, LIU Xian-yong, et al. Oil-gas Separation Film Used for Transformer On-line Monitoring[J]. Journal of Tsinghua University(Science & Technology), 2005, 45(10): 1301-1304.
- [11] 贾瑞君. 关于变压器油中溶解气体在线监测的综述[J]. 电网技术, 1998, 22(5): 49-55.
JIA Rui-jun. Review about Gas Dissolved in Transformer Oil On-line Detection [J]. Power System Technology, 1998, 22(5): 49-55.
- [12] Ward B H, Lindgren S. A Survey of Developments in Insulation Monitoring of Power Transformers[A]. in: Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation[C]. Anaheim(USA): 2000. 141-147.
- [13] 贾瑞君. 变压器油中溶解氢气在线监测仪的研制[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 4-7.
JIA Rui-jun. Development of On-line Monitoring Device for Hydrogen Dissolved in Transformer Oil[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 4-7.
- [14] Michel Dual. New Techniques for Dissolved Gas-oil Analysis[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(2): 6-15.
- [15] Arakelian V G. The Long Way to the Automatic Chromatographic Analysis of Gases Dissolved in Insulating Oil[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004, 20(6): 8-25.
- [16] Zylka P. Electrochemical Gas Sensors Can Supplement Chromatography-based DGA[J]. Electrical Engineering, 2005, 87(3): 137-142.
- [17] 肖燕彩, 朱衡君, 张霄元, 等. 基于溶解气体分析的电力变压器在线监测与诊断技术[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(6): 93-96.
XIAO Yan-cai, ZHU Heng-jun, ZHANG Xiao-yuan, et al. On-line Monitoring and Diagnosis of Power Transformer Based on Dissolved Gas Analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(6): 93-96.
- [18] 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 Jian-hua, RU Qiu-shi, et al. Development and Prospect of Transformer Oil Dissolved Gas On-line Monitoring Technology[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 30-35.
- [19] 李红雷. 油浸电力设备色谱在线监测及诊断系统的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2000.
LI Hong-lei. Study of Chromatography On-line Monitoring and Fault Diagnosis System of Oil-immersed Power Equipment[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2000.
- [20] 陈伟根. 以油中多种气体为特征量的变压器绝缘在线监测及故障诊断技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
CHEN Wei-gen. Study on the Technology of the On-line Monitoring and Fault Diagnosis for Transformer Insulation Using the Character Value of Oil-dissolved Gases[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003.
- [21] Sparling B, Aubin J, Glodjo A. Field Experience with Multigas On-line Monitoring of Powertransformers[A]. in: IEEE Transmission and Distribution Conference[C]. 1999. 895-900.
- [22] 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.
ZHANG Chuan, WANG Fu. Application of Photoacoustic Spectroscopy Technology to Dissolved Gas Analysis in Oil of Oil-immersed Power Transformer [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 84-86.
- [23] 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 Xian-yong, ZHOU Fang-jie, HU Jin-song, et al. Prospect to Apply Photoacoustic Spectroscopy in Dissolved Gasses in Oil Analysis[J]. Transformer, 2004, 41(7): 30-33.

收稿日期: 2009-04-09; 修回日期: 2009-08-02

作者简介:

赵笑笑(1981-), 女, 硕士, 从事电力系统自动化相关研究, E-mail: laughnet@163.com;

云玉新(1979-), 男, 博士, 从事电气设备的在线监测与故障诊断技术等研究;

陈伟根(1967-), 男, 博士, 博士生导师, 长期从事高压与绝缘技术研究。