

基于激光光声光谱技术的变压器绝缘油故障气体在线监测系统研究

李红明¹, 谭其勇¹, 陈 战¹, 蒋亚超², 马 锋², 刘锡银²

(1. 广西电网有限责任公司北海供电局, 广西 北海 536006; 2. 武汉豪迈光电科技有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 研制基于半导体激光器光声光谱技术的变压器绝缘油故障气体在线监测系统, 替代传统的油色谱测量和传统的光声光谱油气测量装置。相比传统技术测量装置, 激光光声光谱变压器绝缘油故障气体在线监测系统具有使用寿命长、维护量低、测量无交叉干扰及重复性好等优点, 可在实际在线监测中提供更准确、及时的预警机制, 从而带来可观的经济效益。

关键词: 半导体激光器; 光声光谱; 变压器; 在线监测系统

Research on on-line monitoring system of transformer insulating oil fault gas based on laser photoacoustic spectroscopy

LI Hongming¹, TANQiyong¹, CHEN Zhan¹, JIANG Yachao², MA Feng², LIU Xiyin²

(1. China Southern Power Grid Guangxi Power Grid Beihai Power Supply Bureau, Beihai 536000, China; 2. Wuhan Haomai Photoelectric Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: An on-line monitoring system of transformer insulating oil fault gas based on the photoacoustic spectroscopy of semiconductor laser is developed, which can replace the traditional measuring device of oil spectrum and photoacoustic spectrum. Compared with the traditional measuring device, the on-line monitoring system of the transformer insulating oil fault gas of laser photoacoustic spectroscopy has the advantages of long service life, low maintenance, no cross interference and good repeatability in measurement. It can provide more accurate and timely warning mechanism in the actual online monitoring, and brings considerable economic benefits.

Key words: semiconductor laser; photoacoustic spectroscopy; transformer; on-line monitoring system

0 引言

变压器是变电站站内最为主要的设备之一, 特别是对于大容量的变压器而言, 其容量越大, 造价越高。其故障则会造成设备的损坏以及影响电网安全, 甚至造成严重的大范围停电风险事件。因此检测变压器的故障, 对其存

在的潜在故障进行诊断则显得尤为必要。充油式电力变压器主要采用油纸绝缘, 在放电和过热运行过程中, 油和纸将裂解, 产生 C_2H_2 、 CO 、 CO_2 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 和 C_2H_6 等气体, 这些气体部分溶解于油中。分析油中溶解气体的成分和比例, 可以判断变压器潜在性故障和类

型，并建立起一系列国际国内标准。因此，对于微弱的故障气体含量的检测具有重要的意义。

当前，检测变压器油中溶解气体含量比较成熟的是气相色谱法，它在变压器中应用很普遍，但其试验环节多，操作手续烦琐，检测周期长，不能及时快速地反映变压器的故障。目前，南方电网某公司所辖220 kV及以上变电站油浸式变压器及高抗依据油色谱检测周期要求，日常油色谱离线检测工作量较大。采用气相色谱法油色谱在线检测装置对运行设备进行跟踪与监测，在应用过程中暴露了不少问题：①检测准确度低，频繁出现误报警或漏报警；②更换载气频率高，维护量大，使用成本高。当前的油色谱在线检测装置非但未能及时反映变压器的真实健康状态，反而增加了检修人员对油色谱在线检测装置本身的维护与消缺工作。因此，研发一种新的变压器油气在线监测系统迫在眉睫。

针对此现象，又衍生出了光声光谱检测方案，此方案与气相色谱法相比，具有诸多优点：①非接触性测量、不消耗任何标准气体；②不需要分离气体，直接确定气体的成分和含量，检测速度快，可实现连续测量；③直接测量气体吸收光能大小，探测灵敏度高，气室体积小。国内已有大量文献开展了光声光谱变压器油中溶解气体在线监测技术的研究^[1-7]，但市面上见到的光声光谱油中气体检测设备多采用红外宽谱光源、窄带滤光片与机械斩光器的技术方案，在实际应用上因滤光带宽较宽，特征气体交叉干扰明显，而机械斩光带来的振动和机械损耗，会导致设备测试性能逐渐下降。

随着21世纪通信产业的飞速发展，近红外半导体激光器已逐步迈入小尺寸、高功率、稳定性可控、多品种、波长齐全和低成本的大规模应用时代。通信产业的大量应用为近红外半导体激光器带来了性能（输出功率达20~40 MW）和成本优势，使得光声光谱技术在许多气体吸收的泛频带（近红外NIR区域）具备了实现高灵敏度检测的能力。由于半导体激光器具有可

直接调制的特性，波长调制技术与锁相放大技术相结合，可以获得极高的检测准确度。因此，采用半导体激光器光源的光声光谱技术成为新时期提高气体检测灵敏度的新选择。

本文在光声光谱油气在线监测系统基础上，提出了采用半导体激光器代替红外宽谱光源，而故障气体只需选择对应特征谱线的半导体激光器即可，激光光源功率稳定，在通信领域应用广泛，也得到了可靠性验证，而激光直接电调制，系统可避免机械振动带来的损耗，超窄带光谱，能较好地避免气体交叉干扰。激光光声光谱技术作为气相色谱法和传统光声光谱法的技术升级，不仅无须更换载气，更具有准确度高、稳定性好的优点，可以进一步提高主变压器初期缺陷发现率，降低变压器的故障率，并减少运维成本，从而提高变压器等主设备的安全运行水平，实现电网运行的提质增效。

1 国内外光声光谱气体检测研究进展

1.1 国外研究进展

迄今，国外针对光声光谱应用于气体检测的研究已经有接近50年的历史，进行了多种气体（包括CO₂、CO、O₃、O₂、NO、CH₄、C₂H₄、C₂H₂和C₂H₆等）的研究，其研究方向主要包括光声气体池的设计（目前包括Helmholtz型、一维光声池和最近的MEMS光声池等）、光声压力检测方法（包括传统的传声器和最新的MEMS悬臂梁和石英音叉传感器）以及激光光源（近红外半导体激光器、光纤激光器和量子级联激光器）的研究。

2005年，英国Kelman公司推出了基于光声光谱的变压器油中气体检测分析仪，它可以检测油中溶解七种特征气体且均具有较宽的检测范围，就灵敏度和可检测范围而言，其指标优于现有的大多数色谱检测仪。目前该设备在国内一些电力部门得到初步使用，但由于其采取一台宽谱热光源与多个窄带滤光片结合，得到特征光进而进行检测的，经窄带滤光片处理后的光谱线宽还是存在抗干扰、稳定性以及多

组分气体交叉影响等问题,且对于具体的单一油中溶解气体的光声光谱检测特性没有深入的研究,变压器运行现场监测并不理想。

1.2 国内研究进展

国内虽然可见零星光声光谱检测气体的报道,但多为综述文章,实质性的研究工作寥寥,主要有20世纪八九十年代复旦大学对光声池的研究,和近期重庆大学以及大连理工大学对部分微量气体的监测。

实际应用的变压器油气检测上的设备则主要以Kelman公司技术路线为主,国内厂家通过合作或者购买模块再进一步开发的模式,将国外的光声光谱油气在线监测技术引入到国内应用,由于光源的选定方案无法避免交叉干扰等问题,同时由于机械斩波器带来的设备损伤,注定了设备的运行寿命。

南方电网公司管辖范围内安装的油气在线监测系统主要是油色谱在线监测装置和少部分的光声光谱油气在线监测设备,前者运行之初测量较准确,运行一年后则因载气消耗、色谱柱污染等问题需要维护,且测量准确度下降,而后面临巨大的维护费用;传统光声光谱油气在线监测系统因选取光源方案决定了各种故障气体之间测量干扰较大,尤其是浓度差异较大时,低浓度气体测不准。针对这些情况,南网公司相关人员也进行了一系列的调查,但目前尚无合适产品研发成功,故本文的目的在于通过研究激光光源与光声光谱技术相结合,开发出一套准确度高、无交叉干扰及无耗材的油气在线监测系统。

2 光声光谱多组分气体检测

由于篇幅所限,本文对于光声光谱气体检测技术原理不再赘述。

2.1 系统组成

本文采用近红外波段半导体可调谐激光器结合光纤放大器作为光源,光纤声波传感器作为探测光声信号的传声器,以及共振式光声池

作为检测场所的方案,结合斩波器强度调制与锁相放大微弱信号检测技术搭建光声光谱多组分气体检测系统。图1为光声光谱多组分气体检测系统。

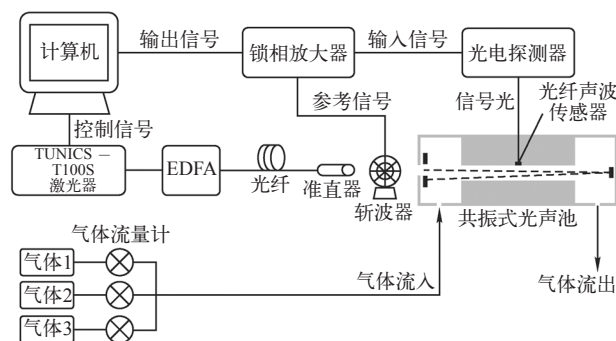


图1 光声光谱多组分气体检测系统

Fig. 1 A multi-component gas detection system based on photoacoustic spectroscopy

所采用的TUNICS-T100S型半导体激光器为发射波长、调制频率和输出功率可调的光纤耦合输出近红外半导体激光器,激光工作参数可通过控制面板设定,以达到选择本实验所要求的激光工作性能。其波长调谐范围达到190 nm (1 470~1 660 nm),绝对波长准确度为 ± 30 pm,分辨率达到1 pm,调谐速率达到100 nm/s。允许在整个宽谱范围内进行微调分析。该激光器提供专有的主动控制,可确保精确的无跳模操作以及在整个调谐范围内准确的波长扫描。下表为该激光器常用参数,其各项性能指标能够满足实验中对于激光光源的各项要求。

目前,常见的气体光声池包括微音器、气体接口、光学窗片和圆筒状池体。本文采用共振式光声池,其具有较高的工作频率和较强的共振效应,可以减小噪声比,实现动态测量。图2为共振式光声池纵剖面示意图。

考虑光声池的共振频率,设计一种高灵敏度的膜片式光纤EFPI声波传感器。具体参数:灵敏度为72 mV/Pa,信噪比为71 dB,频响波动幅度为 ± 0.75 dB,在1 600 Hz附近具有较平坦的频率响应。

此外,采用SR830数字锁相放大器,实现给斩波器以参考信号,并将特定频率的信号过

表 激光器常用参数
Tab. Common parameters of laser

性能	具体参数
波长范围/nm	1 470 ~ 1 660
波长分辨率/pm	1
绝对波长精度/pm	±30
最大输出光功率/MW	4
波长设置解析度/pm	1
调谐速率(典型值)/(nm/s)	100
光谱宽度	400 kHz (典型) (一致性控制 关闭); >100 MHz (一致性控制 开启)
光学接头	FC-APC
远程控制	R32C 和 IEEE 488.17
操作温度范围/℃	15 ~ 30
电源供电	100 ~ 240 V, 50 ~ 60 Hz
尺寸/mm×mm×mm	448×133×370

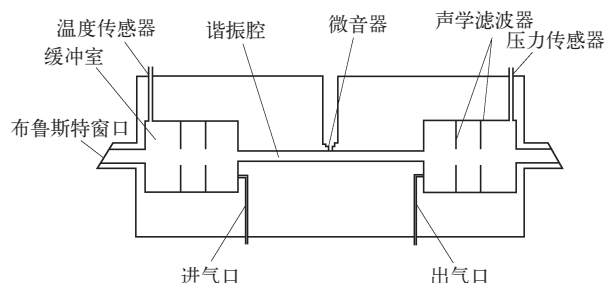


图2 共振式光声池纵剖面示意图

Fig. 2 Longitudinal section diagram of resonance photoacoustic pool

滤出来，最后输出至计算机进行系列运算。

该检测系统具备众多优点，其中主要有响应度高，造价不高，对气体甄别性强。该系统可用于微量气体检测。

3 主要技术和经济指标

3.1 技术指标

本文研究的技术先进性主要有三个，即高准确度、快速检测和低维护成本。

1) 高准确度。通过所提出的激光光声光谱气体检测实验与分析，可实现 C_2H_2 浓度测量灵敏度为0.1 ppm， CH_4 、 C_2H_4 和 C_2H_6 浓度测量

灵敏度为0.5 ppm， CO 、 CO_2 溶度测量灵敏度为20 ppm， N_2 溶度测量灵敏度为5 ppm，且气体之间无交叉干扰。

2) 快速检测。真空脱气过程缩短到60 min，一次检测只需5~10 min，系统能达到2 h一次的检测频率。

3) 低维护成本。除开油路、气路所必须的泵外，无其他机械部分，延长系统寿命；整个检测部分与被检测气体无化学反应，无新组分产生，使得系统检测结果能长时间保持高稳定性，无须频繁的校准零点；整个检测部分无须耗材，降低维护工作强度，节省维护费用。

3.2 经济指标

对加强供电等单位的安全生产管理、减轻作业人员劳动强度以及压缩故障延时具有积极意义，对保障电力输送安全畅通作用明显，并将产生良好的社会效益。

1) 该系统对变电站工作人员实时提供变压器真实可靠的运行状态信息，对电力安全起重要的预警作用，具有明显的社会效益。

2) 该系统有全自动化、智能化特点，有利于提高劳动生产率，对用户单位可以节约生产维护成本。

4 结束语

本文在光声光谱油气在线监测系统基础上，提出了采用半导体激光器代替红外宽谱光源，而故障气体只需选择对应特征谱线的半导体激光器即可，激光光源功率稳定，在通信领域应用广泛，也得到了可靠性验证，而激光直接电调制，系统可避免机械振动带来的损耗，超窄带光谱，能较好地避免气体交叉干扰。激光光声光谱技术作为气相色谱法和传统光声光谱法的技术升级，不仅无须更换载气，更具有准确度高、稳定性好的优点，可以进一步提高主变压器初期缺陷发现率，降低变压器的故障率，并减少运维成本，从而提高变压器等主设备的

(下转第96页)

参考文献

- [1] 余小燕, 罗逸敏. 几种常见的线损异常案例分析及管理措施[J]. 中国电业(技术版), 2014(11): 180-182.
- [2] 王海云, 张岩, 闫富荣, 等. 基于深度神经网络的低压台区线损异常识别方法[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(6): 31-35.
- [3] 姜惠兰, 安敏, 刘晓津, 等. 基于动态聚类算法径向基函数网络的配电网线损计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 35-39.
- [4] 郑惠哲. 基于电能量数据分析的线损异常排查方法[J]. 科技技术创新, 2019(22): 144-146.
- [5] 陈洪涛, 蔡慧, 李熊, 等. 基于K-means聚类算法的低压台区线损异常辨别方法[J]. 南方电网技术, 2019, 12(2): 2-6.
- [6] 李植鹏, 侯惠勇, 蒋嗣凡, 等. 基于人工神经网络的线损计算及窃电分析[J]. 南方电网技术, 2019, 12(2): 7-12.
- [7] 邓威, 刘俐, 李勇, 等. 基于GCA和LSTM神经网络的配电网线损预测[J]. 广东电力, 2019, 32(9): 154-159.
- [8] 张义涛, 王泽忠, 刘丽平, 等. 基于灰色关联分析和改进神经网络的10 kV配电网线损预测[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1404-1410.
- [9] 辛永, 黄文思, 陆鑫, 等. 基于深度学习LSTM的线损预测技术研究与应用[J]. 测量与检测技术, 2019, 41(4): 104-106.
- [10] 徐浩, 王钢, 汪隆君. 基于深度学习的暂态电压稳定在线识别[J]. 电气自动化, 2019, 41(1): 41-43, 67.
- [11] 李大中, 刘家瑞, 张华英. 基于深度全连接神经网络的风机叶片结冰预测方法[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(4): 39-44.
- [12] 韩伟, 吴艳兰, 任福. 基于全连接和LSTM神经网络的空气污染物预测[J]. 地理信息世界, 2018, 25(3): 34-40.
- [13] 张慧. 深度学习中优化算法的研究与改进[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.

作者简介



李清涛

李清涛(1978—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划管理。

(收稿日期: 2019-09-13) **EA**

(上接第78页)

安全运行水平, 实现电网运行的提质增效。

参考文献

- [1] 王倩. 光声光谱技术在变压器在线监测与故障诊断中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [2] 查申龙. 变压器故障气体宽带光声光谱技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [3] 俞洲. 基于光声光谱技术的变压器油中溶解气体分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [4] 王然. 变压器油溶解气的激光光声光谱分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [5] 史明坤. 变压器油中溶解气体在线监测的光声光谱法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [6] 杨志远. 光声光谱技术检测微量气体浓度研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [7] 操敦奎. 变压器油中气体分析诊断与故障检查[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

作者简介



李红明

李红明(1987—), 男, 工程师, 主要研究方向为电力设备电气试验、电气设备油气分析及在线监测以及电气设备绝缘技术等。

(收稿日期: 2019-07-20) **EA**