

中国测试 China Measurement & Test ISSN 1674-5124,CN 51-1714/TB

《中国测试》网络首发论文

 题目:
 基于激光吸收光谱的痕量乙炔检测方法

 作者:
 李橙橙,曹旺,万元,温和

 网络首发日期:
 2024-01-05

 引用格式:
 李橙橙,曹旺,万元,温和.基于激光吸收光谱的痕量乙炔检测方法[J/OL].中 国测试.https://link.cnki.net/urlid/51.1714.TB.20240104.1614.002



www.cnki.net

网络首发:在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国 学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。

基于激光吸收光谱的痕量乙炔检测方法

李橙橙 1,2,3, 曹 旺 1,2, 万 元 1,2, 温 和 3

(1.湖南五凌电力科技有限公司,湖南 长沙 410000; 2.国家电力投资集团水电产业创新中心,湖南 长沙 410000; 3.湖南大
 学,湖南 长沙 410000)

摘要: 针对现有的正交型锁相放大器在可调谐激光二极管吸收光谱吸收信号中存在检测下限差、稳定性差等问题,该文提出基 于插值离散傅里叶变换的相位测量与数字锁相放大器的光谱吸收信号检测方法,可实现低浓度气体的高精度检测。为验证该方 法的有效性,该文选择 1532.8nm 作为检测中心波长,设计适用于变压器绝缘油中溶解乙炔气体检测的可调谐激光二极管吸收 光谱系统。结果表明,当测量 2μL/L 乙炔气体时,本文提出方法比传统正交型锁相放大器测量准确性提高了 26.76%。本文测 量结果也比传统方法更稳定,且计算量更小。此外,该文设计系统实现变压器绝缘油中溶解乙炔检测时,0.22μL/L 以上乙炔浓 度的测量误差小于 30%,0.12μL/L 乙炔浓度的测量偏差小于±0.5μL/L,满足电力变压器油中溶解乙炔的检测需求。

关键词:可调谐半导体激光吸收光谱;谐波检测;数字锁相放大器;插值离散傅里叶变换

中图分类号: TM41; O657.7

Detection of low-concentration acetylene based on tunable diode laser absorption

LI Chengcheng^{1,2,3}, CAO Wang^{1,2}, WAN Yuan^{1,2}, WEN He³

(1. Hunan Wuling Power Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China; 2. Hydropower Industry Innovation Center, State Power Investment Co., Ltd., Changsha 410000, China; 3. Hunan University, Changsha 410000,

China)

Abstract: The traditional orthogonal lock-in amplifier performs the limited detection accuracy and poor stability. In order to improve the measuring accuracy of low concentration gases, the lock-in amplifier combined with DFT-based phase detection is proposed to obtain the detection of the absorption signal based on TDLAS. Moreover, the 1532.8nm laser in the near infrared wavelength range is selected to correspond to the absorption peak of acetylene, while using the proposed method to develop the tunable diode laser absorption spectrum system. According to the results, the proposed method is improved by 26.27% compared with the traditional method when measuring the acetylene gas with a standard concentration of $2\mu L/L$, and the measurement results are more stable than those of the traditional method. Besides, when the system is used to detect dissolved acetylene in transform insulting oil, the relative errors of acetylene concentration above $0.22\mu L/L$ is less than 30%, and the deviation of $0.12\mu L/L$ is less than $\pm 0.5\mu L/L$, which meet the needs of oil-dissolved acetylene detection in transformer.

Keywords: tunable diode laser absorption spectroscopy; harmonic detection; digital lock-in amplifier; interpolated digital Fourier transform

0 引言

变压器绝缘油中溶解气体分析是判断变压器早 期潜伏性故障最有效的方法之一^[1-2]。现有的电化学 传感器和气相色谱法测量变压器油中溶解气体时需 要消耗载气、标定等不足^[3]。特别是目前应用非常广 泛的气相色谱法,需在变压器外壳附近取油样,进 行油气分离后再开展气体检测,气体从故障点溶解 到取样点耗时长达数小时甚至数十小时,会影响测 量准确性^[4]。因此亟需一种测量精度高、检测速度快、 灵敏度高的变压器绝缘油中溶解气体检测方法。

近年来,可调谐激光二极管吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)技术具 有稳定性好,不需消耗载气,灵敏度高以及可实现 多组分气体测量等优点,被广泛应用于痕量气体检 测、环境监测等领域^[5-6],近几年也逐渐引入到变压 器绝缘油中溶解气体检测中^[7]。

项目基金:国家自然科学基金(61771190);国家电力投资集团科技项目(WLKY-C-2022-SD36) 作者简介:李橙橙(1992-),女,湖南岳阳市人,工程师,博士,主要从事电气设备在线监测、数字信号处理等。

变压器绝缘油中溶解气体的体积分数常为微量 级,TDLAS光谱信号经光电探测器后的电信号通常 是毫伏级,甚至更低。同时,变压器运行现场的环 境干扰、电路噪声等因素使得与气体浓度相关的信 号不可避免的夹杂有强噪声,导致系统对痕量气体 的检测精度不高,从而缺乏对变压器早期故障的感 知^[8-10]。现有研究大多针对基于TDLAS的气体浓度 检测系统设计及方案优化,对于低浓度气体下的弱 信号降噪、提高检测准确性和稳定性的研究较少。 文献[11]设计了一种正交型模拟锁相放大器实现二 次谐波信号检测,有效简化系统结构,但存在稳定 性差,不如数字锁相放大器灵活等不足。文献[12] 采用正交型锁相放大器实现光电探测器信号的谐波 提取,将二次谐波除以一次谐波的波形峰值点实现 气体浓度反演,但正交型锁相放大器在低浓度气体 检测精度方面存在局限性。文献[13]采用经验模态分 解 (empirical mode decomposition, EMD) 结 合 Savitzky-Golay滤波(Filter)用于TDLAS气体吸收线二 次谐波信号去噪,可以提高气体检测下限,但算法 计算量大,从而降低检测实时性。

为提高低浓度气体的检测下限,本文提出基于插 值离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)的相位测量结合数字锁相放大器用于激光吸 收光谱的谐波信号检测方法。该方法采用插值DFT 算法实现光谱吸收信号二次谐波相位测量的基础 上,应用设计的数字锁相放大器实现谐波检测。仿 真和实验结果表明,所提出的方法可以提高测量准 确性和稳定性。

1 理论分析

1.1 TDLAS 检测原理

根据比尔-朗伯定律,特定频率的激光束进入待 测气体前后的光强变化可以表示为

$$I_{t}(v) = I_{0}(v) \exp\left[-\alpha(v)cL\right]$$
(1)

式中, *I*₀(*v*)为入射光强, *I*₁(*v*)为经过待测气体后的接 收端的光强, *a*(*v*)为在频率 *v* 处,单位浓度,单位长 度下待测气体对光的吸收系数, *L* 为激光反射路径的 长度, *c* 表示待测气体的浓度。

为提高 TDLAS 检测过程的抗干扰能力,波长调制技术和谐波检测技术得到广泛应用。波长调制技术是在激光器扫描信号(频率为 \bar{v})上叠加一个频率为f的高频正弦调制信号,由此激光器的瞬时频率 v(t)可以表示为

$$v(t) = \overline{v} + a\cos(2\pi f t) \tag{2}$$

式中, *a* 为调制幅度。当 *a* 足够小时, 波长调制过程中的入射光光强可视为不变, 均为 *I*₀, 则公式(1)可进一步表示为

$$I_{t}\left[\nu(t)\right] = I_{0} \exp\left\{-\alpha\left[\overline{\nu} + a\cos\left(2\pi ft\right)\right]cL\right\}$$
$$= I_{0}cL\sum_{n=0}^{+\infty}H_{n}\left(\overline{\nu}\right)\cos\left(2\pi ft\right)$$
(3)

式中, *H_n*(*v*)表示气体吸收系数经过波长调制后的傅里叶系数。

谐波检测技术通过将波长调制后的信号输入至 锁相放大器中,并将倍频信号作为参考信号进行解 调,可得各次谐波分量。

1.2 锁相放大器原理

锁相放大器是基于相关检测原理,即参考信号 与待测信号中噪声无关,只与有效信号相关,从而 实现信号检测。设含有噪声的待测信号如下式所 示:

$$\kappa(t) = \sum_{h=1}^{H_1} A_h \sin\left(2\pi h f_1 t + \varphi_h\right) + \sigma(t)$$
(4)

式中, A_h 、 hf_1 、 φ_h 分别表示待测信号第 h 次谐波的 幅值、频率和相位, f_1 为基波频率也即信号的调制 频率, H_1 为谐波的最大次数, $\sigma(t)$ 为噪声。

常用的正交型锁相放大器采用两路正交信号, 如正弦和余弦信号。应用幅值为1,相位为0,频率 2f1的正弦、余弦信号分别与待测信号相乘后,根据 三角函数性质化简后分别得到x_s(t)、x_e(t),可表示为

$$\begin{cases} x_{s}(t) = \frac{1}{2}A_{2}\cos\varphi_{2} + \sigma_{1}(t) \\ x_{c}(t) = \frac{1}{2}A_{2}\sin\varphi_{2} + \sigma_{2}(t) \end{cases}$$
(5)

式中, A₂、 φ₂ 表示二次谐波信号幅值、相位; σ₁(*t*)、σ₂(*t*)分别表示交流分量、噪声等。将上式所 述信号通过低通滤波器后滤除交流分量、噪声后, 可得二次谐波的幅值和相位,如下所示

$$A_2 = 2\sqrt{x_s^2 + x_c^2}$$
 (6)

$$\varphi_2 = \arctan\left(-x_c/x_s\right) \tag{7}$$

传统的锁相放大器通过正交法将待测信号分解 到两个正交信号上,从而避免相位对检测精度的影 响。相较于单通道的锁相放大器,该方法的计算量 更大,对资源占用比较高。此外,正交法通过算数 平方根计算幅值,会降低检测下限。

1.3 基于插值 DFT 的相位测量

应用采样频率 f_s 对公式(4)所示的待测信号进行 离散采样后,通过低通滤波器滤除部分高频干扰后 可得

$$x(n) = \sum_{h=1}^{H_2} A_h \sin(2\pi h f_1 n / f_s + \varphi_h) + \sigma(n)$$
 (8)

式中, 2<*H*₂<*H*₁, *H*₂与低通滤波器系数有关。*n*=0, 1, ..., *N*-1, *N* 为数据长度。Hanning 窗的时域离散 表达式 *w*(*n*)可表示为

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right) \tag{9}$$

应用 Hanning 窗对公式(8)所示的待测信号进行 加权截断,得到

$$x_w(n) = x(n)w(n) \tag{10}$$

信号 xw(n)的离散傅里叶变换可表示为

$$X_{w}(k) = \sum_{h=1}^{H_{2}} \frac{A_{h}}{2j} \Big[W(k-k_{h}) e^{j\phi_{h}} - W(k+k_{h}) e^{-j\phi_{h}} \Big] (11)$$

式中, W(•)表示 Hanning 窗的 DFT 表达式, k=0,1,..., N-1, k_h=hf₁N/f_s 为频率 hf₁ 对应谱线在离散频谱中的 位置。进一步忽略公式(11)中的负频影响可得

$$X_{w}(k) = \sum_{h=1}^{H_{2}} \frac{A_{h}}{2j} \left[W(k-k_{h}) e^{j\phi_{h}} \right]$$
(12)

当 N>>1 时, W(•)可近似为

$$W(k) = \frac{N\sin(\pi k)}{2\pi k (1-k^2)} e^{-j\pi \frac{N-1}{N}k}$$
(13)

由于待测信号的非整周期截断导致栅栏效应, 使得信号的频率 h_1 很难恰好位于离散频谱上,即 k_h 一般不为整数,设在峰值频点 k_h 附近幅值最大谱线 为 k_m ,其左边谱线为 k_m -1,右边谱线为 k_m +1,令 $\delta_{h=k_h-k_m}$,则-0.5< δ_h <0.5,记二谱线比值 η 满足

$$\eta = \begin{cases} |X_{w}(k_{m})| / |X_{w}(k_{m}-1)|, \exists |X_{w}(k_{m}-1)| \ge |X_{w}(k_{m}+1)| \\ |X_{w}(k_{m}+1)| / |X_{w}(k_{m})|, \exists |X_{w}(k_{m}-1)| < |X_{w}(k_{m}+1)| \end{cases}$$
(14)

$$\delta_{h} = \begin{cases} \frac{(2-1)\eta - 2}{\eta + 1}, \exists |X_{w}(k_{m} - 1)| \geq |X_{w}(k_{m} + 1)| \\ \frac{2\eta - 2 + 1}{\eta + 1}, \exists |X_{w}(k_{m} - 1)| < |X_{w}(k_{m} + 1)| \\ \text{根据公式(12), 从而求得相位为} \end{cases}$$
(16)

$$\varphi_{h} = phase\left[X_{w}\left(k_{m}\right)\right] + \pi/2 - phase\left[W\left(\delta_{h}\right)\right] \quad (17)$$

其中, *phase*[•]表示取相位。结合式(16),式(17)可近 似为

$$\varphi_{h} = phase \left[X_{w} \left(k_{m} \right) \right] + \pi/2 - \delta_{h} \pi$$
(18)

将式(16)所示的 δ_h 代入式(18),可实现谐波相位求解。

1.4 基于插值 DFT 相位测量的锁相放大器设计

基于插值 DFT 相位测量的锁相放大器设计结构 图如图 1 所示。对于 TDLAS 检测系统输出的气体光 谱吸收信号,即图 1 中待测信号,经过低通滤波器 后滤除部分高频干扰后,应用基于插值 DFT 算法计 算其二次谐波相位,生成幅值为 1,与二次谐波同频 率、同相位的参考信号。最后,将参考信号与滤波 后信号在乘法器中实现待测谐波的解调。



图 1 基于插值 DFT 的相位测量的锁相放大器设计

乘法器输出信号中还包括其他频率成分、噪声 等干扰信号,需通过低通滤波器进一步滤除干扰信 号。当待测信号的采样频率较高时,如果直接设计 窄带低通滤波器,会导致滤波器阶数高、不稳定, 从而影响锁相放大器性能。因此,本文采用"积分梳 状滤波器+低通滤波器"的结构代替传统锁相放大器 中仅采用低通滤波器 (如文献[12])的方案。其中, 积分梳状滤波器用于降低系统采样频率,其 n 时刻 的输入 s(n)与输出 v(n)可表示为

$$\begin{cases} y(n) = s(n) * h(n) = \sum_{m=0}^{N_1 - 1} s(n - m) h(m) = \sum_{m=0}^{N_1 - 1} s(n - m) \\ y(n + 1) = \sum_{m=0}^{N_1 - 1} s(n + 1 - m) = y(n) + s(n + 1) - s(n + 1 - N_1) \end{cases}$$
(19)

其中,*表示卷积,N₁为抽样倍数,即积分长度。h(n) 为积分梳状滤波器的冲激响应函数,可表示为

$$h(n) = \begin{cases} 1 & 0 \le n \le N_1 - 1 \\ 0 & n < 0 \not\equiv \notn > N_1 \end{cases}$$
(20)

根据公式(19)所示,仅采用加法运算即可实现积 分梳状滤波器,计算量较小,适于工程应用。

对积分梳妆滤波器降采样后的信号,通过有限 脉冲响应低通滤波器滤除干扰信号,从而获得二次 谐波信号。以采样频率为 1MHz 为例,若对解调信 号直接采用低通滤波器(如文献[12]),根据 MATLAB 的 Filter Designer 工具,对于通带频率为 1Hz,阻带频率为 200Hz 低通滤波器的阶数会高达 13649,阶数高会导致滤波器计算量大、不稳定,难 实现工程应用。若采用本文提出的"积分梳状滤波器 +有限脉冲响应低通滤波器"的结构,对解调信号通 过积分长度为 250 的积分梳妆滤波器将频率降为 4000Hz 后,设计相同参数的有限脉冲响应低通滤波 器,其阶数仅为 55。因此,采用"积分梳状滤波器+ 有限脉冲响应低通滤波器"代替仅采用有限脉冲响应 低通滤波器可以有效减少计算量,提高锁相放大器 的稳定性。

2 系统设计

变压器绝缘油中溶解乙炔(C₂H₂)气体的含量可 以反映变压器的放电和过热故障,因此,本文以变 压器油中重要特征气体 C₂H₂为代表,设计基于 TDLAS 的 C₂H₂检测系统结构如图 2 所示。



图 2 基于 TDLAS 的 C2H2 检测系统

本文设计的基于 TDLAS 的乙炔气体检测系统 采用模块化结构设计,以ARM+FPGA 为核心,DFB 半导体激光器采用中心波长为 1532nm 的激光器。气 室采用光程为 10米的气体吸收池,AD采用 AD7403, 系统采样频率为 1MHz。FPGA 完成激光器驱动电流 信号的产生以及锁相放大器功能实现。其中激光器 的工作温度设置为 17℃,电流驱动为 10kHz 的正弦 和 10Hz 的锯齿波的复合信号。激光器在温控电路、 驱动电流的作用下产生中心波长为 1532.8nm 的激光 束,激光经过气室被乙炔气体吸收后,经过光电探 测器后可转换为与气体浓度相关的电信号,经放大 后进入 FPGA 的锁相放大器模块完成谐波检测与特 征值计算。其中,锁相放大器模块采用 1.4 节所述的 基于插值 DFT 相位测量的锁相放大器。在拟合函数 的基础上,完成浓度计算。

3 实验结果与分析

本部分通过设计不同实验验证本文提出的锁相 放大器在 TDLAS 检测系统中的有效性与准确性。

3.1 气体标定实验

气体标定实验中采用流量计控制气体流量,配 比了体积分数为 2~100μL/L 的 C₂H₂ 气体,平衡气体 采用氮气。基于 TDLAS 的 C₂H₂ 检测系统得到二次 谐波波形如图 3 所示。将二次谐波吸收峰的波峰、 波谷的差值作为特征值,不同气体体积分数下的特 征值与体积分数之间的拟合结果如图 4 所示,其中 线性拟合的 R² 值高于 0.999,表明特征值与乙炔气体 浓度之间具有非常好的线性关系。根据图 4 的数据, 基于最小二乘拟合方法可以获得气体浓度 (y₁) 与浓 度特征值 (x₁) 的函数,如式(21)所示



图 4 二次谐波特征值与乙炔浓度关系

3.2 测量稳定性实验

为验证文中提出基于插值 DFT 锁相放大器的测量稳定性,现提供本文所设计锁相放大器与文献[12] 所述正交型锁相放大器的测量结果进行对比。由于 文献[12]中对解调后的结果仅采用低通滤波器,且未 给出锁相放大器中低通滤波器的具体参数。为了对 比不同相位计算方法对锁相放大器测量结果的影 响,本部分设置两种锁相放大器均采用积分梳妆滤 波器和有限脉冲响应低通滤波器完成干扰信号滤 除,且滤波器参数一致,即积分长度为 250 的积分 梳妆滤波器,低通滤波器的通带频率为 1Hz,阻带频 率为 200Hz。此外,为确保实验中两种锁相放大器分 析的信号一致,将第 2 节设计系统中 AD 采集的信号 通过网口传输至 PC 端。通过 PC 端 MATLAB 实现 两种锁相放大器,对 AD 采集的信号进行解调分析。 根据解调的二次谐波得到浓度特征值,基于公式(21) 实现浓度计算。正交型锁相放大器采用 3.1 节类似方 法完成拟合,在拟合函数的基础上实现浓度计算。

测试过程中,每隔半个小时测量 5 组 2μL/L 的 浓度值,取 5 次浓度值的平均值作为该次测量结果。 不同锁相放大器的测量结果如图 5 所示。



图 5 系统测量稳定性分析

如图5所示,正交型锁相放大器的最大测量值、 最小测量值分别为1.9和1.55,33组数据标准差为 0.101;基于插值DFT锁相放大器的最大测量值、最 小测量值分别为2和1.9,33组数据标准差为0.03。由 于所分析的待测信号一致,两种锁相放大器测量数 据的变化趋势相同,但本文提出的基于插值DFT锁相 放大器测量结果更为稳定。

3.3 测量准确性实验

为对比本文设计的锁相放大器与正交型锁相放 大器的测量准确性,采用 3.2 节中的实验方法。对于 不同浓度 C₂H₂ 气体的吸收信号,两种锁相放大器的 测量结果如表 1 所示。

根据表 1 中测量结果,基于插值 DFT 的锁相放 大器在大部分浓度,特别是低浓度下的测量相对误 差略小于正交法。当测量 2μL/L 乙炔时,本文提出 方法比传统正交型锁相放大器测量准确性提高了 26.76%,验证了本文方法的测量准确性。

表1 不同锁相放大器方法下测量相对误差						
气体浓度 (μL/L)	基于插值 DFT 的锁 相放大器		正交型锁相放大器			
	测量值 (µL/L)	测量相 对误差 (%)	测量值 (µL/L)	测量 相对 误差 (%)		
2	1.93	3.74	1.39	30.5		
4	4.08	2.12	4.19	4.66		
6	6.01	0.10	6.06	1.01		
8	8.11	1.40	8.18	2.24		
10	10.16	1.59	10.23	2.29		
20	19.93	0.36	20.08	0.39		
40	39.12	2.20	39.03	2.43		
60	60.42	0.70	60.18	0.30		
80	80.89	1.12	80.61	0.76		
100	99.35	0.65	99.06	0.94		

3.4 油中溶解气体测试实验

本部分旨在研究本文系统在变压器绝缘油中溶 解乙炔气体检测的准确性。由于变压器故障所产生 的气体一经产生后会溶解于绝缘油中,在对气体浓 度分析之前需要将气体从绝缘油中脱出,即油气分 离。因此,在测试之前,通过动态顶空法加热、搅 拌绝缘油,使得绝缘油中气体析出,并达到气相、 液相分配的平衡状态,然后应用本文系统实现乙炔 气体检测。以河南中分仪器有限公司的气相色谱仪 ZF-301B 的测量结果作为对比,测量结果如表 2 所 示。

表 2 测量准确性对比					
气相色谱 示值 (μL/L)	本文设计 系统测量 结果 (µL/L)	测量绝对 误差 (μL/L)	测量相对 误差(%)		
0.12	0.07	0.05	42		
0.22	0.17	0.05	22.7		
0.42	0.45	-0.03	-6.67		
3.27	3.75	-0.48	-12.80		
6.43	6.03	0.40	6.63		
22.18	22.28	-0.10	-0.45		
22.28	22.91	-0.63	-2.84		

根据国家电网最新发布的 Q/GDW 10536-2021 《变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范》 500kV 及以下变电站变压器检测装置的 A 级要求乙 炔浓度在 0.5~10μL/L 内的相对误差小于±30%或者偏 差满足±0.5μL/L,在 10~200μL/L 内的相对误差小于 ±20%。根据表 2 中的测量结果,本文设计的基于 TDLAS 的 C₂H₂ 检测系统测量误差较小,0.22μL/L 以上浓度测量误差小于 30%,0.12μL/L 的测量偏差 小于±0.5μL/L,满足 A 级要求。因此,本文设计的 基于 TDLAS 的乙炔气体检测系统满足电力变压器 油中溶解乙炔的检测需求。

4 结束语

本文提出一种新型数字锁相放大器方法,采用 基于插值 DFT 的相位测量算法结合数字锁相放大器 实现光谱吸收信号的谐波检测,可解决传统锁相放 大器在低浓度气体检测时稳定性差、准确度低等问 题。此外,本文通过设计适用于低浓度 C₂H₂气体检 测的 TDLAS 系统,验证了本文提出锁相放大器在测 量低浓度乙炔气体的准确性和稳定性,具有较高的 实际意义和工程应用价值。

参考文献

- [1] 唐红,郑维刚,郎雪淞,等.基于稳健统计法的绝缘油中溶 解气体分析实验室间比对及结果分析[J].中国测 试,2022,48(S1):115-117.
- [2] 姜飞宇, 吴雄, 高松涛,等.红外光谱法检测变压器油中糠醛含量[J].中国测试,2022,48(S2):72-77.
- [3] Jiang J, Chen R, Zhang C, et al. Dynamic fault prediction of power transformers based on lasso regression and change point detection by dissolved gas analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(6): 2130-2137.
- [4] Dai J. Development of an Online Detection Setup for Dissolved Gas in Transformer Insulating Oil[J]. Applied

Sciences, 2021, 11(24): 12149.

- [5] Huang A, Cao Z, Zhao W, et al. Frequency-division multiplexing and main peak scanning WMS method for TDLAS tomography in flame monitoring[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(11): 9087-9096.
- [6] Zhang X, Yan J, Zhang Y, et al. Infrared spectrum analysis and quantitative detection of SF6 characteristic decomposition components SO2F2 and SOF2[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(4): 1316-1323.
- [8] 冯治国,金日,罗冲,李昂.基于 Transformer 神经网络的变压 器状态监测[J].国外电子测量技术,2023,42(02):145-150.
- [7] Jiang J, Wang Z, Han X, et al. multi-gas detection in power transformer oil based on tunable diode laser absorption spectrum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 153-161.
- [9] 吴铁洲,李炎,祁军,等.卡尔曼滤波结合数字锁相放大器的弱光声信号降噪方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020,453(10):98-102.
- [10]陈铁,陈一夫,李咸善,等. 基于 SDS-SSA-LSTM 的变压器
 油中溶解气体浓度预测[J]. 电子测量技术, 2022, 45(12):
 6-11.
- [11]余亚东. 一种红外气体检测中谐波信号锁相放大器的设计[J]. 激光与红外, 2021, 51(11): 1460-1465.
- [12]王国水,郭奥,刘晓楠,等. TDLAS 气体检测系统仿真与 影响因素分析[J].光谱学与光谱分析,2021,41(10): 3262-3268.
- [13]Meng Y, Liu T, Liu K, et al. A modified empirical mode decomposition algorithm in TDLAS for gas detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(6): 1-7.