

变压器油中溶解二氧化碳光谱监测降噪研究

丁文斌¹, 李红英², 汪昱煜¹, 许枢畅¹

(1. 国能江西丰城发电有限公司, 江西 丰城 331100;

2. 国家能源集团科学技术研究院有限公司武汉分公司, 湖北 武汉 430000)

摘要:为实现变压器油中溶解二氧化碳(CO₂)实时监测,设计了基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的变压器油中CO₂监测装置,采用粒子群算法优化积分梳状滤波降低现场噪声对二次谐波的影响,滤波后信噪比由7.86 dB提升至18.33 dB,采用背景扣除技术去除怀特池吹扫过程中引入的空气中CO₂成分,实现了自动取样、脱气、测量以及回油功能。在气相标定实验中,优化后的二次谐波峰谷值与浓度的拟合线性度达0.999 5,具备良好的线性关系;在油样测试中,装置的检测下限与误差满足国网A级要求,可为变压器油中溶解气体分析提供准确的CO₂值。

关键词:二氧化碳;可调谐半导体激光吸收光谱;积分梳状滤波;二次谐波

中图分类号:O433.4

文章编号:1000-0682(2026)02-0104-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.02.020

Research on noise reduction in spectral monitoring of dissolved carbon dioxide in transformer oil

DING Wenbin¹, LI Hongying², WANG Yuyu¹, XU Shuchang¹

(1. Guoneng Fengcheng Power Generation Co., Ltd., Jiangxi Fengcheng 331100, China;

2. China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Hubei Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to achieve real-time monitoring of dissolved carbon dioxide (CO₂) in transformer oil, a CO₂ monitoring device based on tunable diode laser absorption spectroscopy technology was designed. The device uses cascaded integral-comb filtering to reduce the impact of on-site noise on the second harmonic, and background subtraction technology to remove CO₂ components introduced in the air during the blowing process of the White pool, achieving automatic sampling, degassing, measurement, and oil return functions. In the gas phase calibration experiment, the fitting linearity between the peak and valley values of the second harmonic and the concentration reached 0.999 5, indicating a good linear relationship. In oil sample testing, the detection lower limit and error of the device meet the a-level requirements of the State Grid, and can provide accurate CO₂ values for dissolved gas analysis in transformer oil.

Keywords: carbon dioxide; tunable diode laser absorption spectroscopy; cascaded integral-comb filtering; second harmonic

0 引言

在变压器油中溶解气体分析(Dissolved Gas Analysis, DGA)中,变压器油中溶解的CO₂含量与产气速率是判断固体绝缘老化的重要依据。

常用变压器油中溶解气体的检测方法有气相色谱法、光声光谱法以及可调谐半导体激光器法(TD-LAS)^[1]。气相色谱法应用广泛,但存在消耗载气,需专人取样,取样过程易受污染等不足。光声光谱法基于气体的光声效应,利用微音器检测到的声音强度计算气体浓度,但易受环境噪声干扰以及多气体交叉干扰。TDLAS利用激光器的可调谐特性,扫描气体吸收光谱来测量气体浓度与温度等参数,具

收稿日期:2025-10-11

第一作者:丁文斌(1992—),男,甘肃庆阳人,助理工程师,大学本科,主要研究方向为电气一次方面。E-mail:826733935@qq.com

有高分辨高灵敏度的特点,近年来已逐步在 DGA 领域应用。宋宏图等基于 TDLAS 技术研发油中溶解 CO₂ 气体传感系统,实现 μL/L 量级的测量,但使用激光器的中心波长为 2004 nm,造价昂贵^[2]。李洋流等设计了基于光声光谱检测原理的变压器油中溶解气体检测系统,其中对 CO₂ 的极限灵敏度为 10 μL/L^[3]。蒋维等研制了变压器油中 CO、CO₂ 浓度在线监测系统,实现了气相浓度下限 50 μL/L 的检测,但未扣除检空气中的 CO₂ 影响^[4]。

该文选用中心波长 1580 nm 激光器作为检测光源,研制了基于 TDLAS 技术的变压器油中 CO₂ 监测装置,使用粒子群算法优化 CIC 滤波抑制系统噪声,并在测量时扣除了背景信号,系统测量精准,满足电力行业监测需要。

1 检测原理

气体选择性吸收是 TDLAS 检测的基础。当特定波长的激光穿过分布均匀的气体介质时,气体分子吸收激光能量后产生跃迁,导致光强衰减,衰减强弱与气体浓度有关,比尔朗博定理描述了衰减过程^[5]。

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\alpha(\nu)LC] \quad (1)$$

式中: $I_0(\nu)$ 为入射光强; $I(\nu)$ 为出射光强; $\alpha(\nu)$ 为吸收系数,与气体组成成分、温度及压强有关; L 为光程; C 为目标气体浓度。

TDLAS 技术计算浓度的方法主要有直接吸收法和波长调制法。直接吸收法原理简单,光谱吸收信号直接反应吸收强度,但难以检测大噪声背景下的微小浓度变化^[6-7]。波长调制法在激光器电流中注入高频正弦调制,激光器的瞬时频率为:

$$\nu = \nu_c + \nu_a \cos \omega t \quad (2)$$

式中: ν_c 为激光器的中心频率; ν_a 为调制振幅; ω 为正弦调制频率。将调制后的激光将代入式(1),并展开傅里叶级数为:

$$I(\nu_c, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\nu_c) \cos(n\omega t) \quad (3)$$

式中: A_n 为谐波分量。

$$A_n(\nu_c) = \frac{2I_0CL}{\pi} \int_0^{\pi} -\alpha(\nu_c + \nu_a \cos\theta) \cos n\theta d\theta \quad (4)$$

由式(4)可知, $A_n(\nu_c)$ 正比于气体浓度 C 。 A_n 由数字锁相放大器解调,其中二次谐波关于中心波长对称,在偶次谐波中幅值最大,常取二次谐波的峰谷值作为反演浓度的依据^[8]。

2 测量系统

2.1 装置结构

变压器油中溶解 CO₂ 监测装置分为油样脱气模块、气体检测模块以及控制模块,如图 1。

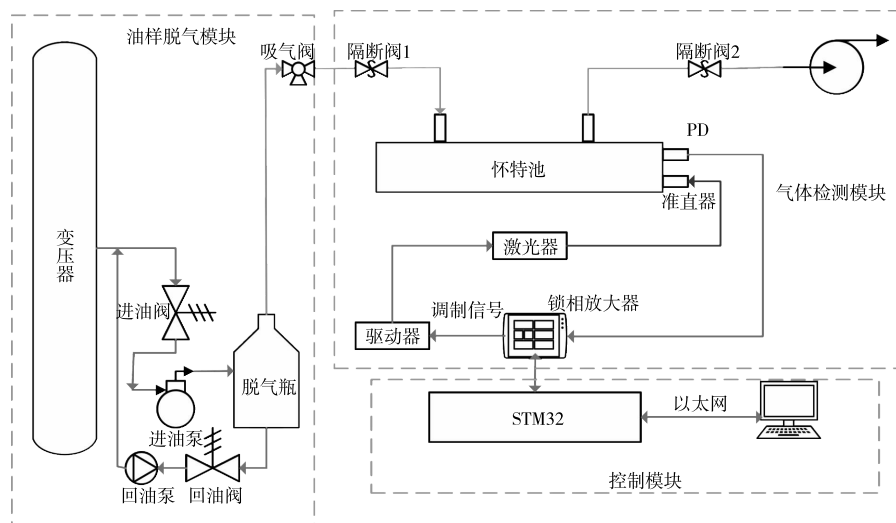


图1 系统结构图

油样脱气模块由油泵、脱气瓶、阀门等组成,完成装置的自动取油、脱气以及自动回油功能,脱气采用负压恒温顶空脱气,脱气瓶中内置搅拌器加速气体析出。气体检测模块包括数字锁相放大器、激光驱动

器与怀特池等,激光驱动器将锁相放大器产生的调制信号转换为电流信号,精准控制激光器在 1679.1 nm 附近扫描,PD 捕捉气体吸收过后的激光后传输至锁相放大器解调为二次谐波。控制模块中根据二次谐

波计算气体浓度,并控制装置的运行逻辑。

2.2 CIC 滤波

变压器现场环境高温高湿,伴有强电磁辐射,锁相放大器解调的二次谐波在传输至浓度计算模块时易受外界噪声干扰。噪声的存在会影响测量精度,降低装置的可靠性。CIC 滤波器无需存储滤波系数、不含乘法运算,结构简单,适用于实时性要求高的降噪场景。CIC 滤波器的本质是 FIR 滤波器,是线性时不变系统,拥有特殊的冲击响应,可表示为:

$$h(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq R-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R 为滤波器阶数。

在 CIC 滤波中,阶数 R 影响滤波性能,阶数越大计算量越大,但滤波性能并非最优。在评价滤波器性能时,选取信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)与相关系数作为最优参数判断条件。信噪比越大,信号中的有效成分的比越大,噪声成分占比越低^[9]。信噪比计算公式为:

$$SNR = 10 \lg \left[\frac{\sum_{t=1}^N x(t)^2}{\sum_{t=1}^N (x(t) - y(t))^2} \right] \quad (6)$$

式中: $x(t)$ 为含噪信号; $y(t)$ 为降噪后信号; N 为信号长度。

相关系数越大,说明滤波后信号与滤波前信号越相似,畸变越小,反应的浓度信息越准确。相关系数计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{t=1}^N (x(t) - \bar{x})(y(t) - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (x(t) - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^N (y(t) - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

2.3 降噪处理

为确定变压器油中 CO_2 监测装置的最优滤波器阶数 R , 该文以粒子群算法优化 CIC 滤波的阶数选择。粒子群算法是一种模拟鸟类觅食的演化算法,该算法利用数据运算实现复杂空间内最优解搜索,相比于其他进化算法收敛更快。粒子群算法中粒子具有速度、位置和适应度属性,分别决定粒子飞行方向、飞行距离以及当前解的品质。一般情况下,粒子

朝最优粒子方向运动,并经逐代搜索中得出最优解。粒子迭代过程中,跟踪粒子本身迄今搜索到的最优解 pst 和种群最优解 gst 来更新。

$$\mathbf{v}_{ik}(t+1) = \omega \mathbf{v}_{ik}(t) + c_1 r_1 (\mathbf{pst}_{ik}(t) - \mathbf{x}_{ik}(t)) + c_2 r_2 (\mathbf{gst}_{ik}(t) - \mathbf{x}_{ik}(t)) \quad (8)$$

$$\mathbf{x}_{ik}(t+1) = \mathbf{x}_{ik}(t) + \mathbf{v}_{ik}(t+1) \quad (9)$$

式中: \mathbf{v}_{ik} 为当前粒子速度; $\mathbf{x}_{ik}(t)$ 为当前粒子位置; $k \in [1, N]$, 表示当前空间维度; r_1 与 r_2 为区间 0 至 1 之间的随机数; c_1 与 c_2 为学习因子; ω 为粒子对当前位置的依赖程度。

优化步骤如下:

(1) 初始化粒子群算法各项参数,构造适应度函数,其中粒子群滤波的阶数寻优范围[5, 50]。适应度函数采用信噪比与相关系数的乘积的倒数,适应度函数越小,代表该阶数的噪声抵制能力越强,并且滤波后的畸变越小。

(2) 计算各粒子的适应度函数大小,更新粒子位置,直至满足最大迭代次数,得出适应度函数最小的参数。

(3) 以最优参数进行 CIC 滤波,得出平滑后的二次谐波。

在实验室环境下得出无噪声的理想信号,并在理想信号的基础上引入随机高斯噪声得出含噪信号,含噪信号的信噪比为 7.86 dB,选取粒子群优化 CIC 滤波进行降噪处理,优化后的 CIC 滤波阶数为 15,滤波效果如图 2 所示。

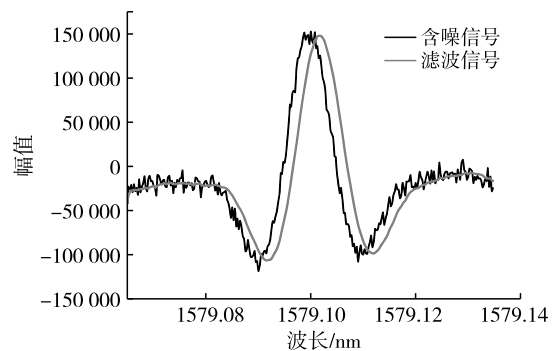


图 2 最优参数滤波效果

在滤波后,信号中的噪声基本倍滤除,不存在毛刺与凸起。为验证粒子群优化后选取的 CIC 阶数为最优参数,随机选取部分阶数的滤波性能如表 1。

表 1 不同阶数的性能指标

CIC 阶数	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
信噪比/dB	12.34	16.74	19.02	18.33	15.86	13.61	11.38	9.55	7.94	6.59
相关系数	0.989	0.991 6	0.993 3	0.992 9	0.990 1	0.980 9	0.979 4	0.969 4	0.953 3	0.931 2

由表1可知,滤波阶数为15时拥有最大的信噪比18.33 dB与相关系数0.99,适应度函数最小,说明粒子群算法选取了CIC滤波的最优阶数。

2.4 背景扣除

在装置吸入外部空气吹扫怀特池时,不可避免地吸入大气中的CO₂。因此,在测量变压器油中CO₂时,需扣除吸入CO₂的影响。该文采用波形相减的方法去除背景,在装置吸入空气吹扫怀特池时记录背景波形,在测量油中溶解气体时减去背景波形,得出仅含油中溶解CO₂浓度的去背景二次谐波。去背景波形如图3。

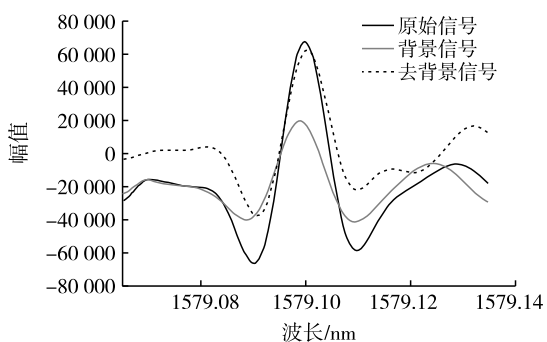


图3 去背景波形图

由图3可知,背景二次谐波中明显存在吸收,说明背景中含有CO₂,若不去除将影响变压器油中的检测精度。

3 实验

3.1 气样标定

在进行油样测试前,需先进行气样标定,确保装置气体检测的准确性。标定用气由高精度配气仪配置,并由离线色谱仪取样复核,浓度依次为0 μL/L、100.4 μL/L、301.2 μL/L、502 μL/L、1004 μL/L、1314.14 μL/L、2628.27 μL/L、5020 μL/L。各浓度的二次谐波如图4,峰谷值与浓度拟合关系如图5。

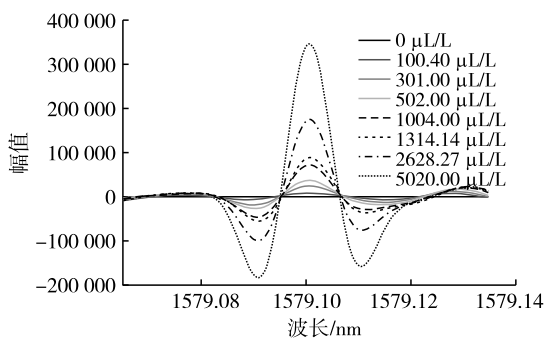


图4 二次谐波

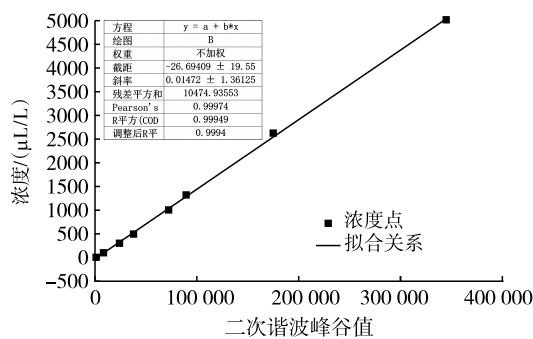


图5 峰谷值与浓度关系

经CIC滤波的各浓度二次谐波中均无明显毛刺,二次谐波峰谷值与浓度之间呈明显的线性关系,拟合度为0.9995。

3.2 油样测试

根据《变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范》,变压器油中CO₂的最低检测下限要求为25 μL/L,A级测量误差要求为相对偏差小于30%或绝对偏差在±25 μL/L以内^[10]。对于运行年限久的变压器,油中CO₂浓度可达数万。为检验变压器油中CO₂实时监测装置的油样测试性能,分别配置浓度26.2 μL/L,780.3 μL/L,3500.4 μL/L,7561.3 μL/L,15310.8 μL/L,24302.5 μL/L的油样。测试过程每组油样测量10次,去除最大最小值后,计算平均值作为最终检测结果。去背景的结果如表2,未去背景的结果如表3。

表2 去背景的油样测试结果

油样浓度/ (μL/L)	测量结果/ (μL/L)	相对偏差/ %	绝对偏差
26.2	48.6	85.50	22.4
780.3	626.4	19.72	153.9
3500.4	3212.4	8.23	288
7561.3	7025.1	7.09	536.2
15310.8	13523.4	11.67	1787.4
24302.5	20301.8	16.46	4000.7

表3 未去背景的油样测试结果

油样浓度/ (μL/L)	测量结果/ (μL/L)	相对偏差/ %	绝对偏差
26.2	480.6	1734.35	454.4
780.3	1086.4	39.23	306.1
3500.4	3580.4	2.29	80
7561.3	7515.1	0.61	46.2
15310.8	13918.4	9.09	1392.4
24302.5	20761.8	14.57	3540.7

由表2与表3可知,去背景油样测试结果均满足A级测量误差要求,而未去背景的油样测试结果

在浓度 26.2 μL/L、780.3 μL/L 中不满足,原因在于受空气中的 CO₂影响,导致测量结果偏大。

4 结论

该文分析了 TDLAS 检测原理,设计了变压器油中 CO₂监测装置,选取 CIC 滤波提升二次谐波的信噪比,确定最优的 CIC 滤波阶数,并扣除了吹扫时引入的大气背景。测试结果表明,浓度反演关系为标准的线性关系,气体检测下限满足国网 A 级需求,可为变压器安全提供参考信息。

参考文献:

[1] 江浩,廖雍琦,李兴旺.一起 110 kV 变压器套管发热缺陷处理及油中微量乙炔分析[J].农村电气化,2023,09:89-92.

[2] 宋宏图.基于 TDLAS 的变压器油中溶解 CO 及 CO₂的传感研究[D].北京:华北电力大学,2017.

[3] 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(06):103-105.

[4] 蒋维,张龙飞,杨生彬,等.基于可调谐半导体激光的

变压器油中 CO、CO₂浓度监测方法江西电力,2024,48(02):20-23.

[5] 李秉辉.基于可调谐二极管激光吸收光谱技术的 SO₃气体测量参数优化[J].应用激光,2023,43(12):133-137.

[6] 程绳,陈启明,张引,等.基于中红外可调谐激光光谱技术的 SO₂检测[J].高压电器,2024,60(09):155-162.

[7] 杨舒涵,乔顺达,林殿阳,等.基于可调谐激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究[J].2023,16(01):151-157.

[8] 马砺,范新丽,张朔,等.基于 TDLAS 技术的 CH₄气体检测与温度补偿方法[J].光谱学与光谱分析,2021,41(11):3632-3638.

[9] 张华乾,于庆.基于小波阈值函数降噪的实时煤矿氧气检测数据误差处理[J].煤矿机电,2023,44(06):28-32.

[10] 国家电网有限公司.变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范:Q/GDW 10536-2021[S].北京:2021-12-06.

(上接第 100 页)

[7] 李展,成振松,尤默,等.某火电机组汽电双驱动风机系统辅机故障控制仿真及试验分析[J].热能动力工程,2023,38(09):174-182.

[8] 王远鑫,陈鸿伟,杨新,等.基于注意力机制 CNN-BiLSTM 的磨煤机故障预警方法[J].华北电力大学学报(自然科学版),2025,52(04):134-142.

[9] 朱瑞.基于混沌粒子群算法的火电机组热工控制策略优化[J].电子设计工程,2025,33(15):82-87.

[10] 佟帅,洪陆阔,艾立群,等.高温氢基还原铁矿的在线气体检测系统设计及试验验证[J].烧结球团,2025,50(04):99-105.

[11] 高明,郭辉,贾志卓.基于数据拟合法的三角形薄壁堰渠流量测量不确定度优化[J].计量学报,2024,45(09):1348-1352.

[12] 吴喜军,朱经国,许方鹏,等.高性能温湿度检定箱的设计与试验[J].山东农业大学学报(自然科学版),2024,55(04):540-547.

[13] 王琳,郑志振,王勇,等.喷油润滑内齿圈外圆面红外测温及误差分析[J].振动.测试与诊断,2024,44(02):253-258+407.

[14] 李乃稳,黄滢淳,陈小攀,等.基于跌坎压力自相似分布的明渠水深-流量关系推求[J].工程科学与技术,2024,56(01):218-227.

[15] 李东东,申润祺,杨帆,等.基于信息间隙决策理论的多区域电网源-储-荷灵活优化运行策略[J].电力系统保护与控制,2025,53(19):39-51.

[16] 王翔,王辉,甘玮,等.基于改进 DESN 的火电机组出力预测模型[J].计算机仿真,2025,42(04):99-105.

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号:52-49 国际发行代号:BM529 定价:18.00 元/期 108.00 元/年
 地址:西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编:710075 电话:029-81871277
 网址:http://yb-zdh.shaangu-group.com 电子邮箱:gyybbjb@126.com