

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.05.004

变压器油中溶解乙炔光热干涉检测系统的温度和压强特性

吴睿涵¹, 何亚倩¹, 江军¹, 王祥传², 范利东³

(1. 南京航空航天大学(江苏省新能源发电与电能变换重点实验室), 江苏 南京 211106;

2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 211106;

3. 杭州钱江电气集团股份有限公司, 浙江 杭州 311243)

摘要:光热干涉(photothermal interference, PTI)法是一种气体检测的新型光学方法,因其高灵敏度、高精度和“零背景”的优点,有望在油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)检测领域中得以推广和应用。然而,油中溶解气体的温度和压强对光热相位的影响规律尚不明确,为提高PTI技术在DGA领域的适用性,文中提出一种基于Herriott气室的光强调制型PTI油中乙炔传感方案。为模拟故障状态下变压器油中气体检测,文中对含乙炔等多组分特征气体的混合气体进行实测,并重点研究测量过程中温度和压强对检测结果的影响规律,得出温度降低和压强增大均会使光热相位增大。由此表明,乙炔检测的精度和稳定性依赖于检测过程中合理设置温度和压强。所研制的测量系统对乙炔浓度具有较强的线性响应,检测灵敏度为 $0.151 \text{ mV}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$,检测下限为 $5.3 \mu\text{L}/\text{L}$ 。所提方案为后续开发基于PTI技术的新型DGA检测提供了思路并奠定了基础。

关键词:油浸式变压器;油中溶解气体分析(DGA);乙炔检测;光热干涉法;Sagnac干涉仪;温度-压强特性

中图分类号: TM854

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)05-0030-07

0 引言

油浸式电力变压器承担着电网中电压等级变换的重要任务,其安全可靠运行可为电力系统的稳定提供重要保障^[1-2]。目前关于电力变压器的状态监测和故障诊断主要集中在油中溶解气体分析^[3-4](dissolved gas analysis, DGA)。实时监测故障气体的成分和含量,对于分析早期潜伏性故障和风险预警具有重要参考价值^[5]。

传统DGA检测方法中,气相色谱法^[6]应用广泛,但其操作过程复杂、实时性较差,且检测精确度依赖于定期的校准以及色谱柱的更换;电化学传感器^[7]的高检测灵敏度依赖于高温工作环境,不仅应用场景受限,还存在高功耗的缺点;半导体传感器^[8]面临易老化、多组分气体交叉敏感和基线漂移等问题。因此,以上方法均不适用于现场长期稳定的在线监测。相比之下,光学方法凭借其本质安全、可抗电磁干扰和具有高选择性等优点,近年来在DGA检测领域得到快速发展和应用。直接吸收光谱(direct absorption spectroscopy, DAS)法^[9]的系统组成和浓度反演算法简单直观,但易受光源和环境背景噪声影响,因此检测低浓度气体的能力不足。为降低背景噪声,可调谐半导体激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)

技术^[10]采用波长调制光谱(wavelength modulation spectroscopy, WMS)法^[9],但同时可能带来剩余强度调制的问题^[11],导致检测精度和检测下限受限。光声光谱(photoacoustic spectroscopy, PAS)法通过优化如悬臂式麦克风^[12]、石英音叉^[13]、多通道反射谐振腔^[14]等声压传感器设计而具有较高检测灵敏度。然而,PAS技术无法避免噪声干扰,如斩波片的振动及电机噪声,因此限制了对油中溶解气体真实浓度的准确探测。激光拉曼光谱(laser Raman spectroscopy, LRS)法^[15]可同时检测多种特征气体,但气体的拉曼散射截面较小,拉曼效应较弱,在一定程度上限制了其检测精度。

光热干涉(photothermal interference, PTI)法是一种气体检测的新型光学方法。该方法先利用激励光激发待测气体的光热效应,再利用探测光间接检测光热效应引起的光相位变化^[16]。光热相位调制幅值正比于有效作用光程和激励光功率,因此通过增大光程和激励光功率可大幅提升检测灵敏度^[17]。此外,激励光额外噪声、环境噪声、剩余强度调制、光路中散射和反射损耗并不会对光热相位产生影响^[18],因此PTI技术具有“零背景”的优势^[19]。基于不同干涉解调技术的PTI气体检测方案也相继提出,如马赫-曾德尔型(Mach-Zehnder)^[20]、塞格纳克型(Sagnac)^[21]、法布里-珀罗型(Fabry-Perot)^[22]、外差型(Heterodyne)^[18,23]。

然而,油中溶解气体的温度易受变压器负荷波

收稿日期:2023-07-14;修回日期:2023-08-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177150)

动影响,气体压强也受油产气速率影响^[24],气体温度和压强对光热相位的影响规律尚不明确。为提高 PTI 技术在 DGA 领域的适用性,文中提出一种基于 Herriott 气室的光强调制型 PTI 油中乙炔传感方案。为模拟故障状态下变压器油中气体检测,文中对含乙炔等多组分特征气体的混合气体进行实测,分析 PTI 系统的信噪比和检测下限,并重点研究温度和气体压强因素对光热相位的影响规律。文中理论分析及实验所得结果为进一步完善油中溶解气体 PTI 在线监测提供了技术支撑。

1 PTI 技术原理

文中乙炔检测方案采用定制的一体式反射镜 Herriott 气室作为气体光热效应激发场所,该气室具有长光程、小体积、充气速度快、抗震能力强等优点。气室内乙炔分子光热效应的激发过程见图 1,省略了气孔、准直器、大部分反射光等部件和设计。

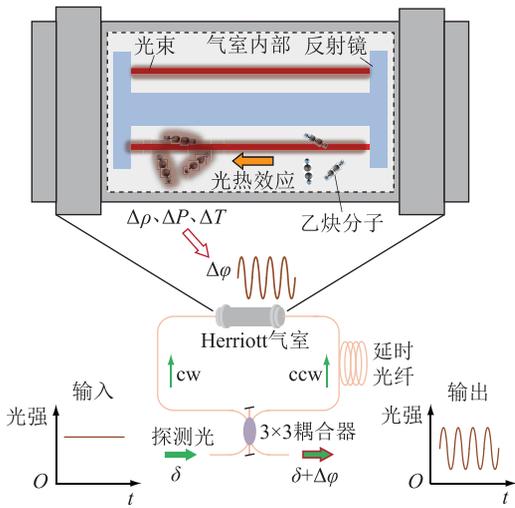


图1 基于 Herriott 气室的 PTI 法乙炔检测原理

Fig.1 Principle of acetylene detection based on PTI method using the Herriott cell

激励光经准直器后,形成模场半径为 0.2 mm 的高斯空间光,在反射镜之间反复传播并与乙炔分子充分接触。乙炔分子吸收特定波长激励光的能量,发生能级跃迁,以非辐射弛豫的方式释放能量,进而引起背景气体温度 T 、密度 ρ 和压强 P 变化(分别记为 ΔT 、 $\Delta \rho$ 、 ΔP),导致局部空间折射率发生变化。由于探测光与激励光具有相同传输路径,在正弦变化的激励下,探测光的相位同样受到正弦调制。探测光的波长避开了乙炔吸收峰,因而不会影响光热相位。光热相位调制 $\Delta \varphi$ 可由式(1)^[25]描述。

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{probe}}} \times \frac{dn}{dT} \times \frac{k^* P_{\text{pump}} L c \alpha_0}{\kappa} \quad (1)$$

式中: λ_{probe} 为探测光波长; P_{pump} 为激励光功率; k^* 为比例系数,与 PTI 系统拓扑有关; L 为光热作用长度; c 为乙炔浓度; α_0 为乙炔的吸收系数; n 、 $\frac{dn}{dT}$ 分别为背景气体的折射率和热光系数; κ 为氮气的热导率。将浓度信息附加在激励光相位上,可大幅提升检测灵敏度。

文中采用基于 Sagnac 干涉结构的 3×3 耦合器解调算法,其具有以下优点^[26]: (1) 抗环境噪声的能力强。探测光经过耦合器后分为两束,在 Sagnac 环中分别沿顺时针(cw)和逆时针(ccw)方向传输,两束光的相位同时受到外界影响,因此相位差基本不随环境改变。(2) 解调处在线性区。初相稳定在 $2\pi/3$,而痕量气体检测时引起的光热效应微弱,因此光热相位调制几乎线性解调为光强调制。

Sagnac 干涉仪输出光强 I 的表达式为^[27]:

$$I = I_{\text{cw}} + I_{\text{ccw}} + 2\sqrt{I_{\text{cw}}I_{\text{ccw}}} \times \cos(\beta \cos(2\pi f_m(t - \tau_D/2)) + \delta + \varphi_{\text{noise}}) \quad (2)$$

式中: I_{cw} 、 I_{ccw} 分别为干涉臂顺时针、逆光束的光强; f_m 为相位调制频率; τ_D 为探测光经过延迟光纤的时间; δ 为探测光的初始相位,值为 $2\pi/3$; φ_{noise} 为相位噪声; β 为相位余弦调制的幅值, $\beta = 2\Delta \varphi \sin(2\pi f_m \tau_D/2)$ 。通过输出光强的交流分量可反演气体浓度。

2 光强调制型 PTI 乙炔检测系统

2.1 吸收谱线选取

考虑到变压器故障监测的应用需求,为模拟变压器油中故障特征气体中乙炔的检测,文中选取包含多组分特征气体的混合标准气体,乙炔浓度为 1 000 $\mu\text{L/L}$,其他浓度的乙炔通过质量流量计控制标气与纯氮气的配比得到。混合标准气体的组分信息如表 1 所示。

表 1 混合标准气体组分信息

Table 1 Composition of mixed standard gases

气体组分	浓度/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	气体组分	浓度/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$
CH ₄	5 100	CO ₂	9 930
C ₂ H ₆	5 030	CO	2 990
C ₂ H ₄	5 030	H ₂	5 030
C ₂ H ₂	1 000		

在 PTI 技术气体检测领域,乙炔检测常采用 1 530.37 nm 处 P(9) 吸收线^[18,20,26],吸收线强为 $1.211 \times 10^{-20} \text{ cm}^{-1}/(\text{molec} \cdot \text{cm}^{-2})$ 。根据 HITRAN 光谱数据库,绘制各组分特征气体在室温、1 个标准大气压和 6 m 光程条件下的吸收谱线,如图 2 所示。

其中不包括 C₂H₄ 和 C₂H₆, 因为这 2 种气体在激励光的可调谐范围 1 480~1 640 nm 内无吸收线。乙炔在 1 530.37 nm 处有明显的吸收效应, 而其他组分气体的吸光度都接近 0, 因此不会干扰乙炔的检测。

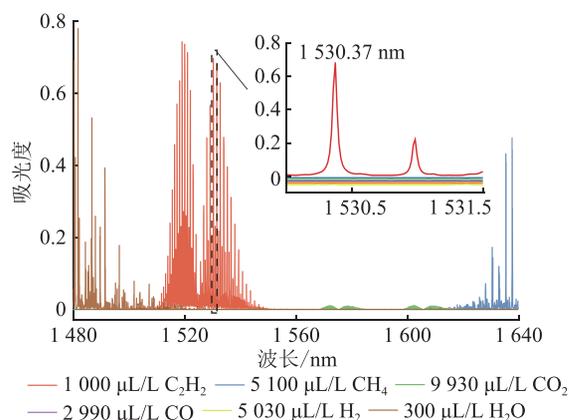


图2 根据 HITRAN 2021 数据库计算的乙炔吸收谱线
Fig.2 Acetylene absorption lines based on the HITRAN 2021 database

2.2 实验系统搭建

光强调制型 PTI 乙炔检测系统利用激励光激发气室内乙炔气体的光热效应, 从而调制探测光的相位, 最后通过直线型 Sagnac 干涉仪解调光热相位, 其实验拓扑见图 3。采用该 Herriott 气室作为传感单元具有以下优势: (1) 长光程。反射光路总长达 6 m, 激励光与乙炔气体能充分接触, 探测光探测的相位信号也将更强。(2) 响应速度快。气室拥有 50 mL 的超小容积, 待测气体能更快充满气室并达到稳态。(3) 抗震能力强。气室内部是一个一体式的镜片结构, 整个镜片保持同一震动状态从而避免高震动环境对气体检测的干扰。因此, 该 Herriott 气室适用于变压器强振动环境下的监测。

激励光采用连续的可调谐窄线宽激光 (TSL-710), 输出光强为 0~10 mW, 调谐范围为 1 480~1 640 nm; 掺铒光纤放大器 (erbium-doped fiber amplifier, EDFA) 可将 6 mW 输入光强最大放大至 283 mW; 采用 EDFA 前置光滤波器减小 EDFA 自发辐射噪声的影响^[18]; 采用声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM) 调制激励光光强, 其通过射频 (RF) 电路驱动; 波分复用器 (wavelength division multiplexer, WDM) 的作用是将激励光耦合进气室。探测光采用放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 光源, 半波全宽为 1 525~1 565 nm, 能有效减小 Sagnac 光路中的相干后向散射和反射噪声^[20]; 偏振控制器 (polarization controller, PC) 被用来抑制 Sagnac 干涉仪中的偏振衰弱现象^[28]; 延迟光纤为长度 2 km 的普通单模光纤, 对应延迟时间为

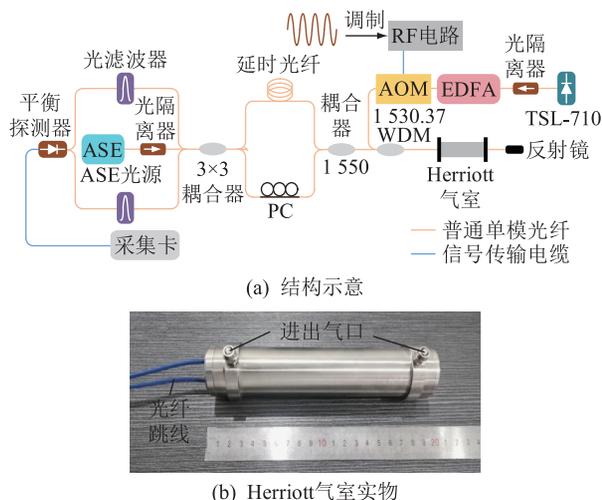


图3 光强调制型 PTI 乙炔检测系统
Fig.3 Acetylene detection system based on light intensity modulated PTI

10 μs; 平衡探测器将干涉光强转化为电信号, 其内置差分放大器能有效抑制共模噪声; 平衡探测器前置光滤波器的作用是防止激励光干扰探测信号, 通带范围为 1 545~1 555 nm。

3 变压器油中乙炔传感测试

3.1 环境温度的影响

变压器油的温度易受负荷波动和电热故障影响, 进而改变油中溶解气体的温度。因此, 研究气体温度对光热相位的影响, 对于提升乙炔检测的精度具有重要意义。

将 Herriott 气室置于温控箱内, 并将 PT100 贴片式温度传感器紧贴在气室外壳表面。加热温度不宜太高, 以免对气室造成不可逆的损坏。由于气室外壳材料是具有良好导热性的 304 合金, 并且温控箱内温度稳定均匀, 因此气室外壳与内部乙炔的温度可看作一致。激励光光强保持在 180 mW, 并对其进行 50 Hz 的正弦调制, 实验在 1 个标准大气压下进行。通过采集卡 NI-USB-6211 同步采集干涉信号与温度的数据, 采样频率为 1 000 Hz。在加热过程中, 温控箱内部温度从 296 K 上升至 339 K, 如图 4(a) 所示。但由于加热初期设定温度过低, 温升曲线出现小阶梯波形。在停止加热后, 箱内自然冷却 3 000 s。从图 4(b) 可看出, 正弦变化干涉信号的幅值在温度变化下受到显著影响。提取干涉信号上下包络并进行相减, 然后利用 Savitzky-Golay 滤波算法进行平滑处理, 得到干涉信号峰峰值 V_{p-p} 随时间变化的曲线, 如图 4(c) 所示。在加热过程中, 干涉信号峰峰值呈现下降趋势; 但在停止加热后, 干涉信号峰峰值开始缓慢增大。在升温 and 降温的

过程中,干涉信号峰峰值的平均值随温度变化关系如图5所示,呈现近乎线性的负相关。温度从296 K上升至339 K,干涉信号峰峰值从231.8 mV衰减至93.8 mV,总共衰减了59.5%。

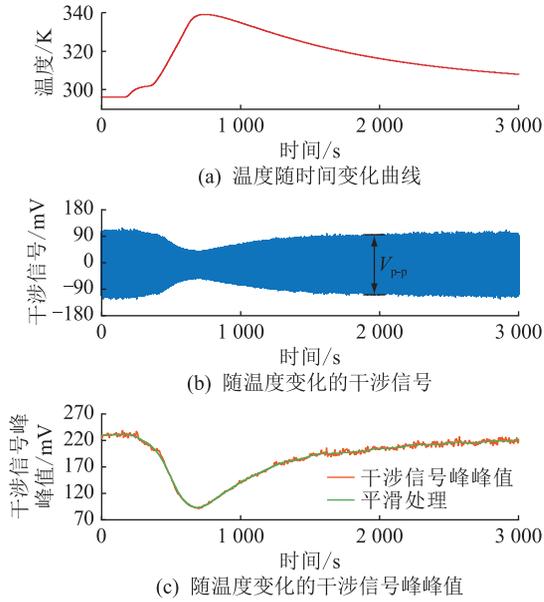


图4 温度和干涉信号及其峰峰值随时间的变化
Fig.4 Temperature, interference signals, and their peak-to-peak value changes over time

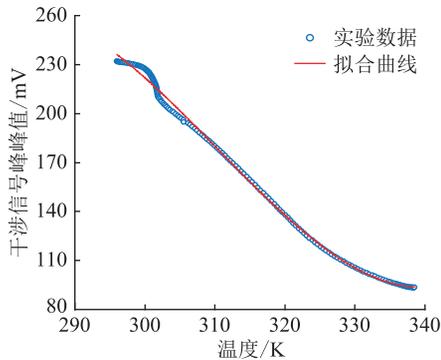


图5 干涉信号峰峰值与温度的关系
Fig.5 The relationship between peak-to-peak value of interference signal and temperature

根据式(1),光热相位受氮气热光系数 $\frac{dn}{dT}$ 、热导率 κ 及乙炔吸收系数 α_0 影响,而这3个参量与温度和压强的数学模型^[29-31]可描述为:

$$\frac{dn}{dT} = -\frac{\mu P}{T^2} \quad (3)$$

$$\kappa = \sqrt{T}(-92.9/T + 1.647 + 5.255 \times 10^{-4}T) \quad (4)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{\pi\gamma(T)} P S_{v_0}(T_{ref}) \frac{T_{ref}}{T} \times$$

$$\frac{Q(T_{ref})}{Q(T)} \left(\frac{1 - e^{-\frac{v_0}{k_B T}}}{1 - e^{-\frac{v_0}{k_B T_{ref}}}} \right) e^{-\frac{E''}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (5)$$

式中: $\mu = 8.093 \text{ K/Pa}$; T_{ref} 为背景气体的参考温度; $\gamma(T)$ 为乙炔吸收线型的半高半宽, $\gamma(T) = P(T_{ref}/T)^{0.817} \gamma(T_{ref})$; v_0 、 S_{v_0} 分别为乙炔吸峰的中心波长和线强; $Q(T)$ 为内分配函数, $Q(T) = (T/T_{ref})^{3/2} Q(T_{ref})$; $E'' = 62.878 \text{ cm}^{-1}$, 为跃迁低态能量; $k_B = 0.695 \text{ cm}^{-1}/\text{K}$, 为玻尔兹曼常数。

氮气热导率、热光系数及乙炔吸收系数在不同温度下的相对变化量的计算结果见图6。当气压为1个标准大气压时,温度由296 K增大至339 K,氮气热导率、热光系数和乙炔吸收系数分别减小至原来的89.7%、76.2%和69.7%,综合影响是使得光热相位衰减约52.4%,接近实验值59.5%。因此,在实际监测过程中,预先对油中溶解气体进行冷却处理,保持气体温度的稳定,可以减小温度漂移对检测的影响。此外,也可以采取温度补偿措施。

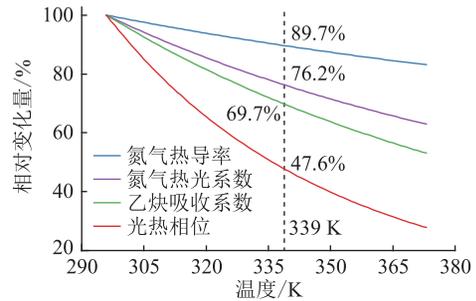


图6 光热相位的相对变化(296~373 K)

Fig.6 Relative changes in photothermal induced phase (296~373 K)

3.2 气体压强的影响

为探究气室内气体压强对光热相位的影响,仅将乙炔混合气体的气压控制在1.0~2.2个标准大气压范围内,同一气压下进行3次重复测试。激励光强保持在180 mW,并对其进行50 Hz的正弦调制,实验在室温下进行。实验结果如图7所示,干涉信号峰峰值随气压增大而线性增大。经直线拟合后,拟合直线的斜率为2.12 mV/kPa,拟合优度 R^2 为0.998。气压增大主要使氮气热光系数线性增大,而几乎不影响热导率^[30];乙炔吸收系数不随气体压强改变,这是由于 Lorentz 线型本身的峰值与气压成反比,抵消了气体压强所致分子数密度变化的影响^[32]。因此,理论上光热相位随气压线性增大。当气压从1个标准大气压增大至2个标准大气压时,干涉信号峰峰值由236.1 mV增大至449.6 mV,增大190%,略小于理论值200%。光热相位和气压的线性关系表明,可通过增大气压的方式来提升 PTI 系统的检测灵敏度,但为了降低气室气密性减弱的风险,后续实验将在1个标准大气压条件下进行。

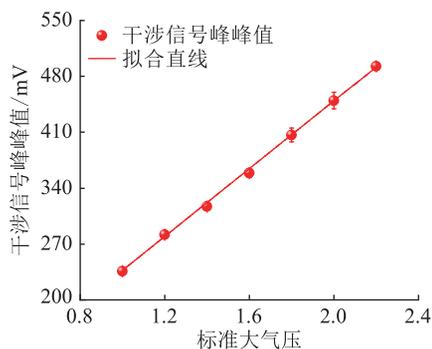


图7 干涉信号峰峰值与气压的关系

Fig.7 The relationship between peak-to-peak value of interference signal and gas pressure

3.3 系统信噪比及检测下限

激励光强保持在 180 mW, 并对其进行 50 Hz 的正弦调制, 实验在室温和 1 个标准大气压下进行。利用质量流量计将 1 000 $\mu\text{L/L}$ 乙炔混合气体与纯氮气配比得到 250~1 000 $\mu\text{L/L}$ 浓度范围的乙炔混合气体, 在每个浓度下测试 3 次, 结果如图 8 和图 9 所示。干涉信号峰峰值的平均值与乙炔浓度具有良好的线性关系, 拟合优度 R^2 为 0.985, 乙炔检测灵敏度为 $0.151 \text{ mV}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$ 。

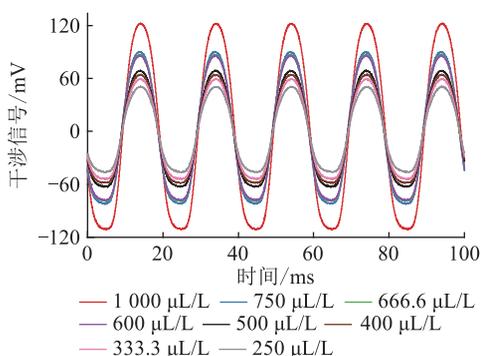


图8 不同乙炔浓度的干涉信号

Fig.8 Interference signals for acetylene with different concentrations

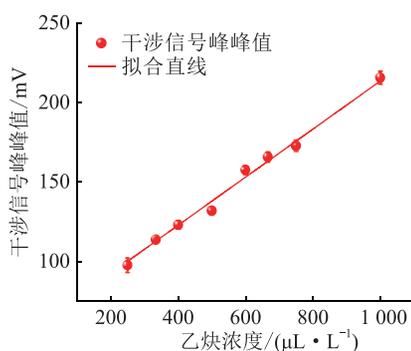


图9 干涉信号峰峰值与乙炔浓度的关系

Fig.9 The relationship between peak-to-peak value of interference signal and acetylene concentration

为评估系统检测下限, 在气室内通入 1 000

$\mu\text{L/L}$ 乙炔混合气体, 激励光强保持在 180 mW, 并对其进行 50 Hz 的正弦调制, 实验在 1 个标准大气压和 296 K 温度下进行。实验测得的干涉信号波形和对应的背景噪声(测试环境为高纯氮气)如图 10 所示。干涉信号峰峰值为 V_{p-p} 为 229.27 mV, 充入纯氮气后, 测得背景噪声的标准差 σ_{noise} 为 1.22 mV, 计算出 PTI 系统的信噪比为 187.93, 检测下限为 5.3 $\mu\text{L/L}$, 接近电力行业标准 DL/T 722—2014 中对在运 220 kV 及以下电压等级变压器油中乙炔浓度的注意值 5 $\mu\text{L/L}$ 。

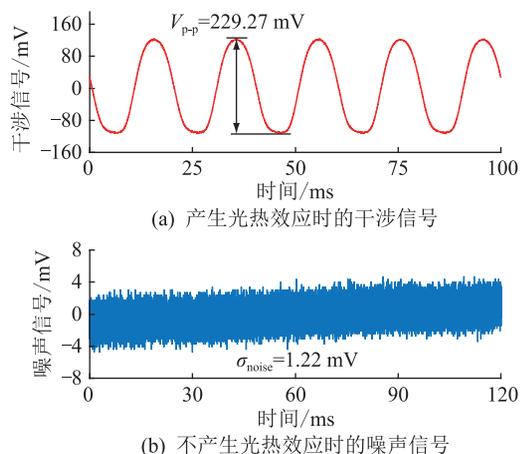


图10 干涉信号与噪声信号

Fig.10 Interference signal and noise signal

4 结论

为提升绝缘油故障特征乙炔气体的检测能力, 文中提出了一种基于光强调制型 PTI 法的光学传感方案, 分别开展了传感机制、传感测试和环境因素的影响研究, 得到如下结论:

(1) 待测气体的温度和压强均对光热相位调制有显著影响, 温度升高使光热相位减小, 而压强升高可以增大光热相位。因此, 优化气体温度和压强是提高检测灵敏度的有效手段。

(2) PTI 乙炔检测系统对乙炔浓度具有较强的线性响应, 检测灵敏度为 $0.151 \text{ mV}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$, 拟合优度为 0.985。

(3) PTI 系统的信噪比为 187.93, 检测下限为 5.3 $\mu\text{L/L}$, 有望被用于高电压等级变压器油中乙炔浓度的在线监测。

参考文献:

[1] 刘云鹏, 许自强, 李刚, 等. 人工智能驱动的数据分析技术在电力变压器状态检修中的应用综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 337-348.
LIU Yunpeng, XU Ziqiang, LI Gang, et al. Review on applications of artificial intelligence driven data analysis technology in

- condition based maintenance of power transformers [J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(2):337-348.
- [2] 赵志新,赵宗罗,赵颖,等. 基于并行化 BP 神经网络的配电变压器故障快速诊断方法[J]. *浙江电力*, 2021, 40(12):82-88.
ZHAO Zhixin, ZHAO Zongluo, ZHAO Ying, et al. A fast fault diagnosis method of distribution transformer based on parallel BP neural network [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2021, 40(12):82-88.
- [3] 周倩,陈振伟,张施令,等. 基于密度泛函理论的油中溶解气体吸附分析[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(1):155-161.
ZHOU Qian, CHEN Zhenwei, ZHANG Shiling, et al. Dissolved gas in transformer oil absorption analysis based on density functional theory [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(1):155-161.
- [4] 邓佳乐,孙辰昊,胡博,等. 基于改进关联规则挖掘的变压器油中溶解气体分析模型[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(3):165-172.
DENG Jiale, SUN Chenhao, HU Bo, et al. Evaluation model of the power transformer dissolved gas analysis based on the enhanced association rule mining algorithm [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(3):165-172.
- [5] 汪可,李金忠,张书琦,等. 变压器故障诊断用油中溶解气体新特征参量[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(23):6570-6578,6625.
WANG Ke, LI Jinzhong, ZHANG Shuqi, et al. New features derived from dissolved gas analysis for fault diagnosis of power transformers [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(23):6570-6578,6625.
- [6] BIAGIONI V. Boosting hydrodynamic chromatography through DC-electroosmotic flows [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2023, 100:367-372.
- [7] WANG J, ZHAO L J, LI J, et al. Stabilized zirconia-based solid state electrochemical gas sensor coupled with CdTiO₃ for acetylene detection [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 316:128199.
- [8] SUKKEE A, ALHARBI A A, STAERZ A, et al. Effect of AgO loading on flame-made LaFeO₃ p-type semiconductor nanoparticles to acetylene sensing [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 312:127990.
- [9] 卢伟业,朱晓睿,李越胜,等. TDLAS 直接吸收法和波长调制法在线测量 CO₂ 的比较 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(7):155-160.
LU Weiye, ZHU Xiaorui, LI Yuesheng, et al. Comparison of direct absorption and wavelength modulation methods for online measurement of CO₂ by TDLAS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7):155-160.
- [10] MA G M, ZHAO S J, JIANG J, et al. Tracing acetylene dissolved in transformer oil by tunable diode laser absorption spectrum [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:14961.
- [11] CHAKRABORTY A L, RUXTON K, JOHNSTONE W, et al. Elimination of residual amplitude modulation in tunable diode laser wavelength modulation spectroscopy using an optical fiber delay line [J]. *Optics Express*, 2009, 17(12):9602.
- [12] MA F X, LIAO Z H, ZHAO Y, et al. Detection of trace C₂H₂ in N₂ buffer gas with cantilever-enhanced photoacoustic spectrometer [J]. *Optik*, 2021, 232:166525.
- [13] MA Y F, HE Y, ZHANG L G, et al. Ultra-high sensitive acetylene detection using quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy with a fiber amplified diode laser and a 30.72 kHz quartz tuning fork [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(3):031107.
- [14] MA Y F, QIAO S D, HE Y, et al. Highly sensitive acetylene detection based on multi-pass retro-reflection-cavity-enhanced photoacoustic spectroscopy and a fiber amplified diode laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(10):14163.
- [15] 陈新岗,李松,马志鹏,等. 变压器油中溶解气体拉曼光谱检测及其光谱线型模型分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(8):2492-2498.
CHEN Xingang, LI Song, MA Zhipeng, et al. The detection of Raman spectra on dissolved gas in transformer oil and its spectral linear model analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(8):2492-2498.
- [16] 苗银萍,靳伟,杨帆,等. 光纤光热干涉气体检测技术研究进展 [J]. *物理学报*, 2017, 66(7):074212.
MIAO Yinping, JIN Wei, YANG Fan, et al. Advances in optical fiber photothermal interferometry for gas detection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7):074212.
- [17] KRZEMPEK K, HUDZIKOWSKI A, GLUSZEK A, et al. Multi-pass cell-assisted photoacoustic/photothermal spectroscopy of gases using quantum cascade laser excitation and heterodyne interferometric signal detection [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(5):74.
- [18] YAO C Y, GAO S F, WANG Y Y, et al. Heterodyne interferometric photothermal spectroscopy for gas detection in a hollow-core fiber [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 346:130528.
- [19] JIN W, CAO Y C, YANG F, et al. Ultra-sensitive all-fibre photothermal spectroscopy with large dynamic range [J]. *Nature Communications*, 2015, 6:6767.
- [20] ZHU G A, BAI Y R, YANG Y Y, et al. Ultra-wide range and wavelength fixed trace gas detection technology based on single chamber multiplexing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 158:107170.
- [21] LIN Y C, JIN W, YANG F, et al. Performance optimization of hollow-core fiber photothermal gas sensors [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22):4712-4715.
- [22] 汪超,林粤川,孙立臣,等. 空芯光纤光热干涉法用于痕量氨气传感研究 [J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(5):480-486.
WANG Chao, LIN Yuechuan, SUN Lichen, et al. Hollow-core optical fiber as a photothermal interference sensor for trace ammonia detection [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(5):480-486.
- [23] 王渊,马国明,谢洋洋,等. 无需油气分离的油中溶解乙炔

- 原位直接检测[J/OL]. 中国电机工程学报:1-10[2023-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20221012.1446.010.html>.
- WANG Yuan, MA Guoming, XIE Yangyang, et al. Direct detection of oil-dissolved acetylene without oil-gas separation[J/OL]. Proceedings of the CSEE;1-10[2023-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20221012.1446.010.html>.
- [24] 张永超. 基于数字孪生技术的变压器温度预测及热寿命损失分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2022.
- ZHANG Yongchao. Transformer temperature prediction and thermal life loss analysis based on digital twin technology[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2022.
- [25] ZHAO P C, HO H L, JIN W, et al. Hollow-core fiber photothermal methane sensor with temperature compensation[J]. Optics Letters,2021,46(11):2762-2765.
- [26] LIN Y C, JIN W, YANG F, et al. Highly sensitive and stable all-fiber photothermal spectroscopic gas sensor[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose, California. Washington, D.C.:OSA,2016;1-2.
- [27] YANG J H, DONG X P. Multipoint gas detection based on photothermal effect and wavelength-division multiplexing (WDM) interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(20):19879-19885.
- [28] SONG Y, JIANG J, HE Y Q, et al. Partial discharge detection based on optimization of optical probe and Sagnac interference[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71:1-9.
- [29] HOSHINO T, MITO K, NAGASHIMA A, et al. Determination of the thermal conductivity of argon and nitrogen over a wide temperature range through data evaluation and shock-tube experiments[J]. International Journal of Thermophysics, 1986, 7(3):647-662.
- [30] SUN L, VENART J E S. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and heat capacity of gaseous argon and nitrogen[J]. International Journal of Thermophysics, 2005, 26(2):325-372.
- [31] CAO J N, ZHANG K K, WANG Z, et al. Optic fiber methane gas sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy[C]//2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics. Chengdu, China. IEEE, 2010;1-5.
- [32] 齐汝宾, 赫树开, 李新田, 等. 基于 HITRAN 光谱数据库的 TDLAS 直接吸收信号仿真研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(1):172-177.
- QI Rubin, HE Shukai, LI Xintian, et al. Simulation of TDLAS direct absorption based on HITRAN database[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(1):172-177.

作者简介:



吴睿涵

吴睿涵(1998),男,硕士在读,研究方向为电力设备状态监测及光学传感应用(E-mail: wran243255032@163.com);

何亚倩(1999),女,硕士在读,研究方向为电力变压器状态监测与故障诊断;

江军(1988),男,博士,研究员,博士生导师,研究方向为电力设备状态监测及光学传感应用。

Temperature and pressure characteristics of dissolved acetylene in transformer oil based on photothermal interference detection system

WU Ruihan¹, HE Yaqian¹, JIANG Jun¹, WANG Xiangchuan², FAN Lidong³

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Jiangsu Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion), Nanjing 211106, China; 2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 3. Hangzhou Qiantang River Electric Group Co., Ltd., Hangzhou 311243, China)

Abstract: Photothermal interference (PTI) is a new optical method for gas detection. Due to its high sensitivity, high accuracy, and "zero background" advantages, it is expected to be promoted and applied in the field of dissolved gas analysis (DGA). However, the influence of the temperature and pressure of dissolved gases in oil on the photothermal phase is not yet clear. To improve the applicability of PTI technology in the DGA, an intensity-modulated-PTI-based acetylene sensing scheme using a Herriott cell is proposed. Experimental measurements are conducted on mixed gases containing acetylene and other characteristic gases to simulate fault conditions in transformer oil, and the influence of temperature and pressure on the detection results during the measurement process is focused. It is found that the photothermal phase increases with decreasing temperature or increasing pressure. Therefore, the accuracy and stability of acetylene detection depend on the reasonable setting of temperature and pressure during the detection process. The system demonstrates a strong linear relationship with acetylene concentration, with a detection sensitivity of $0.151 \text{ mV}/(\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$ and a detection lower limit of $5.3 \mu\text{L}/\text{L}$. The proposed solution provides insights and lays the foundation for the future development of a new type of DGA based on PTI technology.

Keywords: oil-immersed transformer; dissolved gas analysis (DGA); acetylene detection; photothermal interference method; Sagnac interferometer; temperature-pressure characteristic

(编辑 陆海霞)