

基于近红外 TDLAS 变压器油中溶解气体在线检测装置

陈 杨, 戴景民*, 王振涛, 杨宗举

哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘 要 变压器绝缘油以链烷烃(C_nH_{2n+2})为主要化学成分,在变压器长期运行过程中因电弧、放电、过热、受潮等原因导致化学键逐步发生断裂,产生与故障有关的故障判别气体(CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO 和 CO_2),因此变压器绝缘油中会溶解多组分气体,故需要一种多组分气体的在线检测装置,以保证变压器的正常运行。针对电力行业装配需求,研制基于可调谐激光吸收光谱法(TDLAS)多组分气体的在线检测装置。针对6种故障特征气体的近红外吸收波段,分别选取1580,1654,1626和1530 nm四个近红外激光器,使用分时扫描的时分多路技术,实现对多组分气体的分时快速顺序检测并采用波长调制技术,消除背景气体的交叉干扰。主要检测气体为绝缘油化学键断裂所产生的烃类化合物(CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 和 C_2H_6)和碳氧化物(CO 和 CO_2)。在线检测,与变压器油气象色谱测量方法进行对比实验,并对其进行工况稳定性测试。实验结果表明:乙炔浓度测量范围为 $0.5\sim 1\,000\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$,范围小于 $5\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最大测量误差小于0.8, $5\sim 1\,000\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最大误差在 $6\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下;甲烷、乙烷、乙烯的浓度测量范围为 $0.5\sim 1\,000\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$,最大测量误差小于 $6\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$;碳氧化物(CO 和 CO_2)测量范围分别为 $25\sim 5\,000$, $25\sim 15\,000\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$,最大测量误差分别在2与 $20\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。所设计的近红外 TDLAS 多组分气体检测装置能够用于变压器油中溶解气体的在线检测,测量的气体浓度满足在线检测要求,能够稳定运行且适应恶劣工况条件,为检测变压器油中溶解气体在线测量提供了有效的实践经验。

关键词 TDLAS; 近红外光谱; 故障气体检测; 多组分气体检测

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)12-3712-05

引 言

电网进行可靠供电对变压器稳定地运行具有较高的需求^[1]。变压器健康状态以绝缘油中气体浓度作为判别依据^[2]。由此,获取溶解在变压器油里的气体浓度以确定变压器的健康状态对于有效维护电网的运行非常重要。

常规的混合气体检测手段是现今油中气体测量的主要手段,随着光学技术的发展,光学检测被引进该领域。光学检测技术相比于常规混合气体检测技术在响应速度方面表现更为突出。吸收光谱法是甄别分子最为高效的检测技术,可调谐激光吸收光谱法,在吸收光谱法中尤为重要,克服了其他分析方法对谱线距离很近时难以分辨局限性,从而实现对混合气体浓度的测量。

可调谐激光吸收光谱法(TDLAS)于20世纪70年代首先由 Hinkley 和 Reid 等^[3]提出,随之在可燃气体检测方向上

进行应用。2002年, Werle 等对近中红外波段最佳吸收峰及对应的检测下限进行研究, Kormann 等^[4]选用多个激光器实现对大气中的一氧化氮、甲醛、过氧化氢痕量气体的检测。2005年, 阚瑞峰等设计了基于 TDLAS 的甲烷浓度检测的实验装置,并提出二次谐波信号幅值与浓度成正比关系的标定方法。2006年, 涂兴华等应用 TDLAS 系统检测了一氧化碳与二氧化碳浓度。2008年, Schiller 等在飞行装置上安装量子级联激光器对大气中二氧化氮、一氧化碳、甲烷等浓度测量进行研究。2012年, Wagner 等为实现对火焰中乙炔定性定量检测,基于 TDLAS 技术研制新型分光计。2013年, Nwaboth 等以 Herriott 池为装置气室完成对二氧化碳浓度的检测。同年潘卫东等^[5]应用 White 池为气室实现对矿道乙烯痕量气体检测。2015年, Pogany 等^[6]开发设计了同时检测二氧化碳与水蒸气的实验装置。2016年, He 等使用近红外波段采用 TDLAS 技术与波长调制技术进行了乙炔浓度检测的实验^[7]。2017年, Ye 等^[8]实现了中红外波段同时检测甲

收稿日期: 2020-11-02, 修订日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61875046)资助

作者简介: 陈 杨, 1990年生, 哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院博士研究生 e-mail: yongechan@163.com

* 通讯作者 e-mail: djm@hit.edu.cn

烷与乙烷的实验系统, Ivan Tadic 等^[9]在飞行器上安装中红外激光器实现对大气对流层中一氧化碳浓度的检测。与其他的工业应用场合不同, 电力系统行业对于多组分特征气体在线检测的精确度及测量速度的要求更为严苛, 中远红外波段检测的下限可达到 $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 级, 但由其造价成本高同时其运行工况需在高效制冷的条件, 使其无法满足在电厂、变电站及恶劣的环境下广泛的装配和稳定的运行。

本文以近红外波段为基础, 采用 TDLAS 技术研制了同时检测 6 种变压器油中特征气体的快速精确在线检测装置。对所研制的装置进行了现场环境试验测试, 在保证满足恶劣工况条件下的同时, 快速检测出变压器油中的 6 种特征气体数据。将数据进行计算得出变压器油中特征气体浓度, 并与常规线下检测装置(变压器油气相色谱仪, ZTGC-TD-2014D)进行对照, 根据实验结果表明在线检测装置所得数据符合国家标准。

1 装置检测原理

本文研制多组分气体检测装置采用 TDLAS 技术, 使用线宽远小于气体吸收谱线宽度的激光器, 并利用激光器的可调谐性对气体的单条特征谱线进行扫描。用特征吸收光谱高分辨率的特点, 清除非被测气体光谱对要测气体间的相互干扰^[5,10]。

根据 Beer-Lambert 定律, 一束光经过气体分子被吸收

$$H_2(x, m) = \frac{2\text{CLPS}(T)}{\Delta\nu_c \pi} \left\{ \frac{\sqrt{2}(M+1-x^2) \sqrt{M+\sqrt{M^2+4x^2}} + 4x \sqrt{\sqrt{M^2+4x^2}-M}}{m^2 \sqrt{M^2+4x^2}} - \frac{4}{m^2} \right\} \quad (6)$$

式(6)中, $M=1+x^2+m^2$, 在吸收线中心位置时, 因为此时 $x=0$, 对式(6)进行简化并得出二次谐波波峰与浓度成正比关系

$$P_2 \propto \frac{I_0 \text{CLPS}(T)}{\Delta\nu_c \pi} \left\{ \frac{2}{m^2} \left[\frac{2+m^2}{(1+m^2)^{1/2}} - 2 \right] \right\} \quad (7)$$

2 气体检测装置设计

多组分气体测量装置由激光控制光源、气室、数据采集、数据处理四部分组成, 其原理如图 1 所示。装置采用分时扫描的时分多路技术, 通过激光控制光源切换至不同的工

后, 其光强的变化为

$$I_r(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\alpha(\nu)cL] \quad (1)$$

式(1)中: $I_0(\nu)$ 为入射无吸收时辐射强度, $I_r(\nu)$ 为接收端辐射强度, $\alpha(\nu)$ 为在频率 ν 处气体的吸收截面, 为某气体的吸收系数, c 为所测气体浓度, L 为气室内光的路径长度。

采用波长调制及谐波检测技术将高频调制信号与扫描信号相叠加, 此时激光瞬时频率 $\nu(t)$ 为

$$\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

式(2)中, a 为调制幅度, $T(\bar{\nu})$ 为透射率。则

$$I_r[\nu(t)] = I_0 T(\bar{\nu}) = I_0 \sum_{n=0}^{+\infty} H_n(\bar{\nu}) \cos(2\pi nft) \quad (3)$$

$H_n(\bar{\nu})$ 为经调制的透射光傅里叶系数。透射光强度又可以表达为与特征谱线线强 $S(T)$ 气体介质压强 P 以及洛伦兹线型函数 $G(\nu)$ 有关的关系式

$$T(\bar{\nu}) = \exp(-PS(T)G(\nu)cL) \quad (4)$$

调制情况下透射率 $T(\bar{\nu})$ 瞬时表达为

$$T(\bar{\nu}) \approx 1 - \text{CLPS} \left[\frac{2}{\pi \Delta\nu_c} \frac{1}{1 + (x + m \cos 2\pi ft)^2} \right] \quad (5)$$

式(5)中, m 为调制系数, $x = \frac{\bar{\nu} - \nu_0}{\Delta\nu_c/2}$, $m = \frac{a}{\Delta\nu_c/2}$, $\Delta\nu_c$ 为吸收线半高宽。在谐波检测技术中通常选用二次谐波来检测气体浓度, 根据 Reid^[3] 等所提出的傅里叶系数的二次谐波表达式

作状态, 使激光依次入射到气室内, 实现多组分气体的分时检测; 激光经由气室后到达光电探测器, 通过放大电路和锁相放大器的调节输出二次谐波信号, 由 A/D 转换电路采集到上位机系统中, 并以 TDLAS 为理论基础得到各组分气体的数值。

本装置针对变压器所用绝缘油在长期运行下所分解出的故障气体(CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO , CO_2) 进行检测。气体吸收谱线的选取原则是激光器近红外波段能够最大限度地覆盖多种气体, 同时具有良好的单峰性。特征气体的近红外吸收谱线及线强, 如表 1 所示。

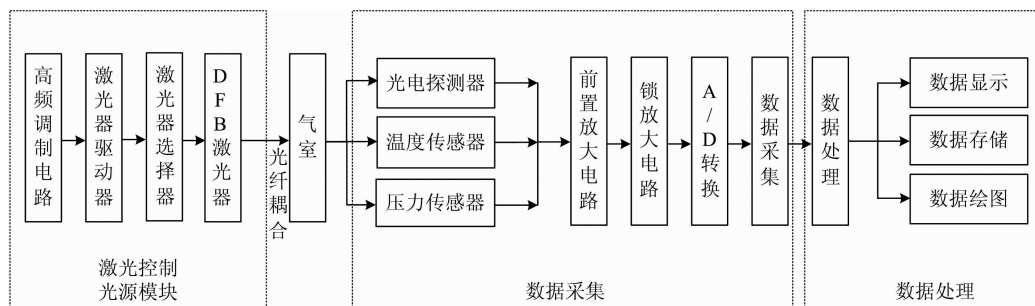


图 1 多组分气体测量装置原理

Fig. 1 Principle of multi-component gas measuring device

表 1 特征气体的吸收谱线

Table 1 Absorption lines of characteristic gases

气体	吸收谱线/nm	线强/($\text{cm} \cdot \text{mol}^{-1}$)
CO ₂	1 579.57	1.51×10^{-23}
CO	1 579.74	1.48×10^{-23}
CH ₄	1 653.72	1.34×10^{-21}
C ₂ H ₄	1 626.8	6.47×10^{-21}
C ₂ H ₆	1 653.32	1.436×10^{-23}
C ₂ H ₂	1 530.37	1.239×10^{-20}

通常,可调谐激光器调谐范围为 1~2 nm,不能覆盖全宽度光谱范围。CO 和 CO₂ 的吸收谱线相隔 0.17 nm, CH₄ 和 C₂H₆ 相隔 0.4 nm。选取两种 DFB 型激光器用以实现对 4 种气体的精确扫描。而 C₂H₄ 和 C₂H₂ 分别应用适于各自吸收谱线的激光器进行精确扫描,因此多组分气体检测装置通过 4 种激光器实现对 6 种特征气体的精确扫描。本装置的多组分气体检测功能,可消除背景气体交叉干扰、并同时检测多种成分气体的浓度、测量精度高、测量时间短、进行温度压力修正以适应恶劣测量环境。

3 装置标定与实验

3.1 多组分气体标定实验

在进行标定实验之前,先对气室通入高纯氮气(浓度为 99.99%),清除气室内已存气体。根据气室大小选择合理的

通气时间(本装置的时间为 10 min),之后设定气体分割仪器浓度配比数值,打开气阀通入待标定气体,当气体完全充满气室后开始标定。利用波长调制技术获得特征气体的二次谐波的幅值,对气体分割仪设置的各种特征气体浓度与相应的二次谐波幅值进行拟合,得出对应浓度的数值。为提高装置检测的准确性,需降低检测过程中基线漂移对峰值的影响。因此,本装置采用二次谐波最大峰值与最小谷值的绝对值之和来定义二次谐波幅值,如图 2 所示。

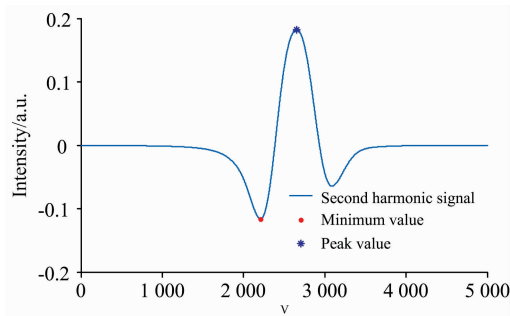


图 2 特征气体的二次谐波的幅值

Fig. 2 The amplitude of the second harmonic of the characteristic gas

特征气体在不同浓度下吸收峰的二次谐波信号峰谷值和相应浓度进行最小二乘法进行拟合,如图 3 所示,拟合度分为:乙炔 0.999 4、甲烷 0.999 3、乙烷 0.998 0、乙烯 0.999 5、一氧化碳 0.997 7、二氧化碳 0.996 4。

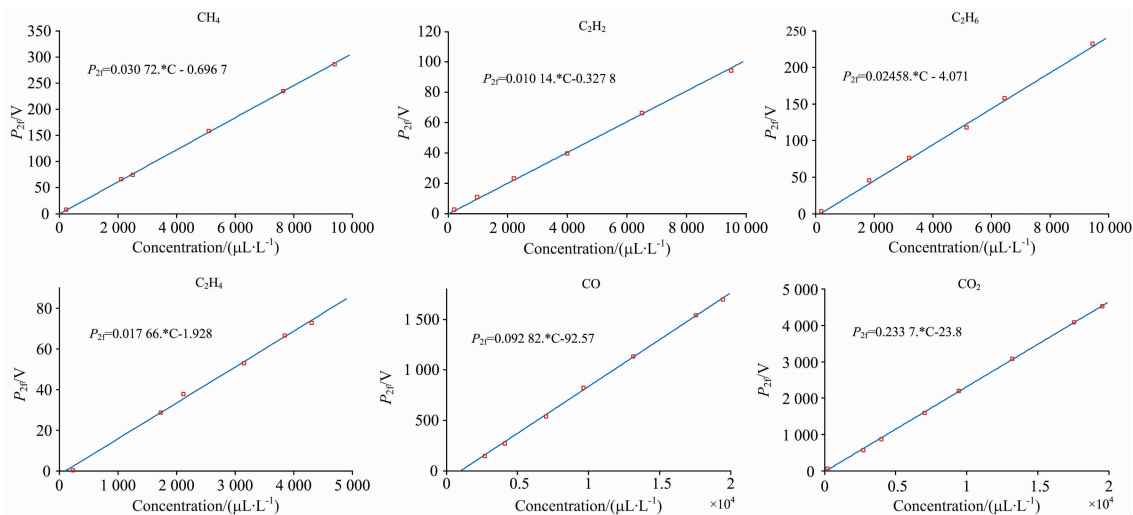


图 3 特征气体的二次谐波信号峰谷值和相应浓度的拟合曲线

Fig. 3 The fitting curve of the peak and valley value of the second harmonic signal of the characteristic gas and the corresponding concentration

3.2 实验及验证

在绝缘油检测室对本文装置,如图 4(a),进行准确性验证。选取同组变压器油中溶解气体与变压器油气相色谱仪(型号 ZTGC-TD-2014D)进行对照实验,如图 4(b),对照实验数据如表 2。

为验证装置在复杂情况下的运行稳定性和适应性,在实

际现场对其进行了 100 h 的连续工况测试,采样间隔为 30 min,数据如图 5 所示。

本文研制的多组份气体在线检测装置与变压器油气相色谱仪(型号 ZTGC-TD-2014D)进行对照实验,试验共分三组,根据表 2 的实验结果可以看出:CO₂ 浓度的测量误差小于 20 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, CO 浓度的测量误差小于 2 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, CH₄ 浓度的

表 2 特征气体实时检测数据与对照数据

Table 2 Characteristic gas real-time detection data and control data

组分	实验组 1/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)			实验组 2/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)			实验组 3/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)		
	TDLAS	气相色谱	误差	TDLAS	气相色谱	误差	TDLAS	气相色谱	误差
CO	410.85	411.33	-0.48	409.22	407.50	1.72	454.86	455.60	-0.74
CO ₂	428.89	447.55	-18.66	465.16	478.70	-13.54	490.00	479.00	11.00
CH ₄	5.92	7.01	-1.09	8.45	8.40	0.05	5.70	5.40	0.30
C ₂ H ₂	1.14	1.93	-0.79	1.09	1.00	0.09	1.16	1.10	0.06
C ₂ H ₄	30.86	36.60	-5.74	52.46	49.30	3.16	34.43	35.90	-1.47
C ₂ H ₆	12.62	16.37	-3.75	13.20	11.30	1.90	10.70	9.20	1.50

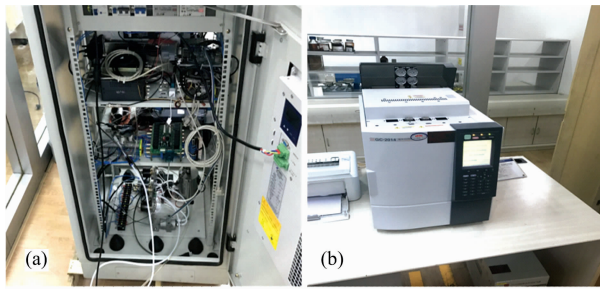


图 4 变压器油特征气体检测装置

Fig. 4 Transformer oil characteristic gas detection devices

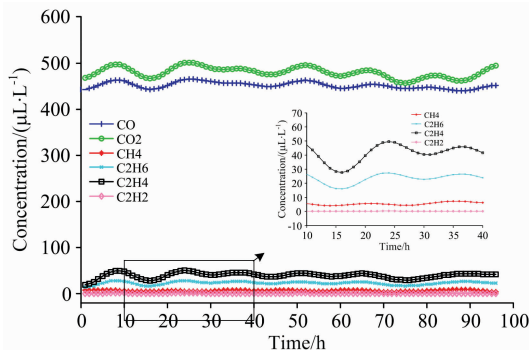


图 5 多组分气体实时监控数据

Fig. 5 Real-time monitoring data of multi-component gases

测量误差在实验组 2 与实验组 3 均在 $1 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 实验组 1 的误差也仅仅只有 $1.09 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, C₂H₂ 浓度的三组实验测量误差均在 $1 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, C₂H₄ 浓度的测量误差小于 $6 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, C₂H₆ 浓度的测量误差小于 $4 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在实际工况稳定性测试中, 连续进行了 100 h 的运行检测, 气体浓度检测未发生明显跳变, 其稳定性满足在线检测要求, 综上所述, 本文装置为检测变压器油中溶解气体的在线检测提供了有效的实践经验。

4 结论

采用可调谐激光吸收光谱法, 面向变压器油中 6 种特征气体, 研制了基于近红外波段的多组分气体在线检测装置。根据分时扫描的时分多路技术, 实现对 6 种特征气体测量, 实验结果表明:

(1) 运用波长调制技术及标定手段可以消除背景气体的交叉干扰, 提高检测特征气体浓度的精度、降低检测特征气体浓度的测量时间, 并适应变电站及电厂等工况条件恶劣的测量环境; (2) 在实际现场测试中, 除 CO₂ ($20 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下) 以外, 其他气体浓度的测量误差均在 $6 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 测量精度完全满足复杂工况的生产需求; (3) 基于 TDLAS 变压器油中溶解的特征气体测量装置的成功研制, 为变压器中特征气体的在线检测提供了一种较为精准的有效装置。

References

- [1] Duval M. Electrical Insulation Magazine IEEE, 2002, 18(3): 8.
- [2] Faiz J, Soleimani M. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1239.
- [3] Reid J, Shewchun J, Garside B, et al. Applied Optics, 1978, 17(2): 300.
- [4] Kormann R, Fischer H, Guck C, et al. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2002, 58(11): 2489.
- [5] PAN Wei-dong, ZHANG Jia-wei, DAI Jing-min, et al (潘卫东, 张佳薇, 戴景民, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2012, 32(10): 2875.
- [6] Pogany A, Wanger S, Werhahn O, et al. Applied Spectroscopy, 2015, 69(2): 257.
- [7] He Qixin, Zheng Chuantao, Liu Hifang, et al. Infrared Physics & Technology, 2016, 75: 93.
- [8] Ye Weilin, Zheng Chuantao, Tittel F K, et al. Proc SPIE 10111, Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XIV. 1011134, 2017, <https://doi.org/10.1117/12.2250941>.
- [9] Ivan Tadic, Uwe Parchatka, Horst Fischer, et al. Applied Physics B—Lasers and Optics, 2017, 123(5): 1.
- [10] Sepman A, Ogren Y, Qu Zhenchao, et al. Energy & Fuels, 2019, 33(11): 11795.

A Near-Infrared TDLAS Online Detection Device for Dissolved Gas in Transformer Oil

CHEN Yang, DAI Jing-min^{*}, WANG Zhen-tao, YANG Zong-ju

School of Instrumental Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract Transformer insulating oil uses paraffin (C_nH_{2n+2}) as the main chemical component. Due to electric arc, discharge, overheating, moisture, etc., the chemical bonds are broken, and characteristic gases (methane, ethane, ethylene, acetylene, carbon dioxide, carbon monoxide) are generated during the long-term operation of the transformer. Therefore, Multi-component gas will be dissolved in transformer insulating oil, so an online detection device for multi-component gas is needed to ensure the normal operation of the transformer. According to the assembly requirements of the power industry, this paper conducts an online detection device of 6 types of fault characteristic gases based on near-infrared tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS). Based on the near-infrared absorption bands of 6 types of fault characteristic gases, the device selects four near-infrared lasers at 1 580, 1 654, 1 626 and 1 530 nm respectively. It uses the time-division multiplexing technology of time-sharing scanning to achieve fast time-sharing of multi-component gases. Sequentially detect and adopt wavelength modulation technology to eliminate the cross-interference of the background gas. The designed near-infrared TDALS multi-component gas detection device mainly detects methane (CH_4), ethane (C_2H_6), ethylene (C_2H_4), acetylene (C_2H_2), carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO_2). The developed experimental device is verified with the traditional transformer oil dissolved gas method (transformer oil meteorological chromatographic measurement method), and the working condition stability test is carried out. The measurement range of acetylene concentration is $0.5 \sim 1\,000 \mu L \cdot L^{-1}$. When the range is less than $5 \mu L \cdot L^{-1}$, the maximum measurement error is less than $0.8 \mu L \cdot L^{-1}$. When the range is $5 \sim 1\,000 \mu L \cdot L^{-1}$, the maximum error is below $6 \mu L \cdot L^{-1}$; the concentration measurement range of methane, ethane, and ethylene is $0.5 \sim 1\,000 \mu L \cdot L^{-1}$, the maximum measurement error is less than 6 ppm; The measurement ranges of CO and O_2 are $25 \sim 5\,000$ and $25 \sim 15\,000 \mu L \cdot L^{-1}$, and their maximum measurement errors are below 2 and $20 \mu L \cdot L^{-1}$ respectively. The designed near-infrared TDALS multi-component gas detection device can be used for online detection of dissolved gases in transformer oil, and the measurement meets the requirements of online detection. It can operate stably and adapt to harsh working conditions. The successful design of this on-line detection device provides practical experience for on-line measurement of dissolved gases in the detection of transformer oil.

Keywords TDLAS; Near infrared spectroscopy; Fault gases detection; Multi-component gas detection

(Received Nov. 2, 2020; accepted Mar. 8, 2021)

* Corresponding author