

## 中红外谐波检测背景信号漂移的修正方法

邹丽昌<sup>1</sup>, 黄俊<sup>4</sup>, 李峰辉<sup>1</sup>, 邓瑶<sup>1</sup>, 邵国栋<sup>1</sup>, 阮真<sup>4</sup>, 卢志民<sup>1, 2, 3</sup>, 姚顺春<sup>1, 2, 3\*</sup>

1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640
2. 广东省能源高效清洁利用重点实验室, 广东 广州 510640
3. 广东省能源高效低污染转化与工程技术研究中心, 广东 广州 510640
4. 广州珠江电力有限公司, 广东 广州 511458

**摘要** 可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)由于具有高灵敏度、高分辨率、非侵入及实时检测等特点,被广泛应用于燃烧诊断、痕量气体监测、工业过程控制等领域中。波长调制光谱(WMS)的二次谐波(2f)检测是最常用的 TDLAS 气体传感方法之一。激光器作为 TDLAS-WMS 在线检测系统中最核心的部件之一,在长期运行过程中会由于其工作温度等因素变化,引起输出激光波长漂移和 2f 背景信号基线变化,从而导致气体浓度反演的精确度和 TDLAS-WMS 在线检测系统的稳定性降低。针对上述问题,根据 NO 气体分子在中红外波段 5.176~5.189  $\mu\text{m}$  的基频吸收特性,选择峰值发射波长位于 5.184  $\mu\text{m}$  的分布反馈式连续波量子级联激光器(DFB-CW QCL),分析了输出激光中心波长对应的峰值采样点位置随采样时间变化的漂移规律和 2f 吸收及其背景信号的漂移特性。基于上述分析,提出了以 2f 信号平均峰峰值替代 2f 信号峰值建立气体浓度反演模型以修正 2f 背景信号基线漂移,并结合以信噪比最优为 2f 背景信号波长漂移修正原则的 2f 背景信号漂移综合修正方法,以消除 TDLAS-WMS 在线检测系统长期连续检测过程中 2f 背景信号漂移对气体浓度反演结果的不利影响。研究表明,2f 信号平均峰峰值随配置的 NO 样气浓度的增加而增大,这两者呈现较好的线性关系,其拟合曲线的线性拟合度  $R^2$  达到了 0.999 9。在使用体积浓度为  $20 \times 10^{-6}$  NO 气体样品开展的连续 60 min 监测实验中,波长漂移修正后,反演浓度的标准偏差由波长漂移修正前的  $0.19 \times 10^{-6}$  下降到了  $0.07 \times 10^{-6}$ ,反演浓度的最大相对误差由波长漂移修正前的 6.30% 下降到了 3.85%,相对误差均方值由波长漂移修正前的 24.39% 下降到了 9.99%。结果显示,该 2f 背景信号漂移综合修正方法可以有效地抑制 2f 背景信号漂移对气体浓度反演结果的影响,显著提高了 TDLAS-WMS 在线检测系统连续监测的灵敏度、精确度和稳定性。

**关键词** 激光吸收光谱; 背景信号漂移; 中红外谐波检测; NO 浓度

**中图分类号:** O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)02-0408-06

### 引言

可调谐激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)利用激光器窄线宽和波长可调谐等特性,具有高灵敏度、高分辨率、实时检测等优点,已被广泛应用于大气环境痕量气体检测<sup>[1]</sup>、工业生产过程气体检测<sup>[2]</sup>、燃烧诊断<sup>[3]</sup>等众多领域。TDLAS 检测通常分为直接吸收法(direct absorption spectroscopy, DAS)和基于波长调制的谐波检测法(wavelength modulation spectroscopy,

WMS)。在对检测系统灵敏度要求更高,检测下限要求更低的情况下,谐波检测法因其可以有效降低检测系统中低频噪声的干扰,而具有更大的优势。偶数次谐波信号的峰值与气体吸收谱线的中心位置对应,在实际应用中通常选择信号峰值最大的 2f 信号用于气体浓度的检测。

在实际长期检测过程中,可调谐激光器受内、外部温度变化等因素的影响,会导致波长漂移和激光光强抖动等。当激光的输出波长产生漂移时,不仅会影响吸收信号的振幅,还会引起气体吸收谱的畸变。信号幅度的波动以及频域内谐波信号的漂移和抖动效应会导致系统性能显著下降,使气体

收稿日期: 2020-01-05, 修订日期: 2020-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676073), 广州市科技计划重点项目(201904020017), 中央高校基本科研业务费专项(2018KZ09)资助

作者简介: 邹丽昌, 1995 年生, 华南理工大学电力学院硕士研究生 e-mail: 1549420845@qq.com

\* 通讯作者 e-mail: epscyao@scut.edu.cn

的反演浓度产生误差,并恶化检测极限<sup>[4]</sup>。为了保持激光输出波长的稳定,袁松等<sup>[5]</sup>设计了温度补偿电路,通过实时调整激光器的工作温度,对激光器的波长漂移进行补偿和稳定。陈昊等<sup>[6]</sup>设计搭建了一套高精度恒温控制系统,对激光器管壳进行恒温控制,有效消除了由于室温变化引起的背景信号漂移。以上研究是从激光器温度控制的角度来消除波长漂移,对控温系统提出了更高的要求,在一定程度上增加了检测系统的复杂性和成本。Werle 等<sup>[7]</sup>采用激光/样品双调制技术有效地抑制了漂移效应引起的背景波动。Kluczynski 等<sup>[8]</sup>和 Ruxton 等<sup>[9]</sup>采用双光束系统,即设置参考光路来对背景信号的漂移情况进行跟踪,进而对背景进行采集和消除。这些研究是通过增加系统装置与复杂性来减少系统背景信号漂移对测量结果的影响。唐七星等通过对光谱信号进行相关性分析来修正背景信号漂移。赵迎等提出了背景信号实时搜索方法,通过调整激光器的扫描电流范围使得激光器波长在吸收区域和无吸收区域来回移动,采用相关性分析方法提取无吸收区域的谐波信号作为背景信号,从而消除波长漂移引起的背景信号改变带来的反演误差。这些方法(请参阅本刊 38 卷 11 期和 35 卷 11 期)修正了波长在频域上的漂移,但同时产生的信号幅值波动而导致的反演浓度误差并未有效解决,其中一种消除方法还需要频繁改变扫描电流范围,对设备性能要求较高。

因此,在不增加装置和系统复杂性的前提下,提出了一种采用  $2f$  信号平均峰峰值替代  $2f$  信号峰值,并结合以信噪比最优为波长漂移修正原则的综合修正方法,旨在克服  $2f$  背景信号漂移的影响。通过搭建中红外 TDLAS-WMS 检测 NO 的实验系统,验证该方法的可行性。

## 1 理论分析

### 1.1 $2f$ 背景信号理论分析

WMS 技术已被广泛应用于 TDLAS 痕量气体检测中,通过在激光器低频锯齿波扫描信号的基础上加载高频正弦波调制信号,使激光发射波长发生调制。激光器的出光频率为

$$\nu(t) = \nu_c + \delta\nu \cos(\omega t) \quad (1)$$

式(1)中,  $\nu_c$  为中心频率,  $\delta\nu$  为频率调制幅度。出射激光经过待测气体后被探测器探测后输入锁相放大器进行  $2f$  信号解调。

随着注入电流的改变,激光器频率被调制的同时,激光光强也会被调制<sup>[10]</sup>。激光强度存在线性和非线性调制

$$I_0(t) = I_0 [1 + K_1 \delta\nu \cos(\omega t + \varphi_1) + K_2 \delta\nu^2 \cos(2\omega t + \varphi_2)] \quad (2)$$

式(2)中,  $I_0$  为平均激光强度,  $K_1$  和  $K_2$  为线性强度调制系数和非线性强度调制系数,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  为强度调制和频率调制之间的线性和非线性相移。

通常在无目标气体吸收的情况下,由于光学系统中存在有限频率相关传输  $\beta(\nu_c, \delta\nu, t)$ ,它对探测器上总激光强度调制有贡献,所以经过检测系统后的激光强度可以写成

$$I(\nu_c, \delta\nu, t) = \beta(\nu_c, \delta\nu, t) I_0(\nu_c, \delta\nu, t) \quad (3)$$

$\beta(\nu_c, \delta\nu, t)$  具有波长和长度依赖性,其主体结构一般拥有较稳定的特性。在标准具长度不变的情况下,背景信号和

波长存在对应关系。因此,随着波长在时域上的漂移,背景信号也产生相同程度的漂移,导致系统的信噪比不断降低。

在检测过程中,由于背景信号含有非线性部分,而非线性部分就会引起与气体吸收无关的剩余幅度调制(residual amplitude modulation, RAM),其存在会引起  $2f$  信号的畸变,造成基线漂移<sup>[10]</sup>,从而导致  $2f$  信号的对称性变化及幅值抖动。

### 1.2 信噪比计算

采用信噪比最优作为波长漂移的修正原则,信噪比的定义为

$$\text{SNR} = \frac{(\text{Average Vpp})_{2f \text{ signal}}}{SD_{2f \text{ Background}}} \quad (4)$$

式(4)中,  $(\text{Average Vpp})_{2f \text{ signal}}$  为  $2f$  吸收峰两侧峰峰值的平均值,即  $2f$  吸收信号平均峰峰值;  $SD_{2f \text{ Background}}$  为  $2f$  吸收信号未吸收段,即背景信号的标准偏差。

### 1.3 $2f$ 背景信号漂移修正方法

一般而言,先在气体池中通入零气采集  $2f$  背景信号,然后将其近似作为测量所得  $2f$  吸收信号的背景信号进行扣除<sup>[11]</sup>。然而,激光器在长期连续运行过程中,由于温度波动等原因,其中心波长会在一定的范围内来回漂移,造成背景信号不断发生变化,信噪比也会随着漂移程度的加剧而呈现下降趋势。因此,这种情况下如果直接使用通入零气时的背景信号进行扣除反而会引入额外的噪声,增大测量误差。在测量过程中,背景信号主体结构比较稳定,在一定时间内其形状大小不会发生较大改变,只是会随着时间产生波长和基线漂移。为减少背景信号漂移的影响,采用  $2f$  信号平均峰峰值替代  $2f$  信号峰值建立气体浓度反演标定模型来修正基线漂移,并同时以信噪比最优作为波长漂移修正原则,这种背景信号漂移综合修正方法的具体流程如图 1 所示。

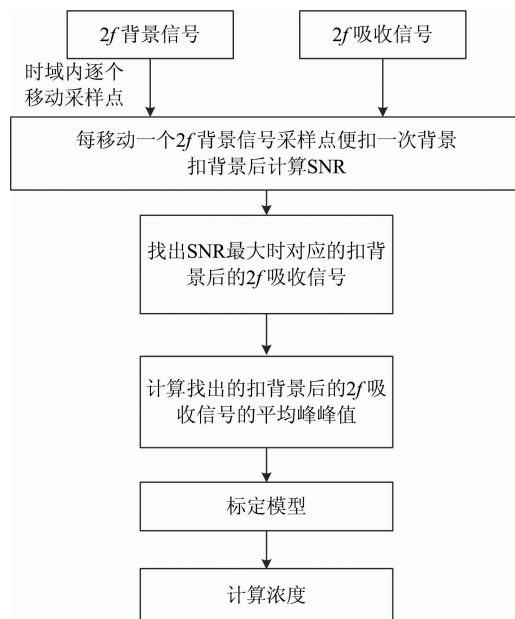


图 1 背景信号漂移修正算法流程图

Fig. 1 Flow chart of background signal drift correction algorithm

首先用谐波信号平均峰峰值替代谐波信号峰值,利用其和测量浓度成正比的关系建立系统标定模型,然后利用程序将背景信号数据在指定的采样点范围内连续移动,在此过程中气体  $2f$  吸收信号不断扣除背景信号并计算信噪比。当  $2f$  背景信号在指定移动范围内扣除和计算完毕时,便得到了信噪比在指定移动范围内的变化,信噪比曲线中的最大值即代表  $2f$  吸收信号未吸收段与对应的  $2f$  背景信号形状最为吻合,即此时  $2f$  背景信号与  $2f$  吸收信号的波长是一一对应。其信噪比最大值对应移动的采样点数即为由于温度变化等因素所导致的波长漂移距离。

## 2 实验部分

选用 NO 气体作为检测对象,所搭建的实验系统如图 2 所示。光源为分布反馈式连续波量子级联激光器(DFB-CW QCL),发射波长位于  $5.18 \mu\text{m}$  附近的激光。激光经过平面镜反射后入射到  $25 \text{ cm}$  单光程的气体池被池内气体吸收,从气体池出射出来的激光经过离轴抛物面镜聚焦后,由中红外探测器探测并将光信号转换为电信号后输入多通道锁相模块进行  $2f$  信号解调,解调后的  $2f$  信号由数据采集卡采集,最后传输至计算机进行数据处理。

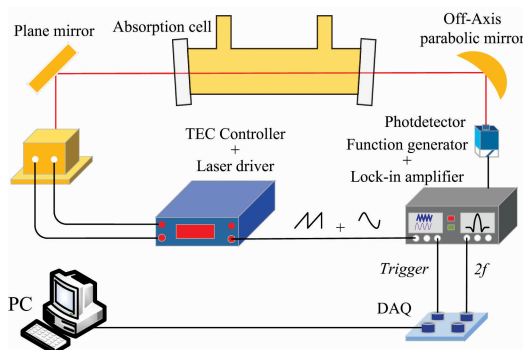


图 2 TDLAS 实验装置图

Fig. 2 Experimental schematic of TDLAS

实验中,设置锯齿波扫描频率为  $2 \text{ Hz}$ ,正弦调制频率为  $5 \text{ kHz}$ ,调制电压为  $0.15 \text{ V}$ ,数据采集模块的采集速率为  $10 \text{ kHz}$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 谱线选择

吸收谱线的选取一般有两个原则:(1)线强足够强,以获得较高的检测灵敏度;(2)避开其他气体吸收谱线如  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  的干扰。如图 3 所示为常压、室温条件下 NO 气体分子在中红外区域波数为  $1927 \sim 1932 \text{ cm}^{-1}$  范围内的吸收谱线及模拟的吸光度,可见在这个波数范围内没有  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  等谱线的干扰,NO 气体分子在  $1929.021 \text{ cm}^{-1}$  的吸收谱线强度最大。因此,本实验选择了波数为  $1929.021 \text{ cm}^{-1}$  的 NO 吸收谱线。

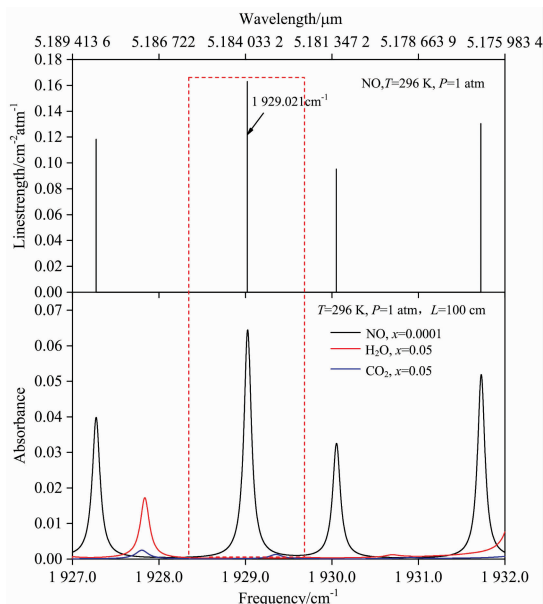


图 3 HITRAN 数据库中  $1927 \sim 1932 \text{ cm}^{-1}$  范围内 NO,  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  吸收谱线强度及吸光度

Fig. 3 Absorption line strengths and absorbances of NO,  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  with wavenumber from  $1927$  to  $1932 \text{ cm}^{-1}$  in HITRAN database

### 3.2 基于谐波信号平均峰峰值的浓度反演模型建立

利用配气系统,采用高纯( $99.99\%$ )  $\text{N}_2$  稀释  $100.4 \times 10^{-6}$  的 NO 标气,分别配置体积浓度为  $100 \times 10^{-6}$ ,  $80 \times 10^{-6}$ ,  $60 \times 10^{-6}$ ,  $45 \times 10^{-6}$ ,  $30 \times 10^{-6}$ ,  $25 \times 10^{-6}$ ,  $15 \times 10^{-6}$ ,  $10 \times 10^{-6}$  和  $7 \times 10^{-6}$  的 NO 样气。为避免残余气体干扰,在每一个浓度的样气测量前,先往气体池内通入高纯  $\text{N}_2$  吹扫,待吹扫完全后,通过数据采集卡采集  $2f$  信号作为背景信号。之后在气体池中通 NO 样气,待稳定后采集  $2f$  信号。标定时,由于  $2f$  背景信号和其对应的  $2f$  吸收信号采集时间间隔很短, $2f$  背景信号的漂移可忽略不计,该  $2f$  背景信号可直接作为对应的  $2f$  吸收信号的背景来扣除。扣除原先所采集的背景信号后的  $2f$  吸收信号如图 4 所示。由于峰

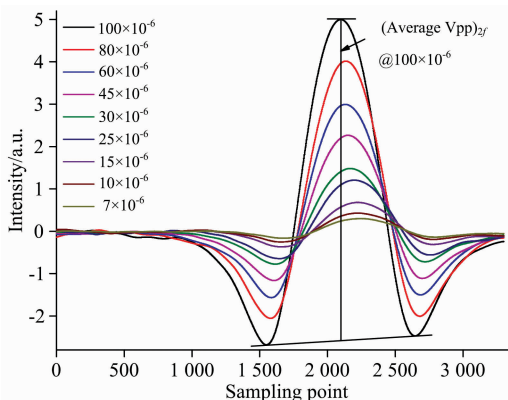


图 4 不同 NO 配置浓度水平下的  $2f$  信号  
Fig. 4 The  $2f$  signal for different NO concentration levels

值吸收波长处气体吸收增强,  $2f$  信号的平均峰峰值随着气体浓度的增加而增大。

采用谐波信号平均峰峰值替代谐波峰值获得的 NO 标定曲线如图 5 所示, 可见谐波信号平均峰峰值和 NO 浓度呈现了很好的线性关系, 线性拟合度  $R^2$  达到了 0.999 9, 谐波信号平均峰峰值不受  $2f$  信号基线漂移的影响, 因此可以有效降低检测过程中因  $2f$  信号基线漂移而产生的测量误差。NO 的标定曲线表示为

$$y = 13.006\ 13x + 1.263\ 57 \quad (5)$$

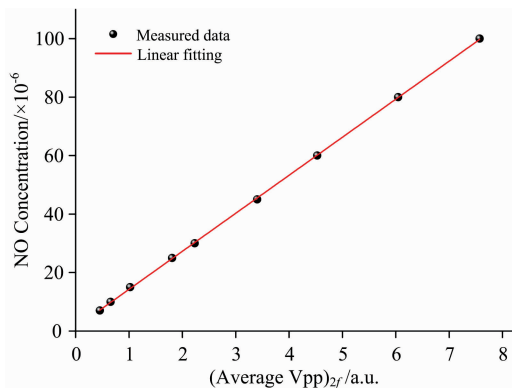


图 5 NO 配置浓度和  $2f$  信号平均峰峰值的实测数据点和线性拟合

Fig. 5 Measured data dots and linear fitting of NO concentration and  $(\text{Average Vpp})_{2f}$

### 3.3 系统背景信号漂移分析

实验设置参数不变, 持续向气体吸收池内通入 NO 含量为  $100.4 \times 10^{-6}$  的标准气体, 3 h 内共采集到 7 251 组数据。 $2f$  吸收信号峰值对应的采样点位置即为气体吸收中心波长对应的位置。峰值对应的采样点位置随连续采样次数(运行时间)的变化, 如图 6 所示。由此可知, 激光器在连续运行的 3 h 内, 气体吸收峰对应的采样点位置先向小采样点数方向漂移, 达到最大漂移量后, 再逐渐往回大采样点数方向漂移。以图 7 所示结果为例, 在连续采样过程中, 两个不同时刻的  $2f$  吸收信号都发生了不同程度的漂移, 采样时刻 2 的漂移比采样时刻 1 的严重, 扣除背景后的  $2f$  吸收信号噪声

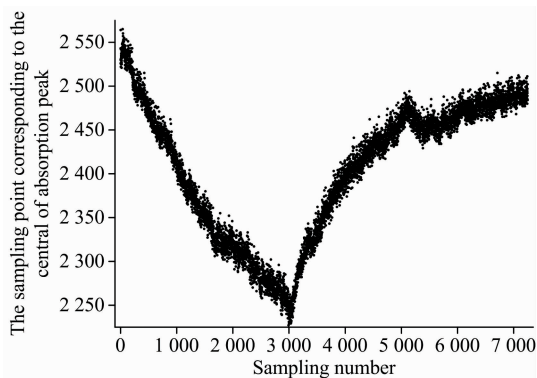


图 6 吸收峰采样点位置的漂移

Fig. 6 The drift of the sampling point position of absorption peak

较大, 且信号峰值也产生了抖动, 最终导致系统信噪比和反演浓度精度降低。与此同时, 也可以从未吸收段信号看出波长漂移和光强发生波动过程中背景信号结构比较稳定。

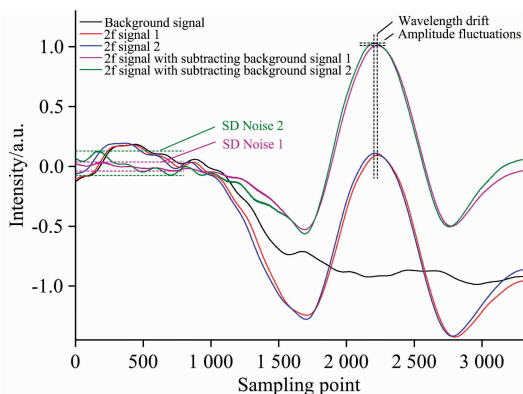


图 7 气体吸收时的  $2f$  背景信号与两个不同时刻背景信号扣除前后的  $2f$  吸收信号

Fig. 7 The  $2f$  background signal without gas absorption and the  $2f$  signals before and after background signal subtraction at two different moments

### 3.4 系统连续检测中背景信号漂移修正

在进行连续测量前, 先采集背景信号。然后利用配气系统配置 NO 含量为  $20 \times 10^{-6}$  的样气, 通入气体池内, 等待气体池内气体稳定后, 连续 60 min 采集 NO 吸收的  $2f$  信号。

利用图 1 所述方法对波长漂移进行修正, 即以信噪比最优作为波长漂移修正原则,  $2f$  吸收信号连续逐个扣除移动的背景信号, 同时计算信噪比 SNR, 得到信噪比随  $2f$  背景信号移动点数的变化关系。图 8 所示为某一时刻采集的  $2f$  吸收信号修正过程中其信噪比随  $2f$  背景信号移动点数的变化关系。信噪比最大值对应的移动点数即为由于温度变化等因素导致的波长漂移距离, 此时得到的扣除背景后的谐波信号已消除了波长漂移的影响。

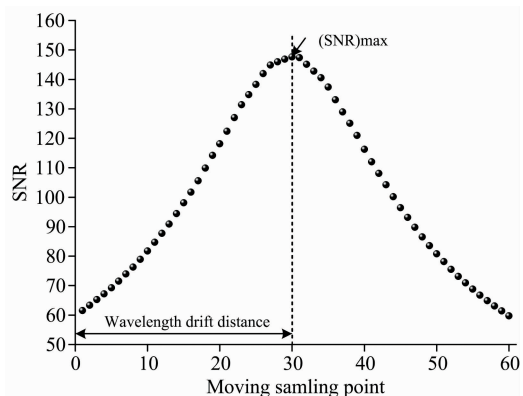


图 8 信噪比随  $2f$  背景信号移动点数的变化关系

Fig. 8 The relationship between SNR and the moving sampling point of  $2f$  background signal

利用式(5)标定模型, 计算得到背景信号波长漂移修正前和修正后的 NO 浓度随时间的变化过程, 如图 9 所示。由图 9 所示实验数据计算可得, 背景信号波长漂移修正前和修

正后反演浓度的平均值分别为  $20.97 \times 10^{-6}$  和  $20.63 \times 10^{-6}$ ，最大相对误差分别为 6.30% 和 3.85%，标准差分别为  $0.19 \times 10^{-6}$  和  $0.07 \times 10^{-6}$ ，反演浓度相对误差的均方值分别

为 24.39% 和 9.99%。实验结果表明，该修正方法有效地抑制了背景信号漂移的干扰，提高了测量结果的准确性和检测系统的稳定性。

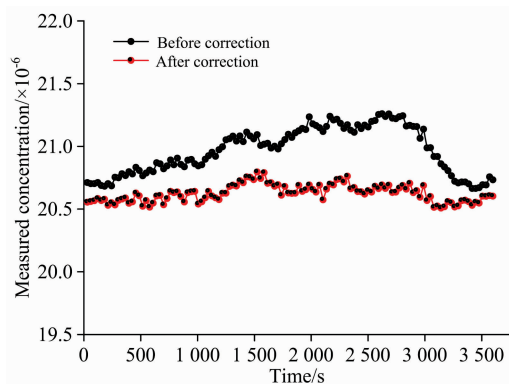


图 9 背景信号漂移修正前后连续测量得到的 NO 浓度

Fig. 9 NO concentration obtained by continuous measurement before and after background signal drift correction

## 4 结 论

针对 TDLAS-WMS 系统连续检测中的  $2f$  背景信号漂移的问题，分析了背景信号漂移随时间变化的特点，提出了以  $2f$  信号平均峰峰值替代  $2f$  信号峰值来建立标定曲线以修正背景信号基线漂移，并同时以信噪比最优为  $2f$  背景信号波长漂移修正的原则，建立了谐波背景信号漂移综合修正模型。搭建了中红外激光吸收光谱气体浓度检测实验系统，通过实验比较了  $2f$  背景信号漂移修正前后反演浓度的精度和长时间连续检测中反演浓度的准确性和系统稳定性。在标定实验中，修正方法有效地提高了系统的灵敏度和拟合曲线的线性度；在长时间的连续检测实验中，背景信号漂移修正后反演浓度的最大相对误差由 6.30% 降低到了 3.85%，标准差由  $0.19 \times 10^{-6}$  降低到了  $0.07 \times 10^{-6}$ ，相对误差的均方值由 24.39% 降低到了 9.99%。

## References

- [ 1 ] Kormann R, Fischer H, Gurk C, et al. Spectrochimica Acta Part A: Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2002, 58(11): 2489.
- [ 2 ] Barrass S, Gérard Y, Holdsworth R J, et al. Spectrochimica Acta Part A: Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2004, 60(14): 3353.
- [ 3 ] Ma L H, Lau L Y, Ren W. Applied Physics B, 2017, 123(3): 83.
- [ 4 ] Scheumann, Bodo. Optical Engineering, 1994, 33(9): 3093.
- [ 5 ] YUAN Song, KAN Rui-feng, HE Ya-bai, et al(袁 松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2013, 40(5): 242.
- [ 6 ] CHEN Hao, JU Yu, HAN Li, et al(陈 昊, 鞠 昱, 韩 立, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(6): 16.
- [ 7 ] Werle P W, Lechner S. Proceedings of SPIE, 1996, 2834: 68.
- [ 8 ] Kluczynski P, Axner O. Applied Optics, 1999, 38(27): 5803.
- [ 9 ] Ruxton K, Chakraborty A L, Johnstone W, et al. Sensors and Actuators B: Chemical, 2010, 150(1): 367.
- [ 10 ] HU Ya-jun, ZHAO Xue-hong, ZHANG Rui, et al(胡雅君, 赵学珏, 张 锐, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2013, 33(11): 1130002.
- [ 11 ] Muecke R J, Scheumann B, Slemr F, et al. Proceedings of SPIE, 1994, 2112: 87.

# Research on Correction Method of Background Signal Drift in Mid-Infrared Harmonic Detection

ZOU Li-chang<sup>1</sup>, HUANG Jun<sup>4</sup>, LI Zheng-hui<sup>1</sup>, DENG Yao<sup>1</sup>, SHAO Guo-dong<sup>1</sup>, RUAN Zhen<sup>4</sup>, LU Zhi-min<sup>1, 2, 3</sup>, YAO Shun-chun<sup>1, 2, 3\*</sup>

1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

2. Guangdong Province Key Laboratory of Efficient and Clean Energy Utilization, Guangzhou 510640, China

3. Guangdong Province Engineering Research Center of High Efficiency and Low Pollution Energy Conversion, Guangzhou 510640, China

4. Guangzhou Zhujiang Electric Power Co., Ltd., Guangzhou 511458, China

**Abstract** Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) is widely used in the combustion diagnosis, measuring trace gases and industrial process control and so on due to its high sensitivity, high resolution, non-intrusive and real-time detection. The second-harmonic ( $2f$ ) detection technology of wavelength modulation spectroscopy (WMS) is one of the main methods for TDLAS gas sensing. The laser is one of the core components of TDLAS-WMS online detection system and its output wavelength and baseline of  $2f$  background signal will drift due to changes of the laser's operating temperature and other factors during long-term operation, resulting in reduced accuracy of gas concentration inversion and stability of TDLAS-WMS online detection system. Aiming at the above problems, according to the fundamental absorption properties of NO gas molecules in the mid-infrared band of  $5.176\sim 5.189\ \mu\text{m}$ , a distributed feedback, continuous-wave quantum cascade laser (DFB-CW QCL) with the peak wavelength of  $5.184\ \mu\text{m}$  will be chosen to analyze the drift variation of the laser center output wavelength corresponding to the sampling points and the characteristics of the  $2f$  absorption and background signal drift. Based on the above analysis, the average peak-to-peak value of  $2f$  signal is used to replace the peak value of  $2f$  signal to establish the gas concentration inversion model to correct baseline drift of  $2f$  background signal as well as combining with the signal-to-noise ratio is optimized as the principle of wavelength drift correction, and the  $2f$  background signal drift correction method is finally established to eliminate the adverse effect of the  $2f$  background signal drift on the gas concentration inversion results in the long-term continuous detection of TDLAS-WMS online detection system. The results showed that the average peak-to-peak value of the  $2f$  signal increased with the concentration of NO gas. The average peak-to-peak value of the  $2f$  signal and the concentration of the NO sample showed a good linear relationship and linear fit  $R^2$  of the fitted curve reached 0.999 9. In the 60 min continuous monitoring experiment which was conducted by using NO sample with a volume concentration of  $20\times 10^{-6}$ , the standard deviation, the maximum relative error and the relative error mean square value of the inversion concentration decreased from  $0.19\times 10^{-6}$  to  $0.07\times 10^{-6}$ , decreased from 6.30% to 3.85% and decreased from 24.39% to 9.99% after the drift correction, respectively. The method can effectively suppress the influence of  $2f$  background signal drift on the gas concentration inversion result, and significantly improve the sensitivity, accuracy and stability of the TDLAS-WMS online detection system continuous monitoring.

**Keywords** Laser absorption spectroscopy; Background signal drift; Mid-infrared Harmonic Detection; NO concentration

(Received Jan. 5, 2020; accepted Apr. 19, 2020)

\* Corresponding author