

基于固定点波长调制光谱技术的气体浓度测量方法

庄欠瑶, 周宾*, 王一红, 赵荣, 汪步斌, 段拼搏

东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096

摘要 固定点波长调制光谱技术虽然具有时间分辨率高的优点,但随着激光器出光中心的波数漂移,气体浓度的测量会出现较大误差。为消除波数漂移对浓度测量的不利影响,本文提出了一种基于固定点波长调制光谱技术的气体浓度测量方法。引入一条带有封闭气池的参考光路,通过谐波高度来推算激光器出光中心的波数偏移量,使用循环迭代算法实现待测气体浓度的有效反演。搭建了一套基于固定点波长调制光谱技术的测量系统,通过改变激光器的工作温度来模拟波数漂移现象。选择 CH_4 分子在 6046.955 cm^{-1} 附近的吸收谱线进行浓度测量实验,结果显示:浓度测量的最大相对误差由 90.510% 降低至 5.204%;对于低于 70.000% 的误差,修正后均可控制在 2.000% 以内。这说明所提方法能准确计算波数偏移量,提高气体浓度的测量精度,为使用固定点调制光谱技术实现快速场反演提供了技术保障。

关键词 光谱学; 固定点波长调制光谱技术; 波数漂移; 参考光路; 浓度测量

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2330001

Gas Concentration Measurement Method Based on Fixed Wavelength Modulation Spectroscopy

Zhuang Qian Yao, Zhou Bin*, Wang Yi Hong, Zhao Rong, Wang Bu Bin, Duan Pin Bo

School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

Abstract Although fixed wavelength modulation spectroscopy has the advantage of high temporal resolution, a large measurement error of gas concentration appears with the wavenumber drift of the laser emission center. A gas concentration measurement method based on fixed wavelength modulation spectroscopy was proposed in this paper to eliminate the influence of wavenumber drift on concentration measurement. A reference optical path with a closed gas cell was introduced, and the wavenumber offset of the laser emission center was calculated according to the harmonic height. A cyclic iterative algorithm was adopted, and the gas concentration to be measured was calculated through inversion. A measurement system based on fixed wavelength modulation spectroscopy was built. The working temperature of the laser was adjusted to simulate wavenumber drift. The absorption line of CH_4 molecules near 6046.955 cm^{-1} was selected to carry out concentration measurement experiments. The results show that the maximum relative error of concentration measurement is reduced from 90.510% to 5.204%. Errors smaller than 70.000% can be controlled within 2.000% after correction. This means that the proposed method can accurately calculate the wavenumber offset, improve the measurement accuracy of gas concentration, and thereby provide technical support for fast field inversion by fixed modulation spectroscopy.

Key words spectroscopy; fixed wavelength modulation spectroscopy; wavenumber drift; reference optical path; concentration measurement

OCIS codes 300.6170; 300.6260; 300.6380

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-04-25; 录用日期: 2021-06-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0603204)、国家自然科学基金(50976024)

通信作者: *zhoubinde@seu.edu.cn

1 引言

可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术具有环境适应性强、响应速度快、非侵入等优点^[1-3],不仅可用于大气环境下的气体检测,还在燃煤锅炉、航空发动机燃烧室等流场诊断方面有着广阔的应用前景。波长调制光谱(WMS)技术^[4]是 TDLAS 技术中的一种典型方法,具有抗噪声干扰能力强、灵敏度高的特点。根据是否叠加低频扫描信号可以将 WMS 技术分为扫描波长调制光谱(Scanned-WMS)技术^[5-7]和固定点波长调制光谱(Fixed-WMS)技术^[8-10]。目前应用广泛的 Scanned-WMS 技术是使用分布式反馈(DFB)激光器对目标吸收谱线进行一定波数范围的扫描,对数据发生与采集设备的要求高,较难满足对时间分辨率需求高的场景;而 Fixed-WMS 技术无低频信号扫描,只在激光器输出固定波数处叠加高频调制信号,相对于 Scanned-WMS 技术来说,无需对吸收系数进行积分运算,峰值处的吸收光谱信息为有效信息,采集和处理固定谱线中心处的激光强度信号即可,具有时间分辨率高的优点。因此,在实现快速场反演的研究背景下,本课题组选择使用 Fixed-WMS 技术进行浓度反演。但是,Fixed-WMS 技术在使用过程中也存在一些问题:首先,将激光出光中心严格调整到谱线中心位置是很难实现的;其次,激光器在长时间运行时,驱动电流、驱动温度的漂移,环境温度的实时变化和控制电路的老化等,都会导致 DFB 激光器出光波数中心发生缓慢漂移^[11]。以上两种情况都会使探测到的信号不是峰值高度信息,极大地降低了气体参数的测量精度。唐七星等^[12]提出了一种改进的时域相关光谱修正算法,该算法通过对积分吸光度的修正消除了随机噪声、背景噪声、漂移噪声对系统的影响;该方法属于 Scanned-WMS 技术范畴,且仅考虑了测量系统的稳定性,系统的准确性(即浓度值的测量是否精确)未明确指出。祝仰坤等^[13]提出了一种基于波数漂移修正算法的免标定固定点波长调制方法,该方法通过拟合标准具测量信号来计算激光器波数的瞬时值,进而实现气体浓度的免标定测量;该方法中影响波数偏移量的参数较多,且均依赖实验测得,易受低频噪声的干扰。为了消除激光波数漂移对气体浓度测量精度的影响,魏玉宾^[14]提出了基于参考光路与参考气室的自校准方案,该方案需要实时手动调整控制器来实现对激光波数的控制,无法保证测量精度。激光器的出光波数发生变化时,

光强解调得到的二次谐波幅值不仅与气体参数有关,还与激光器的调制特性有关。传统的带参考池的修正方法^[15-16]往往认为含有误差的二次谐波全部将误差转移给气体参数,忽视了调制深度等激光特性参数的变化。因此,消除激光波数漂移影响的光谱测量系统的精度仍有待提高。

为了消除波数漂移对测量系统的不利影响,本文提出了一种基于 Fixed-WMS 技术的气体浓度测量方法。设置一条带有封闭气池的参考光路(封闭气池内的气体参数已知且在数据采集时间内无明显变化),借助标准具信号实时更新调制深度的变化;利用谐波高度计算激光器的波数偏移量,使用循环迭代算法实现待测气体浓度的精确反演。激光器在短时间内的波数偏移量很小,又因为受到采集卡存储空间的限制,长时间的监测很难实现。通过改变激光器的运行参数,使出光中心波数发生不规则波动,在达到下一平稳状态之前存在一定时间延迟;本文通过该过程模拟激光中心波数漂移现象来验证所提方法的有效性。

2 基本原理

当激光器受到频率为 f 的正弦电流调制时,激光器的出光波数 $\nu(t)$ 就会受到调制作用,其随时间的变化可表示为

$$\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos(2\pi ft + \varphi), \quad (1)$$

式中: $\bar{\nu}$ 为激光器的出光中心波数, cm^{-1} ; a 为激光器出光波数的调制深度, cm^{-1} ; f 为激光器的调制频率, kHz ; φ 为波数调制初始相角, rad ; t 为时间, s 。

在常温常压环境下,气体吸收光谱的线型函数可以近似表述为洛伦兹(Lorentz)线型函数^[17]。根据 Beer-Lambert 定律,光谱吸收率 $\alpha(t)$ 可以表示为

$$\alpha(t) = -\ln \left[\frac{I^1(t)}{I^0(t)} \right] = A\phi(\nu), \quad (2)$$

$$\phi(\nu) = \frac{1}{\pi\gamma} \frac{1}{1 + \left(\frac{\nu - \nu_0}{\gamma} \right)^2} = \frac{1}{\pi\gamma} L(x, m),$$

$$x = \frac{\Delta\nu}{\gamma} = \frac{\nu - \nu_0}{\gamma}, m = \frac{a}{\gamma}, \quad (3)$$

式中: $I^1(t)$ 为经均匀待测气体吸收后的透射光强; $I^0(t)$ 为无气体吸收的背景光强; A 为积分吸收面积; $\phi(\nu)$ 为线型函数; ν_0 为吸收谱线中心波数; $L(x, m)$ 为归一化的 Lorentz 线型函数,其中 x 是激光器偏移程度的无量纲参数, m 是激光器的调制

系数; $\Delta\nu$ 为激光器瞬时出光波数相对谱线中心的偏移量; ν 为激光器的瞬时出光波数; γ 为 Lorentz 线型函数的半峰全宽 (HWHM)。 γ 可以表示为

$$\gamma = P \sum_j (C_j 2\gamma_j), \quad (4)$$

式中: P 为气体总压力, atm; C_j 是第 j 种组分的物质的量分数, %; γ_j 是第 j 种组分的碰撞展宽系数, $\text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$ 。碰撞展宽系数是关于温度 T 的函

数, 表示为

$$\gamma_j(T) = \gamma_j(T_0) \left(\frac{T_0}{T} \right)^{n_j}, \quad (5)$$

式中: $\gamma_j(T_0)$ 为参考温度下第 j 种组分的展宽系数, 其中 T_0 ($T_0 = 296 \text{ K}$) 为参考温度; n_j 为对应的温度指数, 典型值为 0.5。

激光器出光中心在某波数处的 Lorentz 线型函数的谐波高度 H^L ^[18] 可以表示为

$$H^L = \frac{-4}{m^2} + \frac{\sqrt{2}}{m^2} \frac{(r+1-x^2)\sqrt{r+X} + 2|x|\sqrt{r-X}}{r}, \quad r = \sqrt{X^2 + 4x^2}, \quad X = 1 - x^2 + m^2. \quad (6)$$

定义光谱吸收率 $\alpha(t)$ 经过数字锁相、低通滤波后获得的二次谐波信号为 H^a , 由 (2) 式、(3) 式可得积分吸收面积为

$$A = \frac{\pi\gamma H^a}{H^L} = \frac{\pi\gamma H^a}{-4/m^2 + \sqrt{2}\{(r+1-x^2)\sqrt{r+X} + 2|x|\sqrt{r-X}\}/(m^2r)}, \quad (7)$$

最后, 反演的浓度值为

$$C = \frac{A}{PlS(T)}, \quad (8)$$

式中: $S(T)$ 为线强, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$, 是温度 T 的函数, 以 $T_0 = 296 \text{ K}$ 时的线强 $S(T_0)$ 为参考, 查找 HITRAN 数据库可以计算得到线强 $S(T)$ ^[19]; l 为光程长, cm。

3 实验系统与流程

图 1 为激光器波数漂移情况下的气体浓度测量装置示意图。函数发生器 (RIGOL DG1062z) 发出正弦调制信号 (调制频率为 10 kHz, 电压峰峰值为 1.1 V) 到激光温度电流控制器 (Stanford Research System LDC50), 对 DFB 激光器 (NLK1U5EAAA) 的输出波数进行调谐; DFB 激光器输出的激光由光

纤分束器分为四路: 第一路激光经准直器 (F240-1550 APC/FC) 准直后, 通过高分辨率光学标准具 (自由谱间距为 0.01 cm^{-1}), 然后被高带宽光电探测器 (THORLABS PDA10CF-EC, 带宽为 150 MHz) 接收, 用于获取激光瞬时频率与时间的离散响应关系; 第二路光直接被探测器 (THORLABS PDA10CS-EC, 带宽为 17 MHz) 接收, 探测器获得的是无任何吸收的背景光强 $I^0(t)$; 第三路是带有封闭气池 (石英玻璃气池, 外裹隔热保温层, $l_{\text{ref}} = 44.5 \text{ cm}$) 的参考光路, 封闭气池内的气体与待测气体种类相同且气体参数已知, 透射光强 $I_{\text{ref}}^1(t)$ 被探测器 (THORLABS PDA10CS-EC, 带宽为 17 MHz) 接收; 第四路为测量光路, 测量气池 ($l_{\text{mea}} = 20 \text{ cm}$) 中通入流量稳定的目标气体, 透射光强 $I_{\text{mea}}^1(t)$ 被探测器 (THORLABS PDA10CS-EC, 带宽为 17 MHz)

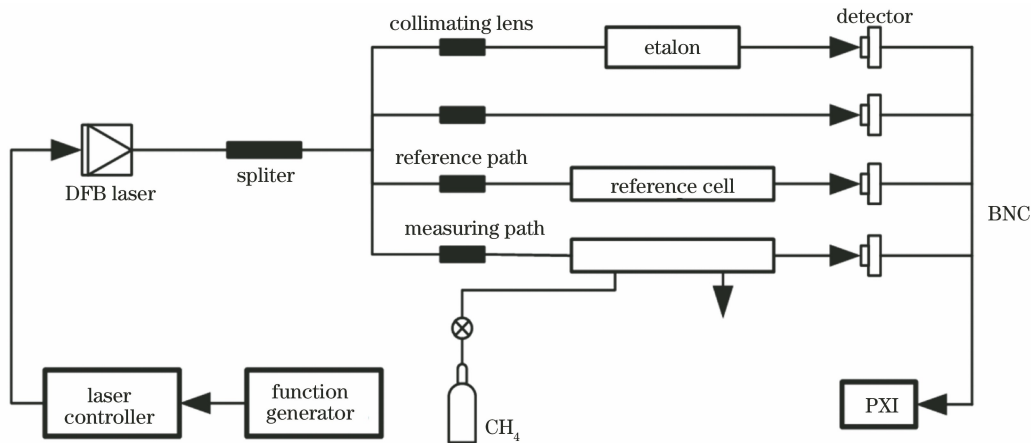


图 1 气体浓度测量装置示意图

Fig. 1 Schematic of gas concentration measurement equipment

接收。四路信号经过 BNC 传输线后被高速数据采集卡(NI PXIe-5170R, 采样频率 $f=25$ MHz)采集。两气池的温度由带有贴片式温度传感器的数显温控仪(XMT-121)测量。

实施流程步骤如图 2 所示。具体如下:

1) 环境温度 T 、压强 P 、光程 l_{ref} 、参考光路封闭气池内气体的物质的量分数 C_{ref} 已知, 根据(8)式计算积分吸收面积 A_{ref} ; 根据(4)、(5)式计算 Lorentz 展宽 γ_{ref} ; 将测得的参考光路探测信号 I_{ref}^t 、 I_{ref}^0 取对数后, 经过数字锁相、低通滤波得到光谱吸收率的二次谐波高度 H_{ref}^a ; 已知 A_{ref} 、 γ_{ref} 、 H_{ref}^a , 根据(7)式计算得到参考光路 Lorentz 线型函数的谐波高度 H_{ref}^L 。

2) 由光学标准具测得 $v(t)$ 信号, 根据(1)式拟合出调制深度 a , 计算调制系数 m_{ref} 。已知 H_{ref}^L 、 m_{ref} 、 γ_{ref} , 根据(6)式计算激光器偏移程度的无量纲

参数 x_{ref} , 得到偏移量 Δv_{ref} 。测量光路的激光器出光中心波数偏移量 $\Delta v_{\text{mea}} = \Delta v_{\text{ref}}$ 。

3) 假设测量光路中待测气体的浓度初始值为 $C_{0,\text{mea}}$, 环境温度 T 、压强 P 、光程 l_{mea} 已知, 根据(4)、(5)式计算初始展宽 γ_{mea} , 根据已知调制深度 a 计算调制系数 m_{mea} , 根据已知偏移量 Δv_{mea} 计算偏移无量纲参数 x_{mea} ; 根据(6)式计算测量光路 Lorentz 线型函数的谐波高度 H_{mea}^L 。

4) 将测量光路的探测信号 I_{mea}^t 、 I_{mea}^0 进行对数变换, 之后经过数字锁相、低通滤波处理获得光谱吸收率的二次谐波高度 H_{mea}^a ; 已知 γ_{mea} 、 H_{mea}^a 、 H_{mea}^L , 根据(7)式计算积分吸光度 A_{mea} , 最终得到浓度值 C_{mea} 。

5) 判断 $|C_{\text{mea}} - C_{0,\text{mea}}| / C_{0,\text{mea}} < \epsilon$ 是否成立, 若成立, 计算结束, $C_{\text{mea}} = C_{0,\text{mea}}$, 否则更新初始浓度值 $C_{0,\text{mea}}$, 重复步骤 3) 和 4)。

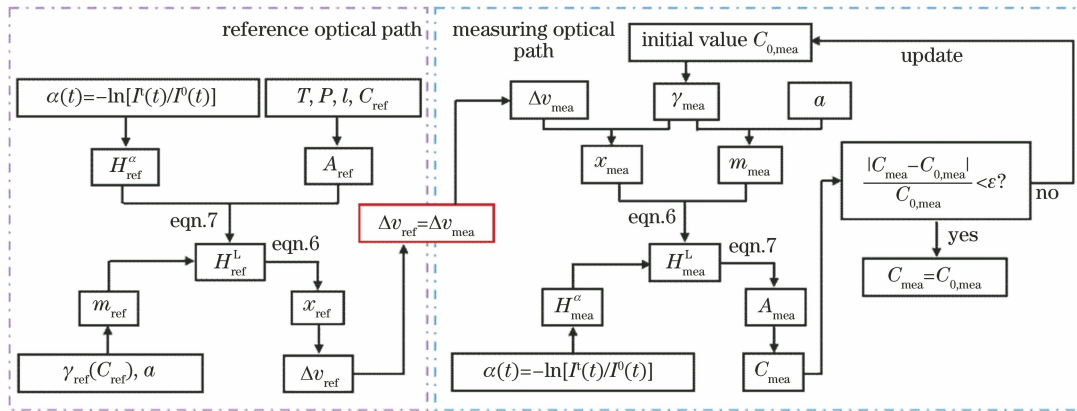


图 2 实验流程图

Fig. 2 Experimental flow chart

4 实验验证与结果

通过改变激光器的温度控制参数, 使出光中心波数发生不规则波动, 在达到下一平稳状态之前存在一定的时间延迟, 本文通用该过程模拟激光中心波数漂移现象来验证所提方法的有效性。通过实验探究了调制深度和透射吸收光强随波数漂移的变化情况, 分析了波数漂移修正前后的浓度反演误差。

实验条件与参数如下: 谱线选取的是在近红外波段吸收强且相对孤立的 CH_4 吸收谱线 6046.955 cm^{-1} (波长为 1653.73 nm), 调制频率 $f_m = 10 \text{ kHz}$, 实验数据采样频率 $f = 25 \text{ MHz}$, 实验时间为 3.5 s , 压强为 $1 \text{ atm}(101325 \text{ Pa})$; 参考光路封闭气池内 CH_4 的物质的量浓度为 1.66% , 温度为 $18.1 \text{ }^\circ\text{C}$; 测量光路待测气体 CH_4 的物质的量浓度为 0.98% , 温度为

$18.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。具体参数设置如表 1 所示。

表 1 两光路参数设置

Table 1 Parameter setting of two optical paths

Type	Cell length l / cm	Gas molar fraction $C / \%$	Cell temperature T / K
Reference path	44.5	1.66	291.1
Measuring path	20.0	0.98	291.6

本文利用参考光路的谐波幅值来计算波数偏移量。为保证偏移量计算的准确性, 对影响谐波幅值大小的参数进行分析。影响谐波高度的参数主要包括气体吸收强度参数(压力、温度、浓度、光程)和激光特性参数(调制深度、激光中心波数偏移量)两类。封闭参考气池的长度和内充气体参数为已知值, 不随激光器波数的变化而变化, 因此, 除了激光中心波数偏移量这一待求激光特性参数以外, 仍需考虑调

制深度 a 是否发生剧烈变化。在波长调制技术中, 激光波数和激光强度被同时调制, 如果调制深度 a 产生变化, 则势必带来激光波数和激光强度的变化。本文选取参考光路的调制深度 a 和透射光强的实验数据进行观察。

调制深度 a 随时间的变化如图 3 所示。可见, 调制深度在 $0 \sim 1.5$ s 内抖动明显, 1.5 s 后逐渐趋于平稳, 因此调制深度不能看作是常数, 需实时更新。由于环境噪声等因素的存在, 信号存在一定的随机性。为提高测量精度, 将杂乱的信号进行滤波去噪处理后再参与后续的计算。图 4 为激光器波数存在漂移的情况下参考光路的透射光强, 可见: 光强幅值有明显的抖动, 在 $0 \sim 1.5$ s 内光强幅值抖动得比较明显, 1.5 s 后逐渐趋于平稳, 与调制深度 a 的变化趋势大体一致。此外, 光强幅值在发生变化的同时, 吸收峰的位置也在发生变化。为了消除激光光强变化对谐波高度的影响, 先采用对数变换法处理光强信号^[20], 再通过数字锁相、低通滤波获取二次谐波, 见(2)式。

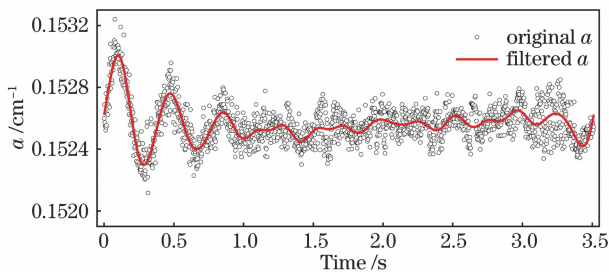


图 3 调制深度随时间的变化

Fig. 3 Variation of modulation depth over time

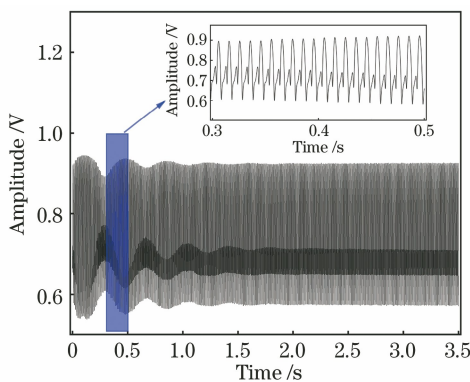


图 4 参考光路的透射光强

Fig. 4 Transmitted light intensity of reference optical path

参考光路的二次谐波高度与激光器波数偏移量的关系如图 5 所示, 可见, 二次谐波高度与波数偏移量呈一一对应关系。当波数偏移量为 0 cm^{-1} 时, 即激光器出光波数与气体谱线中心重合时, 光谱吸收

率 $\alpha(t)$ 解调得到的二次谐波高度取得最大值, 此处气体浓度反演的误差理论上为 0; 随着偏移量逐渐增加, 谐波高度逐渐减小。如不进行波数漂移修正的相关工作, 当偏移量达到约 0.102 cm^{-1} 时, 谐波高度将取到极限值 0, 此时浓度反演误差最大, 为 100%。参考光路的气体参数已知, 因此二次谐波的理论值已知, 测量波数漂移下的瞬时二次谐波值, 然后根据(6)、(7)式即可计算瞬时偏移量 $\Delta\nu$ 。

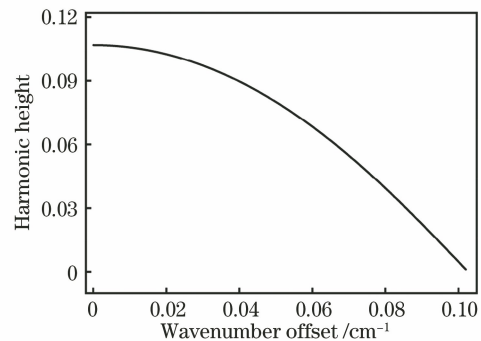


图 5 参考光路的谐波高度与波数偏移量的对应关系

Fig. 5 Corresponding relations between harmonic height and wavenumber offset of reference optical path

实验光路测量的是带有误差的二次谐波, 可以通过循环迭代算法精确反演浓度值。测量光路中的 CH_4 气体浓度在修正前后的反演结果及误差如图 6 所示。可以看出, 如果忽略激光器出光中心波数漂移对浓度测量系统的影响, 激光器波数达到平稳之前波动幅度最大处(图中 p 时刻)的物质的量浓度为 0.093%, 残差高达 90.510%, 此时激光器出光中心波数到谱线中心的偏移量为 0.095 cm^{-1} , 如图 7 所示; 经过修正后的物质的量浓度为 1.031%, 残差降低到 5.204%。对于 1 s 后波数浮动较小的数据区域, 修正后的浓度值基本趋于平稳, 在极小的范围内波动。

将不同波数偏移量下修正前后的误差进行对比, 如图 8 所示。当偏移量在 $0 \sim 0.06 \text{ cm}^{-1}$ 范围内时, 修正效果较好, 修正误差不超过 1.000%; 随着偏移量增大, 修正误差逐渐增大, 但对于在 $0 \sim 0.083 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的激光波数漂移, 迭代算法可将 $0 \sim 70.000\%$ 的误差修正在 2.000% 以内。上述实验结果表明, 本文方法能有效消除激光波数漂移对气体浓度反演的影响, 测量精度较高。

5 结 论

为消除波数漂移对测量系统的不利影响, 本文提出了一种基于 Fixed-WMS 技术的气体浓度测量

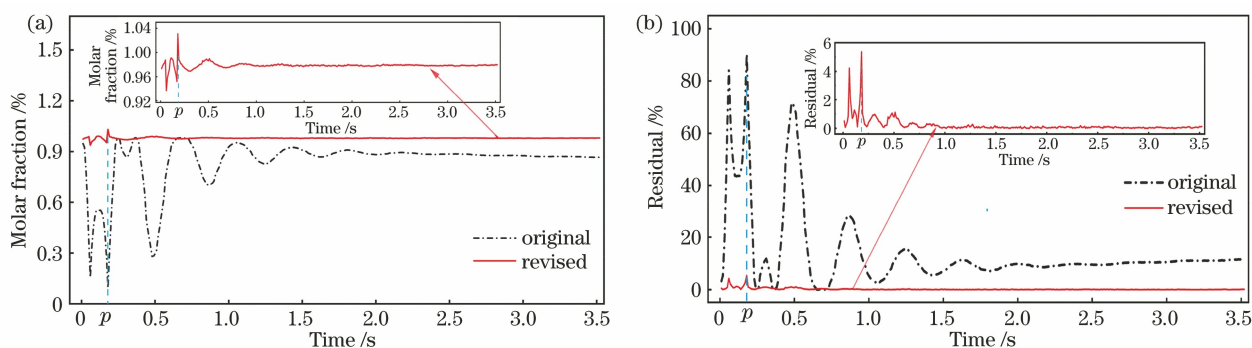


图 6 浓度反演与误差结果。(a) 修正前后的气体浓度;(b)修正前后的误差

Fig. 6 Concentration inversion and residuals. (a) Gas concentration before and after correction; (b) residuals before and after correction

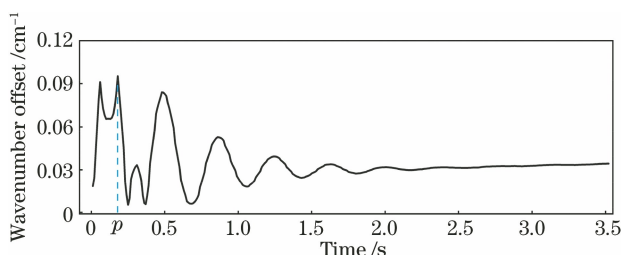


图 7 激光器出光中心的波数偏移量

Fig. 7 Wavenumber offset of laser emission center

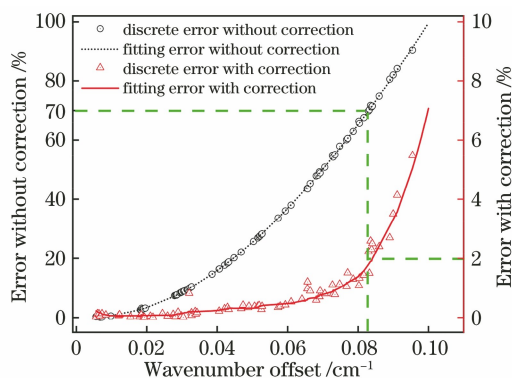


图 8 不同偏移量下修正前后的误差对比

Fig. 8 Error comparison before and after correction at different offsets

方法。通过设置一条带有封闭气池的参考光路来实时计算激光器的波数偏移位置,使用循环迭代算法实现对待测气体浓度的有效反演。搭建了CH₄浓度测量系统,然后采集、处理参考光路与测量光路的光强信号,观察调制深度和透射吸收光强随波数漂移的变化,探究二次谐波与波数偏移量的对应关系;最后通过分析修正前后的气体浓度误差,验证了所提方法可以有效消除波数漂移给气体浓度反演带来的影响。

采用对数变换对光强信号进行处理,使解调得到的谐波不受采集激光强度干扰和噪声干扰的影

响。与传统的带参考池的方法相比,所提方法借助标准具信号实时更新激光特性参数,气体浓度的反演精度更高。使用该方法测量基于 Fixed-WMS 技术的气体参数时,无需严格调整激光器出光中心到谱线中心的位置,拓宽了应用场景。Fixed-WMS 技术高时间分辨率的优点为后续气体温度场、浓度场的快速反演提供了有力的理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Sun K, Chao X, Sur R, et al. Wavelength modulation diode laser absorption spectroscopy for high-pressure gas sensing [J]. Applied Physics B, 2013, 110(4): 497-508.
- [2] Zhang Z R, Pang T, Sun P S, et al. Measurement of carbon isotope of methane and analysis of its genesis type using laser absorption spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1211001. 张志荣, 庞涛, 孙鹏帅, 等. 基于激光吸收光谱技术的甲烷碳同位素测量及其成因类型分析 [J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1211001.
- [3] Bolshov M A, Kuritsyn Y A, Romanovskii Y V. Tunable diode laser spectroscopy as a technique for combustion diagnostics [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2015, 106: 45-66.
- [4] Jiang J, Ma G M, Song H T, et al. Highly sensitive detection of methane based on tunable diode laser absorption spectrum [C]//2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, May 23-26, 2016, Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [5] Qu D S, Hong Y J, Wang G Y, et al. Study on mass flux measurement methods of gas based on scanning wavelength modulation spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0904006. 屈东胜, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于扫描波数调制光谱的气体质量流量测量方法研究 [J]. 中国激光,

- 2016, 43(9): 0904006.
- [6] Stewart G, Johnstone W, Bain J R P, et al. Recovery of absolute gas absorption line shapes using tunable diode laser spectroscopy with wavelength modulation: part I: theoretical analysis [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(6): 811-821.
- [7] Zeng X B, Wang H X, Wang Z M, et al. Methane detection system performance improvement based on sawtooth modulation half-wave scanning technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0817003.
曾祥豹, 王海旭, 王忠民, 等. 锯齿波调制半波扫描技术对甲烷检测系统的性能改进 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(8): 0817003.
- [8] Zhang Y Q, Wang F, Cui H B. Temperature measurement of carbon dioxide using fixed-wavelength absorption spectroscopy technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 193001.
张雅琪, 王飞, 崔海滨. 基于固定波数法吸收光谱技术的 CO₂ 温度测量 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 193001.
- [9] Baer D S, Nagali V, Furlong E R, et al. Scanned and fixed-wavelength absorption diagnostics for combustion measurements using multiplexed diode lasers [J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(3): 489-493.
- [10] Pokrowsky P, Whittaker E A, Bjorklund G C. Determination of offset between a fixed wavelength laser and an absorption line using frequency modulation spectroscopy [J]. *Optics Communications*, 1983, 45(3): 196-200.
- [11] Liu H F, Li B, He Q X, et al. Development of a digital orthogonal lock-in amplifier and its application in methane detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(4): 0423004.
刘慧芳, 李彬, 何启欣, 等. 数字正交锁相放大器的研制及其在甲烷检测中的应用 [J]. *光子学报*, 2016, 45(4): 0423004.
- [12] Tang Q X, Zhang Y J, Chen D, et al. Research on wavelength shift correction algorithm for tunable laser absorption spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(11): 3328-3333.
唐七星, 张玉钧, 陈东, 等. 调谐激光吸收光谱波数偏移修正算法研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(11): 3328-3333.
- [13] Zhu Y K, Zhou B, Wang Y H, et al. Research on calibration-free fixed-point wavelength modulation spectroscopy based on wavenumber drift-correction algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0830001.
祝仰坤, 周宾, 王一红, 等. 基于波数漂移修正算法的免标定固定点波数调制技术 [J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0830001.
- [14] Wei Y B. Research on key technologies of optical fiber gas sensor and its application in safety engineering [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
魏玉宾. 光纤气体传感器及其安全工程应用中的关键技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [15] Gao G Z, Chen B X, Hu B, et al. Sensitive detection of CO based on tunable multi-mode diode laser absorption spectroscopy [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2014, 25(4): 718-723.
高光珍, 陈抱雪, 胡波, 等. 基于多模激光吸收光谱的 CO 浓度高灵敏度测量 [J]. *光电子·激光*, 2014, 25(4): 718-723.
- [16] Zhao Y J, Wang C, Liu T Y, et al. Application in methane extraction of fiber methane monitoring system based on spectral absorption [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(10): 2857-2860.
赵燕杰, 王昌, 刘统玉, 等. 基于光谱吸收的光纤甲烷监测系统在瓦斯抽采中的应用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(10): 2857-2860.
- [17] Lin J L. Research on spectral line profile and line width of high-resolution (saturation) molecular spectra and its application [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, 2001.
林洁丽. 高分辨(饱和)分子光谱谱线线型、线宽及其应用的研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2001.
- [18] Reid J, Labrie D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers: comparison of experiment and theory [J]. *Applied Physics B*, 1981, 26(3): 203-210.
- [19] Xu Z Y. Research on temperature measurement and 2D distribution for transient combustion process by infrared absorption spectroscopy [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2012.
许振宇. 瞬态燃烧过程红外激光光谱温度场测量与重构方法研究 [D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究所, 2012.
- [20] Cong M L, Sun D D, Wang Y D. Application of logarithmic transformed-wavelength modulation spectroscopy in gas detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0223001.
丛梦龙, 孙丹丹, 王一丁. 对数变换一波数调制光谱在气体检测中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0223001.