

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2205079

基于 TDLAS 技术的 CO₂ 浓度检测方法研究^{*}

陈剑虹 孙超越 林志强 杨 佳 任军怡

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

摘 要:全球变暖日益严重,二氧化碳作为温室气体的主要成分,需要精准把控。可调谐半导体激光吸收光谱技术因其具有高灵敏度、高分辨率的特点,被广泛应用于气体检测等领域。为了进一步提高 TDLAS 系统的测量精度,在小波去噪的基础上,对去噪后的 TDLAS 二次谐波信号进行了频域分析处理,利用离散小波变换提取与 CO₂ 浓度变化相关的频域特征信号,建立回归模型反演气体浓度。时域回归模型校正集与预测集的相关系数分别为 0.998 5 和 0.997 3, RMSE 值分别为 0.045 9% 和 0.017 9%, 预测集的最大相对误差为 4.62%; 频域回归模型校正集与预测集的相关系数分别为 0.999 3 和 0.999 7, RMSE 值分别为 0.032 0% 和 0.006 9%, 预测集的最大相对误差为 1.54%。实验结果表明 TDLAS 系统的预测能力和测量精度均有效提高,验证了该方法的可行性。

关键词:TDLAS; 气体检测; 离散小波变换; 频谱分析

中图分类号: TN219; O433. 1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460. 4035

Research on CO₂ concentration detection method based on TDLAS technology

Chen Jianhong Sun Chaoyue Lin Zhiqiang Yang Jia Ren Junyi

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Global warming is becoming more and more serious, and carbon dioxide, as the main component of greenhouse gases, needs to be precisely controlled. Tunable semiconductor laser absorption spectroscopy is widely used in gas detection and other fields due to its high sensitivity and high resolution. In order to further improve the measurement accuracy of the TDLAS system, the denoised TDLAS second harmonic signal was analyzed in the frequency domain on the basis of wavelet denoising, and the frequency domain characteristic signal related to the change of CO₂ concentration was extracted by discrete wavelet transform. And establish a regression model to invert the gas concentration. The correlation coefficients of the time domain regression model calibration set and prediction set are 0.998 5 and 0.997 3, the root mean square error (RMSE) values were 0.045 9% and 0.017 9%, respectively, and the maximum relative error of the prediction set is 4.62%. The correlation coefficients of the frequency domain regression model calibration set and prediction set were 0.999 3 and 0.999 7, the RMSE values were 0.032 0% and 0.006 9%, respectively, and the maximum relative error of the prediction set was 1.54%. The experiment results show that the prediction ability and measurement accuracy of the TDLAS system were effectively improved, which verifies the feasibility of the method.

Keywords: TDLAS; gas detection; discrete wavelet transform; spectrum analysis

0 引 言

近年来,CO₂ 等温室气体排放量持续增加,全球变暖日益严重,造成了冰川融化、海平面上升、极端高温天气

等自然灾害^[1-2]。我国政府一直高度关注气候变化对国家和社会的影响,积极推进碳减排工作。可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)具有光谱分辨率高、气体选择性良好、响应速度快、信噪比高等优点,被广泛地应用于气体检测的各个领域^[3-7]。TDLAS 技术通过调节激光

器的工作温度和电流来对输出波长进行调谐,结合波长调制技术使激光器的输出波长可以扫过待测气体一条完整的吸收谱线,利用锁相放大的方法提取吸收信号的二次谐波分量,根据二次谐波信号幅值计算气体浓度^[8-10]。

国外发达国家对 TDLAS 技术的研究应用起步较早,已进入工业应用阶段;国内研究起步较晚,TDLAS 系统检测精度等性能指标亟待改进,检测效果不尽人意。在此基础上,邹得宝等^[11]在 TDLAS 逃逸氨检测中利用小波变换对二次谐波原始光谱进行滤波,有效提高了系统信噪比;任红军等^[12]在甲烷激光遥测过程中,利用小波阈值对二次谐波信号去噪处理,将测量误差从 5.5% 将为 2.7%。因此,提高系统测量精度对于国内 TDLAS 技术的发展具有重要的意义。

小波去噪的本质是对信号的分解与重构,将原始信号的噪声在频域滤出后重构回时域中,而在这个过程中频域特征信号则被忽视。本文在小波去噪的基础上,对小波去噪后的 TDLAS 二次谐波信号进行了频域分析,利用离散小波变换(DWT)算法重新将其分解至频域,对分解后的各层细节分量(Di)进行 FFT 提取对应的频谱分量幅值,筛选与 CO₂ 分子基团振动吸收相关联的频域特征信号,利用提取的频域特征信号建立回归模型,反演气体浓度。同时,对小波去噪后的二次谐波信号提取时域幅值,建模形成实验对照。实验结果表明,本文对 TDLAS 二次谐波信号频域分析的方法,可改善 TDLAS 检测系统的精度,降低系统检测误差。同时,本方法可灵活推广到其他气体检测,为气体检测领域提供了新思路。

1 CO₂ 浓度检测系统

1.1 TDLAS 检测原理

由 Beer-Lambert 定律^[13-15]可知,当一束频率为 ν 的单色激光穿过气体吸收介质后,其光强变为:

$$I = I_0 \exp[-PS(T)\varphi(\nu)CL] \quad (1)$$

式中: I_0 是入射光强, I 是经气体吸收后的光强, P 为压强, $S(T)$ 为待测气体在温度 T 下的特征谱线强度, $\varphi(\nu)$ 为线性函数, C 为气体浓度, L 为气体吸收光程。

当 $PS(T)\varphi(\nu)L \ll 0.05$ 时,式(1)简化为:

$$I \approx I_0 [1 - PS(T)\varphi(\nu)CL] = I_0 [1 - \alpha(\nu)L] \quad (2)$$

$$\alpha(\nu) = PS(T)\varphi(\nu)C \quad (3)$$

式中: $\alpha(\nu)$ 是频率 ν 的吸收系数。对式(2)傅里叶级数展开,可以得到:

$$I_{2f} \propto I_0 PS(T)\varphi(\nu)CL \quad (4)$$

式中: I_{2f} 为二次谐波信号强度,在外界环境和检测气体不变的条件下, I_0 、 $S(T)$ 、 P 、 $\varphi(\nu)$ 、 L 都是常量,二次谐波信号强度 I_{2f} 与气体浓度 C 呈线性相关。

1.2 系统设计

基于 TDLAS 技术的 CO₂ 浓度系统检测原理如图 1 所示。光源为德国 nanoplus 公司生产的蝶形封装的 DFB 二极管激光器,功率 5 mW,在 1578.67 nm 处发出单模激光。输出的光束经过激光准直器准直后进入 Herriott 池中,出射信号由光电探测器接收,将激光信号转换为电信号。DFB 激光二极管的工作电流和温度由美国 Port City Instruments 公司生产的 PCI-1DA 型 TDLAS 控制器提供,可提供 0~150 mA 调谐激光电流以及分辨率为 0.01 °C 的 TEC 温控电流。PCI-1DA 还集成了信号发生器、锁相放大器 and 示波器,可直接记录输出的二次谐波(2 f)光谱。其中,信号发生器提供 10 Hz 锯齿波信号和 31.2 kHz 正弦波信号。同时,正弦波信号也是锁相放大器用于谐波测量的内部参考信号。两种信号相加后转换成电流信号,送入激光二极管调制信号输入端,为 DFB 激光二极管提供电流和温度控制。之后,从光电探测器出来的电信号经锁相放大器解调后得到 2 f 信号,锁相放大器参考信号设置为 62.4 kHz。将从锁相器得到的 2 f 信号通过数据采集卡送到计算机里,即可对采集的二次谐波信号进行时域和频域分析。

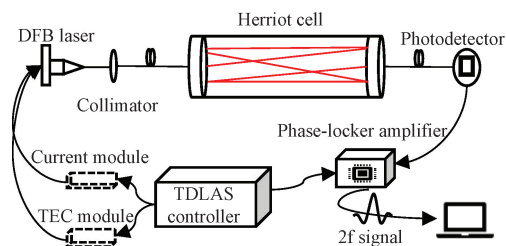


图 1 系统检测原理

Fig. 1 Diagram of detecting system

激光器的调谐性能对谐波信号的稳定性有很大影响,其温度设置为 37.35 °C,工作电流设置为 60~80 mA,通过调谐电流控制激光器波长扫描范围,以便使激光器的波长扫描二氧化碳分子的吸收峰。采用 Herriott 吸收池,经过多次反射产生 10.1 m 的光学吸收通路,极大提高了系统的信噪比和检测下限。

2 频域分析

小波变换具有将信号在时间和频率上分解的能力,在频率高的位置时间细化、频率低的位置时间细化。小波变换的结果是信号各个子频谱带在频域的表现。因此,利用小波变换对小波去噪后的二次谐波信号多尺度细分,在二次谐波信号不同尺度下的频谱带中分离与 CO₂ 浓度变化相关的频域特征分量,小波去噪后的二次谐波信号如图 2 所示。

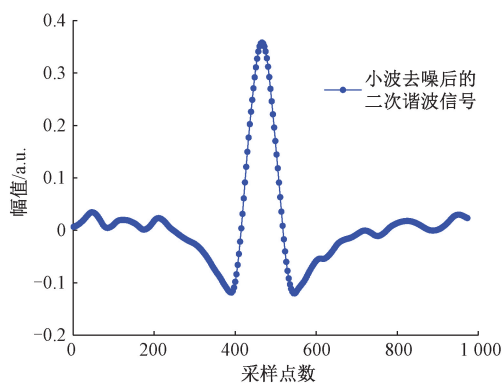


图2 小波去噪后的二次谐波信号

Fig. 2 Second harmonic signal after wavelet denoising

由小波变换理论,在任意信号的 $L^2(R)$ 空间中,可以将原始信号 $f(t)$ 按特定的某一种小波进行小波分解变换^[16-18]。对函数 $f(t)$ 的小波分解表达式为

$$WT_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

其中, a 为伸缩因子(或尺度因子); b 为平移因子; $\varphi_{a,b}(t)$ 为依赖于 a 和 b 的小波基函数。原始信号 $f(t)$ 根据不同的分辨率分解为若干分量,由若干分量重构原始信号,分解表达式为:

$$f(t) = \sum_k c_{j,k} 2^{-\frac{j}{2}} \phi(2^{-j}t - k) + \sum_k d_{j,k} 2^{-\frac{j}{2}} \varphi(2^{-j}t - k), j, k \in Z \quad (6)$$

$f(t)$ 被分解为频率小于 2^j 的低频部分和频率在 2^j 和 2^{j+1} 之间的高频部分。由此,可以将二次谐波信号在时间以及频率上作局部化分析,利用平移和伸缩实现二次谐波信号的不同频段多尺度细分。

在检测系统中,依据波形近似原则,选择 sym6 小波基对二次谐波信号进行分解。尺度步进为 1,分别选取 2^j 的分解尺度系数作为观察对象, j 为分解层数,分解 10 层,分解后各个尺度下的细节分量(Di)小波系数分布如图 3、4 所示,可以看出二次谐波信号分解后的不同尺度下的细节。对每层小波系数进行 FFT,获得二次谐波信号各个频段的细节分量频谱,如图 5、6 所示。经研究发现,对应尺度第 7 层下的细节分量提取的频谱分量幅值信息与 CO₂ 浓度变化高度相关。

3 实验部分

3.1 CO₂ 测量实验

为了定量分析 CO₂ 浓度与频谱分量幅值二者之间的关系,使用标准气体对系统评估与校正。利用气体流量计配比浓度为 0.2%~3% 下的 23 组标准 CO₂ 气体,将每

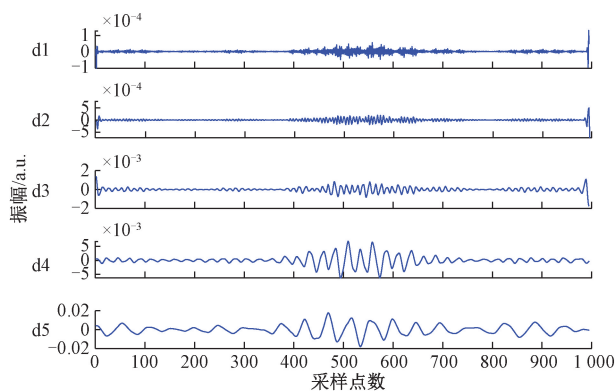


图3 细节分量 d1~d5 层下的小波系数

Fig. 3 Wavelet coefficient at the detail component d1 to d5 layers

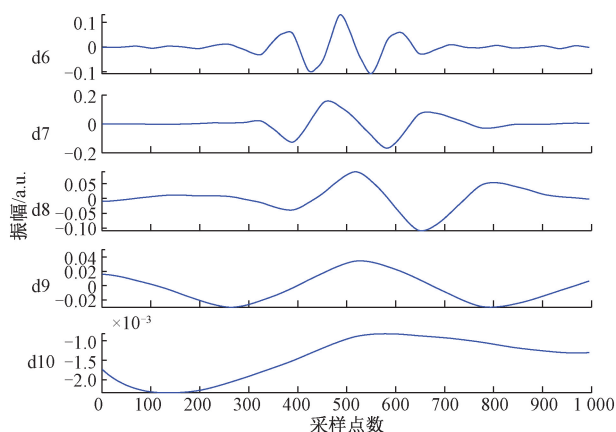


图4 细节分量 d6~d10 层下的小波系数

Fig. 4 Wavelet coefficients at detail components d6 to d10 layers

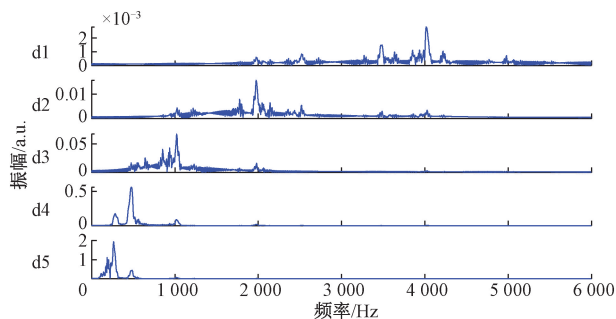


图5 d1~d15 层细节分量频谱

Fig. 5 The d1 to d5 layer detail component spectrum

组气体注入到气池中进行周期扫描,保持每次测量时气池内压强和温度恒定,采集二次谐波信号。小波去噪后的二次谐波信号分别如图 7、8 和 9 所示。

为了评估系统性能,验证频域分析二氧化碳浓度的

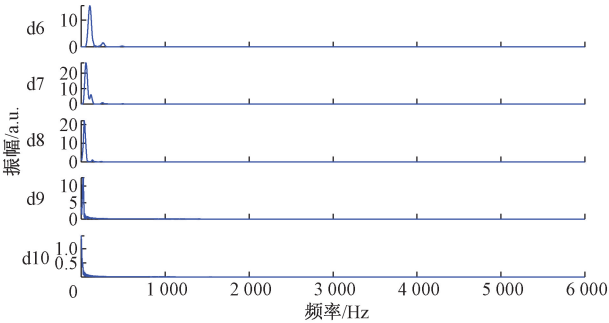


图 6 d6~d10 层细节分量频谱

Fig. 6 The d6 to d10 layer detail component spectrum

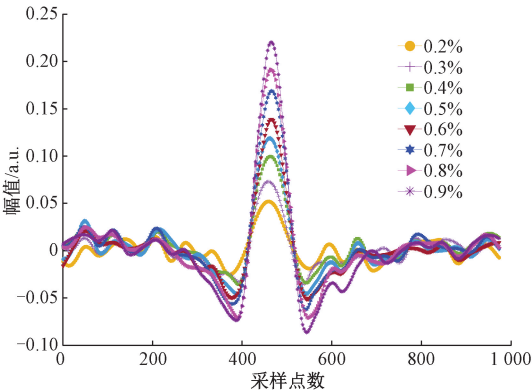


图 7 浓度为 0.2%~0.9% 的 2 f 信号

Fig. 7 2 f signal with a concentration of 0.2%~0.9%

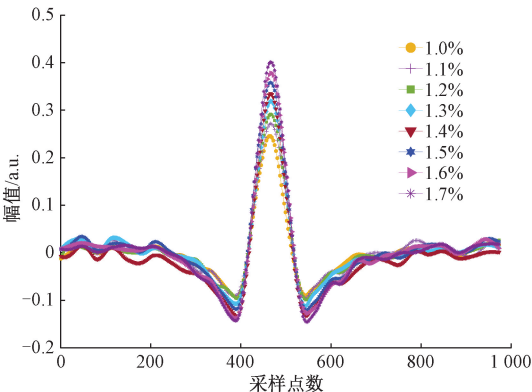


图 8 浓度为 1.0%~1.7% 的 2 f 信号

Fig. 8 2 f signal with a concentration of 1.0%~1.7%

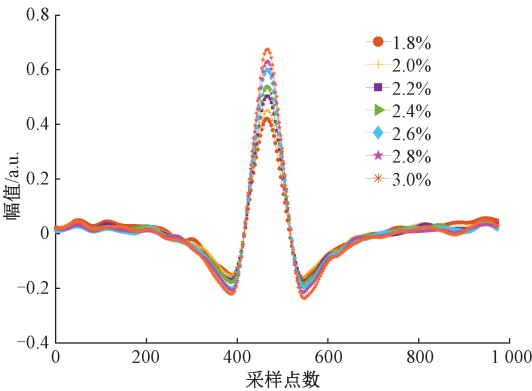


图 9 浓度为 1.8%~3.0% 的 2 f 信号

Fig. 9 2 f signal with a concentration of 1.8%~3.0%

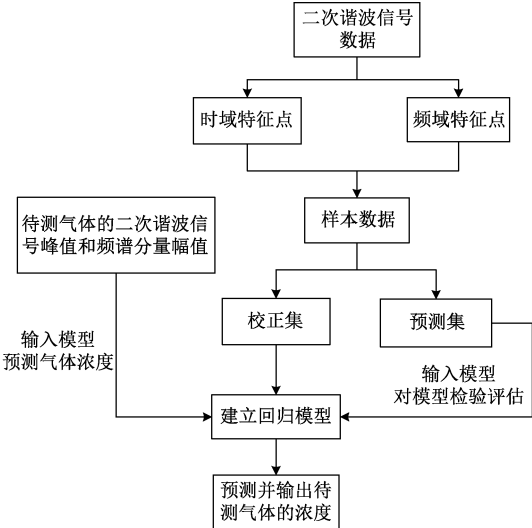


图 10 CO₂ 建模流程

Fig. 10 CO₂ modeling flow chart

本集数据分为校正集与预测集两部分,校正集选取的样本应能够表征整体样本变异信息,用于 CO₂ 反演模型的建立。最后,将预测集数据带入建立的 CO₂ 反演模型中,通过计算相关系数、均方根误差等参数对其进行可靠性评估。

实验共采集 23 组不同浓度的样本,总样本集数据如表 1 所示。其中随机选取的其中校正集 18 组,预测集 5 组,预测集样本数据如表 2 所示。

利用偏最小二乘回归法,结合时域二次谐波幅值和频域特征信号分别建立时域回归模型(二次谐波幅值~CO₂ 浓度)和频域回归模型(频域分量幅值~CO₂ 浓度),模型的回归结果如表 3、4 所示,时域拟合模型的校正集与预测集的相关系数分别为 0.998 5 和 0.997 3,校正集的均方根误差为 0.045 9%,预测集的均方根误差为 0.017 9%。频域拟合模型的校正集与预测集的相关系数

可行性,采用偏最小二乘回归法建立 CO₂ 气体浓度与时域频域特征参数之间的数学模型,建模流程如图 10 所示。

首先,利用 MATLAB 算法提取对应浓度下二次谐波信号的时域特征点和频域特征点,将其加入样本集。每条样本由时域特征点(二次谐波信号幅值)、频域特征点(d7 层频域分量幅值)及对应的 CO₂ 浓度组成。其次,样

分别为 0.999 3 和 0.999 7, 校正集的均方根误差为 0.032 0%, 预测集的均方根误差为 0.006 9%。

表 1 总样本集数据

Table 1 Total sample set data

CO ₂ 浓度/%	<i>I</i> _{2f} 幅值/a. u.	频域分量幅值/a. u.
0.2	0.077 4	4.918 0
0.3	0.108 6	6.682 8
0.4	0.135 7	8.929 0
0.5	0.164 8	11.070 8
0.6	0.190 4	12.370 3
0.7	0.231 4	14.513 6
0.8	0.262 3	16.321 2
0.9	0.307 1	18.184 7
1.0	0.339 7	20.487 1
1.1	0.367 7	21.502 1
1.2	0.390 4	23.523 6
1.3	0.431 3	25.274 6
1.4	0.468 2	27.741 5
1.5	0.478 7	29.096 7
1.6	0.516 4	30.423 1
1.7	0.547 1	32.570 2
1.8	0.583 6	33.252 9
2	0.613 9	36.730 1
2.2	0.678 3	40.783 9
2.4	0.722 1	43.502 4
2.6	0.801 1	47.632 6
2.8	0.846 0	50.675 7
3	0.912 7	54.376 3

表 2 样本集中选取的预测集数据

Table 2 The forecast set data selected in the sample set

CO ₂ 浓度/%	<i>I</i> _{2f} 幅值/a. u.	频域分量幅值/a. u.
0.8	0.262 3	16.321 2
1.3	0.431 3	25.274 6
1.6	0.516 4	30.423 1
2.2	0.678 3	40.783 9
2.6	0.801 1	47.632 6

表 3 时域模型回归结果

Table 3 Time domain model regression results

拟合公式: $y_1 = -0.089\ 5 + 3.354\ 7x_1$			
校正集		预测集	
RMSEC/%	相关系数 R_C	RMSEP/%	相关系数 R_P
0.045 9	0.998 5	0.017 9	0.999 0

表 4 频域模型回归结果

Table 4 Frequency domain model regression results

拟合公式: $y_2 = -0.125\ 3 + 0.057\ 2x_2$			
校正集		预测集	
RMSEC/%	相关系数 R_C	RMSEP/%	相关系数 R_P
0.032 0	0.999 3	0.006 9	0.999 9

根据时域回归模型和频域回归模型的预测集结果, 对比 CO₂ 浓度真实值和两个模型的预测值, 观测模型预测集样本数据的相对误差, 时域回归模型预测结果如表 5 所示, 频域回归模型预测结果如表 6 所示。模型预测结果分析表明, 时域回归模型预测集样本的最大相对误差为 4.62%, 频域回归模型预测集样本的最大相对误差为 1.54%。

表 5 时域模型预测结果分析

Table 5 Time domain model prediction results analysis

CO ₂ 浓度真实值/%	CO ₂ 浓度预测值/%	相对误差/%
0.8	0.79	1.25
1.3	1.24	4.62
1.6	1.64	2.50
2.2	2.18	0.91
2.6	2.59	0.38

表 6 频域模型预测结果分析

Table 6 Frequency domain model prediction results analysis

CO ₂ 浓度真实值/%	CO ₂ 浓度预测值/%	相对误差/%
0.8	0.81	1.25
1.3	1.32	1.54
1.6	1.62	1.25
2.2	2.21	0.45
2.6	2.61	0.38

3.2 系统稳定性与检测极限评估

系统稳定性是影响高灵敏光谱测量系统的重要指标。理论上来说, 系统的信号可以无限平均, 如果忽略系统动态范围的限制, 无限平均会出现极其灵敏的测量。由于系统中的漂移如温度漂移、干涉条纹、白噪声等, 系统只在有限时间稳定, 因此系统存在一个最佳平均时间, 在最佳平均时间内信号的信噪比最高, 检测极限最低。

为了进一步确定系统的检测极限, 对浓度 1% 的标准 CO₂ 气体进行 1 000 s 连续采样, 采样间隔为 1 s, 利用 Allan 方差对频域拟合方法下的 CO₂ 测量系统进行稳定性和检测极限评估^[19-21]。分析结果如图 11 所示, 结果表明, 在系统平均时间为 1 s 时, 检测极限为 9.6×10^{-4} ; 在系统平均时间为 90 s 时, 达到系统最佳检测时间, 检测极限为 8.3×10^{-5} 。

4 结 论

本文在小波去噪的基础上, 对去噪后的 TDLAS 二次谐波信号进行了频域分析处理, 利用离散小波变换提取与 CO₂ 浓度变化相关的频域特征信号, 建立回归模型反演气体浓度。时域回归模型校正集与预测集的相关系数分别为 0.998 5 和 0.997 3, RMSE 值分别为 0.045 9% 和

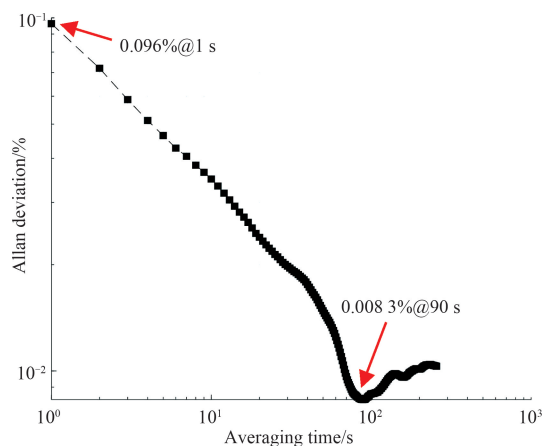


图 11 系统的 Allan 方差评估结果

Fig. 11 Systematic Allan variance evaluation results

0.017 9%, 预测集的最大相对误差为 4.62%; 频域回归模型校正集与预测集的相关系数分别为 0.999 3 和 0.999 7, RMSE 值分别为 0.032 0% 和 0.006 9%, 预测集的最大相对误差为 1.54%。结果表明, TDLAS 系统的预测能力和测量精度均有效提高, 验证了该方法的可行性。同时, 本方法可灵活推广到其他气体检测, 为气体检测领域提供了新思路。

参考文献

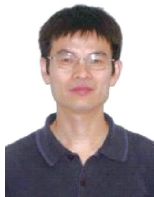
- [1] 王军, 谭金凯. 气候变化背景下中国沿海地区灾害风险研究与应对思考[J]. 地理科学进展, 2021, 40(5): 870-882.
WANG J, TAN J K. Research and response to disaster risk in china's coastal area under the background of climate change[J]. Progress in Geographical Science, 2021, 40(5): 870-882.
- [2] 廖静秋. 全球气候变化及其对人类生存的影响[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 284-291.
LIAO J Q. Global climate change and its impact on human survival[J]. Journal of China West Normal University (Natural Science Edition), 2010, 31(3): 284-291.
- [3] 孙利群, 邹明丽, 王旋. 可调谐半导体激光吸收光谱法在呼吸诊断中的应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 364-381.
SUN L Q, ZOU M L, WANG X. Application of tunable semiconductor laser absorption spectroscopy in respiratory diagnosis[J]. China Laser, 2021, 48(15): 364-381.
- [4] 周言文, 苗澍苗, 姚丹, 等. 基于波长调制光谱和小波去噪的激光甲烷遥测系统[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 306-314.
ZHOU Y W, MIAO P ZH, YAO D, et al. Laser

methane telemetry system based on wavelength modulation spectroscopy and wavelet denoising[J]. China Laser, 2020, 47(6): 306-314.

- [5] 陈亚婧, 邱爽, 徐立军. 多谱线 TDLAS 测温中谱线选择的实验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 1948-1952.
CHEN Y J, QIU SH, XU L J. Experimental study on spectral line selection in multi-spectral line TDLAS temperature measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(12): 1948-1952.
- [6] 张杨, 范颖, 王哲, 等. 基于可调谐激光吸收光谱技术的硫化氢检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 1943-1947.
ZHANG Y, FAN Y, WANG ZH, et al. Research on hydrogen sulfide detection method based on tunable laser absorption spectroscopy[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(12): 1943-1947.
- [7] 蒋亚龙, 蔡霆力, 祝玉泉. 可调谐半导体激光吸收光谱甲烷浓度监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(3): 265-271.
JIANG Y L, CAI T L, ZHU Y Q. Tunable semiconductor laser absorption spectroscopy methane concentration monitoring system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2011, 25(3): 265-271.
- [8] 李金义, 樊鸿清, 余子威, 等. 非合作目标 TDLAS 室内二氧化碳遥测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 229-236.
LI J Y, FAN H Q, YU Z W, et al. Non-cooperative target TDLAS indoor carbon dioxide telemetry[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 229-236.
- [9] 熊佳慧, 卜雄洙, 杨昊青, 等. TDLAS 气体浓度检测中 DFB 激光器驱动及温控电路设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(9): 161-165.
XIONG J H, BU X ZH, YANG H Q, et al. Design of DFB laser driving and temperature control circuit in TDLAS gas concentration detection[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(9): 161-165.
- [10] 张杨, 范颖, 王哲, 等. 基于可调谐激光吸收光谱技术的硫化氢检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 1943-1947.
ZHANG Y, FAN Y, WANG ZH, et al. Research on hydrogen sulfide detection method based on tunable laser absorption spectroscopy[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(12): 1943-1947.

- [11] 邹得宝,陈文亮,杜振辉,等. 数字滤波方法在 TDLAS 逃逸氨检测中的选用[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(9):2322-2326.
ZOU D B, CHEN W L, DU ZH H, et al. Selection of digital filtering method in detection of fugitive ammonia by TDLAS [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012,32(9):2322-2326.
- [12] 任红军,郭东歌,陈海永,等. 小波去噪在激光气体遥测系统中的应用[J]. 自动化与仪器仪表,2021(7):195-199.
REN H J, GUO D G, CHEN H Y, et al. Application of wavelet denoising in laser gas telemetry system [J]. Automation and Instrumentation, 2021(7):195-199.
- [13] 于鑫,李磊,赵靖,等. 多参数补偿中红外甲烷检测仪的研制与试验[J]. 光子学报,2019,48(6):97-105.
YU X, LI L, ZHAO J, et al. Development and test of multiparameter compensated mid-infrared methane detector[J]. Acta Photonics, 2019,48(6):97-105.
- [14] 周鑫,金星. 基于吸收光谱的光程长度测量方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2017,37(9):2844-2848.
ZHOU X, JIN X. Study on optical path length measurement method based on absorption spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017,37(9):2844-2848.
- [15] 吴德操,魏彪,熊双飞,等. 针对水质监测的紫外-可见光谱双光程融合优化算法[J]. 光谱学与光谱分析,2017,37(3):799-805.
WU D C, WEI B, XIONG SH F, et al. UV-Vis spectrum dual-optical path fusion optimization algorithm for water quality monitoring [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017,37(3):799-805.
- [16] 王占利,傅晓,梁春疆,等. 基于连续小波变换与曲线拟合的油液金属屑末传感信号检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(11):32-38.
WANG ZH L, FU X, LIANG CH J, et al. Sensing signal detection method of oil liquid metal chip end based on continuous wavelet transform and curve fitting [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021,35(11):32-38.
- [17] 龚静. 可调阈值函数和能量阈值优化的电能质量扰动小波去噪方法[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(5):137-145.
GONG J. Power quality disturbance wavelet denoising method optimized by adjustable threshold function and energy threshold [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021,35(5):137-145.
- [18] 刘春,刘滔,张海燕,等. 小波变换法在姿态解算中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(1):183-190.
LIU CH, LIU T, ZHANG H Y, et al. Application of wavelet transform method in pose solving [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021,35(1):183-190.
- [19] 赵成龙,黄丹飞,刘智颖,等. 开放型 TDLAS-WMS 技术 CO₂ 痕量气体检测[J]. 光子学报,2022,51(2):333-342.
ZHAO CH L, HUANG D F, LIU ZH Y, et al. Open TDLAS-WMS technology CO₂ trace gas detection [J]. Acta Photonica Sinica, 2022,51(2):333-342.
- [20] 黎奇,白征东,赵思浩,等. Allan 方差方法分析环形激光陀螺仪噪声的性能评估[J]. 清华大学学报(自然科学版),2019,59(11):887-894.
LI Q, BAI ZH D, ZHAO S H, et al. Performance evaluation of ring laser gyroscope noise by Allan variance method [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2019,59(11):887-894.
- [21] 王鑫,荆聪蕊,侯凯旋,等. 基于 TDLAS 技术的人体呼气末 CO₂ 在线检测[J]. 中国激光,2020,47(3):298-304.
WANG X, JING C R, HOU K X, et al. On-line detection of human end-expiratory CO₂ based on TDLAS technology [J]. China Laser, 2020,47(3):298-304.

作者简介



陈剑虹,2000 年于西安交通大学获得博士学位,现为西安理工大学副教授,主要研究方向为光谱与光电检测技术。

E-mail: chenjianhong@xaut.edu.cn

Chen Jianhong received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2000.

Now he is an associate professor in Xi'an University of Technology. His main research interests include spectroscopy and photoelectric detection technology.



孙超越,2019 年于齐鲁工业大学获得学士学位,现为西安理工大学在读研究生,主要研究方向为光电测试技术与仪器。

E-mail: 1443250901@qq.com

Sun Chaoyue received his B. Sc. degree from Qilu University of Technology in 2019.

He is currently a M. Sc. candidate at Xi'an University of Technology. His main research interests include photoelectric testing technology and instrumentation.