

基于经验模态分解的可调谐半导体激光 吸收光谱中干涉条纹的抑制

郭心骞¹, 邱选兵¹, 季文海², 邵李刚¹, 刘淑平¹, 李传亮^{1*}, 马维光³

¹太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024;

²中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580;

³山西大学激光光谱所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006

摘要 提出了基于经验模态分解(EMD)的多次去噪方法来降低多光程吸收光谱中的干涉噪声。从理论上分析并确定了降噪的次数,对采用直接吸收和波长调制二次谐波光谱技术探测得到的不同体积分数的CO₂谱线进行了多次EMD降噪处理,并与多次平均和低通滤波的降噪方法进行了对比。结果表明:多次EMD去噪能更有效地滤除光谱信号中的干涉噪声和随机噪声,且降噪后的信号幅值与待测气体的体积分数满足较好的线性关系,系统的探测灵敏度能达到 3.5×10^{-5} 。测量了不同压强和温度下CO₂标准气体的光谱信号,经多次EMD去噪处理后的光谱信号,其干涉的幅值相对于去噪前减小了近两个量级,信噪比增大了约两个量级。

关键词 光谱学; 可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS); 干涉噪声; 经验模态分解(EMD)去噪; 多光程池

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.113001

Minimization of Interference Fringes in Tunable Diode Laser Absorption Spectrum Based on Empirical Mode Decomposition

Guo Xinqian¹, Qiu Xuanbing¹, Ji Wenhai², Shao Ligang¹, Liu Shuping¹,
Li Chuanliang^{1*}, Ma Weiguang³

¹ School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

² College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;

³ State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract A multi-denoising method based on the empirical mode decomposition (EMD) is proposed to minimize the interference noises in the multi-pass absorption spectra. The denoising number is theoretically analyzed and determined. The CO₂ spectral lines with different volume fractions detected by the direct absorption technology and wavelength modulation spectroscopy at second harmonic are denoised by the multi-EMD, and the results are compared with those by the denoising methods with multi-averaging and low-pass filtering. The results show that the interference and random noises can be effectively filtered by the multi-EMD denoising method. Moreover, the denoised signal amplitude has a good linear relationship with the volume fraction of the gas to detect, and the detection sensitivity of the whole system is up to 3.5×10^{-5} . The spectral signals of CO₂ standard gas at different pressures and temperatures are detected. After the multi-EMD denoising, the interference amplitudes of the spectral signals are reduced by about two orders of magnitude, but the signal to noise ratios are enhanced by about two orders of magnitude.

Key words spectroscopy; tunable diode laser absorption spectrum (TDLAS); interference noise; empirical mode decomposition (EMD) denoising; multi-pass cell

OCIS codes 300.1030; 140.5960; 120.4640; 100.2650

收稿日期: 2018-04-10; 修回日期: 2018-05-10; 录用日期: 2018-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(11504256, U1610117, 61675120)

* E-mail: clli@tyust.edu.cn

1 引言

可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术凭借其高灵敏度、实时响应以及非接触式测量等特点,广泛应用于工业生产、生命科学等领域^[1-4]。为了提高 TDLAS 技术的灵敏度并实现其设备小型化,通常在 TDLAS 系统中使用多光程吸收池。但激光在多光程池中的多次反射及衍射效应会导致光在空间中重叠并引起干涉,难以将干涉噪声从光谱信号中分离出来,从而影响了光谱信号的分析。因此,对干涉的抑制一直是光谱测量研究的热点之一^[5]。

近年来,研究人员采用一系列方法来降低光谱中的噪声,其中的信号平均滤波是比较简单的信号去噪方法,它可以有效提高信号的稳定性和探测的灵敏度^[6]。Zheng 等^[7]采用小波降噪方法使探测灵敏度达到了 1×10^{-6} ,测量误差从 6.2%降低到了 3.8%;Niu 等^[8-9]采用 Kalman 滤波和小波去噪两种方法对光谱信号进行了降噪研究,测量精度分别为 0.0666‰和 0.0619‰,但小波去噪需要经过复杂的过程来选择小波基及分解层数,而 Kalman 滤波算法的运算量很大;Cassidy 等^[10-11]采用波长调制技术并通过选择合适的调制幅度来抑制干涉效应,使信噪比得到大幅提高,但对于不同的干涉噪声需要选择不同的调制信号;Webster^[12]通过在光路中加入振动的布儒斯特窗片来降低干涉效应,使干涉幅值减至原来的 1/30,但该方法不易实现;Wu 等^[13]采用平滑滤波法来消除干涉现象,使信噪比提升了约两个量级,但信号幅值却降低了 70%。通常,数字滤波器更适合用于对平稳非线性信号或线性非平稳信号的处理,而光谱信号为非线性、非平稳信号,这增大了数字滤波器的降噪难度。经验模态分解(EMD)可以将复杂的信号在时域内直接分解成有限个固有模态函数(IMF)之和,能够对周期性的干涉信号进行分解,很好地弥补其他去噪算法的不足^[14]。Colominas 等^[15-17]首次提出了 EMD 方法,目前这种方法已成功应用在生物学领域、航空领域及其他自然科学领域。Meng 等^[14]采用 EMD 去噪方法来去除 TDLAS 中的随机噪声,使得信噪比从 7.32 dB 增大至 14.31 dB。但是,传统的 EMD 去噪方法在去除干涉噪声较大的信号时,难度较大。

本文研究了在干涉噪声较强的情况下,EMD 多次去噪方法对吸收光谱信号中干涉噪声的抑制效果。研究表明,该方法不仅可以对不同条件下的干涉噪声进行有效抑制,还可以降低随机噪声的

影响。

2 去噪原理及模型

2.1 去噪原理

EMD 算法是一种自适应时频分析方法,它根据信号自身的尺度特征分解得到一系列 IMF(包含了原始信号的不同时间尺度的局部特征信号)和残余信号,各分量满足从高频到低频的系列分布,去噪时可直接作用在 EMD 后得到的高频分量上,理论上可以达到较好的去噪结果^[14,18]。为了进一步优化去噪效果,本课题组基于常规的 EMD 去噪方法,提出了将多次 EMD 去噪法用于抑制 TDLAS 中干涉噪声的方法。EMD 方法具有完备性,将 EMD 得到的 IMF 分量及残余信号进行累加可以再次生成原始信号,故此分解方法能进行完全重构,不会遗失信号中包含的信息^[19]。每个 IMF 需要满足如下两个条件:1)信号极值点的个数与零点的个数差不能大于 1;2)曲线任意部分的上包络和下包络的均值为 0^[14]。

使用多次 EMD 去噪方法处理含噪信号的详细分解步骤如下:

1) 找到原始信号 $x(t)$ 的所有极大值点和极小值点,使用三次样条函数拟合得到曲线的上包络 X_{\max} 和下包络 X_{\min} ;

2) 计算上下包络线的均值 $m_1 = (X_{\max} - X_{\min})/2$,用 $x(t)$ 减去 m_1 可以得到除去低频的局部细节信号 $h_1 = x(t) - m_1$;

3) 如果 h_1 满足 IMF 的条件,就将 h_1 记为第一阶 IMF 分量 H_1 ;如果不满足,就把 h_1 作为原始信号 $x(t)$,多次重复 1)~2)步直到 h_n 满足 IMF 条件,将 h_n 记为第一阶 IMF 分量 H_1 ;

4) 用原始信号 $x(t)$ 减去 H_1 得到残余信号 R_1 ,再将 R_1 作为原始信号 $x(t)$,重复步骤 1)~3),直到残余信号为一个趋势项,将最后得到的残余信号记为 R ,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n H_i + R; \quad (1)$$

5) 通过盒子法平滑滤波处理每个 IMF 分量及残余信号 R ,平滑窗口宽度选择为 500(共 5×10^5 个点),滤波后的信号记为 H_{if} 和 R_i ;将 H_{if} 与 R_i 相加来重构信号 $X(t)$,即

$$X(t) = \sum_{i=1}^n H_{if} + R_i; \quad (2)$$

6) 多次重复进行步骤 1)~5),直到达到最佳的去噪效果,得到去噪后的信号。

2.2 仿真分析

为了验证 EMD 用于光谱去噪的可行性,利用 $1.578 \mu\text{m}$ 附近的 CO_2 ($30^\circ 1-00^\circ 0$) 带 $P(16)$ 吸收谱线进行仿真分析^[20]。将直接吸收光谱(DAS)信号叠加干涉噪声和白噪声后用于去噪的仿真研究,加噪后的信号如图 1(a)所示。为了对比降噪的效果,使用信噪比 r_{RSN} 和干涉抑制比 F 这两个指标进行分析。其中: r_{RSN} 为吸收峰幅值与噪声标准偏差(σ)的比值,即 $r_{\text{RSN}} = p_v/\sigma$; F 为降噪前后干涉噪声的幅值抑制比,即 $F = I_{\text{no}}/I_{\text{de}}$, I_{no} 为染噪信号干涉噪声的平均幅值, I_{de} 为降噪后相同位置的平均幅值^[12]。因为每次去噪处理都是对 IMF 分量进行平滑滤波处理,故而随着去噪次数增多,吸收峰的幅值

会有一定程度的减小。

为了确定 EMD 去噪处理的次数,计算每次滤波之后的信号的信噪比、干涉抑制比及吸收峰幅值,结果如图 1(b)~(d)所示。可以看出:随着去噪次数增多,信噪比和干涉抑制比增大,这说明去除干涉噪声的能力增强,但信号的峰值减小;当去噪次数大于 4 次以后,信噪比和干涉抑制比增大的趋势变缓,而信号幅值在第 3 次和第 4 次去噪后变化不大。多次 EMD 去噪后得到的信号如图 2 所示,可以看出,去噪 3 次时信号还有明显的周期性波动,而去噪 4 次后的效果较好,证明了多次 EMD 去噪方法用于光谱降噪的可行性。因此,后续实验选择 4 次 EMD 去噪处理。

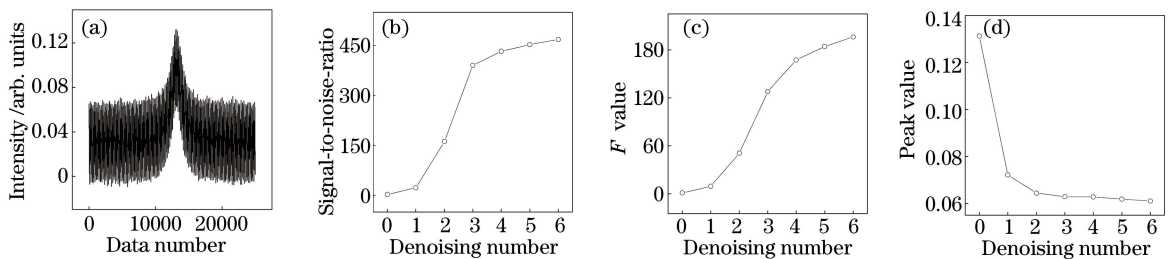


图 1 仿真结果。(a) 加噪后的信号;(b) 不同去噪次数下的信噪比;(c) 不同去噪次数下的干涉抑制比;
(d) 不同去噪次数下的信号峰值

Fig. 1 Simulation results. (a) Signal with noises; (b) signal-to-noise ratios at different denoising numbers;

(c) interference rejection ratio at different denoising numbers; (d) peak signal amplitude at different denoising numbers

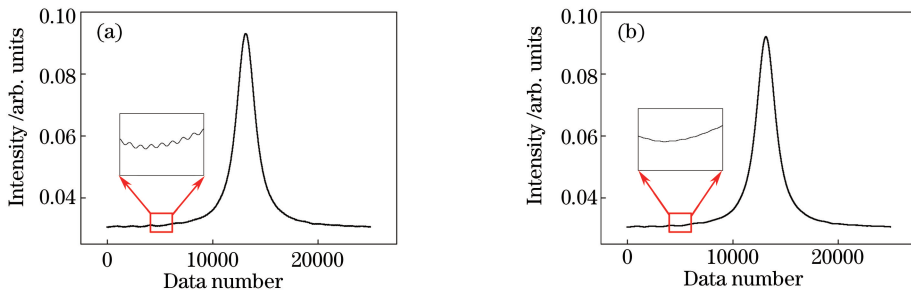


图 2 不同 EMD 去噪次数下得到的去噪信号。(a) 3 次;(b) 4 次

Fig. 2 Denoised signals obtained at different EMD denoising numbers. (a) Three; (b) four

3 实验

TDLAS 气体探测系统的原理图如图 3 所示,其中 LD 为激光二极管, M 为反射镜, PC 为计算机。实验分别采用直接吸收光谱技术(DAS)和波长调制二次谐波(WMS-2f)探测技术测量 CO_2 气体的吸收光谱。光源选用中心频率为 $1.578 \mu\text{m}$ 的分布反馈式(DFB)激光器,由激光驱动器控制其工作温度和注入电流,利用信号发生器产生的三角波注入电流来改变激光的波长,波长调制的驱动信号由三角

波扫描信号和锁相放大器产生的正弦波调制信号(频率为 3 kHz)叠加后产生。DFB 激光器产生的激光先经过光隔离器,目的是避免反射光导致的激光器输出不稳定。随后,激光经渐变折射率(Grin)透镜准直成空间光束后进入带温控的 White 型多光程池,该吸收池的有效光程为 10 m。出射光通过透镜聚焦到 InGaAs 探测器上。采用波长调制技术时,需要采用锁相放大器对信号进行解调(频率为 6 kHz),最后,采用数据采集卡(DAQ,采样速率为 250 kSa/s)采集信号。

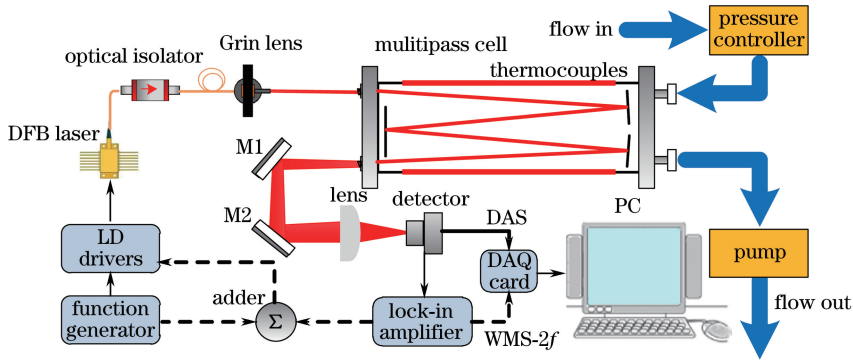


图3 DAS与WMS-2f结合的White型多光程池实验系统原理图

Fig. 3 Schematic of experimental platform of multi-pass White cell with the combination of DAS and WMS-2f

4 结果与讨论

对CO₂吸收谱线进行测量时所选谱线与仿真分析时的一致,吸收强度为 $1.608 \times 10^{-23} \text{ cm} \cdot \text{mol}^{-1}$ [20]。图4所示为在压强为9333 Pa时,体积分数为6.1%的CO₂的DAS信号,以及对此信号分别采用多次平均降噪法、快速傅里叶变换(FFT)低通滤波和多次EMD方法进行降噪的结果。图4(a)所示为100次平均后得到的降噪信号与原始信号的对比图,可以看出,多次平均降噪法对

随机白噪声的降噪效果良好,但无法去除周期性的干涉条纹。图4(b)所示为FFT低通滤波法(截止频率为180 Hz)降噪后的信号与原始信号的对比图,可以看出,低通滤波可以在一定程度上抑制干涉噪声,但去噪后的信号波动明显,且信号中心频率有所偏移,这是因为实际噪声复杂多变,除干涉噪声和白噪声外还有闪烁噪声、热噪声等[8]。由图4(c)所示多次EMD方法降噪后的信号与原始信号的对比图可知,多次EMD方法去噪后的平滑效果好,而且可以得到较高的信噪比。

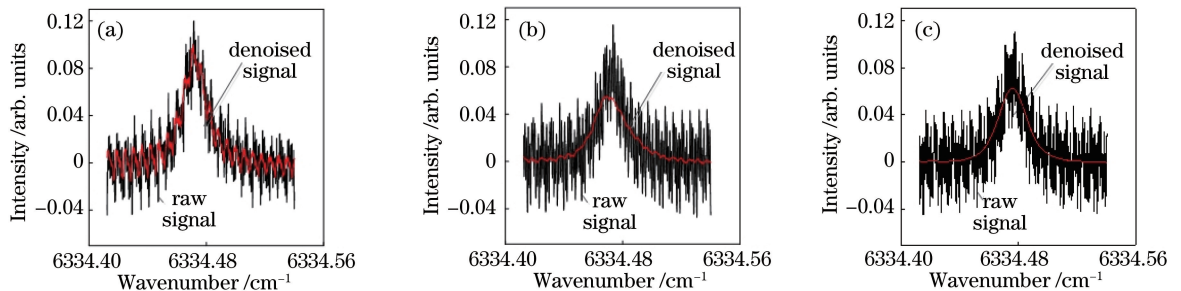


图4 不同方法去噪后DAS信号与原始信号。(a)多次平均方法;(b)低通滤波方法;(c)多次EMD法

Fig. 4 Raw signals and DAS signals denoised by different denoising methods. (a) Multi-averaging method;

(b) low pass filtering method; (c) multi-EMD method

为了进一步测试EMD方法的降噪效果,在9333 Pa压强下测量了体积分数为1.5%~9.9%的CO₂气体的吸收光谱,并对其进行了降噪处理,结果如图5所示。图5(a)所示为多次EMD降噪后得到的直接吸收信号,可以看出,干涉噪声几乎完全被抑制。由图5(b)可知,测量结果具有良好的线性关系,线性相关系数 r 为0.99986。图5(c)、(d)所示分别为低通滤波法及多次平均滤波法去噪后得到的信号的线性关系,其线性相关系数分别为0.99646和0.99179,且测量误差比EMD方法的大。

测量了体积分数为2%~12%的CO₂的二次谐波信号,并进行了多次EMD降噪处理,结果如图6

所示。由图6(a)可知,干涉噪声和随机噪声得到了明显抑制;通过波长调制技术测量的信号的干涉噪声与直接吸收信号的相比有所抑制,这是因为通过改变波长调制技术中调制信号的幅值可以滤除特定频率的干涉噪声[11]。由图6(b)、(c)可知,CO₂的体积分数为2%和4%时,去噪能力较弱。这是因为当CO₂的浓度过低时,吸收信号变弱,且该系统的干涉噪声很大,增大了降噪难度。尽管如此,当CO₂的体积分数为2%时,信噪比仍可达到57.49,系统的探测灵敏度约为 3.5×10^{-5} 。由图6(c)可知,二次谐波信号与波数有较好的线性关系,线性相关系数为0.99889。

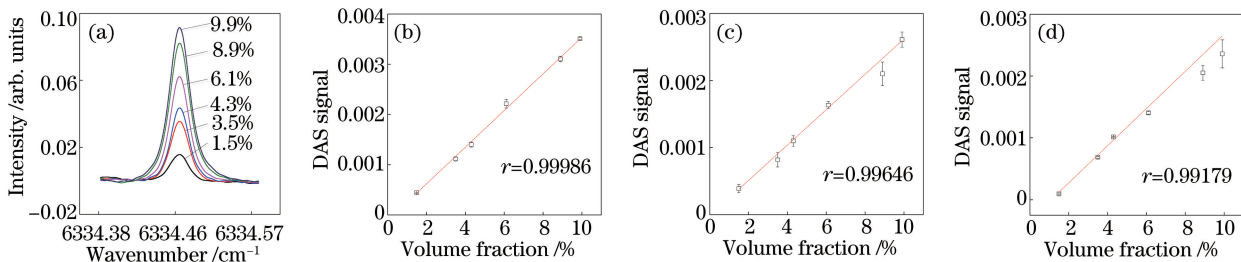


图 5 不同降噪方法的实验结果。(a)不同体积分数 CO₂ 使用多次 EMD 方法降噪后得到的直接吸收信号；(b)经 EMD 降噪后信号的线性度；(c)经低通滤波降噪后信号的线性度；(d)经多次平均降噪后信号的线性度

Fig. 5 Experimental results using different denoising methods. (a) Direct absorption signals denoised by multi-EMD method for CO₂ with different volume fractions; (b) linearity of signal denoised by EMD; (c) linearity of signal denoised by low pass filtering; (d) linearity of signal denoised by multi-averaging

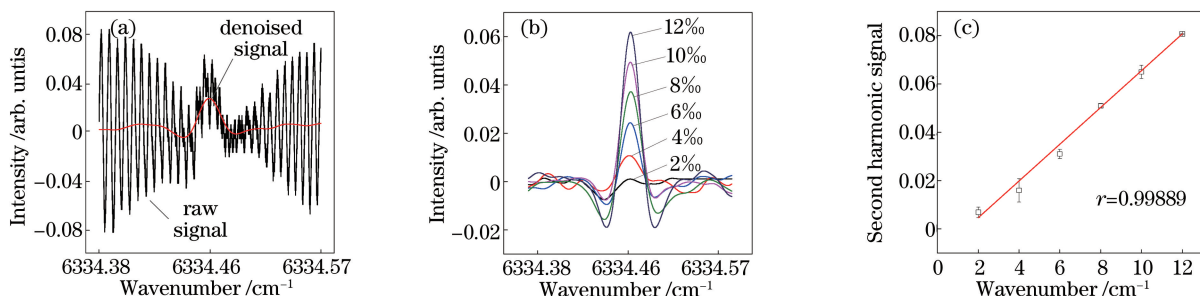


图 6 二次谐波信号的实验结果。(a) CO₂ 体积分数为 6% 时去噪前后的二次谐波信号；(b)多次 EMD 方法降噪后得到的信号；(c)二次谐波信号的线性度

Fig. 6 Experimental results of second harmonic signal. (a) Second harmonic signals before and after denoising for CO₂ with a volume fraction of 6%; (b) denoised CO₂ signals after multi-EMD; (c) linearity of second harmonic signal

温度和压强均会改变光谱信号的强度和干涉的自由光谱区,为了研究测量条件对多次 EMD 降噪效果的影响,在 20 °C、不同压强(6666,7999,9333,10666,11999,13332 Pa)下以及压强为 9333 Pa、不同温度(20,50,100,150,200 °C)下的 CO₂ 信号进行测量及多次 EMD 去噪处理,计算了去噪后信噪比的增大倍数 M 及干涉抑制比 F (与去噪前相比),结

果分别如表 1、2 所示。由表 1 可知,在温度为 20 °C、压强为 9333 Pa 的条件下,降噪效果最好, M 为 136.32, F 为 189.46。由表 2 可知,当压强为 9333 Pa、温度为 200 °C 时, M 最小。这是因为随着温度升高,光谱信号变弱,去噪难度增大。在不同的实验条件下, M 均大于 48, F 比去噪前约降低了两个量级。

表 1 不同压强下去噪后的信噪比增大倍数 M 和干涉抑制比 F

Table 1 Enhancement time of signal-to-noise M and interference rejection ratio F after denoising at different pressures

Pressure /Pa	6666	7999	9333	10666	11999	13332
M	48.20	49.45	136.32	48.51	71.82	84.07
F	70.33	60.15	189.46	68.78	94.29	113.99

表 2 不同温度下去噪后的信噪比增大倍数 M 和干涉抑制比 F

Table 2 Enhancement time of signal-to-noise M and interference rejection ratio F after denoising at different temperatures

Temperature /°C	20	50	100	150	200
M	136.32	194.15	86.86	178.37	50.56
F	189.46	240.12	99.89	173.98	82.25

5 结 论

利用温度可控的 White 型多光程池测量了 1.578 μm 附近的 CO₂ 气体吸收谱线,对多次 EMD

法的去噪效果进行了研究。与多次平均和低通滤波方法相比,多次 EMD 法的去噪效果更佳,能有效去除干涉噪声及随机噪声,且其中心频率未发生偏移。在气体的浓度测量中,多次 EMD 法去噪得到的直

接吸收信号和二次谐波信号均具有良好的线性关系。对不同温度和压强下的光谱信号进行了去噪处理,结果表明,干涉噪声均可以得到很好的滤除,信噪比比去噪前约提高了两个量级,干涉抑制比比去噪前约降低了两个量级。

参 考 文 献

- [1] Du Z H, Zhai Y Q, Li J Y, *et al.* Techniques of on-line monitoring volatile organic compounds in ambient air with optical spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(12): 3199-3203.
杜振辉, 翟雅琼, 李金玉, 等. 空气中挥发性有机物的光谱学在线监测技术[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(12): 3199-3203.
- [2] Yuan S, Kan R F, He Y B, *et al.* Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1208003.
袁松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 基于可调谐半导体激光光谱大气 CO₂ 监测仪[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1208003.
- [3] Cheng Y, Zhao W X, Hu C J, *et al.* Experimental study of the photochemical reaction in the smog chamber using a Chernin multipass[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0830001.
程跃, 赵卫雄, 胡长进, 等. Chernin 型多通池用于烟雾箱光化学反应过程的实验研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0830001.
- [4] Yao L, Liu W Q, Liu J G, *et al.* Research on open-path detection for atmospheric trace gas CO based on TDLAS[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0215003.
姚路, 刘文清, 刘建国, 等. 基于 TDLAS 的长光程环境大气痕量 CO 监测方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0215003.
- [5] Werle P. Accuracy and precision of laser spectrometers for trace gas sensing in the presence of optical fringes and atmospheric turbulence [J]. *Applied Physics B*, 2010, 102(2): 313-329.
- [6] Werle P, Mücke R, Slemr F. The limits of signal averaging in atmospheric trace-gas monitoring by tunable diode-laser absorption spectroscopy (TDLAS) [J]. *Applied Physics B*, 1993, 57(2): 131-139.
- [7] Zheng C T, Ye W L, Huang J Q, *et al.* Performance improvement of a near-infrared CH₄ detection device using wavelet-denoising-assisted wavelength modulation technique[J]. *Sensors and Actuators B*, 2014, 190: 249-258.
- [8] Niu M S, Han P G, Song L K, *et al.* Comparison and application of wavelet transform and Kalman filtering for denoising in $\delta^{13}\text{CO}_2$ measurement by tunable diode laser absorption spectroscopy at 2.008 μm [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): A896-A905.
- [9] Niu M S, Wang G S. The research of $\delta^{13}\text{CO}_2$ by use of wavelet de-noising at 2.008 μm based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(2): 024202.
牛明生, 王贵师. 基于可调谐二极管激光技术利用小波去噪在 2.008 μm 波段对 $\delta^{13}\text{CO}_2$ 的研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(2): 024202.
- [10] Cassidy D T, Reid J. Harmonic detection with tunable diode lasers-two-tone modulation[J]. *Applied Physics B*, 1982, 29(4): 279-285.
- [11] Reid J, El-Sherbiny M, Garside B K, *et al.* Sensitivity limits of a tunable diode laser spectrometer, with application to the detection of NO₂ at the 100-ppt level[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(19): 3349-3353.
- [12] Webster C R. Brewster-plate spoiler: a novel method for reducing the amplitude of interference fringes that limit tunable-laser absorption sensitivities[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1985, 2(9): 1464-1470.
- [13] Wu S Q, Kimishima T, Kuze H, *et al.* Efficient reduction of fringe noise in trace gas detection with diode laser multipass absorption spectroscopy [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, 39(7A): 4034-4040.
- [14] Meng Y X, Liu T G, Liu K, *et al.* A modified empirical mode decomposition algorithm in TDLAS for gas detection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(6): 1-7.
- [15] Colominas M A, Schlotthauer G, Torres M E. Improved complete ensemble EMD: a suitable tool for biomedical signal processing [J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2014, 14: 19-29.
- [16] Huang N E, Shen Z, Long S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [17] Sun L F, Wang Y C. Soft-sensing of oxygen content of flue gas based on mixed model [J]. *Energy Procedia*, 2012, 17: 221-226.

- [18] Huang X, Huang L, Jung T P, *et al.* Intrinsic mode functions locate implicit turbulent attractors in time in frontal lobe MEG recordings [J]. *Neuroscience*, 2014, 267: 91-101.
- [19] Huang D S. Effect of sampling on empirical mode decomposition and correction [J]. *Journal of Vibration Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(3): 381-384.
- [20] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, *et al.* The HITRAN2012 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130(11): 4-50.