

doi:10.3788/gzxb20154401.0114002

# 可调谐半导体激光吸收光谱技术的调制参量影响及优化选择

张志荣<sup>1</sup>, 孙鹏帅<sup>1</sup>, 夏滑<sup>1</sup>, 庞涛<sup>1</sup>, 吴边<sup>1</sup>, 崔小娟<sup>1</sup>, 王煜<sup>1</sup>, 董凤忠<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 安徽省光子器件与材料重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 合肥 230026)

**摘 要:**为获得较好的谐波信号, 完成不同测量目的, 以 DFB-760.77 nm 波长处氧气监测为例, 通过改变扫描锯齿信号和调制正弦信号的频率和幅值, 讨论了调制参量对二次谐波信号峰-峰值、对称性、谐波信号展宽和信号完整性等判别依据的影响和变化. 结果表明: Simulink 模拟值和实验值相关性较高, 当正弦调制信号和锯齿扫描信号频率比值为 1 000 倍时, 可以获得较好的二次谐波信号. 该研究为实验系统中调制参量的选取和调制度及系统准确度、稳定性、重复性等性能的优化提供了一定帮助.

**关键词:** 可调谐半导体激光吸收光谱技术; 调制参量; 扫描锯齿波信号; 调制正弦波信号; 谐波信号

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)01-0114002-10

## Modulation Parameters Influence and Optimal Selection of Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

ZHANG Zhi-rong<sup>1</sup>, SUN Peng-shuai<sup>1</sup>, XIA Hua<sup>1</sup>, PANG Tao<sup>1</sup>, WU Bian<sup>1</sup>,  
CUI Xiao-juan, WANG Yu<sup>1</sup>, DONG Feng-zhong<sup>1,2</sup>

(1 *Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(2 *Department of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of science and technology of China, Hefei 230026, China*)

**Abstract:** In order to select the suitable modulation parameters for harmonic signal and meet the different measurement requirements, taking a oxygen monitoring system with 760.77 nm absorption wavelength for example, the impact of different amplitude values on the symmetry, both sides minimum interval and signal integrity were discussed by changing the sawtooth and sine signal frequency. The result show that the Simulink values are highly relevant with experiment values and a good second harmonic signal is obtained when the ratio  $f_{\text{sin}}/f_{\text{saw}}$  is 1 000. The results have profound guiding significance for the system precision, stability, repeatability and other important aspects of the experimental system.

**Key words:** Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS); Modulation parameters; Scanning sawtooth signal; Modulated sinusoidal signal; Harmonic signal

**OCIS Codes:** 140.3600; 300.0300; 300.1030; 300.6260

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos. 11204320, 11204319, 41405034), 国家科技支撑计划(No. 2014BAC17B03)和中国科学院科研装备研制专项(No. YZ201315)资助

**第一作者:** 张志荣(1981-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为新型环境光学监测技术研究, 激光燃烧诊断关键技术研究. Email: zhangzr@aiofm.ac.cn

**通讯作者:** 董凤忠(1965-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为工业过程控制、环境监测和节能减排减灾中的光纤传感、高灵敏气体在线检测和光机电一体化等技术. Email: fzdong@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2014-06-06; **录用日期:** 2014-08-07

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

20世纪70年代, Hinkley和Reid<sup>[1-2]</sup>等对可调谐半导体激光吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)进行了一系列的研究. 该技术充分利用分布反馈式激光器的窄线宽和可调谐特性, 实现了气体分子的单根吸收谱线“指纹区”的扫描和测量, 具有分辨率高、灵敏度高、环境适应性好和响应快等优点, 是目前逐步推广的痕量气体在线监测技术之一. 近年来, 该技术在系统灵敏度、信号准确度、气体参量以及不同环境下的研究得到了进一步的发展<sup>[3-5]</sup>, 并逐步应用到多组分气体监测<sup>[6]</sup>、环境监测<sup>[7]</sup>、燃烧诊断<sup>[8]</sup>和机动车尾气监测<sup>[9]</sup>等方面.

在TDLAS系统中, 常用的波长调制方法是通过激光器的注入电流进行调制来实现激光器输出波长的调制, 选取经过气体吸收解调后的二次谐波分量作为检测信号进行浓度反演. 该方法常用的输入电流调制信号为低频扫描锯齿波信号叠加高频正弦波调制信号, 然而在实验过程中谐波信号的线型、线强和系统的最优调制是由扫描锯齿信号和调制正弦信号的频率、幅值等因素共同决定的. 并且各个调制参量对信号的影响方式和程度存在较大差异, 因此需要根据不同测量目的和测量条件选择合适的调制参量以达到良好的监测效果.

Werle<sup>[10]</sup>和Reid<sup>[11]</sup>等从TDLAS实验和基本原理方面进行了阐述, 分析了信号调制. Werle<sup>[12]</sup>和Roller<sup>[13]</sup>等研究了谐波信号处理和优化反演浓度的处理过程. Peng Z. M.<sup>[14]</sup>、Liu J. T. C.<sup>[15]</sup>等利用不同频率信号实现了气体浓度、温度、流速等的探测. 然而以上研究内容仅说明了使用的调制参量值, 并未对为何选取调制信号的频率和幅值以及两者之间的影响进行阐述. 虽然Supplee和Kluczynski分别对调制度和调制信号的频率进行了理论研究<sup>[16-17]</sup>, 但未涉及调制幅度和调制频率等参量对检测信号产生的影响. 本文选取经典的TDLAS系统以氧气的二次谐波信号为例进行实验和Simulink模拟分析, 通过改变扫描锯齿信号频率

(1 Hz→500 Hz)及幅值(56 mV→2 160 mV)变化和调制正弦信号频率(1 kHz→80 kHz)及幅值(10 mV→228 mV)变化, 对二次谐波信号峰-峰值、对称性、信号展宽和完整性等方面的影响进行分析, 从实验和理论上给出了TDLAS技术的调制参量变化和优化依据.

## 1 实验系统

常用调制方法可以分为三种: 1)固定激光器的工作电流改变温度控制实现波长调制; 2)固定激光器的工作温度改变工作电流实现波长调制; 3)同时改变激光器的温度和电流实现双重控制. 由于实验系统使用的DFB激光器对温度控制比较敏感, 在调节温度控制时, 激光器输出波长变化快扫描范围大, 不利于波长稳定和信号的检测. 所以采用第二种调制方法, 即先通过激光器的温度控制板和电流控制板分别设定它的工作温度和电流值, 确定中心吸收波长以后, 保持一定的工作温度和电流不变, 通过叠加锯齿信号对调谐激光器注入AC电流来改变激光器的波长, 使激光器输出波长在中心波长760.77 nm附近变化, 实现扫描气体分子的中心吸收线.

该方法对注入电流的调制包括两部分: 一部分是一个缓慢变化的锯齿波调制, 该锯齿波加在激光器的电流控制板上, 通过电流板与激光器的LD阳极相连, 电流控制板的延时、电流限等对激光器起到保护作用. 另一部分是一个快速变化的正弦波, 由于它频率变化很快, 超过了激光器电流板的最大允许频率参量( $<2$  kHz), 所以不能直接加在电流控制板上, 但可以通过一个RC电路滤波保护后加在激光器的阳极上来实现激光器波长的快速调制.

TDLAS实验系统见图1, 系统采用在密封Herriot吸收池中通入5%的氧气为实验气. 经过调制以后的DFB激光器输出准直光束经过吸收池内气体吸收以后, 由锁相放大器进行信号的解调, 由电脑采集和处理, 通过改变锯齿波和正弦波的频率、幅值, 获取相应的二次谐波信号.

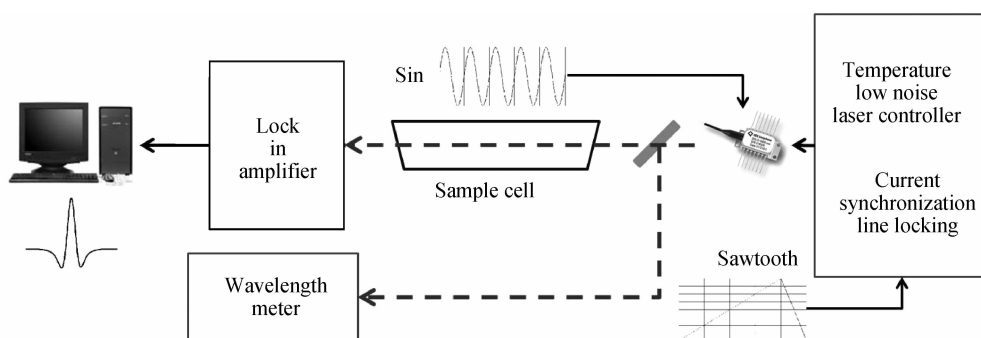


图1 TDLAS监测实验系统

Fig. 1 Block diagram of TDLAS experimental system

系统中激光器受到正弦信号调制后,激光器输出波长  $\nu(t)$  和输出光强  $I_0(t)$  表示<sup>[18]</sup>为

$$\begin{cases} \nu(t) = \overline{\nu(t)} + \Delta\nu \sin \omega t \\ I_0(t) = \overline{I_0(t)} + i_0 \cos(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\Delta\nu$  与  $i_0$  是表示正弦波引起的相应调制幅度,调制频率用  $\omega$  来表示,  $\varphi$  为频率调制和幅度调制的相位差. 将式(1)带入 Beer-Lambert 定律

$$I(t) = I_0(t) \exp[-S(T)NLP\varphi(\nu)] \quad (2)$$

可以得到

$$I(t) = [I_0(t) + i_0 \cos(\omega t + \varphi)] \cdot \exp[-S(T)NLP\varphi[\overline{\nu(t)} + \Delta\nu \sin \omega t]] \quad (3)$$

样品池吸收后的激光强度可以用  $I(\nu_c)$  的余弦傅里叶级数来表示,即

$$I(\nu_c, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\nu_c) \cos(n\omega t) \quad (4)$$

式中  $A_n$  为各次谐波分量,对于痕量气体吸收  $\sigma(\nu)NL \ll 1$ ,可近似得到

$$A_n(\nu_c) = -I_0 CL \cdot \frac{2 - \delta_{0,n}}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \sigma(\nu_c + \Delta\nu \cos \theta) \cdot \cos n\theta d\theta \quad (5)$$

因此,每个谐波分量都是直接与痕量气体的浓度  $C$  成正比的. 其中偶次谐波分量的峰值位于吸收线中心,而奇次谐波分量的峰值相对于中心波长有一个偏移. 因此,实验选取二次谐波分量作为分析信号. 对式(5)以 Lorentzian 线型函数为基础,整理计算得到二次谐波系数为<sup>[18]</sup>

$$k_2 = \frac{2[2 + m^2 - 2(1 + m^2)^{1/2}]}{m^2(1 + m^2)^{1/2}} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,当调制度  $m = \delta\nu / \Delta\nu_L \simeq 2.2$  时,谐波系数  $k_2$  获得最大值,如图 2. 由于调制度的理想化计算

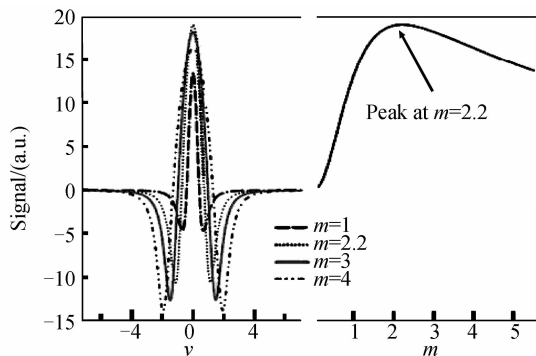


图 2 二次谐波线型与幅值和调制度的关系<sup>[19]</sup>

Fig. 2 The relationship between  $2f$  with the amplitude and modulation index<sup>[19]</sup>

和实验系统存在差异,所以最佳调制度的选取需要结合实际情况调整调制参量以获得谐波信号的最佳效果.

## 2 TDLAS 系统调制影响及讨论

TDLAS 调制信号是由一个低频锯齿信号和一个高频正弦信号共同作用的. 锯齿信号是为了实现激光器波长的扫描,而正弦信号则是为了实现谐波信号的探测和抑制噪声. 然而,每个谐波信号的幅值和信号的形状又同时包含了所测气体的浓度、温度、压力等基本信息,因此需要根据实际情况选取合适的调制参量. 在浓度计算中,谐波信号的幅值是最关键的计算指标,直接关系到气体浓度的监测极限和灵敏度,本文采用完整谐波信号情况下的最大值与最小值之差(峰-峰值)表示信号幅值. 理论上偶次谐波线型是关于中心波长对称的,但是由于剩余幅度调制和系统硬件因素,信号两侧并非完全对称的,因而对称性可以用来作为衡量信号受到其他干扰因素的指标,本文采用谐波信号两谷底的值之比作为衡量对称性的指标,其比值越接近于 1 表明对称性越好,反之偏离即为影响越大. 同时,将峰值两边的谷底坐标表征为谐波线型的宽度. 因此,将四个参量(锯齿波频率、正弦波频率、锯齿波幅值、正弦波幅值)的变化为依据,分析信号的形状、信号幅值、对称性、信号展宽和信号完整性的变化情况.

### 2.1 Simulink 仿真结果

为了验证实验中调制参量的影响,利用 Simulink 进行调制系统建模. Simulink 模拟 TDLAS 系统模块为三个步骤:1)选定 Lorentz 线型函数为气体的吸收函数,依据式(1)及 Simulink 的数学运算模块组(Math Operation)完成相加、增益、平方、叉乘、倒数等操作实现线性函数模拟,模拟图如图 3(a);2)设定锯齿信号、正弦信号的频率和幅值,探测受调制后的激光器输出光通过气体吸收池后的电压信号,模拟光源模块如图 3(b);3)二次谐波信号的提取及谐波信号的整合,如图 3(c);4)按照实验上调制参量的变化值改变调整参量的幅值和频率,获取不同二次谐波信号进行分析以验证实验结果.

建立 Simulink 模拟系统以后,通过叠加已知幅值和频率的锯齿波信号和正弦波信号用以测量该激光器的调制参量用以校正模拟图中的各个参量值. 其激光器电流电压变化关系为:  $0.003 \text{ nm/mA}$ ,  $50 \text{ mA/V}$ . 其具体的模拟过程可查阅文献<sup>[20-21]</sup>本文不再进行详细描述.

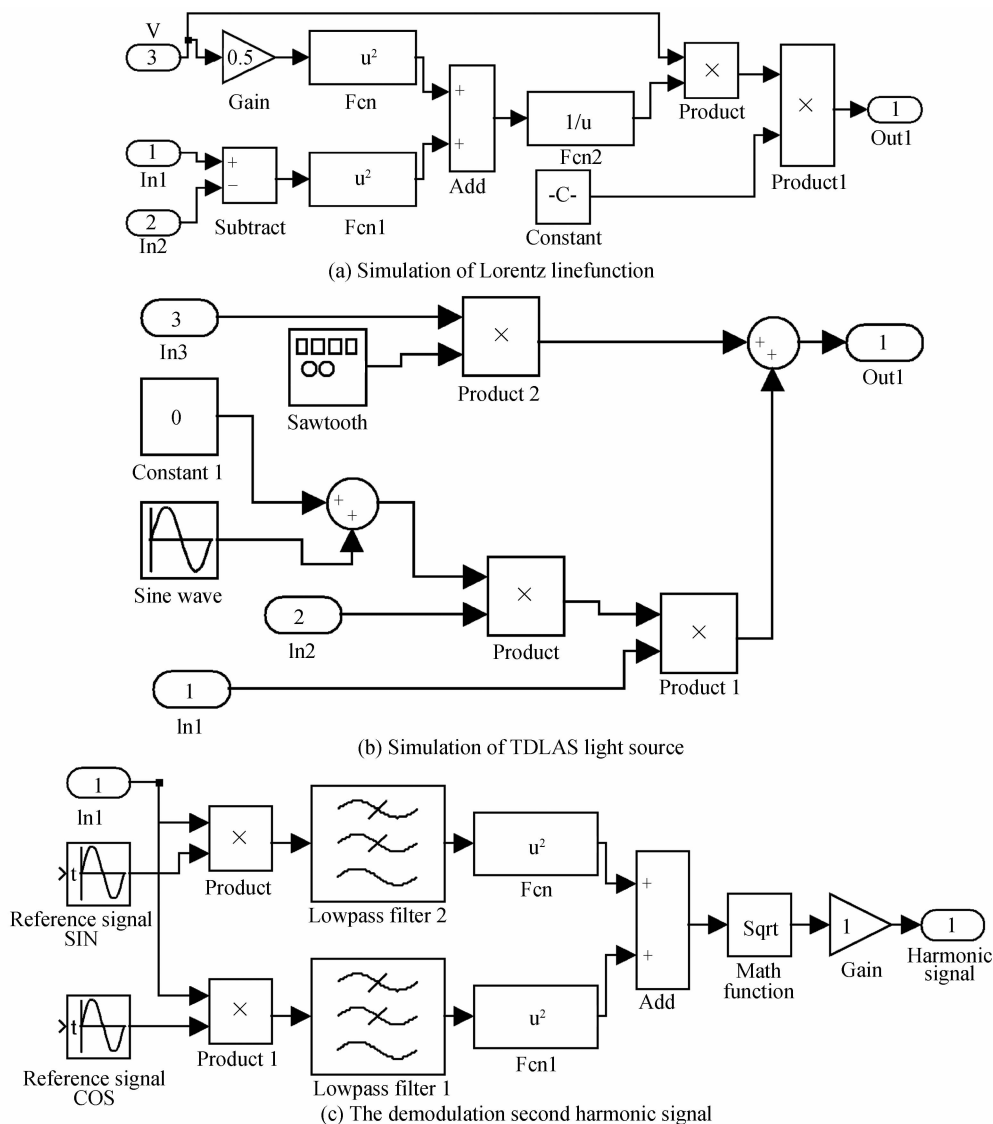


图3 Simulink 模拟系统  
Fig. 3 Simulation of Simulink

## 2.2 实验结果

### 2.2.1 仅锯齿波频率变化

保持锯齿波幅值 ( $V_{pp} = 600 \text{ mV}$ )、正弦波幅值 ( $V_{pp} = 105 \text{ mV}$ )和频率 ( $f_{\text{sin}} = 10 \text{ kHz}$ )不变,测量得到  $1 \text{ Hz} \sim 500 \text{ Hz}$  范围下不同调制频率情况的二次谐波信号特征谱线,如图 4(a)~(c),锯齿信号频率分段变化见图 4(d)~(f).由图 4 可知:1)在  $1 \text{ Hz} \sim 10 \text{ Hz}$  变化过程中,信号幅值逐渐变大,信号线型趋于完整,对称性程度增大,信号逐渐展宽;2)在  $10 \text{ Hz} \sim 500 \text{ Hz}$  变化过程中,随着比值倍数的降低,虽然其线型逐渐靠拢,但是其幅值逐渐变小,线型逐渐变差,对称性程度也降低,信号右侧逐渐发生失真,当达到  $500 \text{ Hz}$  时信号右侧极值已经无法在一个周期内得到明显区分. Simulink 模拟结果见图 4(d)、(e)、(f).由于理论模拟为理想状态下不受电路、光路等的影响,其对称度较好,因此实验中对此部分不做对称度的比较,仅讨论谐波幅值和

展宽之间的理论模拟和实验值对比.从图 6 可以看出,锯齿波频率  $f_{\text{saw}} = 10 \text{ Hz}$  时信号最佳,此时频率比值  $\tau = \frac{f_{\text{sin}}}{f_{\text{saw}}} = \frac{10 \text{ kHz}}{10 \text{ Hz}} = 1000$ .当锯齿波的扫描频率增加时,单一周期的扫描时间变短,信息反演速度加快,可以满足流速测量、燃烧诊断等研究领域的快速检测需求.当采集卡的采样频率固定不变或者达不到采样定律要求的情况时,所采集到的信号点数势必减少,从而影响信号的测量准确度,甚至采集不到有效的信号量,因此必须在改变扫描信号频率时适时调整采样时间或采集卡的参量以保证系统的准确度和速度.当采样速度要求不高时,在采样频率不变的情况下低扫描频率采集到的点数增多,监测准确度相对得到提升,可以满足环境监测等准确度要求较高情况的测量.如果速度和准确度要求很高,则需要更好的匹配锯齿波频率和正弦波频率的比值,并根据谐波线型来确定实际的调制参量.

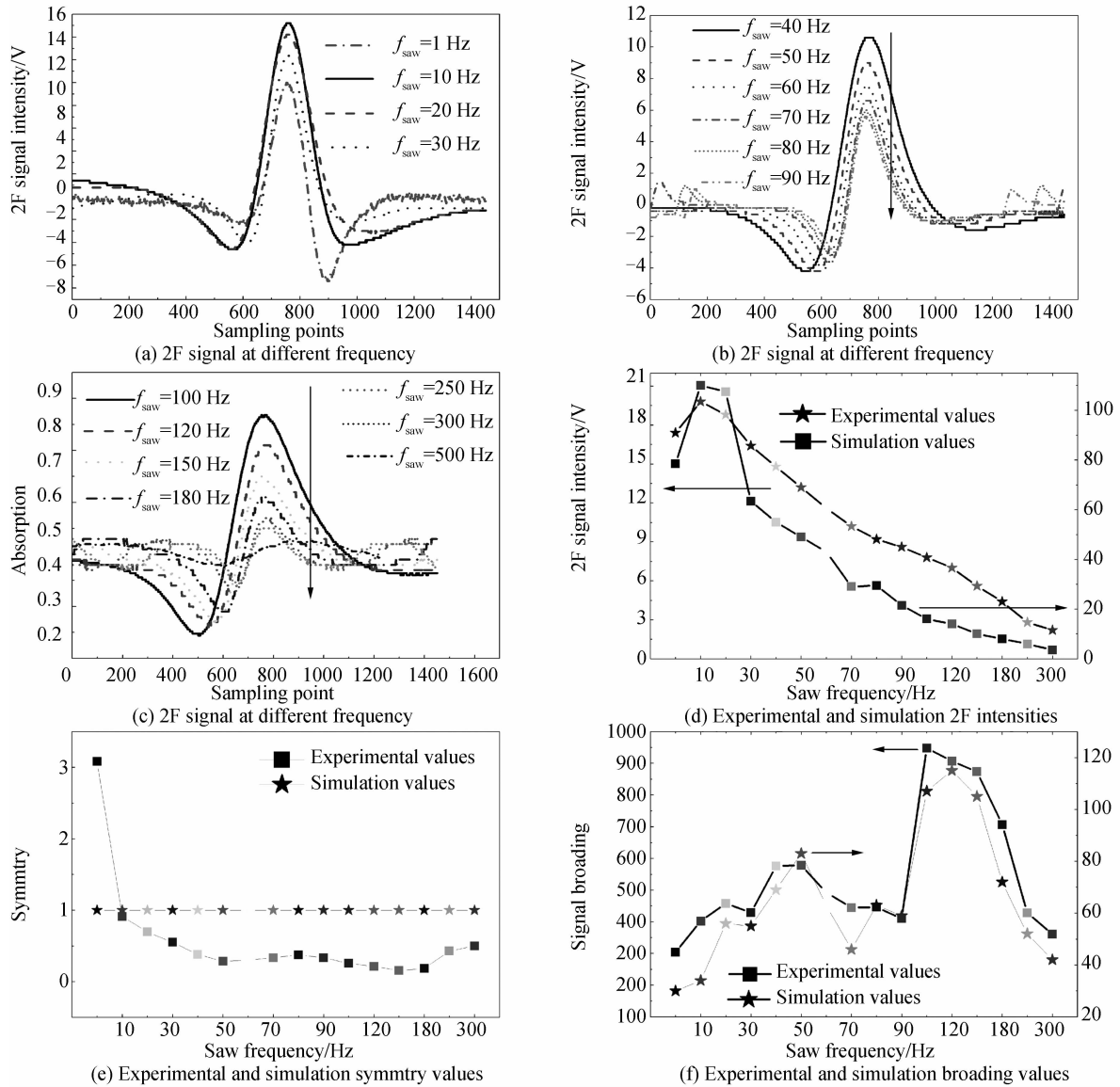


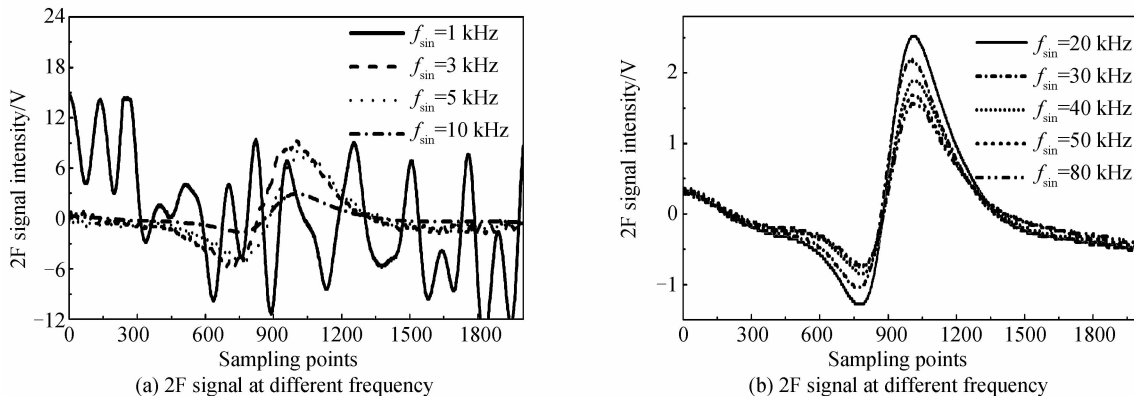
图4 锯齿波频率变化时二次谐波线型、幅值、对称性和展宽的变化情况

Fig. 4 The change situations of lineshape, amplitude, symmetry, broadening along with different sawtooth frequencies

2.2.2 仅正弦波频率变化

保持锯齿幅值 ( $V_{pp} = 600 \text{ mV}$ )、频率 ( $f_{\text{saw}} = 100 \text{ Hz}$ )和正弦信号幅值 ( $V_{pp} = 105 \text{ mV}$ )不变,由于锁相放大器的带宽原因,正弦调制频率最大至  $80 \text{ kHz}$  可

以区分,所以在  $1 \text{ kHz} \sim 80 \text{ kHz}$  间改变调制正弦信号的频率,测量不同正弦调制和参考频率下的二次谐波信号特征谱线,如图 5(a). 比较图 5(b)中信号幅值、对称性和信号宽度发现,1)当频率为  $1 \text{ kHz}$  时,谐波信号



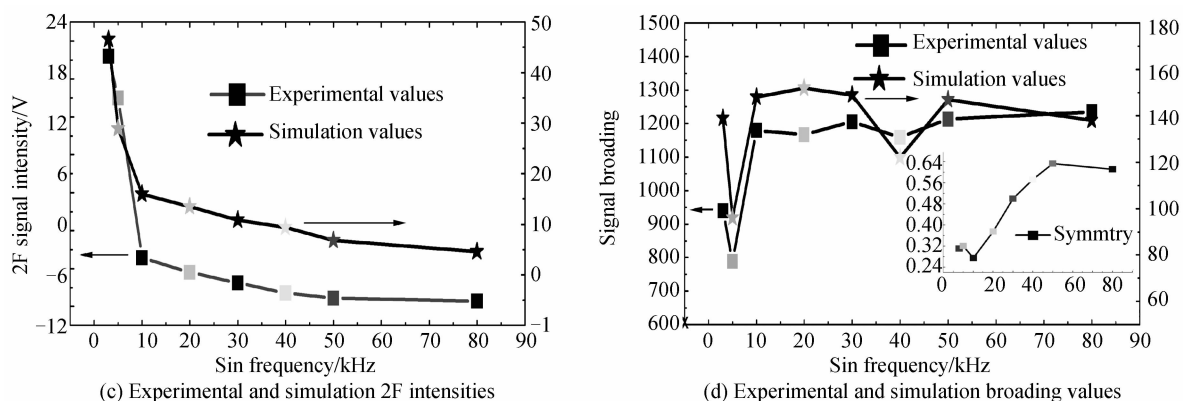


图5 正弦波频率变化时二次谐波线型、幅值、对称性和展宽的变化情况,“X”表示信号失真

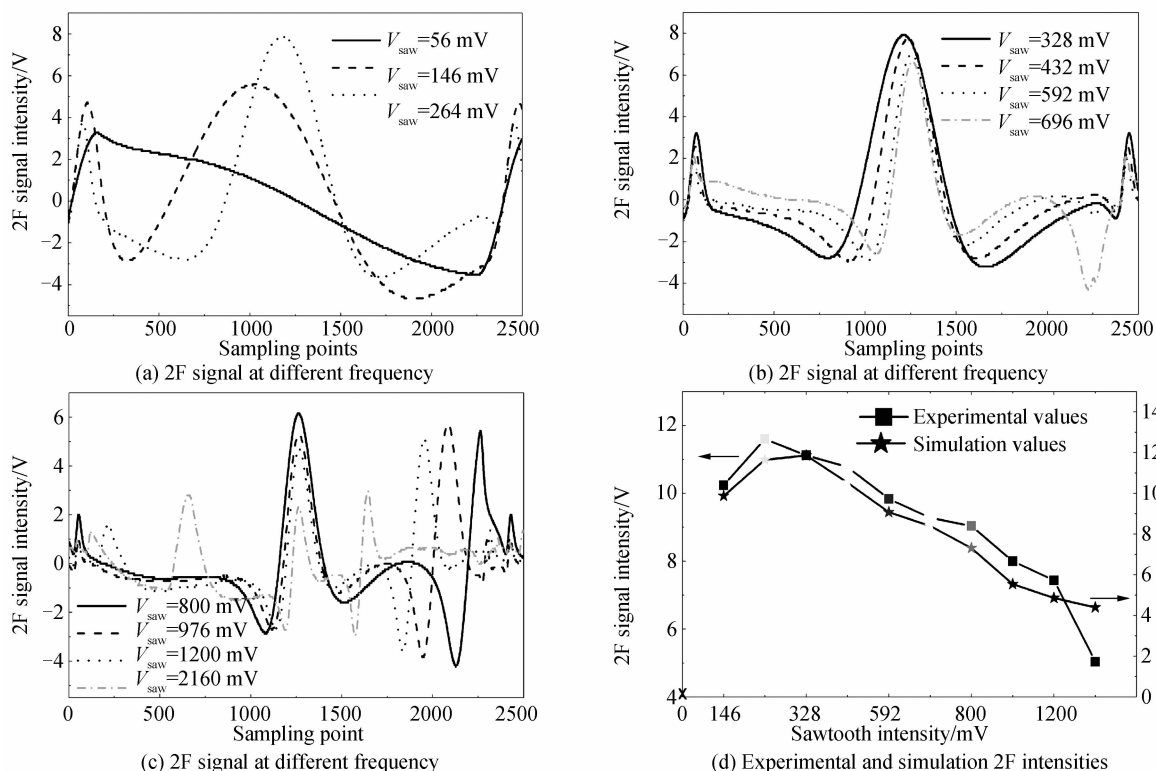
Fig. 5 The change situations of lineshape, amplitude, symmetry, broadening along with different sine frequencies. “X” stands for signal distortion

完全失真,其它信号有相对完整的谐波线型,并在信号频率增大的过程中信号右测逐步趋于平坦且出现失真,这是由于锁相放大器的滤波参量不匹配引起的;2)在频率1 kHz处无法获得有效数值,信号的峰-峰值随频率升高呈逐渐下降趋势,信号对称性整体呈上升趋势,说明信号向中间靠拢,宽度逐步变窄,虽然频率升高对信噪比的提升有一定的改善,但是受到信号完整性的影响,不能一味通过增加频率的方式来改善信号线型和提高抗干扰能力.经过分析,当频率 $\leq 1$  kHz时,信号中的 $1/f$ 噪声占主要地位,当大于1 kHz后激光器的 $1/f$ 噪声得到了很好抑制,二次谐波信号线型也逐渐趋于完整.当正弦波调制频率达到一定程度时, $1/f$ 噪声已经无法对谐波信号构成影响,此后再增大

正弦波频率时,信号的线型也得不到很大的改善.因此,通过选择合适的锯齿信号和正弦信号频率可以达到较为理想的监测状态. Simulink 模拟值如图 5(d),其变化趋势与实验值基本吻合.

### 2.2.3 仅锯齿波幅值变化

为了获得较好的信号线型谱线,保持锯齿频率( $f_{saw} = 10$  Hz)、正弦频率( $f_{sin} = 10$  kHz)和幅值( $V_{pp} = 178$  mV)不变,观察 56 mV~2 160 mV 锯齿信号幅值变化情况下的二次谐波信号谱线,如图 6(a)~(c).对比图 6(d)~(f),当锯齿波幅值为 56 mV 时,由于锯齿幅度非常小引起了谐波信号的极大展宽,锯齿信号的背景谱占据主导地位,以致无法区分完整的二次谐波线型.当信号逐步增大到 146 mV 时,二次谐波信号开



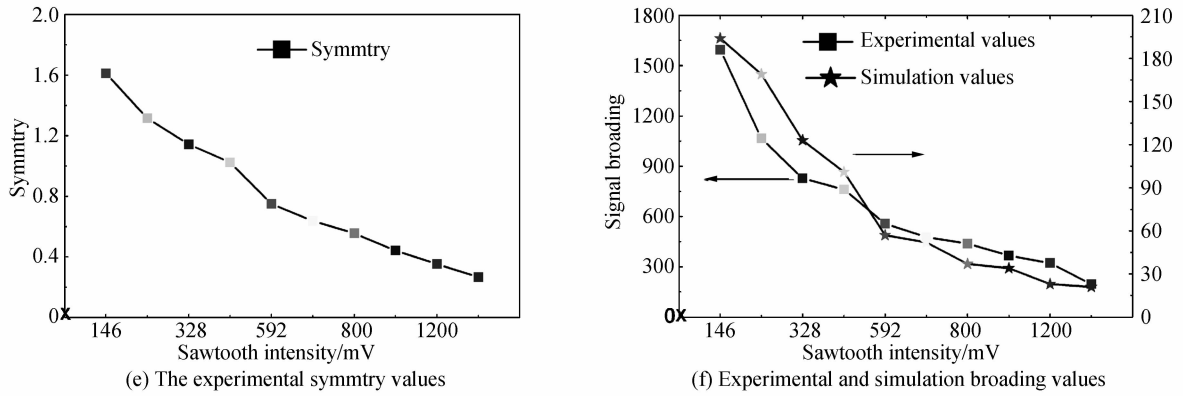


图6 锯齿波幅值变化时二次谐波线型、幅值、对称性和展宽的变化情况,“X”表示信号失真

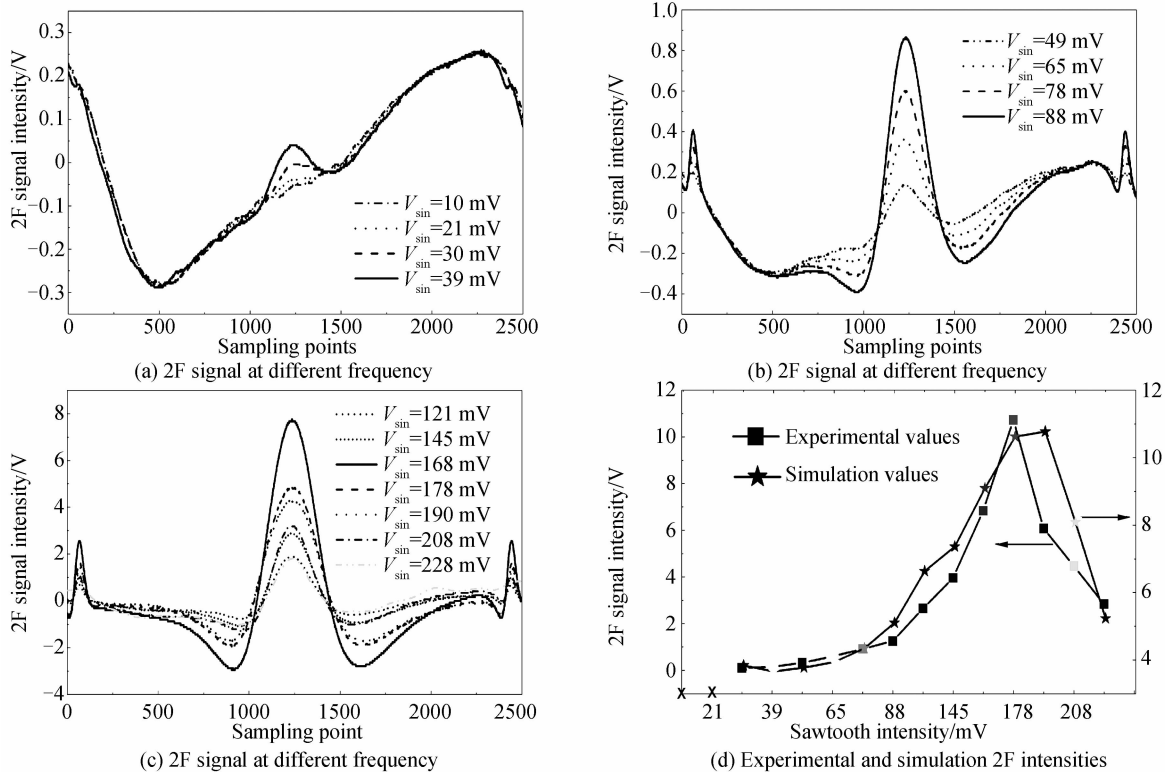
Fig. 6 The change situations of lineshape, amplitude, symmetry, broadening along with different sawtooth intensities. “X” stands for signal distortion

始趋于完整,锯齿信号增加到 432 mV 时,二次谐波幅值达到最大值,对称性达到最好.以 432 mV 为分界点,在扫描信号小于 432 mV 时信号左侧不完整,当信号大于 432 mV 时信号右侧不完整.当锯齿信号幅值继续变大时,激光器的波长扫描范围逐步变大,出现相邻的其他吸收峰,如:696 mV、976 mV、1 200 mV、2 160 mV 的左右峰.采用 Simulink 模拟值如图 6(d)、(f)所示,其变化趋势与实验值基本吻合.当锯齿幅值变大时,二次谐波的幅值、对称性和信号展宽降低.因此,实际工作中进行浓度监测时,必须得到完整的二次谐波信号,即信号中心吸收线两侧的基线,如图中 328 mV~592 mV 即可满足要求.由于温度监测时需要两条相邻的吸收谱线峰-峰值,因此需选择相对较大

的扫描幅值,并考虑激光器扫描的波长范围及最大值以免对激光器造成损伤.

#### 2.2.4 仅正弦波幅值变化

保持正弦频率( $f_{sin} = 10$  kHz)、锯齿频率( $f_{saw} = 10$  Hz)和幅值( $V_{pp} = 432$  mV)不变,只改变正弦信号的幅值,测量正弦幅值 10 mV~228 mV 变化范围内的二次谐波信号谱线,如图 7(a)~(c).分析图 7(d)~(f)的幅值、对称性和谱线宽度分析可知,当正弦信号幅值较小时,如 10 mV 和 21 mV 时无法获得明显的谐波信号,这是因为锁相放大器的滤波常数和参考信号响应过度引起,导致一部分锯齿信号出现了泄漏,就像是信号上叠加了一个锯齿信号一样,占据了谐波线主导地位.当正弦波信号幅值逐渐增大时,二次谐波线



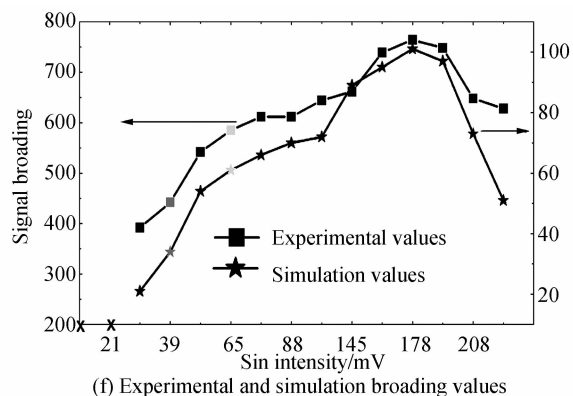
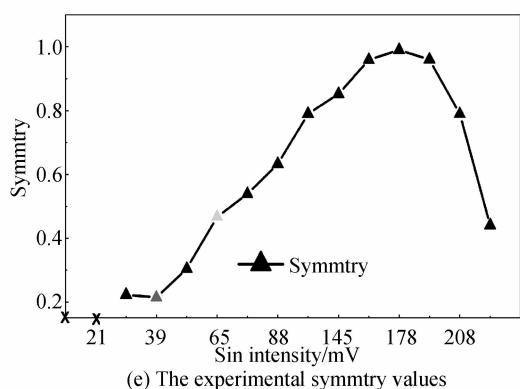


图7 正弦波幅值变化时二次谐波线型、幅值、对称性和展宽的变化情况,“X”表示信号失真

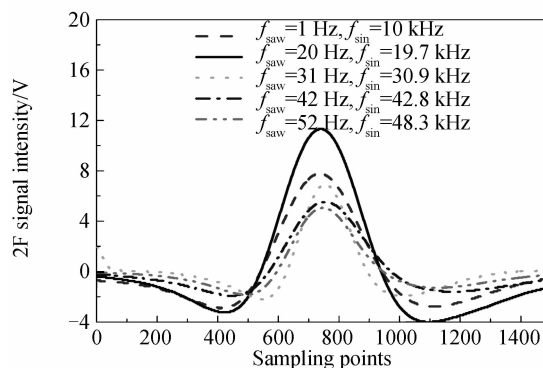
Fig.7 The change situations of lineshape,amplitude,symmetry,broadening along with different sine intensities. “X” stands for signal distortion

型也逐渐趋于完整,在 178 mV 幅值处信号线型完全处于最佳状态,之前正弦幅值小于 178 mV 的谐波信号均是左低右高的不对称性,大于 178 mV 时出现左高右低的相反情况,说明只要锯齿波幅值选定,其最佳信号的正弦波幅值也就确定了.随着正弦信号幅值的增加其变化趋势与对称性变化基本一致.当越过临界点后,各个参量开始降低,影响到探测极限值,可以推断当锯齿信号幅值为 432 mV,正弦信号幅值为 178 mV 时信号是最佳状态,达到最优调制情况,此时监测信号信噪比最好.因此当锯齿参量固定后,寻找合适的正弦信号幅值是浓度监测中提高灵敏度、准确度和完整线型所必须的. Simulink 模拟结果见图 7(d)、(f),其变化趋势与实验值基本吻合.

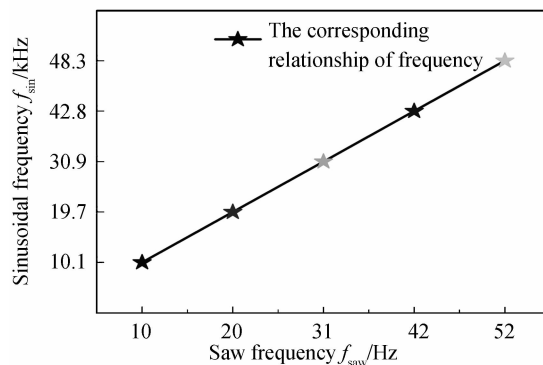
### 3 分析与讨论

锯齿波信号和正弦波信号频率、幅值直接影响二次谐波信号的完整性,因此针对每一个测量需求必须有一个很好的匹配关系.由于大部分背景噪声,尤其是  $1/f$  噪声,具有低频段强度大,高频段强度降低的特点,因此,如在高频下检测信号将会有效地抑制背景噪声,从而使检测灵敏度得到极大提高.为了验证各参量之间的关系,分别采用锯齿波幅值不变  $V_{pp} = 432\text{mV}$ ,频率变化为  $f_{\text{saw}} = 10\text{ Hz}, 20\text{ Hz}, 31\text{ Hz}, 43\text{ Hz}, 51\text{ Hz}$ ,寻找最佳谐波信号的正弦信号,得到的二次谐波信号如图 8(a).保持最佳状态  $V_{\text{pp-sin}} = 178\text{ mV}$  不变,根据最佳谐波信号得到的正弦信号频率分别为  $f_{\text{sin}} = 10.1\text{ kHz}, 19.7\text{ kHz}, 30.9\text{ kHz}, 42.6\text{ kHz}, 48.3\text{ kHz}$ .从图 8(b)可以看出,正弦调制信号和锯齿扫描信号的频率比值约为 1000.由于扫描锯齿和正弦调制幅值保持不变,随着两者频率的增大得到的二次谐波信号幅值降低,因此可以认为当频率变化时所需要的正弦信号幅值同样需要变大才可以得到较大的谐波幅值信号.所得到的二次谐波信号平滑度提高,噪声的影响逐渐减小,说明通过提高调制频率可以降低噪声并提高

信噪比.



(a) The better harmonic signal at different frequency



(b) The correspondence of two different modulation frequencies

图8 锯齿幅值不变  $V_{pp} = 432\text{ mV}$ ,不同调制频率对应的二次谐波线型及关系

Fig.8 Amplitude contains const  $V_{pp} = 432\text{ mV}$ , the harmonic signal at different frequencies and the correspondence

为了使调制参量对信号各参量影响更加容易识别,将实验结果和理论 Simulink 模拟结果采用表 1 符号来简化说明.其中“ $\uparrow$ ”表示信号强度增加,“ $\downarrow$ ”表示信号强度降低,“N”表示信号无明显变化.因为对称性是采用右侧最小值与左侧最小值比值表示的,所以当比值大于 1 时表明左侧比右侧谷底高,当比值小于 1 时表明右侧比左侧谷底高,递增和递减均表示对称性



变差.由于在每一部实验标定过程中的实验值和理论初始值之间存在一定偏差,因此导致 Simulink 理论模拟中的某些值与实验值不一致.

表 1 各判别依据与扫描、调制信号参量的关系

Table 1 The relationship between four parameters with scanning signal and modulation signal

	Saw frequency ↑	Sin frequency ↑	Saw intensity ↑	Sin intensity ↑
Peak-to-peak value	↓	↓	↓	First ↑ After ↓
Symmetry	↓	↑	↓	First ↑ After ↓
Broadening	—	↑	↓	First ↑ After ↓
Integrity	↓	↓	First ↑ After ↓	First ↑ After ↓

在进行气体浓度测量时主要考虑测量准确度,而对测量时间要求低,因此在参量选择时,应该考虑选取谐波幅值较大,信号情况较好的调制参量,扫描参量应该选取相对小的情况,这样既可以保证在采样频率一定的情况下有较高的采样点数,同样可以优化信号的信噪比.在以气体流速、温度、燃烧诊断、发动机诊断等快速应用场合时,为了满足测量需求应当选取较高的扫描频率,此时为了达到较好的谐波信号,正弦调制频率也必须同比增加,并且适时更换采集卡等硬件设备.在测量气体压强、吸收线型等参量时,需要较好对称性的谐波线型,因此须考虑信号的对称性和峰值宽度等变量,可以根据所选择的某一固定参量来确定调制参量以得到合适的信号谱线线型.值得注意的是,在选择各个参量时并不能一味地追求极大值,而应该根据系统所应用的环境条件选择,并且应该充分考虑激光器的硬件参量以保证扫描幅值与调制幅值的大小防止损坏激光器,进而得到完整的谐波信号增加检测准确度、稳定性、适应性和提高激光器寿命.并且,在不同的测量系统硬件条件和不同的激光器情况下,各个参量可能会有所差别,但是基本的原理是不变的,因此需要首先确定基本的调制参量然后再根据实际的系统优化选择参量,其根本宗旨只有一个,就是针对测量目标以提高监测准确度和灵敏度为目的得到最佳的谐波信号线型.

## 4 结论

本文以氧气浓度监测系统的参量优化为例,以实际采集得到的二次谐波信号和 Simulink 理论模拟结果为基础,通过改变扫描锯齿信号的频率(1 Hz→500 Hz)和幅值(56 mV→2 160 mV)变化、调制正弦信号的频率(1 kHz→80 kHz)和幅值(10 mV→228 mV)变化分析信号峰-峰值、对称性、信号展宽和信号完整

性等产生的影响,结果表明,在此硬件系统下的信号变化和优化选择与 Simulink 理论模拟结果具有相关性,即正弦调制信号和锯齿扫描信号的频率大小比值约为 1 000 时二次谐波信号较好,对于大多数监测系统而言其变化趋势是近似的.根据不同的测量目的,如:温度、压力、流速、浓度、燃烧诊断等领域,依据不同的参量对信号峰-峰值、对称性、信号展宽和完整性等变化情况进行选择.通过信号线型变化来选择最佳的固定调制参量值,为实验系统中的系统参量选取优化提供了依据,为系统准确度、稳定度、重复性等方面的改善提供了指导.

## 参考文献

- [1] HINKLEY E D. High-resolution infrared spectroscopy with a tunable diode laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1970, **16**(9): 351-354.
- [2] REID J, WCHUN J S, GARSIDE B K, et al. High sensitivity pollution detection employing tunable diode lasers [J]. *Applied Optics*, 1978, **17**(2): 300-307.
- [3] KAN Rui-feng, DONG Feng-zhong, ZHANG Yu-jun, et al. Influence of the laser intensity in second-harmonic detection with tunable diode laser multi-pass absorption spectroscopy: comparison of experiment and theory [J]. *Chinese Physics B*, 2005, **14**(9): 1904-1909.
- [4] XU Zhen-yu, LIU Wen-qing, LIU Jian-guo, et al. Temperature measurements based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(23): 234204. 许振宇, 刘文清, 刘建国, 等. 基于可调谐半导体激光器吸收光谱的温度测量方法研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(23): 234204.
- [5] XIAO Shang-hui, TANG Cai-jie, JIANG Yi, et al. Design on optical fiber methane sensing systems employing wavelength-scanning based differential absorption techniques [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1479-1482. 肖尚辉, 唐才杰, 江毅, 等. 基于波长扫描的差分吸收光纤煤矿瓦斯传感系统设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1479-1482.
- [6] ZHANG Zhi-rong, XIA Hua, DONG Feng-zhong, et al. Simultaneous and on-line detection of multiple gas concentrations with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(11): 2771-2777. 张志荣, 夏滑, 董凤忠, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱方法的多组分气体浓度同时在线监测技术[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(11): 2771-2777.
- [7] CLAUDIA S G, JOHN P T, DENNIS F R. Tunable diode laser absorption spectrometer measurements of ambient nitrogen dioxide, nitric acid, formaldehyde, and hydrogen peroxide in Parlier [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**: 1583-1591.
- [8] LIU Jin-ru, HU Zhi-yun, ZHANG Zhen-rong, et al. Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(2): 284-296. 刘晶儒, 胡志云, 张振荣, 等. 激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(2): 284-296.
- [9] DONG Feng-zhong, LIU Wen-qing, LIU Jian-guo, et al. On-line roadside vehicle emissions monitoring (Part 1)[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2005, **19**(03): 237-244. 董凤忠, 刘文清, 刘建国, 等. 机动车尾气的道边在线实时监测(上)[J]. *测试技术学报*, 2005, **19**(03): 237-244.
- [10] PETER W. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors [J]. *Spectrochimica Acta Part A*,

- 1998, **54**(2):197-236.
- [11] 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.
- [12] WERLE P W, MAZZINGHI P, D'Amato F, *et al.* Signal processing and calibration procedures for in situ diode-laser absorption spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2004, **60**(2):1685-1705.
- [13] ROLLER C, FRIED A, WALEGA J G, *et al.* Advances in hardware, system diagnostics software, and acquisition procedures for high performance airborne tunable diode laser measurements of formaldehyde [J]. *Applied Physics B*, 2006, **82**(2):247-264.
- [14] PENG Z M, DING Y J, CHE L, *et al.* Calibration-free wavelength modulated TDLAS under high absorbance conditions [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(23):23104-23110.
- [15] LIU J T C, JEFFRIES J B, HANSON R K. Wavelength modulation absorption spectroscopy with 2 f detection using multiplexed diode lasers for rapid temperature measurements in gaseous flows [J]. *Applied Physics B*, 2004, **78**(2-3):503-521.
- [16] SUPPLEE J M, WHITTAKER E A, LENTH W. Theoretical description of frequency modulation and wavelength modulation spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(27):6294-6302.
- [17] KLUCZYNSKI P, AXNER O. Theoretical description based on fourier analysis of wavelength-modulation spectrometry in terms of analytical and background signals [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(27):5803-5815.
- [18] 王鹏. 矿井甲烷浓度光纤监测网络及其关键技术研究[D]. 中北大学, 2009.  
WANG Peng. Research on fiber monitoring network of methane concentration and the key technology in coal mine [D]. North University of China, 2009.
- [19] ZHOU X. Diode-laser absorption sensors for combustion control [D]. Stanford: Graduate of the Stanford University, 2005.
- [20] ZHOU Xin, JIN Xing, WANG Guang-yu. Modeling and simulation for measurement process of gas temperature based on TDLAS [J]. *Journal of Academy of Equipment*, 2012, **23**(5):122-125.  
周鑫, 金星, 王广宇. TDLAS 气体温度测量过程的建模与仿真 [J]. 装备学院学报, 2012, **23**(5):122-125.
- [21] LI Sheng, XIAO Bing, LI Kun-ying. The simulation and analysis of gas parameter measurement system based on TDLAS [J]. *Modern Scientific Instrument*, 2007, **2**:52-55.  
李胜, 肖冰, 李坤颖. 基于 TDLAS 气体测量系统的仿真与分析 [J]. 现代科学仪器, 2007, **2**:52-55.