

# 基于免标定波长调制光谱技术的气体温度和组分浓度测量

屈东胜 洪延姬 王广宇 潘 虎

(装备学院激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

**摘要** 利用基于可调谐半导体激光器的免标定波长调制光谱技术,通过迭代求解实现了温度和组分浓度的测量。通过测量  $7185.60\text{ cm}^{-1}$  和  $7454.45\text{ cm}^{-1}$  两条  $\text{H}_2\text{O}$  吸收谱线的激光调制参数,得到了实验和仿真所需的参数。采用频分复用技术,对温度分布在  $600\text{ K}\sim 1000\text{ K}$  范围内的气体温度场进行了温度和组分浓度的测量验证。结果表明,基于免标定波长调制光谱技术测得的气体温度和组分浓度与预测值基本符合,与热电偶测得的温度和直接吸收光谱方法测得的组分浓度的最大相对偏差分别在  $4\%$  和  $5\%$  以内。

**关键词** 光谱学;可调谐半导体激光吸收光谱;波长调制光谱;温度测量;组分浓度测量;频分复用

**中图分类号** O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1230001

## Measurements of Gas Temperature and Component Concentration Based on Calibration-Free Wavelength-Modulation Spectroscopy

Qu Dongsheng Hong Yanji Wang Guangyu Pan Hu

(State Key Laboratory of Laser Propulsion and Application, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract** The gas temperature and component concentration can be measured according to the iteration using the calibration-free wavelength-modulation spectroscopy based on the tunable semiconductor laser. The parameters required in the experiment and simulation can be obtained after measuring the laser modulation parameters of two  $\text{H}_2\text{O}$  absorption lines ( $7185.60\text{ cm}^{-1}$  and  $7454.45\text{ cm}^{-1}$ ). Frequency division multiplexing technology is adopted to measure gas temperature and component concentration of the gas temperature field in the temperature range of  $600\text{ K}\sim 1000\text{ K}$ . Experimental results show that the measured gas temperature and component concentration using the calibration-free wavelength-modulation spectroscopy are consistent with the predicted values. Compared with the temperature measured by thermocouple and the component concentration measured by direct absorption spectrum method, the most relative errors are within  $4\%$  and  $5\%$ .

**Key words** spectroscopy; tunable semiconductor laser absorption spectroscopy; wavelength-modulation spectroscopy; temperature measurement; component concentration measurement; frequency division multiplexing

**OCIS codes** 300.1030; 120.6780; 300.6260; 300.6360

## 1 引 言

随着我国经济的快速发展,包括航空航天、石油化工、制药、钢铁冶金、汽车工业在内的诸多行业发展十分迅速,气体温度和组分浓度的实时在线测量对其生产过程优化、能源消耗和环境污染物的控制、生产效率的提高都有着十分重要的意义。可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术是一种非接触式测量技术,不仅可以实现气体温度和组分浓度的实时在线测量,而且具有可靠性较高、响应速度快、受气体环境影

响小等优点,可用于高压、高焓、高速等流场特性、强噪声、强振动等恶劣环境下的测量研究<sup>[1-4]</sup>。

TDLAS的基本测量方法包括直接吸收光谱测量方法和波长调制光谱测量方法。直接吸收光谱测量方法的理论简单,实现也相对容易,是早期TDLAS测量的主要方法,但是信噪比较小,受系统噪声和外部因素的影响较大,在气体压强较高或者气体的吸收度较小时,无法实现参考信号的精确调整,会引起较大的测量误差<sup>[5]</sup>。1981年,Reid等<sup>[6]</sup>

收稿日期: 2013-05-16; 收到修改稿日期: 2013-07-29

作者简介: 屈东胜(1989—),男,硕士研究生,主要从事流场诊断技术方面的研究。E-mail: hnqudongsheng@126.com

导师简介: 洪延姬(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事先进推进技术方面的研究。

E-mail: hongyanji@vip.sina.com

提出将波长调制光谱技术应用于 TDLAS。由于系统噪声主要在低频域,测量中对目标信号进行高频调制,非目标信号不经过调制,高达 100 kHz 的调制频率不仅能有效抑制 1/f 噪声(即闪烁噪声,是由有源器件中载波密度的随机波动而产生的)和机械振动带来的音频噪声,而且对超高声速流场带来的尖冲噪声具有明显的抑制作用,因此能够有效地提高测量系统的信噪比和抗干扰能力,实现更高精确度的测量。但是传统的波长调制光谱测量方法无法进行绝对测量,需要进行标定,在实际应用中受到了限制<sup>[1,7]</sup>。Li 等<sup>[8]</sup>通过实验结果与仿真模型的对比,得到被测流场信息。Rieker 等<sup>[9-10]</sup>通过建立仿真模型,得到在相同激光参数下实验测量结果的绝对值,并分析了压强对测量结果的影响。

本文重点研究采用免标定波长调制光谱(WMS-2f/1f)方法来测量气体温度和组分浓度。介绍了免标定波长调制光谱的基本理论,通过选择吸收谱线和测量激光调制参数,建立仿真数据库,将测得的 2f/1f 信号高度比与仿真结果对比,实现了温度和组分浓度的免标定测量。

## 2 波长调制光谱基本原理

二极管激光器的注入电流受到正弦调制时,将

同时产生频率调制(FM)和强度调制(IM),激光穿过被测流场后,透射光强为

$$I(t) = \bar{I}_0 [1 + i_0 \cos(\omega t + \phi_1) + i_2 \cos(2\omega t + \phi_2)] \cdot \tau[\nu(t)], \quad (1)$$

式中  $\omega$  为调制频率,且  $\omega = 2\pi f$ ,  $\bar{I}_0$  为平均激光强度,  $i_0$  和  $i_2$  分别是线性和非线性强度调制的幅度,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别是线性和非线性 FM/IM 相位延迟,激光频率  $\nu(t) = \bar{\nu}(t) + a \cos(\omega t)$ ,  $\bar{\nu}(t)$  (单位为  $\text{cm}^{-1}$ ) 为平均激光频率,  $a$  (单位为  $\text{cm}^{-1}$ ) 为调制深度,透射系数  $\tau(\nu)$  为关于  $\omega t$  的周期性偶函数,可对透射系数  $\tau$  用傅里叶余弦展开,其中  $H$  项为

$$H_0(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos \theta) d\theta, \quad (2)$$

$$H_n(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos \theta) \cos(n\theta) d\theta. \quad (3)$$

透射光强的 2f 和 1f 信号可通过数字锁相放大器获得。将二次谐波信号用一次谐波信号归一化之后,其强度与介质的吸收系数直接相关,消除了检测系统的增益、激光强度变化、普通的激光噪声以及探测器和非共振传播过程中的损失的影响,得到的信号称为归一化二次谐波信号,即

$$C_{2f/1f} = \frac{1}{i_0} \left\{ \left[ H_2 + \frac{i_0}{2} (H_1 + H_3) \cos \phi_1 + i_2 \left( H_0 + \frac{H_4}{2} \right) \cos \phi_2 \right]^2 + \left[ \frac{i_0}{2} (H_1 - H_3) \sin \phi_1 + i_2 \left( H_0 - \frac{H_4}{2} \right) \sin \phi_2 \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (4)$$

由于激光调制参数可通过实验测得,吸收谱线的光谱参数可通过查询高分辨率光谱谱线(HITRAN)数据库得到,因此利用这些已知参数便可仿真出所选谱线的 2f/1f 信号。将测得的 2f/1f 信号与仿真得到的 2f/1f 信号进行对比,通过迭代求解便可获得温度和组分浓度,其实现过程如图 1 所示。

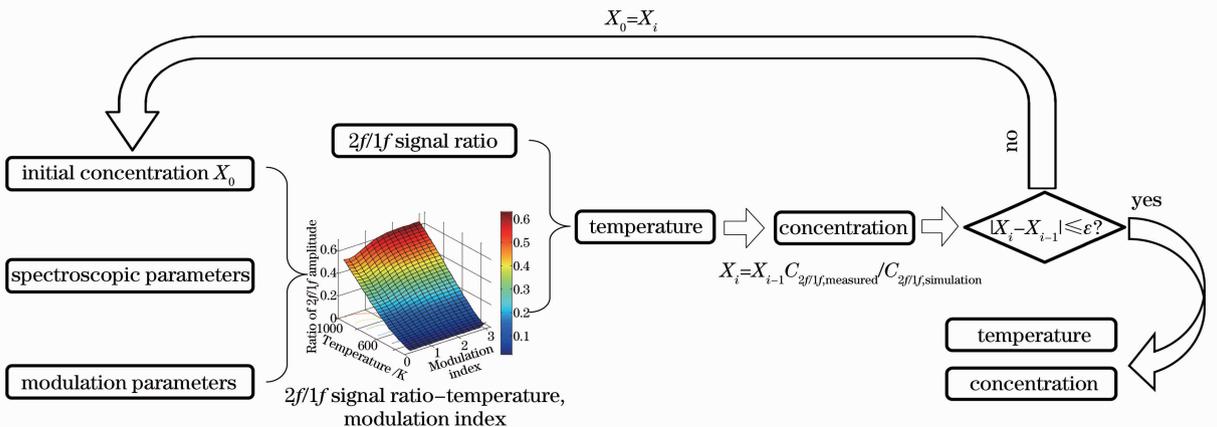


图 1 计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart

### 3 吸收谱线的选择

采用两条谱线进行测量时,选择合适的吸收谱线,能够有效提高测量精确度。Zhou 等<sup>[5,11]</sup>详细给出了谱线选择的原则,其中主要包括:1)谱线中心频率在  $1.3\sim 1.5\ \mu\text{m}$  的近红外光谱区;2)依据被测对象,选择的谱线在被测温度范围内应具有较强的吸收能力,以保证有较高的信噪比;3)尽量减少临近谱线的干扰;4)所选谱线在被测温度范围应具有较高

表 1 所选谱线的光谱参数

Table 1 Spectroscopic parameters of two selected absorption lines

$\nu_0/\text{cm}^{-1}$	$E''/\text{cm}^{-1}$	$S(296\text{ K})/(\text{cm}^{-2}\cdot\text{MPa}^{-1})$	$\gamma_{\text{air}}/(\text{cm}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1})$	$N_{\text{air}}$	$\gamma_{\text{self}}/(\text{cm}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1})$	$N_{\text{self}}$
7185.60	1045.06	$1.88\times 10^{-1}$	0.41	0.65	2.05	0.59
7454.45	1962.51	$1.73\times 10^{-3}$	0.323	0.37	1.98	0.56

### 4 激光调制参数的测量

激光调制参数是激光器本身的特有属性,免标定波长调制光谱测量方法需要知道的激光调制参数包括调制深度  $a$ 、线性调制幅度  $i_0$ 、非线性调制幅度  $i_2$  和相位延迟  $\psi$  等参数。测量时,激光控制器分别控制两个分布式反馈(DFB)半导体激光器的温度和中心电流,中心电流都设为  $70\text{ mA}$ ,输出激光经过  $2\times 1$  耦合器,再经过  $1\times 2$  分束器,其中一束光直接由探测器接收,另外一束光经过标准具(自由光谱范围  $R_{\text{fs}}=1.5\text{ GHz}$ )后,由相同的探测器接收,探测器信号由数据采集卡记录,可同时采集到激光功率和频率信号。

当激光注入电流为正弦调制时,激光强度同时受到调制。激光频率增加时,激光强度减小,结合频率和强度信号的周期性可确定调制周期内标准具信号的起始峰,出现标准具信号峰值时,频率增加了  $0.05\text{ cm}^{-1}$ 。分别采用正弦函数拟合激光光强和频率信号,可得到一定调制电压下对应频率的平均光强、强度调制幅度、频率调制深度和相位延迟。

激光强度  $I_0$  用正弦函数拟合后得到线性调制项,拟合后的残差再次使用正弦函数拟合,可得到非线性调制项,由测得的强度调制和频率调制可得到相位延迟。调制深度以及线性和非线性调制幅度如图 2 所示。由图 2 可知,非线性强度调制的振幅非常小。

经过实验发现,对同一个激光器,激光器的温度和中心电流的变化不会引起  $\psi_1$  的变化,但是对于中心波长不同的激光器,即使调制频率和调制深度相同, $\psi_1$  也会产生相应的变化。相位延迟和调制频率与调制深度的关系如图 3 所示。由图 3 可知, $\psi_1$  对

的灵敏度,能确保被测温度的精确度。按照上述原则选择 2 条  $\text{H}_2\text{O}$  谱线  $7185.60\text{ cm}^{-1}$  和  $7454.45\text{ cm}^{-1}$  进行实验测量。HITRAN 2008<sup>[12]</sup> 光谱数据库的谱线频率  $\nu_0$  和低跃迁态能级  $E''$  的精确度较高,但是吸收谱线强度  $S$ 、展宽系数  $\gamma$  以及展宽温度指数  $N$  等参数具有一定的误差,Zhou 等<sup>[5,11]</sup> 测量了部分谱线的光谱参数,实验中采用的谱线参数如表 1 所示。

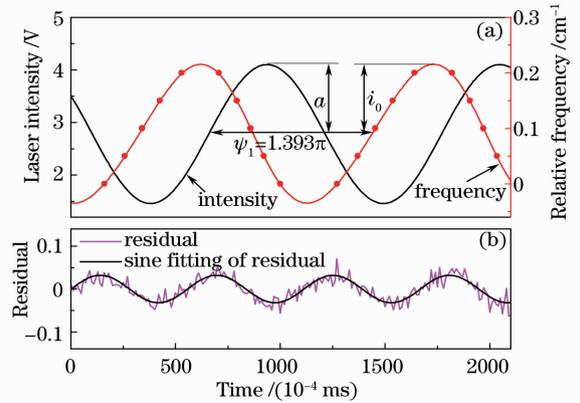


图 2 (a)强度和频率调制( $\nu=7185.60\text{ cm}^{-1}$ ,  $f=180\text{ kHz}$ ,  $a=0.4753\text{ cm}^{-1}$ ); (b)强度调制  $2f$  拟合

Fig. 2 Intensity and frequency modulation ( $\nu=7185.60\text{ cm}^{-1}$ ,  $f=180\text{ kHz}$ ,  $a=0.4753\text{ cm}^{-1}$ ); (b)  $2f$  fitting to the laser intensity modulation

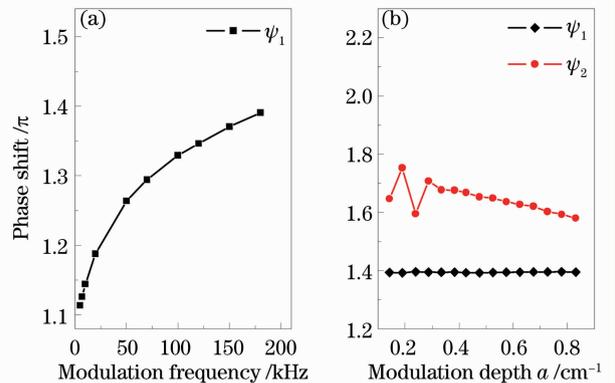


图 3 测量的 FM/IM 相位延迟与 (a) 调制频率与 (b) 调制深度的关系图( $\nu=7185.60\text{ cm}^{-1}$ )

Fig. 3 Relationship of measured FM/IM phase shift with (a) modulation frequency and (b) modulation depth. ( $\nu=7185.60\text{ cm}^{-1}$ )

调制深度  $a$  变化不敏感,随着调制深度的增加, $\phi_1$  几乎保持不变;但对于调制频率的变化很敏感:当调制频率增加时, $\phi_1$  增加;调制频率减小时, $\phi_1$  减小,且调制频率越低, $\phi_1$  越接近于  $\pi$ 。求得  $\phi_1$  后,由激光强度拟合可求出非线性强度调制项的相位延迟  $\phi_2$ ,随着调制深度的增加, $\phi_2$  先减小然后趋于稳定值。

线性强度调制  $i_0$ 、非线性强度调制  $i_2$  和调制深度  $a$  的关系如图 4 所示,经数据分析并拟合后发现, $i_0$  和调制深度呈正比关系, $i_2$  是关于调制深度的二次函数。

由图 4 可知,当调制深度增加时, $i_2/i_0$  增加,非线性效应越来越明显,实验中采用的调制深度较小,因此测量时不考虑非线性强度调制的影响,即  $i_2 = 0$ 。实验中所用的激光调制参数如表 2 所示。

表 2 激光调制参数

Table 2 Laser modulation parameters

$\nu / \text{cm}^{-1}$	Modulation frequency /kHz	Modulation voltage /V	$i_0$	$a / \text{cm}^{-1}$	$\phi_1 / \pi$
7185.60	180	0.3	0.0705	0.0191	1.394
7454.45	240	0.15	0.03355	0.0184	1.181

## 5 实验验证

实验装置如图 5 所示,实验系统主要包括激光源、光学系统、三温区管式炉以及由计算机和数据采集卡构成的仪器控制和数据采集处理(PC with NI DAQ)系统。首先由数据采集卡产生电压信号,输入激光控制器,激光控制器分别控制两个 DFB 半导体激光器的温度和中心电流,两个激光器的输出激光通过  $2 \times 1$  耦合器且经过三温区管式炉后由多模光纤接收并将光信号传输给光电探测器接收。三温区管式炉是可以精确控制温度的恒温炉,最大工作温度为  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,50 cm 的中心区域为恒温区,其他两区抽成真空。探测器信号由数据采集卡记录并存

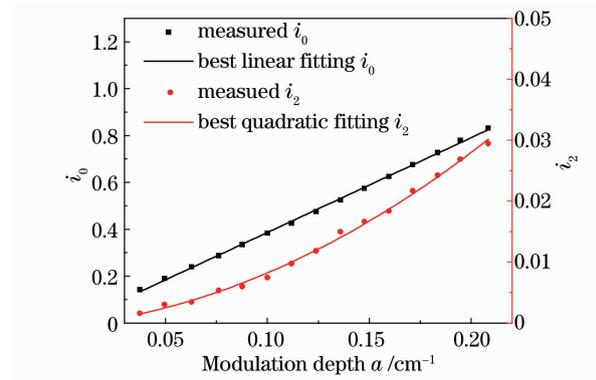


图 4 调制幅度  $i_0$  和非线性调制幅度  $i_2$  与调制深度的变化关系 ( $\nu = 7185.60\text{ cm}^{-1}$ ,  $f = 180\text{ kHz}$ )

Fig. 4 Dependence of linear and nonlinear IM amplitudes on modulation depth ( $\nu = 7185.60\text{ cm}^{-1}$ ,  $f = 180\text{ kHz}$ )

储。实验采用频分复用技术,管式炉的 5 个温度设定点分别为 600 K、700 K、800 K、900 K 和 1000 K,其压强可由压强传感器测得。由于两条谱线的调制频率不同,由实验测得的混频信号经过数值锁相算法可得到两条谱线的  $2f/1f$  信号,实验采集到的信号和解调后的  $2f/1f$  信号如图 6 所示。

得到  $2f/1f$  信号后,可按照图 1 所示的迭代方法求解温度  $T$  和组分浓度  $X_{\text{abs}}$ 。设定温度为 600 K 时的迭代过程如图 7 所示。由图 7 可知,初始组分浓度即使偏离真实值较大,其迭代过程仍然趋向收敛,并且收敛速度较快。

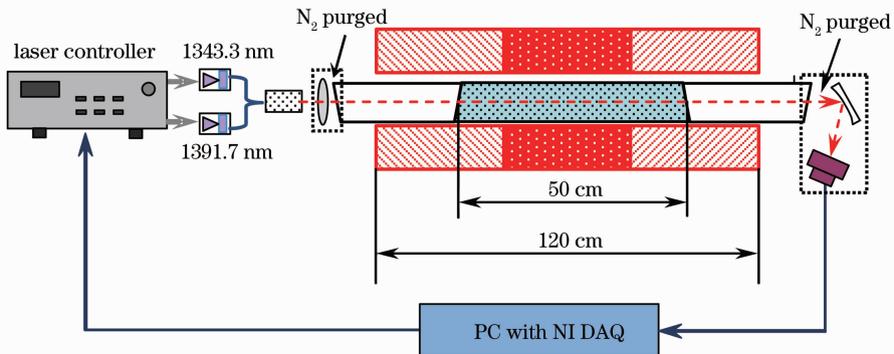


图 5 实验装置图

Fig. 5 Schematic of experiment system

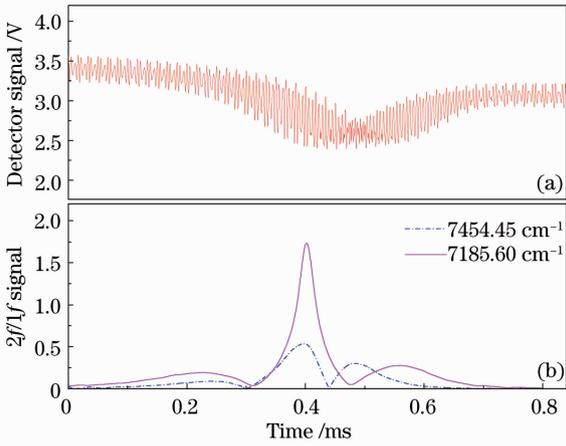


图 6 (a)采集到的信号和(b)解调后的  $2f/1f$  信号  
Fig. 6 (a) Collected signal and (b)  $2f/1f$  signal

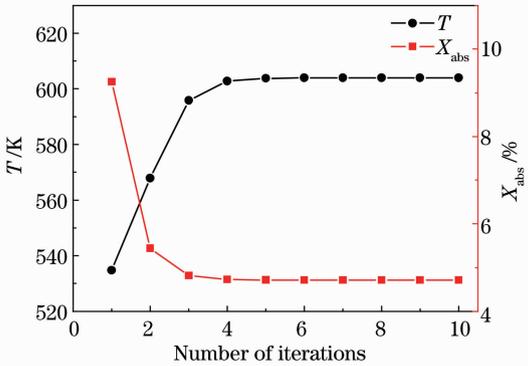


图 7 温度和组分浓度迭代过程图(设定温度为 600 K)  
Fig. 7 Iterative process diagram of temperature and component concentration (setting temperature is 600 K)

图 8 为在不同温度设定点求得的温度和组分浓度,其中图 8(a)为基于免标定波长调制光谱方法测得的温度与设定点温度(热电偶测量温度)的比较。在 600 K~1000 K 温度范围内,基于免标定波长调制光谱方法测得的温度与热电偶测得的温度具有较好的一致性,最大相对偏差在 4% 以内。图 8(b)为基于免标定波长调制光谱方法测得的组分浓度( $X_{\text{measured}}$ )与基于直接吸收光谱方法测得的组分浓度( $X_{\text{actual}}$ )的比值。理论上该比值为 1,而实际测得的组分浓度与直接吸收法测得的组分浓度的最大相对偏差在 5% 以内。误差来源主要有光谱数据的误差、热电偶测得温度误差以及直接吸收方法中基线拟合产生的误差等。尤其是当设定温度较高时,基于免标定波长调制光谱方法测得的温度的误差明显增大,主要是因为管式炉的设定温度是由位于恒温区的热电偶反馈的温度信号决定的,高温时,由于辐射损失等,热电偶测量误差会增大,因此其设定温度与实际温度有一定的差异。

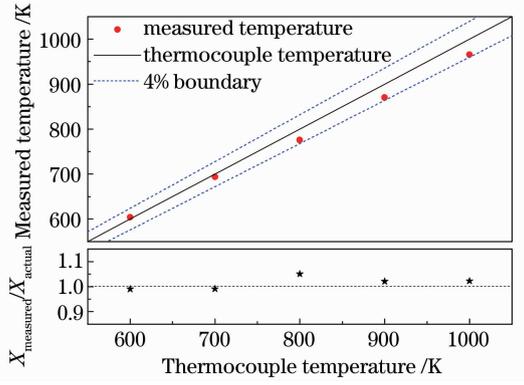


图 8 (a)测量温度和(b)组分浓度验证图  
Fig. 8 Validation (a) measurements of temperature and (b) concentration

## 6 结 论

基于 TDLAS 的测量技术具有抗干扰能力强、能够反映瞬态流场变化等特性,在发动机燃烧诊断等领域得到了广泛的应用。通过选择吸收谱线的参数和测量激光的调制参数,建立基于实验环境的仿真数据库,将实验测量到的  $2f/1f$  信号比与仿真结果对比,实现了基于免标定波长调制光谱技术的温度和组分浓度的测量。使用该方法在气室中进行测量验证,与热电偶测得的温度和基于直接吸收光谱方法测得的组分浓度的最大偏差分别在 4% 和 5% 以内。该结果表明对于均匀的流场环境,该方法具有很高的测量精度。但是该方法依赖的参数较多,参数对实验结果的影响较大,给后期的数据处理分析增加了难度。

## 参 考 文 献

- 1 T P Jenkins, P A DeBarber, T Yoshimura, *et al.*. Development of a non-intrusive temperature sensor in a model gas turbine combustor [C]. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004.
- 2 Xin Zhou, Jay Jeffries, Ronald Hanson, *et al.*. Fast temperature sensor for combustion control using H<sub>2</sub>O diode laser absorption near 1.4  $\mu\text{m}$  [C]. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005.
- 3 Tao Bo, Ye Jingfeng, Zhao Xinyan, *et al.*. Temperature measurement of instantaneous supersonic flow based on absorption spectroscopy technology [J]. *Chineses J Lasers*, 2011, 38(12): 1215002.  
陶波, 叶景峰, 赵新艳, 等. 基于激光吸收光谱技术测量瞬态超声速流场温度[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1215002.
- 4 Chen Jiuying, Liu Jianguo, He Yabo, *et al.*. Temperature measurement of CO<sub>2</sub> by use of a distributed-feedback diode laser sensor near 2.0  $\mu\text{m}$  [J]. *Chineses J Lasers*, 2012, 39(11): 1108004.  
陈玖英, 刘建国, 何亚柏, 等. 基于分布反馈激光器在 2.0  $\mu\text{m}$  波段对 CO<sub>2</sub> 气体温度的测量[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108004.

- 5 X Zhou, J B Jeffries, R K Hanson, *et al.*. Development of a fast temperature sensor for combustion gases using a single tunable diode laser [J]. *Appl Phys B*, 2005, 81(5): 711–722.
- 6 J Reid, D Labrie. Second-harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory [J]. *Appl Phys B*, 1981, 26(3): 203–210.
- 7 Shinjuh Chen, Joel A Joel, Davids Bomse. Combustion species sensor for scramjet flight instrumentation [C]. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2005.
- 8 Hejie Li, Gregory B Rieker, Xiang Liu, *et al.*. Extension of wavelength-modulation spectroscopy to large modulation depth for diode laser absorption measurements in high-pressure gases [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(5): 1052–1061.
- 9 G B Rieker, J B Jeffries, R K Hanson. Calibration-free wavelength modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(29): 5546–5560.
- 10 G B Rieker, X Liu, H Li, *et al.*. Measurements of near-IR water vapor absorption at high pressure and temperature [J]. *Appl Phys B*, 2007, 87(1): 169–178.
- 11 X Zhou, X Liu, J B Jeffries, *et al.*. Development of a sensor for temperature and water concentration in combustion gases using a single tunable diode laser [J]. *Meas Sci Technol*, 2003, 14(8): 1459–1468.
- 12 L S Rothman, I E Gordon, A Barbe, *et al.*. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. *J Quant Spectrosc & Radiative Transfer*, 2009, 110(9-10): 533–572.

栏目编辑: 王晓球