

基于激光吸收光谱技术的超声速气流测量研究^{*}

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: 为研究可调谐半导体激光吸收光谱测量技术在工业环境中的应用, 采用波长调制光谱测量方法, 对超燃直连式试验台隔离段内的超声速气流进行了测量研究。通过对 7185.60cm^{-1} 和 7454.45cm^{-1} 2条 H_2O 吸收谱线的频率标定和多普勒频移测量, 实现了高速气流速度的实时在线测量, 测量值相对于预测值的偏差在3%以内。基于2条 H_2O 吸收谱线的光谱参数和激光调制参数, 建立了基于实验环境的仿真数据库。采用频分复用方法, 通过迭代求解了隔离段内的温度和组分浓度, 其结果相对于预测值的偏差分别在4%和12%以内。该方法不仅能够实现不同谱线的同步实时测量, 而且验证了在恶劣环境下的应用效果。

关键词: 波长调制光谱; 速度测量; 温度测量; 组分浓度测量; 频分复用

中图分类号: O433.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-4055 (2014) 06-0852-06

DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2014. 06. 019

Measurements of Supersonic Gas Flow Based on Laser Absorption Spectroscopy

QU Dong-sheng, HONG Yan-ji, WANG Guang-yu, PAN Hu

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

Abstract: In order to study the application of tunable diode laser absorption spectroscopy technology in the industrial environment, the supersonic gas flow in the isolator of direct-connected scramjet test facility can be studied via wavelength modulation spectroscopy technology. The real-time and on-line measurement of velocity in the high-speed gas flows can be realized after calibrating the frequency and calculating the Doppler shift of two H_2O absorption transitions (7185.60cm^{-1} and 7454.45cm^{-1}). The most relative error is 3% compared with the predicted value. The simulation database can be created based on the spectroscopic parameters and laser modulation parameters of two H_2O absorption transitions. Frequency division multiplexing technology is adopted to measure gas temperature and concentration in the isolator. Compared with the predicted value, the results have a good agreement and the most relative errors are 4% and 12% respectively, which proves that the method is reasonable and reliable in the engineering application. It not only can achieve the real-time measurement at the same time, but also validates the application effects in the harsh environment.

Key words: Wavelength modulation spectroscopy; Velocity measurement; Temperature measurement; Concentration measurement; Frequency division multiplexing

^{*} 收稿日期: 2013-06-23; 修订日期: 2013-09-03。

作者简介: 屈东胜 (1989—), 男, 硕士生, 研究领域为流场诊断技术方面。E-mail: hunqudongsheng@126.com

1 引言

随着航空航天工业的发展,基于可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)的测量技术发展十分迅速。应用TDLAS技术可获得温度、组分浓度、速度、质量流量、动量推力等关键的流场参数信息,这对于现代燃烧和推进系统的发展极为重要。TDLAS测量技术是通过吸收气体对可调谐激光产生共振吸收,进而对气体参量进行分析和判断的一种非接触式测量技术,在工业过程监测控制、燃烧过程分析、发动机流场诊断、爆炸检测等领域得到了广泛的应用^[1-3]。

TDLAS测量技术具有可靠性较高、响应速度快、受气体环境影响小等优点,在发动机流场诊断和工业燃烧监控等领域具有十分广阔的应用前景,国内外很多研究者进行过相关的研究。1993年,Philippe和Hanson在激波管中测量了氧气的速度,温度和压强,但是由于持续时间很短,测量误差很大^[4]。1996年,Miller等采用直接吸收光谱技术测量了普惠公司F-100涡轮发动机的入口的质量流量,测量精度在2%以内^[5]。2000年开始,Hanson小组分别在Stanford大学、NPS和GE公司的脉冲爆震发动机上进行了气体的相关测量研究^[6-8]。2005年,Kent Lyle等在普惠公司的PW6000发动机上实现了进气道速度和密度的实时测量,速度、密度与设定点的总的平均偏差不超过0.67m/s和0.72%^[9]。2011年,李飞等利用H₂O吸收谱线,采用时分复用方法测量了超燃直连式试验台燃烧室气流的静温、水蒸气浓度和流向速度^[10]。

本文首先介绍了波长调制光谱的基本测量理论。利用搭建的TDLAS测量系统,对超燃直连式试验台隔离段内的高速气流进行了测量研究。采用时分复用技术,实现了不同谱线多种流场参数的同步测量,而且对基于波长调制光谱技术的免标定测量进行了研究。

2 基本理论

2.1 扫描波长调制光谱

波长调制光谱利用高频载波的谐波信号检测,能够有效的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,是恶劣环境中广泛使用的测量方法。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),相应的入射光强和加入调制的激光频率表达式分别为

$$\nu(t) = \bar{\nu}(t) + a \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$I_0(t) = \bar{I}_0 [1 + i_0 \cos(\omega t + \psi_1) + i_2 \cos(\omega t + \psi_2)] \quad (2)$$

式中 $\bar{\nu}(t)$ 是平均激光频率, a 是频率调制的振幅,也称为调制深度。 ω 是调制频率,且 $\omega = 2\pi f$, $\bar{I}_0$ 是平均激光强度, i_0 和 i_2 分别是线性和非线性强度调制的幅度, ψ_1 和 ψ_2 是线性和非线性FM/IM相移。由Beer-Lambert定律可知,透射激光强度表达式为

$$I(t) = \bar{I}_0 [1 + i_0 \cos(\omega t + \psi_1) + i_2 \cos(2\omega t + \psi_2)] \cdot \tau(\nu(t)) \quad (3)$$

式中透过系数 $\tau(\nu)$ 是关于 ωt 的周期性偶函数,可对其用傅里叶余弦展开,其中 H 项为

$$H_0(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos \theta) d\theta \quad (4)$$

$$H_n(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos \theta) \cos(n\theta) d\theta \quad (5)$$

透射光强的 $2f$ 信号和 $1f$ 信号可通过数字锁相放大器获得。将2倍频的正弦和余弦参考信号分别乘以透射光强,然后通过低通滤波器,则可以获得 $2f$ 和 $1f$ 信号的 X 和 Y 成分,其表达式分别为

$$X_{2f} = \frac{G\bar{I}_0}{2} \left[H_2 + \frac{i_0}{2} (H_1 + H_3) \cos \psi_1 + i_2 (H_0 + \frac{H_4}{2}) \cos \psi_2 \right] \quad (6)$$

$$Y_{2f} = -\frac{G\bar{I}_0}{2} \left[\frac{i_0}{2} (H_1 - H_3) \sin \psi_1 + i_2 (H_0 - \frac{H_4}{2}) \sin \psi_2 \right] \quad (7)$$

$$X_{1f} = \frac{G\bar{I}_0}{2} \left[H_1 + i_0 (H_0 + \frac{H_2}{2}) \cos \psi_1 + \frac{i_2}{2} (H_1 + H_3) \cos \psi_2 \right] \quad (8)$$

$$Y_{1f} = -\frac{G\bar{I}_0}{2} \left[i_0 (H_0 - \frac{H_2}{2}) \sin \psi_1 + \frac{i_2}{2} (H_1 - H_3) \sin \psi_2 \right] \quad (9)$$

式中 G 是检测系统的光电增益,一次谐波信号与二次谐波信号中含有相同的 G 和 $\bar{I}_0$ 。将二次谐波信号用一次谐波信号归一化之后,消除了检测系统的增益、激光强度变化的影响、普通的激光噪音以及探测器和非共振传播过程中的损失。得到的信号称为归一化二次谐波信号,即

$$C_{2f/1f} = \frac{\sqrt{X_{2f}^2 + Y_{2f}^2}}{\sqrt{X_{1f}^2 + Y_{1f}^2}} \quad (10)$$

2.2 温度和组分浓度的测量

温度和组分浓度的测量是将实验测得的两条谱线的 $2f/1f$ 信号高度比与仿真数据库进行对比通过迭代进行求解。其过程为

(a) 设定初始组分浓度 X_0 ;

(b) 建立 $2f/1f$ 信号高度比-温度的仿真数据库,得到温度 T_0 ;

(c) 利用公式 $X_1 = X_0 \cdot C_{2f/1f, \text{measured}} / C_{2f/1f, \text{simulation}}$,得到 T_0 时的浓度 X_i ;

(d) 修改初始组分浓度,重复(a)至(c)步至组分

浓度和温度收敛,得到被测流场的温度 T 和组分浓度 X_{abs} 。

2.3 速度的测量

速度测量的理论基础是多普勒频移效应,速度测量的原理如图 1 所示。激光器受到驱动产生激光,通过分束器,两路光束进入被测流场,流场具有速度 U 。一束光与垂直方向上成 θ 角向上,另一束光以相同的角度向下穿过被测流场,到达接收端。由于气体具有平行光路方向的速度分量,吸收谱线中心产生多普勒频移,其表达式为

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{U_p}{c}$$
 (11)

式中 $\Delta\nu$ 是频率的偏移量, ν_0 是没有偏移的谱线中心频率, c 是光速, U_p 是气体速度在光束方向上的分量。流场速度 U 为

$$U = \frac{\Delta\nu \cdot c}{\nu_0 \cdot 2 \sin \theta}$$
 (12)

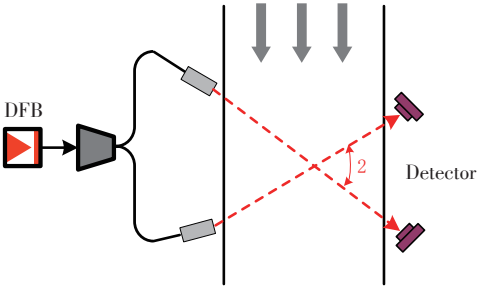


Fig. 1 Schematic of velocity measurement

3 数值仿真

3.1 吸收谱线的选择

选择合适的吸收谱线,能够有效地提高测量精确度。按照文献[11]的谱线选择的原则,本文选择 2 条 H_2O 谱线 7185.60cm^{-1} 和 7454.45cm^{-1} 。HITRAN 2008^[12] 光谱数据库的谱线频率 ν_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 γ 以及展宽温度指数 N 等参数具有一定的误差。本次实验采用 Zhou X^[13] 等测出的光谱参数,如表 1 所示。

两条谱线的吸收谱线强度和温度灵敏度随温度的变化如图 2 所示。由图可知,当温度大于 900K 时,随着温度的升高,谱线 7185.60cm^{-1} 的谱线强度逐渐减小,谱线 7454.45cm^{-1} 的谱线强度变化幅度很小。

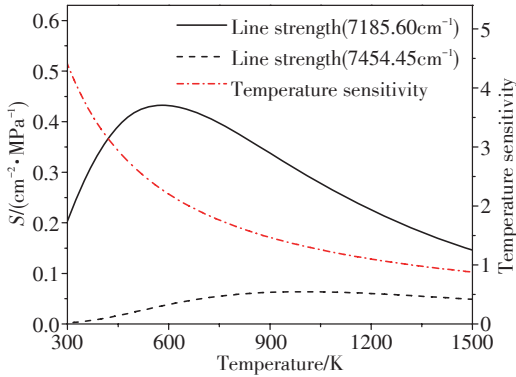


Fig. 2 Line strength and temperature sensitivity versus temperature

Table 1 Spectroscopic parameters of H_2O absorption transitions

ν_0/cm^{-1}	E''/cm^{-1}	$S(296\text{K})/(\text{cm}^{-2}\cdot\text{MPa}^{-1})$	$\gamma_{\text{air}}/(\text{cm}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1})$	N_{air}	$\gamma_{\text{self}}/(\text{cm}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1})$	N_{self}
7185.6	1045.06	1.88×10^{-1}	0.41	0.65	2.05	0.59
7454.45	1962.51	1.73×10^{-3}	0.323	0.37	1.98	0.56

3.2 仿真数据库的建立

利用免标定波长调制光谱测量气体温度和组分浓度时,是将实验测得的 $2f/1f$ 信号高度比与基于实验环境的仿真进行对比,通过迭代求解得到。仿真需要准确知道激光调制参数,当调制频率和调制深度一定时,这些参数可通过实验测量得到。文献[14]提出当调制深度较小或在总压小于 0.1MPa 时,非线性调制项可以忽略。本次实验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。

由具体的激光调制参数和谱线参数,可以仿真所选谱线的 $1f$ 和 $2f$ 信号,谱线 7185.60cm^{-1} 的仿真结果如图 3 所示(总压 $p=0.1\text{MPa}$, 温度 $T=1000\text{K}$, 组分浓

度 $X=2\%$, 吸收长度 $L=20\text{cm}$)。由图 3(b) 和 (c) 可知,在谱线中心频率处, H_1 和 H_3 项为 0, H_2 项具有最大值, H_0 项远大于 H_1 , H_2 和 H_3 项。由公式(6)~(9)可知, H_2 项是 $2f$ 信号的主要项, H_0 项是 $1f$ 信号的主要项。谱线 7185.60cm^{-1} 的 $2f$, $1f$ 和 $2f/1f$ 信号的仿真结果如图 3(d) 所示,将实验测得的 $2f/1f$ 信号高度比与仿真库进行对比,通过迭代可得到流场的温度和组分浓度。

Table 2 Laser modulation parameters

ν/cm^{-1}	Modulation frequency/kHz	i_0	a/cm^{-1}	ψ_1/π
7185.60	180	0.025	0.0156	1.394
7454.45	240	0.058	0.0136	1.181

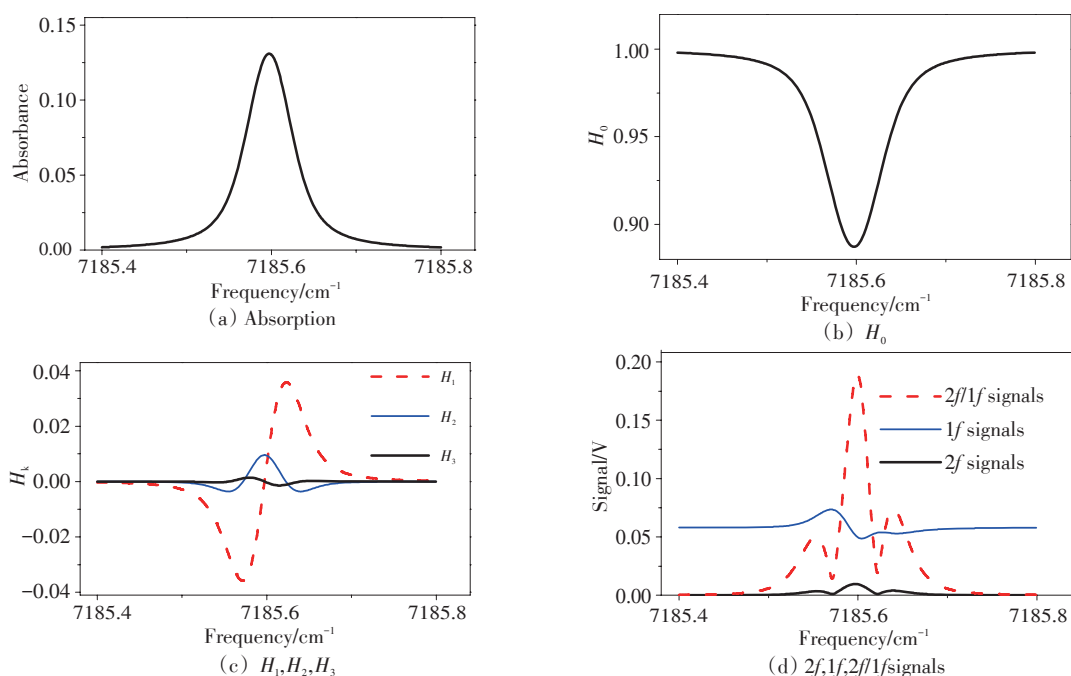


Fig. 3 Simulated results of H_2O absorption transitions (7185.60cm^{-1})

4 实验验证

4.1 实验系统

实验装置如图4所示,实验系统包括两台可调谐半导体激光器、激光控制器、超燃直连式试验台、探测器和数据采集处理系统。超燃直连式试验台主要包括加热器、喷管、隔离段和燃烧室等部分。加热器采用烧氢补氧技术,产生高焓气流,经过喷管后被加速至设计马赫数,流经隔离段后进入燃烧室,与燃料混合后燃烧。实验中直连台喷管马赫数 Ma 为2,气流总温为 1495K ,总压为 0.52MPa 。TDLAS的测量装置安装在位于超燃直连台喷管和燃烧室之间的隔离段。隔离段总长 48cm ,入口截面为 $56\text{mm} \times 100\text{mm}$,壁面厚度 250mm 。沿程安装有5个压力传感器,上下游光束角 $2\theta=60^\circ$,激光入射端和接收端用 N_2 净化,以避免空气中水蒸气的干扰。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经过耦合器,再经过光纤分路器,输出的激光经准直器穿过隔离段的两侧窗口后,由多模光纤收集后由探测器探测,探测器信号经BNC电缆后,由数据采集卡记录并存储。

实验采用频分复用技术,扫描频率为 1kHz ,对采集到的信号进行10次平均。气流流速达到稳定值时,实验采集到的两路吸收信号如图5所示。由图可

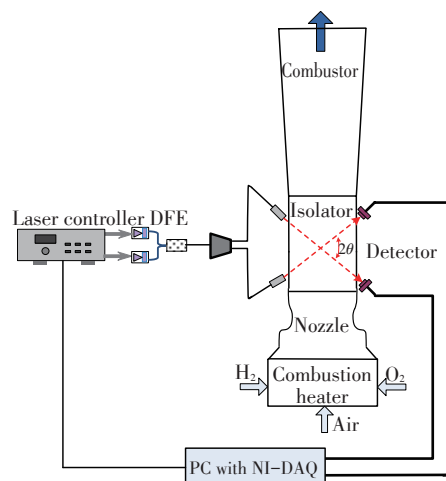


Fig. 4 Schematic of experiment system

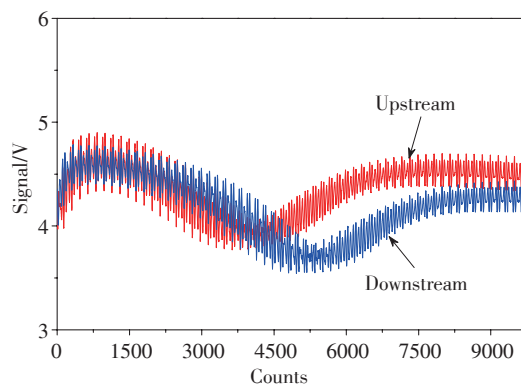


Fig. 5 Detector signals

知,由于气流流速导致吸收线之间产生明显的多普勒频移。由于所选两条谱线的吸收信号强度相差较大,因此图中的凹陷主要是由谱线 7185.60cm^{-1} 的吸收造成的,谱线 7454.45cm^{-1} 的吸收几乎完全被淹没。

4.2 速度的测量

由于直接采集到的信号是时域上的信号,多普勒频移和频域相关。准确地校准激光频率,是测量速度的基础,激光的频率是通过标准具来校准的。实验采用频分复用技术,实时校准频率比较困难。频率校准在实验前完成,即在扫描电压、扫描频率、采样速率和实验中完全一样时采集标准具信号。激光频率校准是在选定的范围内,寻找标准具信号的起始峰对应的时间点,每出现一个标准具信号峰值,激光频率增加 0.05cm^{-1} ,可得到时间和相对频率的相关序列。通过三次样条插值得到时域吸收曲线上任意采样点对应的相对频率,频率校准如图6所示。由图可知,DFB激光器的时频转换关系并不是完全线性的。

通过锁相放大技术可从原始的光电信号中提取谱线信息,两路信号经锁相放大器后,可分别得到每一条谱线的 $2f/1f$ 信号。由标准具信号校准后可由时域转换到频移,谱线 7185.60cm^{-1} 的 $2f/1f$ 信号在时域和频域内的多普勒频移如图7所示,将两路 $2f/1f$ 信号的峰值之间的频率间隔作为多普勒频移。

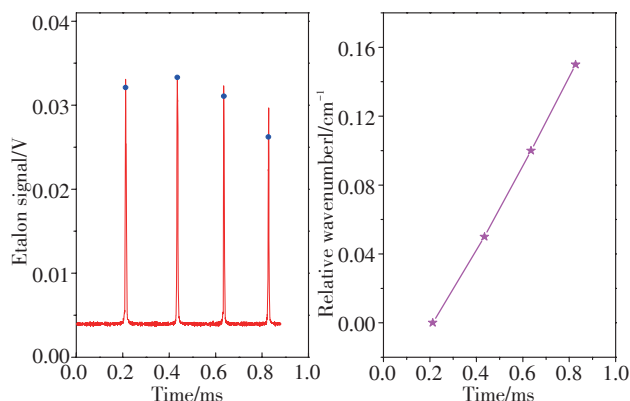


Fig. 6 Relative frequency calibration

隔离段内的气流速度刚开始具有较大的波动性,当气流流速达到稳定值时,采用 7185.60cm^{-1} 和 7454.45cm^{-1} 两条谱线的速度测量结果如图8所示。谱线 7185.60cm^{-1} 测得的速度平均值为 1146.51m/s , 平均方差为 7.9m/s , 7454.45cm^{-1} 谱线测得的速度平均值为 1216.95m/s , 平均方差为 25.1m/s 。由图可知,谱线 7454.45cm^{-1} 测得的速度波动明显较大,主要是因为

该谱线的吸收强度较小,在校准频率产生了误差,导致测得的多普勒频移不够精确。

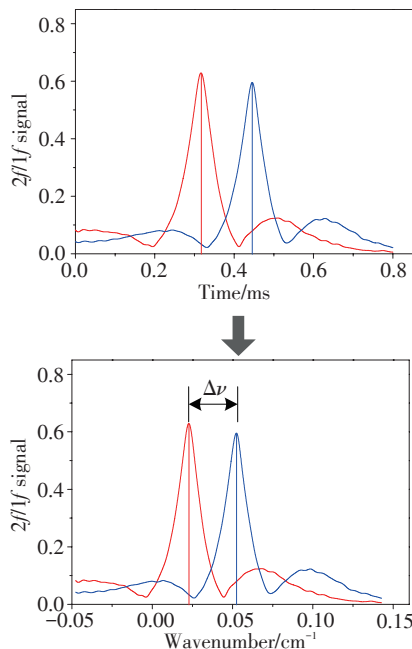


Fig. 7 Doppler shift

由图可知,速度的测量结果与预测值相符,测量偏差在3%以内。由于速度测量的准确性取决于信号的信噪比、激光频率校准和光束夹角的精度等。提高测量速度精确度的方法主要有:(1)增大光束夹角,(2)采用自由光谱范围(FSR)更小的标准具,(3)提高采样率,(4)尽量选择吸收强度较大的谱线等。

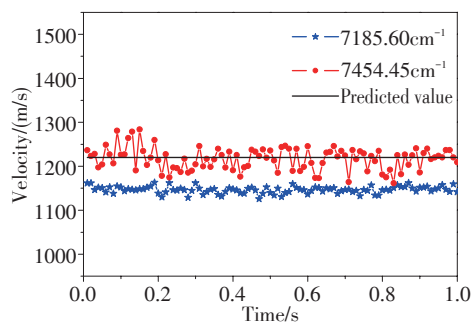


Fig. 8 Velocity results using H_2O absorption transitions (7185.60cm^{-1} and 7454.45cm^{-1})

4.3 温度和组分浓度的测量

实验采集到的数据是两条谱线的混频信号,通过锁相放大器,通过解调得到每条谱线的 $2f/1f$ 信号。锁相放大器的低通截止频率 $f_{\text{cut}}=17\text{kHz}$,解调后,可得到 $2f/1f$ 信号高度比。将解调后的 $2f/1f$ 信号高度比与基于实验环境的仿真数据库进行对比,通过迭

代进行温度和组分浓度的求解,光束上游的测量结果如图9所示。

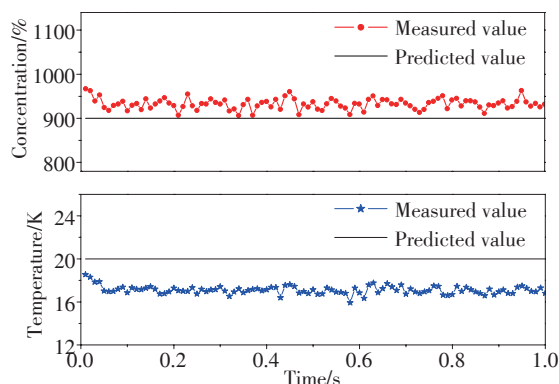


Fig. 9 Results of temperature and H₂O concentration

由图9可知,扫描波长调制光谱的测量结果与预测值具有较好的一致性。温度的预测值通过一元恒定等熵气流方程计算得到。H₂O浓度的预测值是根据注入气体的配比,H₂完全燃烧计算得到。光束上游测得温度和H₂O浓度的平均值分别为932.7K和17.7%,标准差分别为12.5K和0.38%,与预测值的偏差分别为3.64%和11.5%。温度和组分浓度误差产生的原因主要有:(1)所选谱线光谱数据的误差;(2)激光调制参数测量的误差;(3)隔离段的发射端和接收端净化不干净,受到了空气中水蒸气的干扰。

5 结 论

通过本文研究,得出如下结论:

(1)通过测量7185.60cm⁻¹和7454.45cm⁻¹2条H₂O吸收谱线在气流中产生的多普勒频移,实现了高速气流的测量,测量值与预测值的偏差在3%以内。

(2)通过测量激光调制参数,建立了基于实验环境的仿真数据库,将实验测得的2f/1f信号比率与仿真数据库进行对比,迭代求解了流场的温度和组分浓度,与预测值的相对偏差在4%和12%以内。

(3)基于波长调制光谱技术的测量不仅实现了不同谱线的速度和温度的同步测量,而且证明了在强噪声和强震动等恶劣环境中,使用该方法测量时具有较好的信噪比、较高的响应速度和较强的抗干扰能力。

参考文献:

[1] Yoshimura T, Shen J, McDonell V G, et al. Development

of a Non-Intrusive Temperature Sensor in a Model Gas Turbine Combustor[R]. AIAA 2004-546.

[2] Zhou X, Jeffries J B, Hanson H K, et al. Fast Temperature Sensor for Combustion Control Using H₂O Diode Laser Absorption Near 1.4 μm[R]. AIAA 2005-627.

[3] Hanson H K, Jeffries J B. Diode Laser Sensors for Ground Testing[R]. AIAA 2006-3441.

[4] Philippe L C, Hanson R K. Laser Diode Wavelength-modulation Spectroscopy for Simultaneous Measurement of Temperature, Pressure, and Velocity in Shock-Heated Oxygen Flows[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(30):6090-6103.

[5] Miller F, William J K. Diode Laser-Based Air Mass Flux Sensor for Subsonic Aeropropulsion Inlets [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(24):4905-4912.

[6] Mattison D, Liu J T, Jeffries J B, et al. Tunable Diode-Laser Temperature Sensor for Evaluation of a Valveless Pulse Detonation Engine[R]. AIAA 2005-224.

[7] Hinckley K M, Jeffries J B, Hanson R K, et al. A Wavelength Multiplexed Diode Laser Sensor for Temperature Measurements in Pulse Detonation Engines [R]. AIAA 2004-713.

[8] Hinckley K M, Dean A J. Time Resolved Measurement of Fuel-Air Stoichiometry in Pulse Detonation Engines Using a Non-Intrusive Laser Sensor[R]. AIAA 2005-628.

[9] Gregory B R, Jonathan T C. Diode Laser Sensor for Gas Temperature and H₂O Concentration in a Scramjet Combustor Using Wavelength Modulation Spectroscopy [R]. AIAA 2005-3710.

[10] 李 飞, 余西龙, 顾洪斌, 等. 超燃燃烧室气流参数诊断[J]. *力学学报*, 2011, 43(6): 1061-1067.

[11] Zhou X, Liu X, Jeffries J B, et al. Development of a Sensor for Temperature and Water Concentration in Combustion Gases Using a Single Tunable Diode Laser[J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(8): 1459-1468.

[12] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 Molecular Spectroscopic Database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2009, 110(9):533-572.

[13] Zhou X, Jeffries J B, Hanson R K, et al. Development of a Fast Temperature Sensor for Combustion Gases Using a Single Tunable Diode Laser [J]. *Applied Physics B*, 2005, 81(5):711-722.

[14] Li H, Rieker G B, Liu X, et al. Extension of Wavelength-modulation Spectroscopy to Large Modulation Depth for Diode Laser Absorption Measurements in High-Pressure Gases[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(5): 1052-1061.

(编辑:梅 瑛)