

基于扫描波长调制光谱的气体质量流量测量方法研究

屈东胜 洪延姬 王广宇 王明东 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 基于扫描波长调制光谱方法实现了超声速气流的温度、 H_2O 组分浓度、压强、速度以及质量流量的测量。利用两条 H_2O 吸收谱线的谐波信号, 研究了均匀流场中超声速气流多参数同时测量的方法。基于波长调制光谱技术的测量结果能准确反映均匀流场中的气体参数, 然而实际流场往往具有边界层。针对具有边界层的近似均匀流场, 数值仿真研究了谱线选择和边界层厚度对流场中心流测量结果的影响。仿真结果表明, 随着边界层厚度不断增大, 测量结果误差逐渐增大, 选择对边界层温度不灵敏的吸收谱线能够有效降低边界层的影响。对超燃直连台隔离段内的超声速气流进行实验研究, 结果表明基于波长调制光谱的测量方法在强噪声和强振动的环境中具有较高的测量精度。温度、 H_2O 组分浓度、压强、速度以及质量流量测量值与预测值的最大相对偏差分别在 8.2%、7.2%、2.0%、3.1% 和 6.4% 以内。

关键词 测量; 质量流量测量; 波长调制光谱方法; 超声速气流

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0904006

Study on Mass Flux Measurement Methods of Gas Based on Scanning Wavelength Modulation Spectroscopy

Qu Dongsheng Hong Yanji Wang Guangyu Wang Mingdong Pan Hu

State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Equipment Academy, Beijing 101416, China

Abstract The temperature, H_2O concentration, pressure, velocity and mass flux of supersonic gas flow are measured based on scanning wavelength-modulation spectroscopy method. The simultaneous measurement methods of multiple parameters of supersonic gas flow in uniform flow field are studied using the harmonic signals of two H_2O absorption spectral lines. The measurement results based on wavelength modulation spectrum technology can precisely reflect the gas parameters in the uniform flow field, while the actual flow field often has the boundary layers. Aiming at the approximate uniform flow field with boundary layer, the numerical simulation is carried out to study the effect of line selection and boundary layer thickness on the measurement result of core flow in flow field. The simulation results show that the measurement error increases with the boundary layer thickness, and the absorption spectral lines which are insensitive to temperature of boundary layers can effectively decrease the influence of boundary layer. The experiments of supersonic gas flow is carried out in a direct-connected scramjet test facility isolator, the results show that the measurement method based on wavelength modulation spectroscopy has high measurement accuracy in strong noise and strong vibration environments. The maximum relative deviation of predicted value and measured value for temperature, H_2O concentration, pressure, velocity and mass flux are less than 8.2%, 7.2%, 2.0%, 3.1% and 6.4%, respectively.

Key words measurement; mass flow measurement; wavelength modulation spectroscopy method; supersonic gas flow

OCIS codes 120.6780; 300.1030; 300.6260; 300.6360

收稿日期: 2016-04-06; 收到修改稿日期: 2016-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(21403299)

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

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

E-mail: hongyanji@vip.sina.com(通信联系人)

1 引 言

质量流量的测量对于研究燃烧和推进流场具有重大意义,如发动机进气道空气的质量流量是评估燃烧室性能的重要参数,可以作为发动机燃烧状态监测和故障诊断的重要依据。可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)是一种非接触式测量技术,具有不干扰流场、响应快及能承受高温等优点,在发动机流场诊断等领域具有广阔的应用前景^[1]。

质量流量是气流速度和密度的乘积,质量流量的测量通常是通过分别测量密度和速度实现的。1993年,Philippe等^[2]实现了激波管中质量流量的测量,证明了利用半导体激光器测量质量流量的潜力。1996年,Miller等^[3]利用法布里-珀罗激光器测量了普惠公司F-100涡扇发动机进气道空气的质量流量,实现了质量流量传感器在发动机上的应用。1999年,Upsichulte等^[4]开始探索研究TDLAS技术在超燃发动机中的应用,并利用H₂O的吸收光谱实现了模型燃烧室中质量流量的测量。2005年,Lyle等^[5]设计了基于氧气吸收光谱的质量流量传感器。2010年,Chang等^[6-7]采用波长调制光谱技术实现了空气质量流量的测量,其中速度是通过测量谐波信号的频率偏移量得到,而密度是结合测得的温度以及由压力传感器独立测得的压强,然后利用理想气体方程得到。2011年,杨斌等^[8]利用TDLAS技术实现了吸气式发动机来流参数的速度、温度和H₂O组分浓度的测量。2013年,宋俊玲等^[9]采用直接吸收-分时扫描方法测量了隔离段的静温和速度,并结合压力传感器的测量值,实现了空气质量流量的测量。2014年,谷俊青等^[10]利用H₂O的吸收谱线实现了超声速流场内的速度测量。

波长调制光谱方法是吸收光谱主要的测量方法之一,该方法通过对激光信号进行高频调制,利用锁相解调后的谐波信号提取分子的光谱特征,提高了测量系统的信噪比和抗干扰能力,成为恶劣环境中广泛应用的测量方法。本文基于波长调制光谱测量方法,提出了能够直接实现气流质量流量测量的方法。首先介绍了吸收光谱和波长调制光谱的基本理论,其次研究了测量系统和测量方法并进行了数值仿真研究,最后进行了实验研究并给出了结论。

2 基本理论

2.1 吸收光谱理论

Beer-Lambert定律是吸收光谱理论的基本方程,可用来描述频率为 ν 的单色光穿过均匀气体介质时,透射光强 I_t 和入射光强 I_0 的关系

$$\tau(\nu) = \left(\frac{I_t}{I_0} \right)_{\nu} = \exp(-\alpha_{\nu}) = \exp \left[- \int_0^L P \cdot S(T) \cdot \phi(\nu) \cdot X \cdot dx \right], \quad (1)$$

式中 τ 为透射系数, α_{ν} 为光谱吸光度, P 为气体压强, L 为总的吸收长度, X 为气体中吸收分子的组分浓度(摩尔分数,无量纲), $\phi(\nu)$ 为线性函数。谱线强度 $S(T)$ 和温度密切相关,随温度变化的特性主要取决于低跃迁态能级 E'' ,可表示为

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T} \right) \exp \left[- \frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \times \left[1 - \exp \left(\frac{-hc\nu_0}{kT} \right) \right] \left[1 - \exp \left(\frac{-hc\nu_0}{kT_0} \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中 $T_0 = 296 \text{ K}$ 为参考温度, ν_0 为吸收谱线的中心频率, h 和 k 分别为普朗克常数和玻尔兹曼常数, c 为光速。配分函数 $Q(T)$ 是关于温度 T 的函数,可通过经验公式计算得到^[11]。线性函数 $\phi(\nu)$ 通常采用Voigt线性函数描述。谱线的光谱参数 ν_0 、 E'' 和 $S(T_0)$ 等都可以通过查询光谱数据库^[12]或实验测量得到^[13]。

2.2 波长调制光谱理论

激光频率受到正弦调制(通常在激光器的注入电流加入调制)会同时导致激光强度产生调制,其频率 $\nu(t)$ 和强度 $I_0(t)$ 的表达式分别为

$$\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos(2\pi ft), \quad (3)$$

$$I_0(t) = \bar{I}_0 [1 + i_0 \cos(2\pi ft + \phi_1) + i_2 \cos(2\pi ft + \phi_2)], \quad (4)$$

式中 $\bar{\nu}$ 和 \bar{I}_0 分别为激光频率和强度的平均量。 a 为频率调制的幅度, f 为调制频率。 i_0 为线性强度调制幅度, i_2 为非线性强度调制幅度, ϕ_1 和 ϕ_2 分别为线性和非线性频率调制/强度调制的相位偏移。加入调制后,

透射系数 τ 是关于 $2\pi ft$ 的周期性函数,将 τ 利用余弦傅里叶级数展开,即

$$\tau [\bar{\nu} + a \cos(2\pi ft)] = \sum_{k=0}^{\infty} H_k(\bar{\nu}, a) \cos(k \cdot 2\pi ft) \quad (5)$$

式中

$$\begin{cases} H_0(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos \theta) d\theta, k = 0 \\ H_k(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos \theta) \cdot \cos(k\theta) d\theta, k \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\theta = 2\pi ft$ 。将透射光强 I_t 分别与余弦和正弦参考信号相乘,并进行低通滤波,可获得所选谐波信号的 X 和 Y 分量,其表达式为

$$\begin{cases} X_{nf} = \frac{G\bar{I}_0}{2} \left\{ H_n + \frac{i_0}{2} [H_{n+1} + (1 + \delta_{n1}) H_{|n-1|}] \cos \psi_1 + \frac{i_2}{2} [H_{n+2} + (1 + \delta_{n2}) H_{|n-2|}] \cos \psi_2 \right\} \\ Y_{nf} = \frac{G\bar{I}_0}{2} \left\{ \frac{i_0}{2} [H_{n+1} - (1 + \delta_{n1}) H_{|n-1|}] \sin \psi_1 + \frac{i_2}{2} [H_{n+2} - (1 + \delta_{n2}) H_{|n-2|}] \sin \psi_2 \right\} \end{cases} \quad (7)$$

式中 G 为探测器的光电增益, δ 是克罗内克函数。通过分析谐波信号的幅值信息(X 和 Y 分量平方和后再开方)可知,谐波信号中都包含相同的 G 和激光器噪音等,因而不同谐波信号的比值能够消除这些因素的影响。

由上述分析可知,光谱的谐波信号主要依赖于 a 、 i_0 、 i_2 、 ψ_1 和 ψ_2 等调制参数,通过事先测量调制参数,就可仿真不同谐波信号的比值(nf/mf),进而实现气流参数的测量。

3 测量系统与测量方法

3.1 测量系统

基于波长调制光谱的典型测量装置和数据流程示意图如图 1 所示。图 1(a)为典型的测量装置示意图,实验装置包括数据采集(DAQ)电脑、采集卡、激光控制器、半导体激光器、单模光纤、光纤分束器/合束器、准

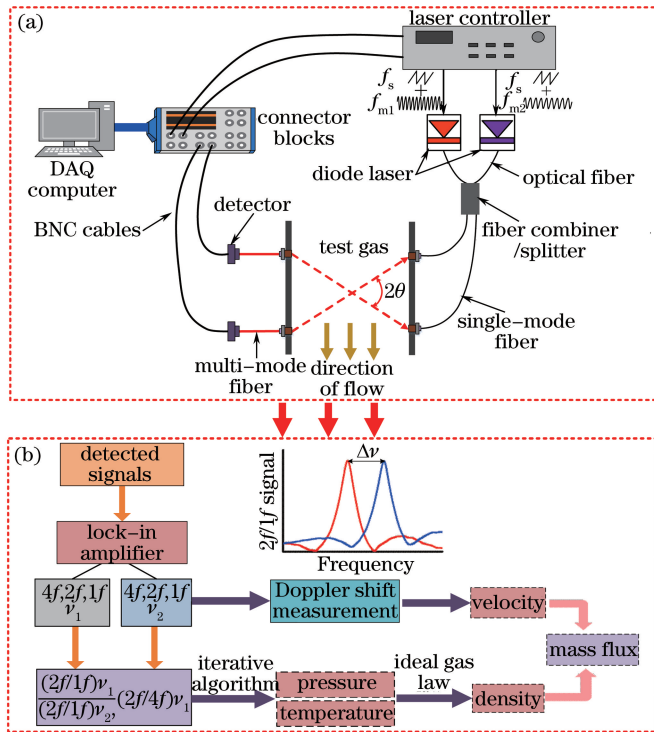


图 1 基于扫描波长调制光谱质量流量的(a)典型测量装置和(b)数据流程示意图

Fig. 1 (a) Schematic of typical experimental setup and (b) data process for mass flux based on scanned wavelength modulation spectroscopy

直透镜、多模光纤和探测器等。

采集卡同时具有输出和采集功能,输出的锯齿波扫描电压信号(扫描频率为 f_s)和正弦波调制电压信号(调制频率为 f_{m1} 和 f_{m2})输入激光控制器。激光控制器产生的激光经合束器/分束器后分成两束光,其中每束光都包括了两个激光器的信息,两束光之间的夹角为 2θ ,激光穿过流场后,由大尺寸的透镜接收,经多模光纤传输至光电探测器,由光电探测器将光信号转换为电信号,经卡扣配合型连接器(BNC)电缆传输至采集卡。

质量流量的数据处理流程示意图如图 1(b)所示,探测器信号经数值锁相放大器解调后,可得到不同谱线的谐波信号,利用谐波信号可实现气流速度、温度及压强的测量,进而可实现质量流量的测量。

3.2 气流速度的测量

激光光束穿过具有速度的气流,当气流具有平行于光束方向的速度分量时,会产生多普勒效应,导致激光中心频率产生偏移,其表达式为

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{U_p}{c}, \quad (8)$$

式中 $\Delta\nu$ 为实验测得的多普勒频移, U_p 是气流速度 U 在光束方向上的分量,假设光束夹角为 2θ ,按照图 1(a)所示的光线布局,气流速度 U 的表达式为

$$U = \frac{\Delta\nu \cdot c}{\nu_0 \cdot 2\sin\theta}. \quad (9)$$

3.3 气流温度、组分浓度和压强的测量

光谱的谐波信号是关于气体温度、组分浓度和压强的函数,利用所选谱线的谐波信号($2f/1f$ 信号以及 $4f$ 峰值与 $2f$ 峰值比 $4f_{\text{peak}}/2f_{\text{peak}}$),通过迭代算法可实现气流温度 T 、组分浓度 X 和压强 P 的测量。基于扫描波长调制光谱的气体温度、组分浓度和压强迭代过程图如图 2 所示。

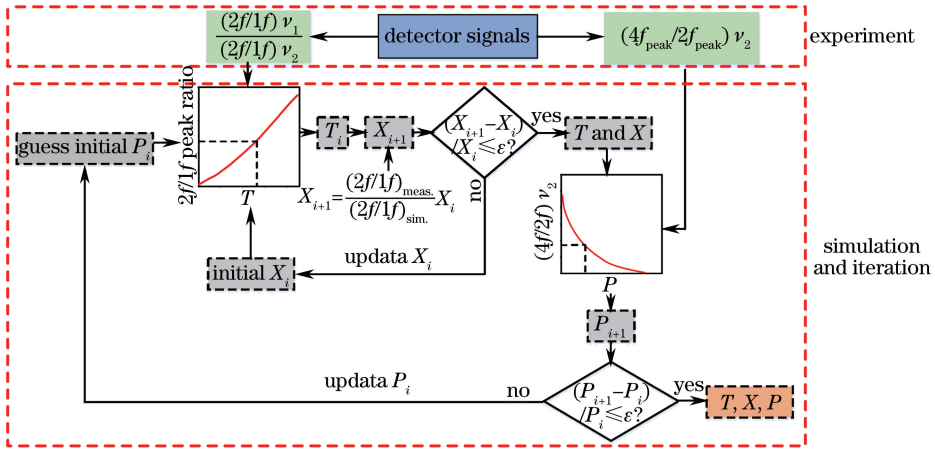


图 2 基于扫描波长调制光谱的气体温度、组分浓度和压强迭代过程图

Fig. 2 Iterative processes for gas temperature, concentration and pressure based on scanned wavelength modulation spectroscopy

3.4 质量流量的测量

利用实验测得的速度、温度和压强,再通过气体状态方程可以实现气体密度 ρ 的测量,其表达式为

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T}, \quad (10)$$

式中 R 为气体常数。质量流量 q_m 的表达式为

$$q_m = \rho \cdot U. \quad (11)$$

4 数值仿真研究

4.1 仿真模型

吸收光谱是利用探测到的光谱线型实现流场内气体温度、压强、组分浓度和速度测量的,属于视线测量

技术,能够准确反映均匀流场内的气体参数。然而气体以一定的速度经过流场时,不可避免会产生边界层(BL),使得流场沿光路为近似均匀分布的流场,流场的非均匀性会使光谱线型发生扭曲和失真,导致测量结果产生偏差。下面讨论非反应流场中的边界层对测量结果的影响,建立具有边界层的近似均匀流场,流场模型如图 3(a)所示。在仿真模型中,压强和组分浓度近似不变,而边界层内的速度和温度变化较大,速度和温度分布沿光路分布如图 3(b)所示。沿光路分布的气体环境如表 1 所示,其中边界层厚度 δ 定义为气体速度从零变化到中心流速的 0.99 倍时的一段距离。

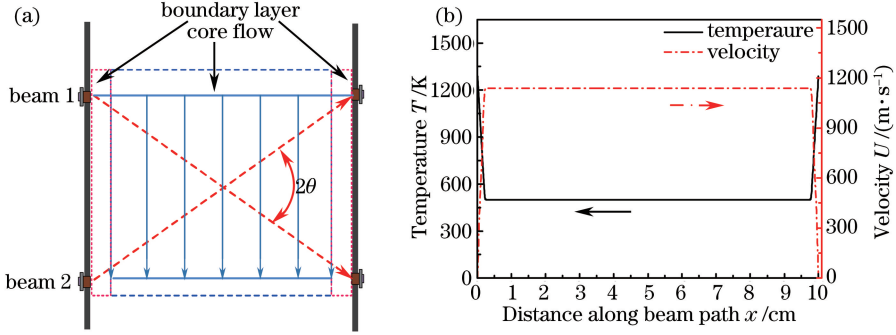


图 3 (a) 流场模型; (b) 气体的速度和温度沿光路的分布

Fig. 3 (a) Model for flow field; (b) velocity and temperature distribution of gas along beam path

表 1 沿光路分布的气体环境

Table 1 Gas condition along beam path

	Temperature T /K	Velocity U /(m/s)	Pressure P /MPa	H ₂ O concentration /%	Path length L /cm
Core flow	500	1138	0.056	0.21	9.50
BL	Variable	Variable	0.056	0.21	0.25

4.2 吸收谱线的选择

由于 H₂O 是燃烧反应涉及的重要分子,因此选用 H₂O 作为目标分子。基于吸收光谱的测量需要选用两条 H₂O 谱线,Liu 等^[14]针对谱线选择进行了详细的讨论和分析,可总结为:1) 选择具有合适线强度的谱线;2) 选择 $|\Delta E''| \geq 700 \text{ cm}^{-1}$ 的谱线组合;3) 避免所选谱线附近有强吸收谱线。

然而在具有边界层的流场中,为了获得中心流的气体参数,除了上述原则外,还需考虑边界层的影响,选择对边界层不敏感的谱线。由(1)式可知,谱线的吸光度与线强度密切相关,而线强度随温度的变化趋势取决于低跃迁态能级 E'' 。为了尽可能减小边界层的影响,应选择具有合适 E'' 的谱线,使谱线在中心流的线强度与边界层的线强度的比值 $R = S(T_{\text{core}})/S(T_{\text{BL}})$ 最大。

针对图 3 和表 1 中的流场环境,综合考虑谱线选择原则,选择 7185.60 cm^{-1} 和 7454.45 cm^{-1} 的两条 H₂O 吸收谱线,同时为了进行比较,增加谱线 6806.03 cm^{-1} ,三条谱线的线强度随温度的变化如图 4 所示。由图 4 可知,三条谱线的线强度随温度的变化差别较大,主要原因是谱线的低跃迁态能级 E'' 差别较大,线强度随温度的变化趋势通常为先上升,达到峰值后迅速下降,三条谱线分别在 $582, 990, 1498 \text{ K}$ 时达到峰值。

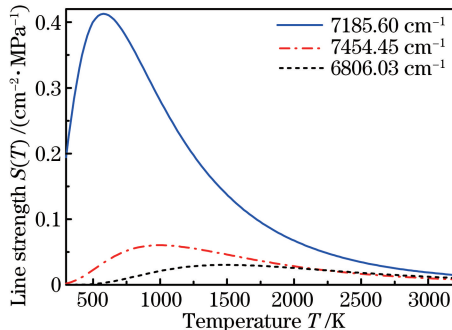


图 4 谱线的线强度随温度的变化

Fig. 4 Spectrum line strength as a function of temperature

4.3 吸收谱线对测量结果的影响

在不同的温度点,谱线的线强度区别很大,因而不同温度时的吸光度 α_v 差别也很大,三条谱线在边界层的吸光度 α_v 占整个光路上的比重也各不相同。针对图 3(a)中的流场,谱线 7185.60 cm^{-1} 在边界层的吸光度 α_v 占整个光路上的比重最小,谱线 7454.45 cm^{-1} 次之,谱线 6806.03 cm^{-1} 占的比重最大。由于非均匀流场中测得的光谱线型是沿光路路径上气体压强、温度、组分浓度的微元叠加结果,因而谱线在边界层中的吸光度 α_v 占的比重越大,光谱线型失真越严重,导致速度、温度和组分浓度的测量结果偏差越大。针对图 3 和表 1 的流场参数,通过数值积分方式仿真不同谱线的谐波信号($2f/1f$ 、 $2f$ 和 $4f$ 信号), 7185.60 cm^{-1} 谱线的谐波仿真信号如图 5 所示。由图 5 可知, $2f/1f$ 信号的信噪比明显高于 $2f$ 和 $4f$ 信号,实验中通常采用 $2f/1f$ 测量气体速度。

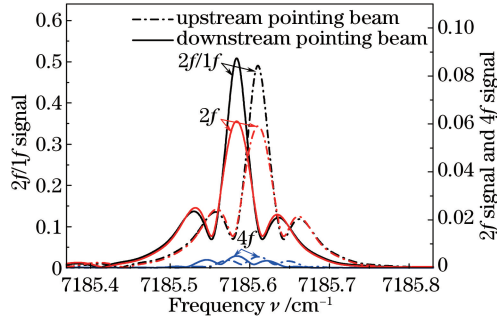


图 5 7185.60 cm^{-1} 谱线的 $2f/1f$ 、 $2f$ 和 $4f$ 仿真信号

Fig. 5 Simulated signal of $2f/1f$, $2f$ and $4f$ for spectral line of 7185.60 cm^{-1}

由于流场存在边界层,通过数值方法仿真的谐波信号存在一定的扭曲,该信号作为实验测量信号,然后假设流场为均匀流场,提取谱线的 $2f/1f$ 信号峰值,测得谐波信号对应的频率偏移量,利用(9)式可计算速度。三条谱线测得的频移量、速度和偏离中心流速度的偏差如表 2 所示。

表 2 利用三条谱线测得的频移量、速度和偏离中心流速度的偏差

Table 2 Frequency shift, velocity and error from core flow velocity measured by three spectral lines

Frequency ν_0/cm^{-1}	Lower state energy E''/cm^{-1}	Frequency shift $\Delta\nu/\text{cm}$	Velocity $U/(\text{m/s})$	Error from core flow /%
7185.60	1045.06	0.02667	1114.1	2.10
7454.45	1962.51	0.02662	1071.0	6.45
6806.03	3291.21	0.01868	823.5	27.6

由表 2 可知,利用不同谱线测得的流场速度区别较大,谱线 7185.60 cm^{-1} 的速度测量值偏离中心流的偏差最小,只有 2.1%,谱线 6806.03cm^{-1} 的速度测量值偏差最大,高达 27.6%。在非均匀流场内,利用 TDLAS 测量获得的气体速度,其测量值并非简单的路径平均值,而是和谱线在不同路径内的吸光度权重相关。

和速度测量方法不同,气流温度、组分浓度和压强的测量需要同时利用两条谱线的 $2f/1f$ 信号和 $4f_{\text{peak}}/2f_{\text{peak}}$,然后通过迭代算法实现。非均匀流场中三条谱线的谐波信号($2f/1f$ 信号和 $4f_{\text{peak}}/2f_{\text{peak}}$)可通过数值仿真方法获得,作为非均匀流场中的实验测量值;然后假设流场为均匀流场,利用不同的谱线组合通过图 2 的迭代算法计算气流的温度、组分浓度和压强,不同谱线组合的测量结果如表 3 所示。由表 3 可知, 7185.60 cm^{-1} 和 7454.45 cm^{-1} 谱线对的测量值偏差最小,而 7454.45 cm^{-1} 和 6806.03 cm^{-1} 谱线对的测量值偏差最大,主要原因是:针对图 3 中的非均匀流场,谱线 7185.60 cm^{-1} 在边界层的吸光度占整个光路上的比重最大,谱线 7454.45 cm^{-1} 次之,谱线 6806.03 cm^{-1} 最小;吸收谱线对在边界层的吸光度占光路上的比重越小,其测量结果的偏差越小。

表 3 利用不同的谱线组合测得的气体温度、 H_2O 组分浓度、压强及其误差

Table 3 Gas temperature, H_2O concentration, pressure and the error measured by different spectral line pairs

Line pair / cm^{-1}	Temperature T/K (error/%)	Concentration X (error/%)	Pressure P/kPa (error/%)
7185.60/7454.45	516.10(3.22)	0.2030(3.33)	58.1403(2.46)
7185.60/6806.03	540.82(8.164)	0.1886(10.19)	61.6259(7.92)
7454.45/6806.03	559.62(11.93)	0.1254(40.29)	74.1091(30.60)

4.4 边界层厚度对测量结果的影响

在不同的流场中,边界层的厚度也会不同,下面讨论边界层厚度对测量结果的影响。仿真和分析方法与4.3节中的方法一样,基于三条谱线的速度测量结果随边界层厚度的变化如图6所示。由图6可知,边界层占光程的比重越大,速度测量结果偏离中心流的偏差越大。谱线 7185.60 cm^{-1} 在温度大于 582 K 时,线强度迅速变小,导致该谱线在中心流的吸光度占光程吸光度比重较大,因而利用该谱线测得的结果偏差最小,当边界层的厚度占光路的比重为 10% 时,基于吸收光谱的速度测量值偏离预测值的偏差只有 4.17% 。然而谱线 7454.45 cm^{-1} 和 6806.03 cm^{-1} 在边界层的吸光度占光程吸光度比重较大,边界层对流场速度的测量影响变大,当边界层的厚度占光路的比重为 10% 时,谱线 7454.45 cm^{-1} 和 6806.03 cm^{-1} 测量的速度偏离预测值的偏差分别为 10.54% 和 39.93% 。

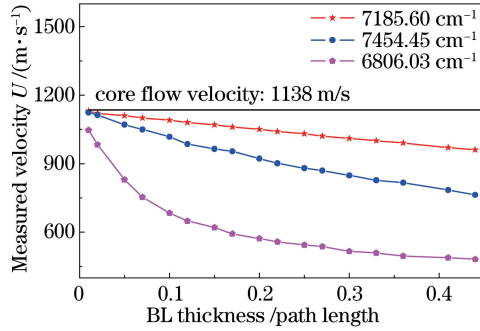


图6 由路径积分线型测得的速度随边界层厚度的变化

Fig. 6 Velocity measured by path-integrated line shapes with the variation of BL thickness

利用数值方法仿真具有边界层的谱线的谐波信号作为实验测量信号,然后利用图2的迭代算法进行测量,气体温度、 H_2O 组分浓度和压强测量结果随边界层厚度的变化如图7所示。由图7可知,边界层厚度占光程的比重越大,流场的非均匀性越严重,对气体温度、 H_2O 组分浓度和压强的测量结果影响越严重。 7185.60 cm^{-1} 和 7454.45 cm^{-1} 的谱线对测得的气体温度、 H_2O 组分浓度和压强偏差较小,这主要是由于与另外两组谱线对相比,这两条谱线在边界层的吸光度占光程吸光度比重较小。

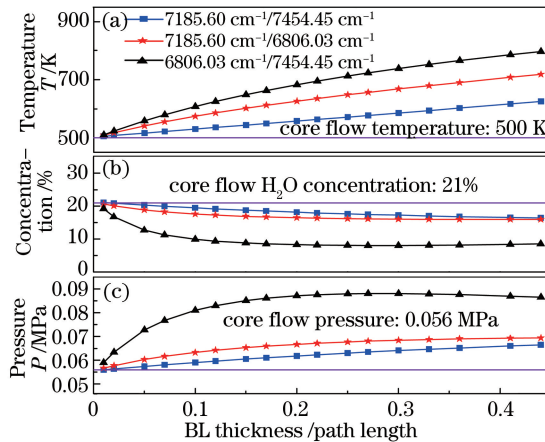


图7 由路径积分线型测得的(a) 气流温度、(b) H_2O 组分浓度和(c) 压强随边界层厚度的变化

Fig. 7 (a) Gas flow temperature, (b) H_2O concentration and (c) pressure measured by path-integrated line shapes vary with BL thickness

5 实验研究

5.1 实验系统

实验在直联式超声速实验台中进行,直连台系统由空气加热器、隔离段、模型燃烧室以及测控系统等组成,空气加热器采用燃烧加热方式,燃料为氢气,用以产生模拟一定飞行条件下满足发动机入口条件的空气。

喷管马赫数为 2.5, 来流总温和总压分别为 1252 K 和 1 MPa, 空气、氧气和氢气的流量分别为 1095.51 g/s、165.29 g/s 和 13.31 g/s。实验在隔离段中进行, 主要实验装置示意图如图 1(a) 所示。隔离段装置及其光路示意图如图 8 所示, 隔离段总长为 42 cm, 光纤发射端和接收端分别安装在距离隔离段入口 17 cm 和 26 cm 处, 隔离段的内流道截面为 7 cm × 8 cm。选择中心波长分别为 1391.7 nm 和 1341.4 nm 带光纤耦合输出的可调谐半导体激光器, 通过激光控制器分别控制两个激光器的中心电流 (70 mA, 70 mA) 和温度 (22.8°, 26.8°), 使得激光输出中心频率位于所选吸收谱线 (7185.60 cm⁻¹ 和 7454.45 cm⁻¹) 附近。激光经分束器/合束器后由单模光纤传输至隔离段壁面发射端, 经准直透镜准直后分别穿过流场, 由大尺寸的透镜接收后经多模光纤传输至 InGaAs 探测器接收。隔离段壁面发射端和接收端通过 N₂ 填充, 尽可能排除这部分区域内水蒸气的干扰。

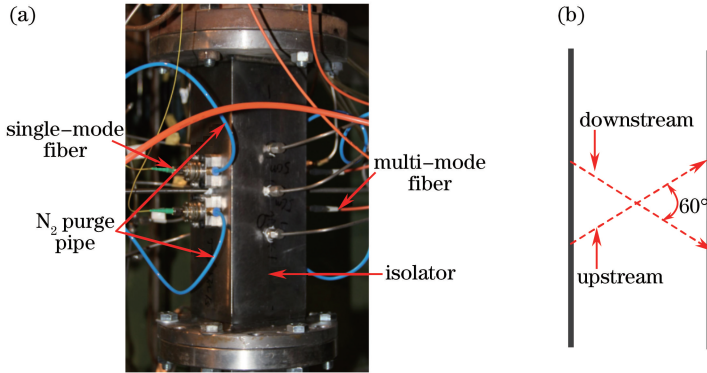


图 8 直联式超声速实验台的隔离段图片及其光路示意图

Fig. 8 Photography of isolator of direct-connect supersonic test facility and schematic of beam path

5.2 实验结果

实验采用频分复用技术, 利用一个探测器同时测量两个激光器信号, 然后利用不同的调制频率 (280 kHz 和 240 kHz) 来区分激光信号。扫描频率为 1 kHz, 采样频率为 $5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, 调制电压分别为 1.2 V 和 1.0 V (调制指数约为 0.9 和 1.1), 为了减小随机噪音的影响, 将原始信号进行 10 次平均处理, 以隔离段内的气体具有速度的时刻为零时刻点。将透射信号解调后能够获得谱线 7185.60 cm⁻¹ 和 7454.45 cm⁻¹ 的 $2f/1f$ 信号和 $4f_{\text{peak}}/2f_{\text{peak}}$, 提取两条谱线的 $2f/1f$ 信号峰值, 测量由于多普勒效应产生的多普勒频移, 计算隔离段内的气流速度, 测量结果如图 9 所示。由图 9 可知, 0~0.5 s 为气流的暂态过程, 气流速度变化较大, 0.5~4.8 s 为流场稳定阶段, 谱线 7185.60 cm⁻¹ 测得的速度波动较小, 平均值为 1264.52 m/s, 标准差为 12.98 m/s; 而谱线 7454.45 cm⁻¹ 测得的速度波动较大, 平均值为 1265.05 m/s, 标准差为 89.21 m/s。其主要原因是受边界层引起的非均匀性影响, 边界层的温度较高, 而谱线 7454.45 cm⁻¹ 的低跃迁态能级较大, 在温度较高时吸收较大, 导致谱线 7454.45 cm⁻¹ 的线型产生较大扭曲, 进而影响速度的测量结果。

将隔离段内的气流作恒定等熵流动处理, 利用来流的马赫数、总温、总压计算气流的速度预测值, 预测值为 1228.2 m/s, 利用两条谱线测得的速度平均值偏离预测值的偏差分别为 2.96% 和 3.00%。

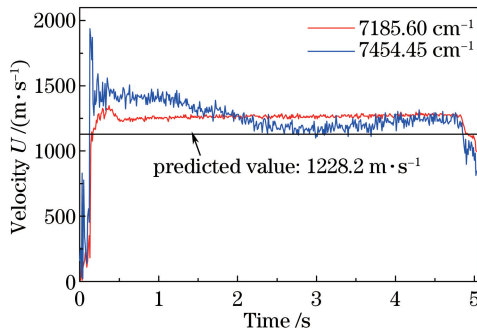


图 9 基于扫描波长调制光谱的速度测量结果

Fig. 9 Measured results of velocity based on scanned wavelength modulation spectroscopy

利用数值锁相放大器分别解调获得的谱线 7185.60 cm^{-1} 和 7454.45 cm^{-1} 的谐波信号 ($2f/1f$ 信号和 $4f_{\text{peak}}/2f_{\text{peak}}$), 通过图 2 的迭代算法可得到气流的压强、温度和 H_2O 组分浓度, 然后利用(10)式和(11)式计算流场内的密度和质量流量。计算质量流量时采用谱线 7185.60 cm^{-1} 测得的速度、压强、温度、组分浓度和质量流量的测量结果如图 10 所示。由图 10 可知, 光谱上游和下游的测量结果具有微小偏差, 这一结果也是由边界层导致的流场非均匀性不同造成的。在气流稳定阶段内, 光束上游的温度、 H_2O 组分浓度、压强和质量流量的测量平均值分别为 721.81 K , 15.84% , 0.05592 MPa 和 $356.17\text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 标准差分别为 21.60 K , 0.489% , 0.001664 MPa 和 $7.359\text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$; 而光束下游的温度、 H_2O 组分浓度、压强和质量流量的测量平均值分别为 706.015 K , 15.43% , 0.05580 MPa 和 $349.08\text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 标准差分别为 23.38 K , 0.423% , 0.001672 MPa 和 $6.961\text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 。

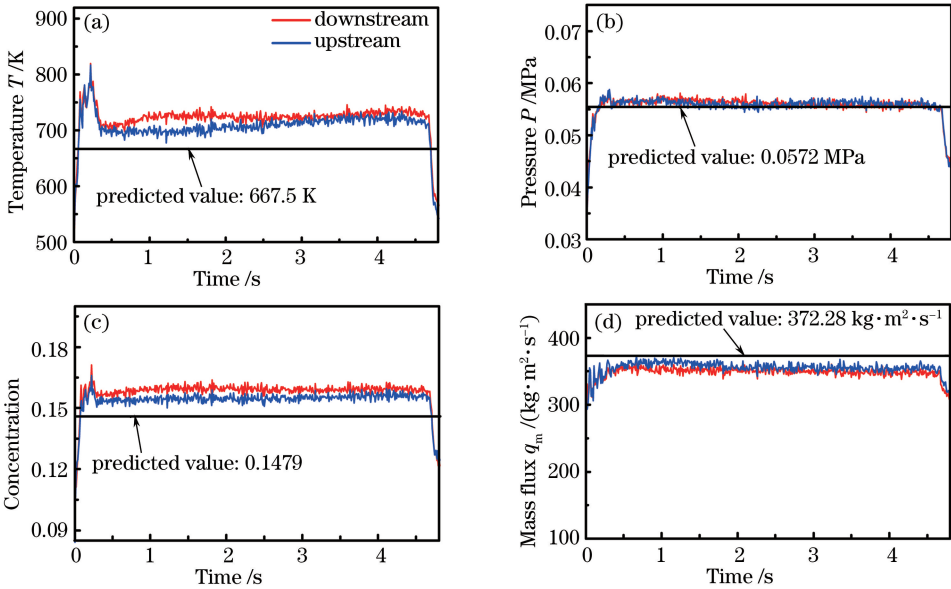


图 10 基于扫描波长调制光谱的(a) 温度、(b) H_2O 组分浓度、(c) 压强和(d) 空气质量流量的测量结果

Fig. 10 Measured results of (a) temperature, (b) H_2O concentration, (c) pressure and (d) air mass flux based on scanned wavelength modulation spectroscopy

气流压强、温度和速度的预测值也可利用来流的马赫数、总温、总压计算获得。利用氢气和空气的流量配比, 当氢气完全燃烧时可计算获得 H_2O 组分浓度的预测值。温度、 H_2O 组分浓度、压强和质量流量的预测值分别为 667.5 K , 14.79% , 0.0572 MPa 和 $372.78\text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 测量平均值偏离预测值的最大偏差分别为 8.13% , 7.10% , 1.86% 和 6.36% 。

基于波长调制光谱的测量依赖于仿真和实验, 其误差来源也是多方面的, 主要有: 1) 谐波信号的仿真(谱线参数和调制参数误差对仿真结果的影响); 2) 边界层的影响; 3) 预测值的误差。

6 结 论

本课题组研究了基于波长调制光谱的质量流量测量方法, 利用两条 H_2O 吸收谱线 (7185.60 cm^{-1} 和 7454.45 cm^{-1}) 的谐波信号实现高速气流速度、温度、 H_2O 组分浓度、压强和质量流量的测量。吸收光谱技术属于视线测量技术, 测量结果能够准确反映均匀流场内的气体参数; 对于非均匀流场, 其测量参数并非简单的路径积分平均值, 而是和谱线在路径上不同位置的吸光度相关。具有边界层的近似均匀流场, 边界层厚度越大, 对中心流测量结果的影响越大, 选择对边界层不灵敏的吸收谱线, 可有效降低边界层对中心流测量的影响。在超声速气流中开展的实验研究表明, 在具有强噪声和强振动等恶劣环境条件下, 波长调制光谱的测量结果具有较高的测量精度, 能够较为真实地反映流场内的气流参数。下一步将主要研究利用波长调制光谱技术实现高度非均匀流场中气体参数的测量。

参 考 文 献

- 1 Bolshov M A, Kuritsyn, Y A, Romanovskii Y V. Tunable diode laser spectroscopy as a technique for combustion diagnostics[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2015, 106: 45-66.
- 2 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.
- 3 Miller M F, Kessler W J, Allen M G, *et al.* Diode laser-based air mass flux sensor for subsonic aer propulsion inlets[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(24): 4905-4912.
- 4 Upsichulte B L, Miller M F, Allen M G, *et al.* Continuous water vapor mass flux and temperature measurements in a model scramjet combustor using a diode laser sensor[C]. Reno: 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 1999, AIAA 99-0518.
- 5 Lyle K H, Jeffries J B, Hanson R K. Aeroengine mass flux sensor based on laser absorption measurements of oxygen velocity and density[C]. Tucson: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2005, AIAA-2005-3784.
- 6 Chang L S, Jeffries J B, Hanson R K. Mass flux sensing via tunable diode laser absorption of water vapor[J]. *AIAA Journal*, 2010, 48(11): 2687-2693.
- 7 Chang L S, Strand C L, Jeffries J B, *et al.* Supersonic mass-flux measurements via tunable diode laser absorption and nonuniform flow modeling[J]. *AIAA Journal*, 2011, 49(12): 2783-2791.
- 8 Yang Bin, He Guoqiang, Liu Peijin, *et al.* TDLAS-based measurements of parameters for incoming flow hot-firing test of air breathing rocket engine[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0508006.
杨 斌, 何国强, 刘佩进, 等. 利用 TDLAS 技术开展吸气式发动机来流热试实验参数测量[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0508006.
- 9 Song Junling, Hong Yanji, Wang Guangyu, *et al.* Measurement of supersonic flow parameters using laser absorption spectroscopy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3510-3515.
宋俊玲, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于激光吸收光谱技术的超声速气流参数测量[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(11): 3510-3515.
- 10 Gu Junqing, Xu Shengli. Fluid velocity measurement of supersonic wind tunnel with tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Laser&Infrared*, 2014, 44(1): 8-11.
谷俊青, 徐胜利. 可调谐二极管激光吸收光谱技术测量风洞流速[J]. *激光与红外*, 2014, 44(1): 8-11.
- 11 Gamache B R, Kennedy S, Hawkins R, *et al.* Total internal partition sums for molecules in the terrestrial atmosphere [J]. *Journal Molecular Structure*, 2000, 517-518: 407-425.
- 12 Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, *et al.* The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130: 4-50.
- 13 Goldenstein C S, Hanson R K. Diode-laser measurements of linestrength and temperature-dependent lineshape parameters for H₂O transitions near 1.4 μ m using Voigt, Rautian, Galatry, and speed-dependent Voigt profiles [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 152: 127-139.
- 14 Liu X, Jeffries J B, Hanson R K, *et al.* Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature[J]. *Applied Physics B*, 2006, 82(3): 469-478.