

基于激光吸收光谱技术的超声速气流参数测量

宋俊玲^{1,2}, 洪延姬¹, 王广宇¹, 潘 虎¹

(1. 装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416; 2. 中国空气动力研究与发展中心
超高速空气动力研究所 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 采用可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术, 针对超声速直连台隔离段内超声速气流温度、组分浓度、速度和质量流量进行了测量。选择 H₂O 的两条吸收谱线 7 185.597 cm⁻¹ 和 7 454.445 cm⁻¹, 采用直接吸收-分时扫描方式, 测量流场静温为 899 K, 并结合吸收面积得到 H₂O 的组分浓度 20.7%。根据安装在流场上游和下游成 60° 的两条光路, 测量流场速度为 1 205 m/s, 结合壁面压力传感器, 测量流场的质量流量为 1 500.49 g/s, 较真实值偏差为 5.23%。TDLAS 测量系统实现了对超声速气流多参数快速线测量。

关键词: 可调谐半导体激光吸收光谱; 超声速气流; 温度测量; 浓度测量; 速度测量
中图分类号: TN247; O433 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3510-06

Measurement of supersonic flow parameters using laser absorption spectroscopy

Song Junling^{1,2}, Hong Yanji¹, Wang Guangyu¹, Pan Hu¹

(1. State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;
2. Science and Technology on Scramjet Laboratory, Hypervelocity Aerodynamics Institute of CARDC, Mianyang 621000, China)

Abstract: Based on the tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) technique, temperature, concentration, velocity and mass flux of the supersonic flows were measured in isolator of a direct-connected scramjet. Two H₂O absorption transitions 7 185.597 cm⁻¹ and 7 454.445 cm⁻¹ were adopted by using direct-absorption and Time Division Multiplexing strategy. The measurement results show the static temperature is of 899 K and the H₂O concentration is of 20.7% calculating from the absorption area. A cross-beam configuration with angles of 60° along the flows was used to measure the axial velocity. Combined with the pressure sensor on the wall and the measured velocity of 1 205 m/s, the mass flux of the flow is of 1 500.49 g/s with deviation of 5.23%. The TDLAS measured system can be used for in-situ measurements of multiple parameters of supersonic flows.

Key words: tunable diode laser absorption spectroscopy; supersonic flows; temperature measurement; concentration measurement; velocity measurement

收稿日期: 2014-03-10; 修订日期: 2014-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61403416)

作者简介: 宋俊玲(1985-), 女, 博士生, 主要从事近红外光谱流场诊断方面的研究。Email: songjl@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 洪延姬(1963-), 女, 教授, 博士, 主要从事先进推进技术方面的研究。Email: hongyanji@vip.sina.com

0 引言

对于吸气式发动机,质量流量测量是评价发动机性能的重要参量。传统的质量流量测量方法是通过在流场内安装温度和压力探针的侵入式方法,但是此方法不仅对发动机内部流场造成干扰,产生激波结构,同时受到高温气体的影响,缩短了探测器的使用寿命。

基于可调谐半导体激光器的激光吸收光谱质量流量测量方法是具有高灵敏度,响应时间快,非接触测量的优点,由 Philippe 和 Hanson^[1]在 1993 年首次实现了对燃烧场和推进流场温度、组分浓度和质量流量的实时测量。Allen 等人^[2]研究了非均匀流动对 Doppler 频移的影响,但仿真的最大速度只有 150 m/s。随后, LyLe 等人^[3-4]发展了进气道质量流量测量方法,实现了 1 Hz 实时测量。Chang 等人^[5-6]在 Li^[7]和 Rieker^[8]的研究基础上,采用免标定波长调制光谱技术,在隔离段测量空气质量流量,精度达到 2%。李飞等人^[9]在直连台上同时测量了燃烧室入口、燃烧室内和出口处的气体温度、速度和分压,计算了燃烧效率。张亮等人^[10]将两条光路吸光度曲线进行归一化处理,采用直接吸收方法测量了高速气流的速度。

文中在在超声速直连台地面实验系统的隔离段处安装 TDLAS 质量流量测量系统,采用直接吸收-分时扫描方式测量了隔离段静温、H₂O 组分浓度、速度,并结合壁面压力传感器,得到了隔离段气体质量流量。

1 基本原理

当入射激光频率 ν 与气体吸收组分跃迁频率相同时,激光能量被吸收。根据 Beer-Lambert 定律,经过被测流场后透射激光强度 I_t 与入射激光强度 I_0 之间的关系为:

$$I_t = I_0 \exp(-PS(T)\phi(\nu)\chi L) \quad (1)$$

式中: P 为气体总压; $S(T)$ 为吸收谱线强度; $\phi(\nu)$ 为吸收谱线线型函数; χ 为气体组分浓度; L 为激光在吸收介质中的传播路程。

将公式(1)整理并对频率积分得:

$$A = PS(T)\chi L \quad (2)$$

吸收谱线强度随温度的变化可以表示为:

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{T_0}{T} \exp\left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{hc\nu}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{hc\nu}{kT_0}\right)\right]^{-1} \quad (3)$$

式中: E'' 为低跃迁能态能量; h 为 Planck 常数; k 为 Boltzmann 常数; c 为光速; $Q(T)$ 为温度 T 时的配分函数值,一定温度范围内的配分函数可以用多项式表示^[11]。

根据公式(2)和(3),被测区域温度可以表示为:

$$T = \frac{\frac{hc}{k}(E_2'' - E_1'')}{\ln \frac{A_1}{A_2} + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc}{k} \frac{(E_2'' - E_1'')}{T_0}} \quad (4)$$

式中:下标 1、2 分别表示测量温度时所使用的两条谱线,参考文献[12-13]介绍了选择谱线的原则,以提高测量的温度灵敏度。文中选择的 H₂O 的两条吸收谱线 7 185.597 cm⁻¹ 和 7 454.445 cm⁻¹ 用于隔离段温度测量,其中吸收谱线 7 185.597 cm⁻¹ 旁 0.2 cm⁻¹ 位置有弱线,文中采用直接吸收方法通过计算吸收面积来确定流场温度,由表 1 可知,吸收谱线 7 185.401 cm⁻¹ 不能被忽略,故谱线拟合时采用双峰拟合。吸收谱线参数如表 1 所示(1 atm=1.013×10⁵ Pa)^[14]。

表 1 H₂O 吸收谱线参数

Tab.1 H₂O absorption parameters

Line/cm ⁻¹	Line strength at 296 K/(cm ⁻² ·atm ⁻¹)	Lower-state energy /cm ⁻¹
7 185.401	2.60×10 ⁻⁴	1 474.98
7 185.597	1.91×10 ⁻²	1 045.06
7 454.445	1.726×10 ⁻⁴⁽¹¹⁾	1 962.51

当被测区域的温度已知,可以由公式(2)计算组分浓度为:

$$\chi = \frac{A}{PS(T)L} \quad (5)$$

当气流在激光传输方向上有速度分量时,沿着激光传输方向气体分子吸收光子时的激光频率较实际激光发射频率发生一定偏移:

$$\Delta\nu/\nu_0 = U_{\text{parallel}}/c \quad (6)$$

式中: ν_0 为未发生频率偏移时的中心频率; U_{parallel} 为平行于光束方向的气体速度; c 为光速。

当两条激光光束夹角为 2θ ,流场速度可以表示为:

$$U = \frac{\Delta v}{2 \sin \theta v_0} c \quad (7)$$

2 实验模型

为了验证 TDLAS 质量流量测量系统的准确性,在超燃直连台地面实验系统的隔离段处安装 TDLAS 质量流量测量系统。为了模拟高空飞行器来流条件,隔离段前端燃烧氢气以产生高焓气流,燃烧后再补充氧气,使得氧气含量与空气中氧气含量相同。实验中燃烧主要产物为 H_2O ,选择 H_2O 的两条吸收谱线 $7\,185.597\text{ cm}^{-1}$ 和 $7\,454.445\text{ cm}^{-1}$ 测量气体温度、速度、组分浓度和质量流量。

隔离段侧壁每间隔 50 mm 安装一组压力传感器,隔离段总长度为 480 mm,入口截面面积为 $56\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,出口截面面积为 $61.86\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,具有 0.7° 的扩张角。两组发射装置分别安装在距离出口 65.5 mm 和 123.2 mm 位置,两条光路夹角为 60° 。隔离段流场参数取决于前端配气系统控制的空气、氢气、氧气的流量和喷管马赫数。实验中空气质量流量为 $1\,276.56\text{ g/s}$,氧气为 283.59 g/s ,氢气为 23.13 g/s ,隔离段设置来流马赫数 Ma 为 2,总压 5.3 atm,总温 1492 K。

超燃直连台隔离段 TDLAS 测量系统示意图如图 1 所示。两个激光控制器(ILX,LDC-3908; Thorlabs,

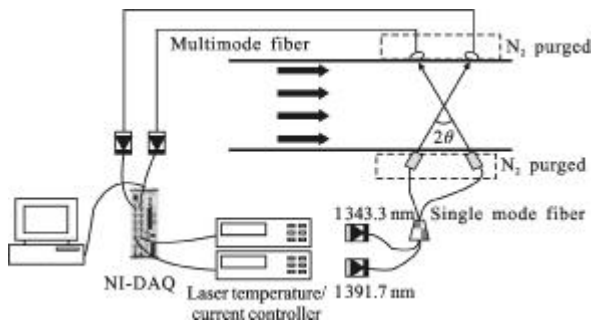


图 1 TDLAS 质量流量测量系统

Fig.1 Schematic of TDLAS mass flux system for isolation

ITC502) 分别通过控制温度和注入电流控制两个 DFB 激光器(NEL, 1391.7 nm, 1341.5 nm)。两个激光器输出激光经过 2×1 光纤耦合器耦合,在经过 1×2 光线分束器,经单模光纤传输到被测现场。两条夹角为 60° 的激光束经过被测流场区域后,经多模光纤接收传输到外部控制室,由探测器(InGaAs, $\Phi 3\text{ mm}$)接收。光纤发射和接收端的光学模块均采用氮气净化,以减少空气中 H_2O 的影响。激光器扫描控制和光电

信号采集由数据采集卡(NI-PCI6115)完成,数据采集卡包括两个输出通道和四个采集通道。两个输出通道同时工作时,输出速率最高为 2.5 MSamples/s。为了确保激光器注入电流扫描足够精细,扫描频率设定为 500 Hz,采样率设定为 10 MSamples/s。

3 数值模拟计算结果

数值模拟程序采用非定常可压缩的 Navier-Stokes 方程,并采用隐式有限体积法求解,使用最小模限制器的 MUSCL 方法获得空间二阶精度。时间离散采用二阶隐式格式,在计算非定常流动时,采用双时间步长方法,详见参考文献[15]。采用二维计算模型,z轴方向为周期边界条件,隔离段入口为远场边界条件,来流方向为沿 x 正方向,计算区域及边界定义如图 2 所示。其中右图给出流场的压力分布云图,箭头给出光线位于流场的位置。

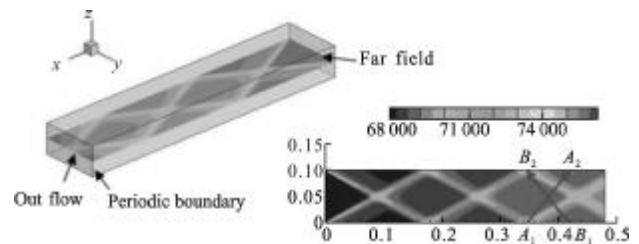


图 2 计算区域及边界定义

Fig.2 Divided computational zones

设置来流马赫数为 2,总温为 1492 K,总压 5.3 atm,绝热系数为 1.4。图 3 给出沿着光线 A_1, A_2 流场速度和温度分布,从计算结果可以看出中心流速度为 1232 m/s,中心流温度为 943 K。定义边界层厚度为该处流体速度等于中心流速度的 0.99 倍,得到在隔离段内沿着光线方向边界层厚度为 0.27 cm,占光路长度的 2%。

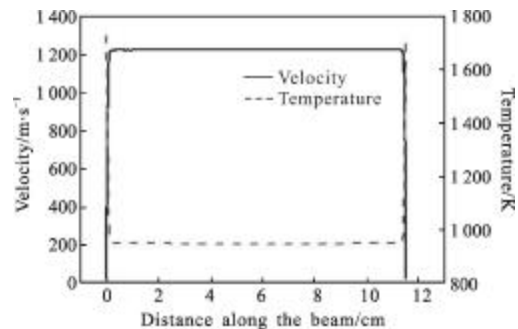


图 3 数值模拟计算沿光路方向速度和温度分布

Fig.3 Velocity and temperature distribution along line of sight

4 实验测量结果

4.1 谱线拟合

实验采用分时扫描的方式,由数据采集卡输出斜坡信号,分别控制两个激光器交替扫描。文中采用的 F-P 标准具(ThorLabs, SA200-12A)来校准激光频率,其自由光谱范围为 1.5 GHz。图 4 给出了吸收光谱的原始光电信号和标准具的干涉信号。干涉信号两峰之间的激光频率差为其自有光谱范围,对标准具干涉信号中激光频率随时间的变化关系进行三次样条插值,便可得到光谱中每个点激光频率。

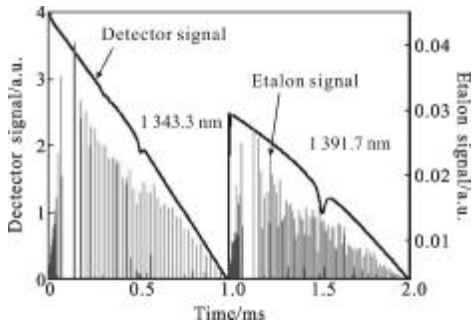


图 4 吸收光谱信号和标准具信号随时间的变化

Fig.4 Signals of absorption and etalon vs time

在实验开始时,干燥空气进入被测流道,探测器无吸收信号;随后,探测器接收到吸收信号,但无明显速度;当超声速气流经过隔离段时,两条光路上的吸收信号发生分离,如图 5 所示。

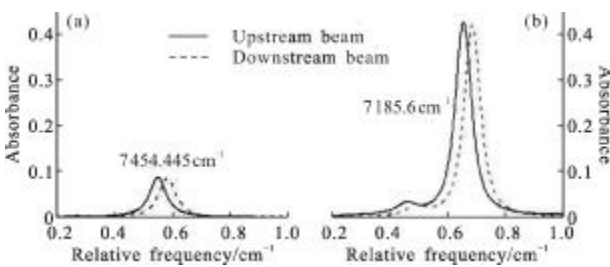


图 5 两条吸收谱线 Doppler 频移

Fig.5 Doppler shift of two absorption line shapes

实验中每 10 个周期的原始数据进行累加平均,减弱实验测量数据中的白噪声影响。截取探测器信号两端非吸收部分进行三次多项式基线拟合,作为入射光强 I_0 。采用 Voigt 线型进行拟合,其中谱线 7185.597 cm^{-1} 采用双峰拟合。

4.2 来流参数测量

分别计算吸收谱线 7185.597 cm^{-1} 和 7454.445 cm^{-1}

的积分吸收面积,根据公式(4)得到对应温度,测量结果如图 6 所示,由于隔离段内上下游温度分布不均匀,顺着和逆着流场方向两条光路温度测量结果略有不同。在 1.7~4.52 s 内,沿逆着流动方向温度平均测量结果为 899 K,标准差 12 K,顺着流场方向温度测量结果为 883 K,标准差为 12 K。根据公式:

$$T = \frac{T_0}{1 + \frac{k-1}{2} \text{Ma}^2} \quad (8)$$

式中: T_0 为总温; k 为绝热系数取为 1.33; Ma 为马赫数,实验设定为 2。计算理论温度为 897 K,测量结果较理论值偏差分别为 0.2%和 1.5%,与数值模拟计算温度结果相比较偏差为 4.8%和 6.4%。

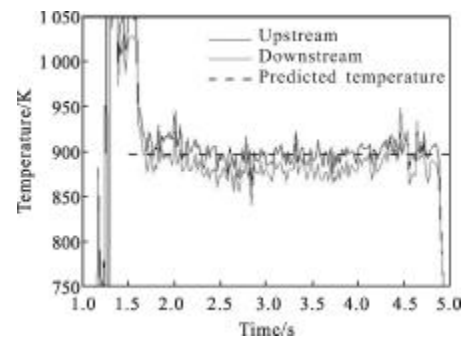


图 6 温度测量结果

Fig.6 Temperature measurement results

根据公式(7),利用吸收谱线 7185.597 cm^{-1} 的频移量计算流道速度,如图 7 所示。其中稳定流持续时间约 3.3 s,理论预测数值 1216 m/s,测量结果平均值为 1205 m/s,测量结果较理论预测结果偏低 0.9%。原因是在隔离段内存在热边界层,边界层内速度较低,根据 4 节 CFD 预测结果计算边界层厚度占光路长度的 2%,参考文献[6]的研究表明,这种情况下测量结果较中心流偏差为 1%,测量结果与文献结果吻合。

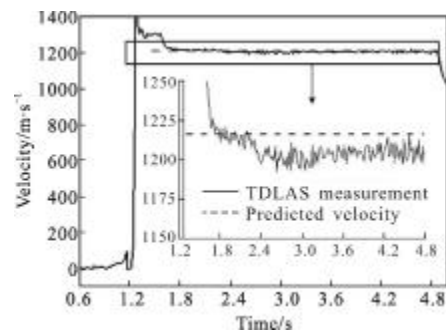


图 7 速度测量结果

Fig. 7 Velocity measurement results

读取空间位置为 400 mm 处压力传感器数值为 5.682×10^4 Pa, 利用测量的温度结果计算吸收谱线 $7\ 185.597\ \text{cm}^{-1}$ 的吸收面积和吸收谱线强度, 根据公式(5), 得到 H_2O 组分浓度随时间的变化, 如图 8 所示。计算 1.7~4.52 s 内组分浓度的平均结果为 0.207, 根据注入气体的配比, 计算 H_2 完全燃烧条件下 H_2O 的组分浓度为 0.197, 测量结果较理论值偏差为 5.07%。

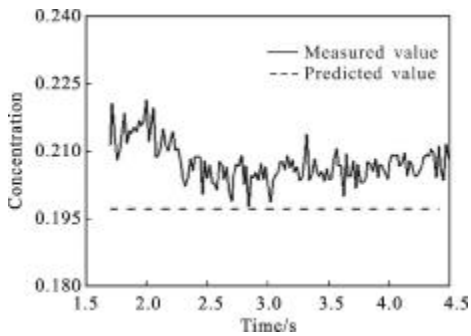


图 8 H_2O 组分浓度随时间的变化

Fig.8 H_2O concentration versus times

根据测量的温度和速度结果, 测量段横截面积为 $100\ \text{mm} \times 60.7\ \text{mm}$, 根据公式

$$\dot{m} = \rho V S = \frac{P}{RT} - M U S \quad (9)$$

式中: R 为气体常数取为 $8.314\ \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; M 为混合气体摩尔质量取为 $26.87\ \text{g}/\text{mol}$; T 为静温; U 为流场速度; S 为横截面积。计算流道中质量流量为 $1\ 500.49\ \text{g}/\text{s}$, 较实际质量流量 $1\ 583.28\ \text{g}/\text{s}$ 偏差为 5.23%。

根据上节温度计算结果, 利用公式计算在 $T = 899\ \text{K}$ 时的 Doppler 线宽

$$\Delta v_D = v_0 \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{mc^2}} = 7.1623 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (10)$$

得到 $\Delta v_D = 3.639 \times 10^{-2}\ \text{cm}^{-1}$, 并根据谱线拟合结果得到的 Voigt 线宽, 可以写成 Doppler 线宽和 Lorentz 线宽的形式^[16], 即:

$$\Delta v_v = 0.5346 \Delta v_c + \sqrt{(0.2166 \Delta v_c^2 + \Delta v_D^2)} \quad (11)$$

得到 Lorentz 线宽 $\Delta v_c = 0.02352\ \text{cm}^{-1}$ 。利用分压 $\chi = P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{air}} = 0.207$, 由 Lorentz 线宽计算公式

$$\Delta v_c = P \sum_i \chi_i^2 \gamma_i \quad (12)$$

$$\gamma(T) = \gamma(T_0) \left(\frac{T_0}{T} \right)^n$$

计算得到流场静压为 $0.622\ \text{atm}$, 较压力传感器测量

结果偏大 10.5%, 分析其原因是压力传感器测量结果为壁面压力, 采用 TDLAS 方法测量压力为沿着光线方向整个流场的平均压强, 当被测流场压力分布不均匀时, 两者数值必然存在差异。

5 结论

基于 TDLAS 技术, 搭建了一套超声速气流多参数测量系统, 实现了 500 Hz 扫描频率下对来流温度、 H_2O 组分浓度、速度和质量流量的快速测量。测量系统采用直接吸收-分时扫描的方式, 通过远程控制, 有效降低实验振动引起的噪声, 提高了测量精度。测量得到速度为 $1\ 205\ \text{m}/\text{s}$, 温度为 $899\ \text{K}$, H_2O 组分浓度为 20.7%, 质量流量为 $1\ 500.49\ \text{g}/\text{s}$, 通过与注入气流组分及完全燃烧后的理论计算结果的比较, 速度、静温、组分浓度和质量流量的偏差分别为 0.9%, 0.2%, 5.07% 和 5.83%。通过研发的 TDLAS 流场多参数测量系统, 实现了对气体参数非接触、快速测量, 该测量方法对于发动机流场诊断和研究燃烧流场效率具有重要意义。

参考文献:

- [1] 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: 6090-6103.
- [2] Allen M G. Diode laser absorption sensors for gas-dynamic and combustion flows[J]. *Measured Science and Technology*, 1998, 9: 545-562.
- [3] Lyle K H, Jeffries J B, Hanson R K. Diode-laser sensor for air-mass flux 1: Design and wind-tunnel validation[J]. *AIAA Journal*, 2007, 45: 2204-2212.
- [4] Lyle K H, Jeffries J B, Hanson R K. Diode-laser sensor for air-mass flux 2: nonuniform flow modeling and aeroengine tests[J]. *AIAA Journal*, 2007, 45: 2213-2223.
- [5] 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: 2687-2693.
- [6] 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: 2783-2791.
- [7] Li H, Farooq A, Jeffries J B, et al. Near-infrared diode laser

- absorption sensor for rapid measurements of temperature [J]. *Applied Physics B*, 2007, 89: 407-416.
- [8] Rieker G B, Jeffries J B, Hanson R K. Calibration-free wavelength modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments [J]. *Applied Optics*, 2009, 48: 5546-5560.
- [9] Li Fei, Yu Xilong, Gu Hongbin, et al. Measurement of flow parameters in a scran jet combustor based on near-infrared absorption [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(6): 1061-1067. (in Chinese)
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.
- [10] Zhang Liang, Liu Jianguo, Kan Ruifeng, et al. On the methodology of measuring high-speed flows using tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(3): 226-232. (in Chinese)
张亮, 刘建国, 阚瑞峰, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的高速气流流速测量方法研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(3): 226-232.
- [11] Gamache R R, Kennedy S, Hawkins R, et al. Total internal partition sums for molecules in the terrestrial atmosphere [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2000, 517-518: 407-425.
- [12] Zhou X, Liu X, Jeffries J B, et al. Development of a sensor for temperature and water vapor concentration in combustion gases using a single tunable diode laser [J]. *Measure Science and Technology*, 2003, 14: 1459-1468.
- [13] 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 Physisc B*, 2006, 82: 469-478.
- [14] 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: 533-572.
- [15] Wang D K, Hong Y J, Li J. Interaction of laser energy with bow shock in mach 5 flow [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 313-314: 596-599.
- [16] Olivero J J, Longbothum R L. Empirical fits to the Voigt line width: a brief review [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1977, 17: 233-236.