

利用 TDLAS 技术开展吸气式发动机来流热试 实验参数测量

杨 斌 何国强 刘佩进 齐宗满 潘科玮

(西北工业大学燃烧、流动和热结构国家级重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 利用可调谐半导体激光器吸收光谱(TDLAS)燃烧诊断技术,开展了吸气式发动机来流热试实验燃气温度、 H_2O 组分浓度和气流速度测量。选用 1392 nm 和 1395 nm 分布反馈式(DFB)半导体激光器,构建了交叉光束时分复用(TDM)系统,通过扫描波长方法,交替调制两个激光器以获得燃气双吸收谱线中心(7185.597 cm^{-1} 和 7168.437 cm^{-1})附近吸收光谱。根据双线测温原理,通过双线积分吸收率比值推断燃气静温,并由此温度测量值,结合单线积分吸收率计算燃气中 H_2O 组分浓度,此外,根据成 70° 夹角双激光束吸收中心的多普勒频移量计算气流速度,从而实现了发动机燃气参数的非接触式和实时在线测量。

关键词 光谱学;可调谐半导体激光器吸收光谱;吸气式发动机;来流热试实验;燃气参数测量

中图分类号 O433; V434 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0508006

TDLAS-Based Measurements of Parameters for Incoming Flow Hot-Firing Test of Air-Breathing Rocket Engine

Yang Bin He Guoqiang Liu Peijin Qi Zongman Pan Kewei

(National Key Laboratory of Combustion, Flow and Thermo-Structure, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS)-based sensor is applied to measurement of path-integrated static temperature, H_2O concentration and local velocity for incoming flow hot-firing test of air-breathing rocket engine. The measurements are achieved using time division multiplexing (TDM) system with scanned-wavelength method, which contains 1392 nm and 1395 nm distribute feedback (DFB) diode lasers. The absorption spectra of gases near 7185.597 cm^{-1} and 7168.437 cm^{-1} are obtained by modulating the two lasers alternately. The value of temperature is deduced from the ratio of two-line measured absorbances, and the water vapor concentration is deduced from the measured absorbance of one transition and the measured temperature, moreover, gas velocity is deduced from the measured Doppler-shift absorption of the two beams, which make an angle of 70° . Therefore, the in-situ and non-intrusive measurements of parameters are applied for gas in rocket engine.

Key words spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; air-breathing rocket engine; incoming flow hot-firing test; parameters measurements

OCIS codes 120.1740; 280.1740; 300.1030; 300.6260

1 引 言

在火箭发动机研究中,燃气参数测量对于了解发动机内部燃烧情况具有重要意义,同时也是燃烧组织和结构优化的依据。然而,由于发动机燃烧环

境恶劣,燃气温度和气流速度较高,传统插入式测量手段无法长时间正常工作,此外,在发动机地面实验中,冲击和振动较强,并可能出现各种意外情况,因此,火箭发动机地面实验迫切需要一种可实现远程

收稿日期: 2010-01-10; **收到修改稿日期**: 2011-02-28

作者简介: 杨 斌(1985—),男,博士研究生,主要从事火箭发动机燃烧诊断技术方面的研究。

E-mail: yangbinsheart@126.com

导师简介: 何国强(1962—),男,博士,教授,主要从事航空宇航推进理论与工程等方面的研究。

E-mail: gqhe@nwpu.edu.cn

操作控制的非接触式测量技术^[1]。

随着碳氢燃料的广泛采用,其燃气较为洁净、无固体颗粒成分的特点为可调谐半导体激光器吸收光谱(TDLAS)技术^[2,3]的燃烧诊断应用提供契机,TDLAS技术可实现温度、组分浓度和速度等多参数非接触式测量,并且由于利用半导体激光器和光纤技术,还具有简单可靠和远程操作控制的特点。由于H₂O是碳氢燃料燃烧重要产物之一,对监控燃烧发生的位置、时间和程度具有重要意义,并且H₂O在通信用分布反馈式(DFB)半导体激光器工作波段内分布着丰富的吸收谱线,因此,TDLAS测量系统通常以H₂O为目标分子开展燃烧环境中的参数测量^[4-6]。

本文针对碳氢燃料火箭发动机燃气测量,设计了采用直接吸收光谱技术(DAS)的交叉光束时分复用(TDM)系统,此外,为验证系统可行性,开展了吸气式发动机来流热试实验参数测量。

2 基本原理

TDLAS技术是将激光波长调制到特定组分吸收频域,通过测量激光束经待测区域的衰减程度,实现气态流场参数测量的一种燃烧诊断技术。如图1所示,半导体激光器产生激光,光强为 I_i ,激光通过待测气体后由光电探测器接收,透射光强为 I_t 。当激光频率 ν 与气体吸收组跃迁频率相同时,激光能量被吸收。定义传播分数 T_ν ,入射光强与透射光强满足比尔-朗伯定律

$$T_\nu = \left(\frac{I_t}{I_i}\right)_\nu = \exp(-k_\nu L) = \exp[-PX_{\text{abs}}S(T)\phi L], \quad (1)$$

式中 k_ν 为光谱吸收系数, L 为光程,将 $(k_\nu L)$ 称为光谱吸收率 α_ν ; P 为总压; X_{abs} 为吸收组分浓度; ϕ 为线型函数,满足 $\int \phi d\nu = 1$,对于燃烧环境,通常采用伏依特线型函数,计算公式采用文献^[7]近似公式; $S(T)$ 为谱线强度,是温度 T 的函数

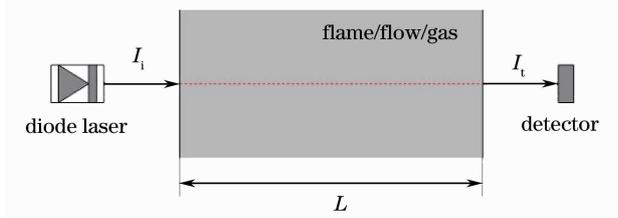


图1 TDLAS基本原理示意图
Fig.1 Schematic of TDLAS

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

式中 h 为普朗克常量; c 为真空中光速; k 为玻尔兹曼常数; E'' 为低能级能量; T_0 为参考温度(通常取296 K); $Q(T)$ 为吸收组分配分函数,是温度的分段函数^[8]。定义积分吸收率 A 为

$$A = \int \alpha_\nu d\nu = PX_{\text{abs}}S(T)L. \quad (3)$$

当两个不同频率的激光通过同一光程时,双线积分吸收率之比可化简为谱线强度之比,并且是温度的单值函数,据此便可通过实验测量的双线积分吸收率比值计算温度。一旦温度确定,就可由(3)式计算吸收组分浓度

$$X_{\text{abs}} = \frac{A}{PS(T)L}, \quad (4)$$

对于气流速度测量,TDLAS技术利用两束激光交叉通过流场,由多普勒现象可知,双激光束谱线中心将发生频移,通过实验测量多普勒频移量 $\Delta\nu$ 便可计算出流场速度

$$\Delta\nu = \nu_0(2\sin\theta) \frac{u}{c}, \quad (5)$$

式中 ν_0 为吸收谱线中心, 2θ 为两激光束夹角, u 为流场速度。

3 TDLAS系统设计

3.1 双线谱线对选择及分析

双线谱线对选择是TDLAS系统的核心问题,Arroyo等^[9]研究认为,不同的双谱线对选择对于TDLAS系统测温精度有重要影响,X. Zhou等^[10]针对1000~2500 K测温范围,总结了TDLAS系统设计的谱线选择原则。X. L. Yu等^[11]根据这些谱线选择原则,针对碳氢燃料燃烧环境,选用7168.437~7185.597 cm⁻¹双线谱线对构建TDLAS系统,并开展平面火焰炉测温实验,实验验证了该双线谱线对在1000~1500 K测温区间,测量最大相对误差为6.7%。由于测量对象类似,因此选择相同双线谱线对。利用HITRAN光谱数据库^[12],可计算双线谱线对谱线强度及其比值随温度的变化关系,如图2所示。

3.2 系统设计

为了开展火箭发动机地面实验燃气参数测量,设计采用扫描波长方法的时分复用系统,如图3所示。利用双通道信号发生器(Tektonix AFG3022B)

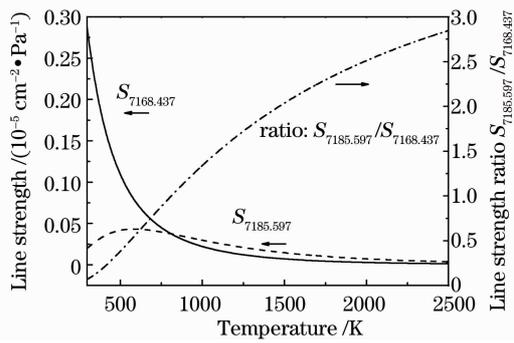


图 2 双线谱线强度及其比值随温度的变化关系
Fig. 2 Line strengths and their ratio as a function of temperature

产生相位差 180°的三角波(CH1:高电平 4 V,低电平 0,频率 1 kHz;CH2:高电平 1.4 V,低电平 0,频率 1 kHz),交替调制 2 个激光控制器(CH1:

ILXLightwave Inc LDC-3724B,控制温度 25.43 °C,控制电流 0;CH2:ILXLightwave Inc LDC-3900,控制温度 26.75 °C,控制电流 0)输出电流,从而实现调制 2 个 DFB 半导体激光器(CH1:1395 nm;CH2:1392 nm,NTT Electronics Corporation)。2 个激光器输出激光经过 2×1 光纤耦合器耦合,经光纤传输至发动机实验现场,再经 1×2 光纤分路器,由准直器输出成 70°夹角的交叉激光束,经待测流场由探测器(InGaAs,φ2 mm)接收,激光光强信号转换为电信号,经电缆传输,由数据采集系统(NI PXI-1042,采样频率为 1000 kHz)记录并存储。调制激光相对频率随时间变化关系可在实验前由自由光谱范围(FSR)为 1.5 GHz 的标准具(ThorsLab SA2000-12A)分析得到。此外,为消除环境中 H₂O 的影响,利用氮气进行吹除。

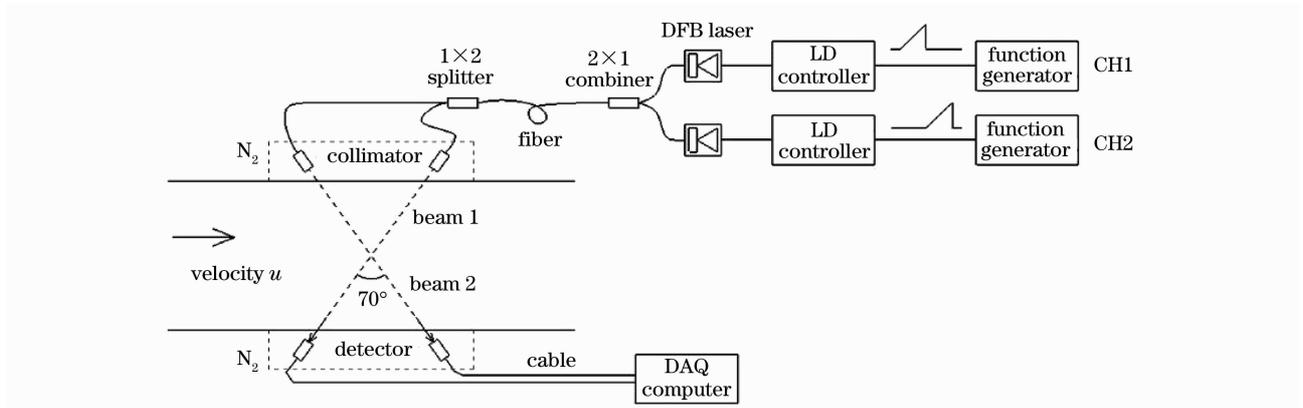


图 3 扫描波长方法交叉光束 TDM 系统示意图

Fig. 3 Schematic of two beams TDM system by scanned-wavelength method

4 实验系统与实验

为了验证 TDLAS 系统对于火箭发动机实验参数测量的可行性,开展了火箭基组合动力循环(RBCC)来流热试实验参数测量。RBCC 推进系统^[13]是一种将高推重比的火箭发动机和高比冲的吸气式发动机实现有机组合的新型吸气式推进系统。其直

连式地面实验系统^[14]由来流模拟系统和发动机系统构成,如图 4 所示。为了测量 RBCC 地面实验燃气参数,在发动机出口处加工安装测量段以固定 TDLAS 交叉光束系统中的准直器和探测器。

在来流热试实验中,加热火箭燃气通过溢流喷管按一定比例进入混合器与干燥空气混合,并补足

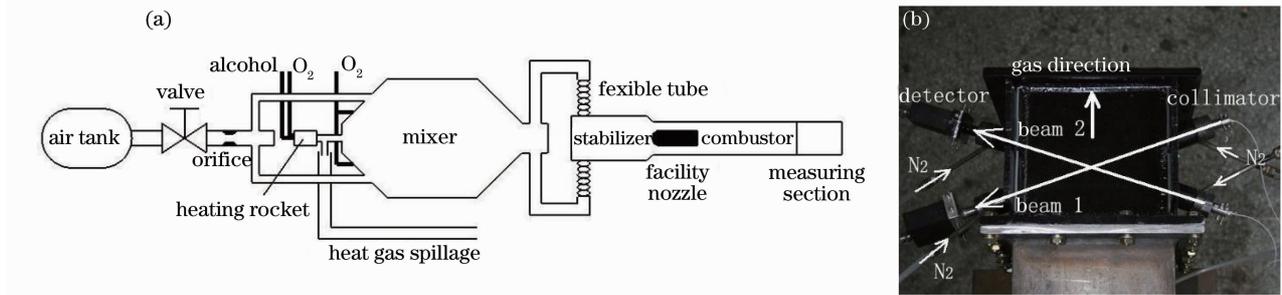


图 4 RBCC 发动机地面实验系统。(a)系统示意图,(b)发动机测量段实物图

Fig. 4 Illustration of RBCC ground test system. (a) system schematic, (b) measuring section photo

一定量氧气,混合气通过悬臂软管,经设备喷管,进入发动机燃烧室内流场,以模拟发动机真实飞行状态下来流状态参数。实验时序及工况参数如图 5 所示,其中以打开空气阀时间为 0 时刻,空气流量为

3766.7 g/s,2.5 s 时刻加热火箭开始工作,乙醇燃料流量为 222.3 g/s,氧气流量为 185.0 g/s,经溢流喷管,燃气以 141.8 g/s 质量流量进入混合器,并补足 202.8 g/s 流量的氧气。

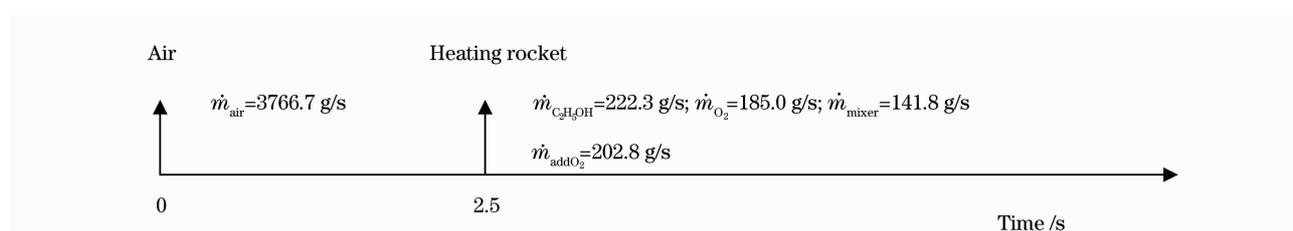


图 5 实验工况参数及时序图

Fig. 5 Schematic of experimental conditions and timing sequence

5 实验结果及分析

5.1 典型时刻实验曲线

根据图 5 实验时序可知,实验开始 0~2.5 s 时间内,干燥空气进入发动机流道,此时,流道中无 H₂O 存在,因此探测器信号无吸收,如图 6(a)所示。当加热火箭工作时,乙醇燃料燃烧产生 H₂O,可见

探测器信号出现吸收,如图 6(b)所示。此外,图 6(b)中除吸收外,曲线还存在较大干扰,这是由燃烧流场密度不均导致光路折射偏斜及发动机实验剧烈振动导致激光校准偏移引起的,在数据处理过程中,可通过对一定时间内取时均的方法消除此类干扰,但是该措施将一定程度降低测量时间分辨力。

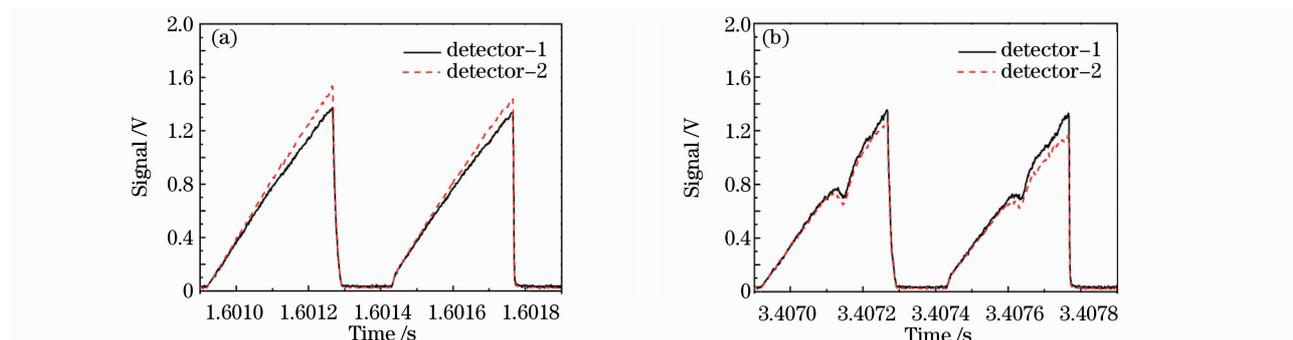


图 6 典型时刻探测器信号曲线。(a)干燥空气,(b)加热火箭工作

Fig. 6 Example laser scans on the typical time. (a) dry air, (b) heating rocket

5.2 双谱线中心附近吸收光谱

对加热火箭稳定工作 100 ms(100 个调制周期)时间内探测器信号时均处理,如图 7 所示。利用零吸收基线拟合的方法,根据标准具探测信号按四次多项式拟合获得的调制激光相对频率随时间变化关系,如图 8 所示(其时间零点为各调制周期内,三角波调制该激光器开始时间),便可获得双谱线中心附近吸收光谱,由于发动机实验环境下,吸收光谱符合伏依特线型函数分布,因此,对实验获得的吸收光谱开展伏依特函数拟合,如图 9 所示,为双激光束双谱线吸收光谱伏依特函数拟合结果曲线。由此,便可

得到各光束各谱线吸收光谱参数,如表 1 所示。

表 1 实验测量吸收光谱参数

Table 1 Absorption spectroscopic parameters of measurements by experiment

| Laser frequency / cm ⁻¹ | Laser beam | Absorbance / 10 ⁻² | Line center / cm ⁻¹ | Doppler shifted / (10 ⁻³ cm ⁻¹) |
|------------------------------------|------------|-------------------------------|--------------------------------|--|
| 7168.437 | 1 | 6.257 | 0.72069 | 8.80 |
| | 2 | 6.631 | 0.72949 | |
| 7185.597 | 1 | 1.933 | 0.63009 | 7.82 |
| | 2 | 2.298 | 0.63791 | |

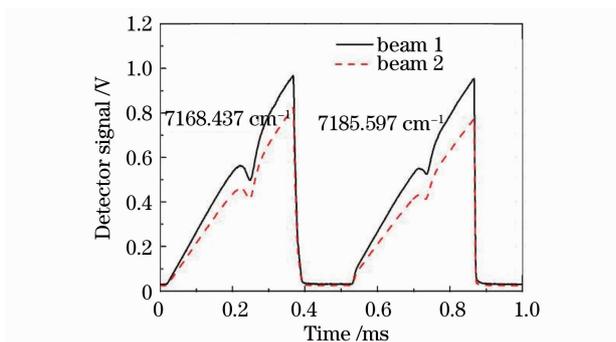


图 7 加热火箭稳定工作 100 ms 内时均处理曲线
Fig. 7 Time-average laser scan of 100 ms with the heating rocket working

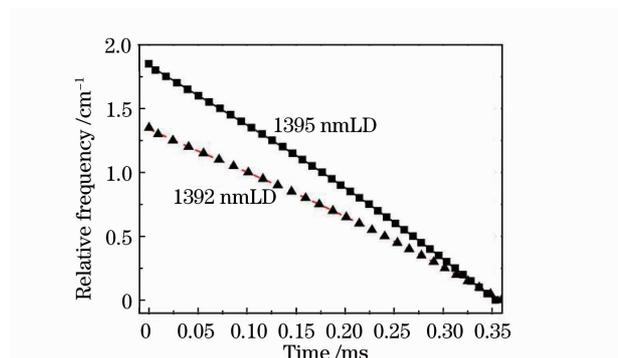


图 8 标准具信号峰值位置拟合结果
Fig. 8 Fitting of the peak positions in the etalon signal

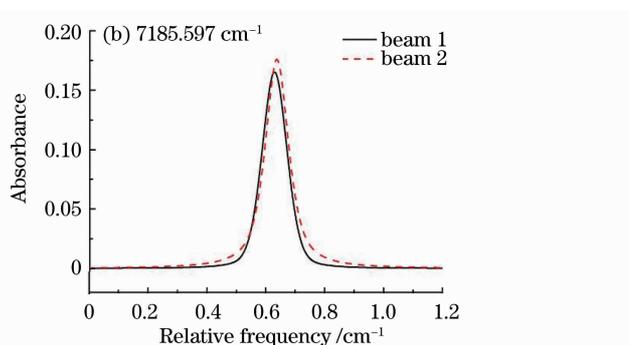
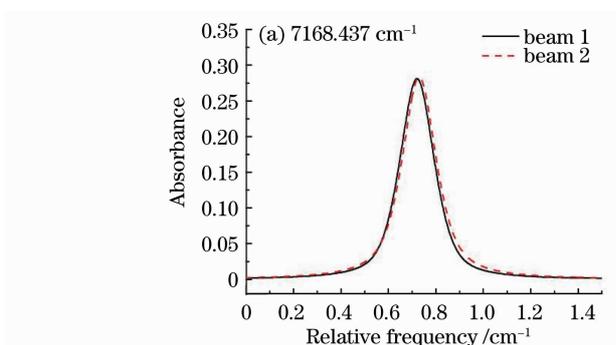


图 9 双激光束吸收光谱伏依特函数拟合结果
Fig. 9 Voigt fitting of spectra of two beams

5.3 燃气参数测量结果

根据表 1 所列的吸收光谱参数,便可分析出燃气静温、 H_2O 组分浓度和气流速度参数,具体分析如下:

1) 温度

根据表 1 实验测量吸收光谱参数,由双线积分吸收率比值与温度的单值函数关系可得,激光束 1 双线测量温度值为 460.7 K,激光束 2 测量温度值为 481.0 K。根据文献[15]网格划分和计算方法开展实验工况下的来流热试实验计算流体力学(CFD)数值计算,温度计算结果为 510.0 K,可知,激光束 1 和 2 相对于参考值 510.0 K 的相对差值分别为 9.67%和 5.69%。

2) H_2O 组分浓度

由(4)式,可知激光束 1 中,根据 7168.437 cm^{-1} 和 7185.597 cm^{-1} 双谱线积分吸收率可计算 H_2O 组分浓度,体积分数分别为 2.654%和 2.650%;激光束 2 中,根据 7168.437 cm^{-1} 和 7185.597 cm^{-1} 双谱线积分吸收率可计算 H_2O 组分浓度,体积分数分别为 3.060%和 3.060%。

利用最小吉布斯自由能法开展实验工况下的热

力计算结果,可得 H_2O 组分浓度参考值体积分数为 2.495%。因此,4 组测量值相对参考值的相对差值分别为:6.37%,6.21%,22.65%和 22.65%。 H_2O 组分浓度测量值相对参考值的相对差值较大,可见该系统对于较小浓度测量时,测量精度较低。

3) 气流速度

根据多普勒频移量,由(5)式可得, 7168.437 cm^{-1} 和 7185.597 cm^{-1} 双谱线气流速度测量值分别为 321.0 m/s 和 284.6 m/s 。相对于 CFD 计算结果 298.1 m/s 的相对差值为 7.68%和 4.53%。

5.4 提高测量精度的方法

由于发动机燃烧流场复杂及发动机实验振动较大,探测器信号有较大干扰,采用 100 ms 时间段时均处理方法可较大程度消除干扰,由此可知,时均数据处理方法是 TDLAS 技术提高测量精度较为简单有效的方法,但是该方法将降低系统时间分辨力。近年来研究发现,调制光谱技术^[16,17]是提高 TDLAS 系统测量精度的更为有力的工具,也是 TDLAS 燃烧诊断技术后续研究的重要方向,它通过高频转换,可大幅提高信噪比。特别是对于微弱吸收情况,不仅具有高信噪比特点,还可以避免直接

吸收光谱技术中,由于较高压强下分子光谱加宽叠加导致基线拟合误差。

6 结 论

1) 实验结果表明,相对于 CFD 或热力计算结果, TDLAS 系统测量温度最大相对差值 9.67%, H₂O 组分浓度最大相对差值 22.65%, 气流速度最大相对差值 7.68%, 测量结果具有重要参考价值。并且在一定测量精度要求内, 实现了 10 Hz 时间分辨。

2) 分析和实验结果表明, 采用扫描波长方法的交叉光束时分复用 TDLAS 系统, 能够通过双线积分吸收率比值推断燃气静温, 并由此温度测量值, 结合单线积分吸收率计算燃气中 H₂O 组分浓度, 此外, 根据多普勒效应导致的双激光束吸收中心频移量计算气流速度, 从而实现了发动机燃气参数非接触式和实时在线的测量手段, 并对研究燃烧加热方式来流对地面实验影响有重要意义。

参 考 文 献

- 1 J. R. Veale, L. G. Wang, T. F. Gallagher. Remote sensing of O₂ in a supersonic combustor using diode lasers and fiber optics [C]. 4th AIAA International Aerospace Planes Conference, AIAA 1992-5090
- 2 Ronald K. Hanson, J. B. Jeffries. Diode laser sensors for ground testing [C]. 25th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, AIAA 2006-3441
- 3 Mark G. Allen. Diode laser absorption sensors for gas-dynamic and combustion flows [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**(4): 545~562
- 4 D. W. Mattison, J. T. C. Liu, J. B. Jeffries *et al.*. Tunable diode-laser temperature sensor for evaluation of a valveless pulse detonation engine [C]. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2005-224
- 5 M. S. Brown, D. L. Barone, T. F. Barhorst *et al.*. TDLAS-based measurements of temperature, pressure, and velocity in the isolator of an axisymmetric scramjet [C]. 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2010-6989
- 6 A. Sappey, L. Sutherland, D. Owenby *et al.*. Flight-ready TDLAS combustion sensor for hypersonics [C]. 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic System and Technology, AIAA 2009-7234
- 7 E. E. Whiting. An empirical approximation to the voigt profile [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1968, **8**(6): 1379~1384
- 8 R. R. Gamache, S. Kennedy, R. Hawkins *et al.*. Total internal partition sums for molecules in the terrestrial atmosphere [J]. *J. Molecular Structure*, 2000, **517-518**: 407~425
- 9 M. P. Arroyo, R. K. Hanson. Absorption measurements of water-vapor concentration, temperature, and line-shape parameters using a tunable InGaAsP diode laser [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(30): 6104~6116
- 10 X. Zhou, J. B. Jeffries, R. K. Hanson. Development of a fast temperature sensor for combustion gases using a single tunable diode laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(5): 711~722
- 11 X. L. Yu, F. Li, L. H. Chen *et al.*. A tunable diode-laser absorption spectroscopy (TDLAS) thermometry for combustion diagnostics [C]. 15th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, AIAA 2008-2657
- 12 L. S. Rothman, I. E. Gordon, A. Barbe *et al.*. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2009, **110**(9-10): 533~572
- 13 Qin Fei, Lü Xiang, Liu Peijin *et al.*. Research status and perspective of rocket based combined cycle propulsion system [J]. *J. Propulsion Technology*, 2010, **31**(6): 660~665
秦 飞, 吕 翔, 刘佩进 等. 火箭基组合推进研究现状与前景 [J]. 推进技术, 2010, **31**(6): 660~665
- 14 Li Yufei. Thermal Adjustment Mechanism Research on Ejector and Ramjet Mode of RBCC [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. 47~63
李宇飞. RBCC 引射/亚燃模态热力调节机理研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007. 47~63
- 15 Pan Kewei, He Guoqiang, Liu Peijin *et al.*. Influence of combustion stabilization by primary rocket under commix-combustion mode in RBCC [J]. *J. Propulsion Technology*, 2010, **31**(5): 544~548
潘科玮, 何国强, 刘佩进 等. RBCC 混合燃烧模态一次火箭对燃烧稳定影响 [J]. 推进技术, 2010, **31**(5): 544~548
- 16 Wang Liangguo, H. Riris, C. B. Carlisle *et al.*. Comparison of approaches to modulation spectroscopy with GaAlAs semiconductor lasers; application to water vapor [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(10): 2071~2077
- 17 J. Reid, D. Labrie. Second-harmonic detection with tunable diode-lasers-comparison of experiment and theory [J]. *Appl. Phys. B-Photophysics and Laser Chemistry*, 1981, **26**(3): 203~210