

# 二极管激光吸收传感器测量超声速流场的温度和速度

王广宇 洪延姬\* 潘 虎 宋俊玲

(装备学院激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

**摘要** 可调谐半导体激光吸收光谱技术作为一种稳健的非接触测量技术,在燃烧和推进等恶劣流场的诊断中具有广泛的应用。开发了一种基于水吸收的可调谐半导体激光传感器,用于同时测量超声速地面测试设备的温度和速度,应用扫描波长吸收谱和免标定的波长调制谱可实现绝对测量。传感器在 2.5 kg/s 质量流量的直连式超燃试验台上开展了工程试验研究,试验马赫数为 2.0,总压为 5.3~5.7 atm(1 atm=1.01325×10<sup>5</sup> Pa),总温为 1100 K~1700 K,速度和温度的测量结果与模型预测值具有较好的一致性,验证了传感器设计的有效性,为工程应用提供了有力的技术支撑。

**关键词** 传感器;流场诊断;可调谐半导体激光吸收光谱技术;温度测量;速度测量;超声速测试设备

**中图分类号** O433.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0912009

## Diode Laser Absorption Sensor for Measurements of Temperature and Velocity in Supersonic Flow

Wang Guangyu Hong Yanji Pan Hu Song Junling

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

**Abstract** Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), as a robust non-contact measurement technology, has extensive applications in the diagnosis, for harsh environments commonly experienced in combustion and propulsion flows. A tunable diode laser sensor, which is based on water absorption, has been developed to measure temperature and velocity in a supersonic ground-test facility simultaneously. Scanned-wavelength direct absorption spectroscopy and calibration-free wavelength modulation spectroscopy are employed to enable the absolute measurement. The sensor is tested at the direct-connect supersonic combustion facility which operates at mass flux of 2.5 kg/s, Mach number of 2.0, total pressure from 5.3 to 5.7 atm (1 atm=1.01325×10<sup>5</sup> Pa) and total temperature from 1100 K to 1700 K. The measured temperature and velocity agree well with the theoretical model, which validates the efficiency of the sensor design. The investigative results can provide the technique support for engineering applications.

**Key words** sensors; flow diagnostic; tunable diode laser absorption spectroscopy; thermometry; velocimetry; supersonic test facility

**OCIS codes** 300.1030; 100.6950; 300.6260; 220.4830

## 1 引 言

准确测量温度、速度、组分浓度、质量流量等气动参数对于发展先进推进系统至关重要<sup>[1]</sup>。特别对于吸气式推进系统,质量流量具有特殊意义,通过测量质量流量可计算进气道和燃烧室的性能以及推力和阻力,因而开发准确和稳健的质量流量传感器对于推进系统的地面和飞行测试都是非常关键的<sup>[2]</sup>。

可调谐半导体激光吸收谱(TDLAS)作为一种稳健的非接触测量技术在高速和燃烧推进流场中获得了广泛应用,可测量温度、组分浓度、速度、质量流量等关键的燃烧和推进流场参数信息<sup>[1-7]</sup>。TDLAS测量质量流量的基本思想是先测量气体的温度和速度,如果压力可独立得到,则结合理想气体状态方程可得到质量流量。这项工作由美国斯坦福

收稿日期: 2013-05-02; 收到修改稿日期: 2013-07-15

作者简介: 王广宇(1976—),男,硕士,助理研究员,主要从事非接触流场诊断方面的研究。

E-mail: wangguangyu1976@gmail.com

\* 通信联系人。E-mail: hongyanji@vip.sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

大学的 Philippe 等<sup>[8]</sup>开创,并于 1993 年申请了推力测量领域的专利。1996 年美国 PSI 公司首次将质量流量传感器应用于全尺寸 Pratt & Whitney F-100 航空发动机进气道<sup>[9]</sup>;2007 年 Hanson 实验室在商业涡扇发动机(PW6000)上首次实现了进气道质量流量的实时测量<sup>[10]</sup>;2011 年 Hanson 实验室又在超声速燃烧地面试验台的隔离段成功测量了超声速气流的质量流量<sup>[2]</sup>。

TDLAS 的测量基础是 Beer 定律,通过透射光强的衰减来确定气体参数。由于路径积分本性,当温度、压力和组分浓度分布均匀时,探测到的线型可表示为气体参数较为简单的函数。两条吸收线型之比可确定温度,速度可通过线型的多普勒频移计算得到。TDLAS 测量方法通常分为两类:直接吸收谱(DA)<sup>[1,11-12]</sup>和波长调制谱(WMS)<sup>[13-15]</sup>。直接吸收谱的理论成熟,实现简单,可做绝对测量而无需标定。然而由于测量信号依赖于绝对吸收水平,对基线拟合误差又极为敏感等一些固有不足,使其只适合应用在通常的测量环境中。相对而言,二次谐波探测的波长调制谱(WMS-2*f*)无须基线拟合,锁相放大器滤除了大部分低频噪声,并且 2*f* 信号除了对绝对吸收水平敏感外,对线型曲率也敏感,因而在处理噪声污染的信号以及弱吸收时更有优势。然而为实现免标定,需要知道探测气体的压力并建立流场的吸收谱仿真模型,增加了应用的复杂性。

本文重点研究利用直接吸收谱和免标定的波长调制谱(WMS-2*f*/1*f*)同时测量超声速燃烧设备的温度和速度。介绍了温度和速度的测量方法,说明了传感器的结构设计和吸收谱线的选择,给出了在超声速燃烧设备上的温度和速度测量结果和结论。

## 2 理论与方法

### 2.1 扫描波长直接吸收谱

扫描波长直接吸收谱的信号如图 1 所示。二极管激光器的注入电流用线性斜坡信号(锯齿波)进行扫描,导致激光强度发生近似线性变化[图 1(a)],与此同时,激光频率也产生近似线性的改变。激光频率扫描穿过所选的吸收跃迁,由于共振吸收,激光强度产生衰减。透过的激光强度用光电探测器记

录,产生吸收线型,对吸收线的非吸收曲翼进行多项式拟合得到基线。

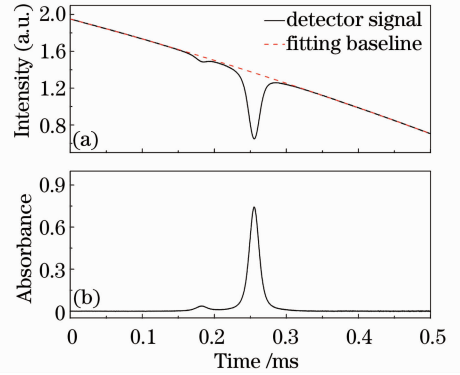


图 1 (a)探测器接收到的透射光强度信号和拟合基线(1392 nm); (b)吸光度曲线

Fig. 1 (a) Detector signal of the transmitted intensity and the fitting baseline (1392 nm); (b) absorbance curve

入射光强度(基线信号)和透射光强度(探测器信号)的关系满足 Beer-Lambert 方程<sup>[11-12]</sup>

$$\tau_\nu = \left( \frac{I_t}{I_0} \right)_\nu = \exp(-\alpha_\nu), \quad (1)$$

式中  $\nu$  为激光频率,  $\tau_\nu$  为透射系数,  $I_t$  为透射激光强度,  $I_0$  为入射激光强度,  $\alpha_\nu$  为谱吸光度。通过对(1)式进行反演得到吸光度曲线,如图 1(b)所示。

对于均匀的气体和孤立的吸收跃迁,吸光度可表示为

$$\alpha_\nu = P\chi_i L S(T)\phi_\nu(T, P, \chi_i), \quad (2)$$

式中  $P$ (单位为 atm, 1 atm = 1.01325 × 10<sup>5</sup> Pa)为混合气体的总静压,  $\chi_i$  为吸收分子的摩尔分数,  $L$ (单位为 cm)是吸收路径长度,  $S$ (单位为 cm<sup>-2</sup>/atm)为吸收跃迁的线强度,  $T$ (单位为 K)为气体温度,  $\phi_\nu$ (单位为 cm)为跃迁的线型函数。

线型函数在频率空间是归一化的,因此吸光度的谱积分为

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_\nu d\nu = P\chi_i S(T)L. \quad (3)$$

吸收跃迁的线强度是吸收元素基本的谱特性,是跃迁频率、温度、跃迁的低能级能量和配分函数的函数。对于给定的跃迁频率,如果在某个参考温度下的线强度  $S(T_0)$  已知,在任何温度下的线强度都可以计算得到,即

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left( \frac{T_0}{T} \right) \exp \left[ -\frac{hcE''}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \left[ 1 - \exp \left( \frac{-hc\nu_0}{kT} \right) \right] \left[ 1 - \exp \left( \frac{-hc\nu_0}{kT_0} \right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

式中  $S(T_0)$  是在参考温度  $T_0$  (通常取 296 K) 处的线强度,  $Q(T)$  是吸收分子的配分函数,  $h$  (单位为  $J \cdot s$ ) 是普朗克常量,  $c$  (单位为  $cm/s$ ) 是光速,  $k$  (单位为  $J/K$ ) 是玻尔兹曼常数,  $E''$  (单位为  $cm^{-1}$ ) 是跃迁的低能态能量,  $\nu_0$  (单位为  $cm^{-1}$ ) 是跃迁吸收线的中心频率。

## 2.2 波长调制谱

波长调制谱是激光频率除了扫描外还叠加了更高频率的正弦调制, 在快速调制频率和非线性吸收线型的相互作用下在探测器信号中产生谐波分量, 可由锁相放大器进行分离。WMS 的调制频率小于吸收线的半宽频率, 典型值在几百千赫兹以下, 由于将探测信号移到更高频率上, WMS 可显著降低  $1/f$  噪声, 提高信噪比 (SNR), 广泛用于低吸光度和/或噪声环境中<sup>[13]</sup>。为了便于理解传感器的设计和实验过程, 将用  $1f$  归一化的 WMS- $2f$  理论 (WMS- $2f/1f$ )<sup>[14-15]</sup> 简要总结于此。

如果二极管激光器的注入电流受到角频率  $\omega = 2\pi f$  的正弦调制, 将同时产生频率调制 (FM) 和强度调制 (IM), 瞬时激光频率和强度可表示为

$$\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos(\omega t), \quad (5)$$

$$I_0(t) = \bar{I}_0 [1 + i_0 \cos(\omega t + \psi_1) + i_2 \cos(\omega t + \psi_2)], \quad (6)$$

式中  $\bar{\nu}$  (单位为  $cm^{-1}$ ) 为平均激光频率,  $a$  (单位为  $cm^{-1}$ ) 为调制深度,  $\bar{I}_0$  为平均激光强度,  $i_0$  和  $i_2$  分别为线性和非线性 IM 的幅度 (由  $\bar{I}_0$  规范化),  $\psi_1$  和  $\psi_2$  是线性和非线性 FM/IM 相移。文献<sup>[14]</sup>的研究表明: 对于注入电流调制的二极管激光器 [如分布式反

馈 (DFB) 激光器, 纵腔面发射激光器 (VCSEL) 等], 随着调制深度增加,  $i_0$  线性增加, 而  $i_2$  则二次方增长, 因而对于大调制深度, 含  $i_2$  的非线性 IM 效应不能被忽略。即使对于大调制深度而言, 更高次的非线性项也影响甚微, 因而没有包含在 (6) 式中。

由 Beer-Lambert 关系, 透射激光强度为

$$I(t) = \bar{I}_0 [1 + i_0 \cos(\omega t + \psi_1) + i_2 \cos(2\omega t + \psi_2)] \cdot \tau[\bar{\nu} + a \cos(\omega t)]. \quad (7)$$

透射系数  $\tau(\nu)$  是关于  $\omega t$  的周期性偶函数, 可展开成傅里叶余弦级数, 即

$$\tau[\bar{\nu} + a \cos(\omega t)] = \sum_{p=0}^{\infty} H_p(\bar{\nu}, a) \cos(p\omega t), \quad (8)$$

式中  $H_p(\bar{\nu}, a)$  是透射系数的  $p$  次傅里叶系数, 可表示为

$$H_0(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos \theta) d\theta, \quad (9)$$

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

$$p = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

式中  $\theta = \omega t$ 。

对于  $2f$  探测, 用锁相放大器分离透射激光强度的二次谐波信号。为了消除对探测器相位的敏感性, 将信号表示成分量形式, 其过程是将探测器信号分别与 2 倍调制频率的余弦  $\cos(2\omega t)$  和正弦  $\sin(2\omega t)$  参考信号相乘, 然后再通过低通滤波得到 WMS- $2f$  信号的  $X$  和  $Y$  分量

$$X_{2f} = \frac{G\bar{I}_0}{2} \left[ H_2 + \frac{i_0}{2} (H_1 + H_3) \cos \psi_1 + i_2 \left( H_0 + \frac{H_4}{2} \right) \cos \psi_2 \right], \quad (11)$$

$$Y_{2f} = -\frac{G\bar{I}_0}{2} \left[ \frac{i_0}{2} (H_1 - H_3) \sin \psi_1 + i_2 \left( H_0 - \frac{H_4}{2} \right) \sin \psi_2 \right], \quad (12)$$

式中  $G$  是光电探测器增益。  $2f$  信号的幅度可表示为

$$S_{2f} = \sqrt{X_{2f}^2 + Y_{2f}^2}. \quad (13)$$

如果气体对激光无吸收,  $H_0 = 1, H_p = 0$ , (11)、(12) 式变成

$$X_{2f}^0 = (G\bar{I}_0/2) i_2 \cos \psi_2, \quad (14)$$

$$Y_{2f}^0 = - (G\bar{I}_0/2) i_2 \sin \psi_2. \quad (15)$$

这个非零的背景  $2f$  信号通常叫做残存幅度调制 (RAM)。显然, RAM 是激光强度非线性调制的结果, 在大调制深度时更为显著。RAM 可通过对探测区域充以非吸收气体, 对探测区域外的光路净化来进行测量。

同理,  $1f$  信号的幅度可表示为

$$R_{1f} = \sqrt{X_{1f}^2 + Y_{1f}^2} = \frac{G\bar{I}_0}{2} \left\{ \left[ H_1 + \frac{i_0}{2} \left( H_0 + \frac{H_2}{2} \right) \cos \psi_1 + \frac{i_2}{2} (H_1 + H_3) \cos \psi_2 \right]^2 + \left[ i_0 \left( H_0 - \frac{H_2}{2} \right) \sin \psi_1 + \frac{i_2}{2} (H_1 - H_3) \sin \psi_2 \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (16)$$

无吸收的背景  $1f$  信号为

$$R_{1f}^0 = \frac{1}{2} G \bar{I}_0 i_0. \quad (17)$$

为了得到完全由吸收产生的 WMS- $2f/1f$  信号,测量的  $2f$  信号和背景信号必须归一化(用  $1f$  信号),然后进行矢量相减

$$C_{2f/1f} = \sqrt{\left[\left(\frac{X_{2f}}{R_{1f}}\right) - \left(\frac{X_{2f}^0}{R_{1f}^0}\right)\right]^2 + \left[\left(\frac{Y_{2f}}{R_{1f}}\right) - \left(\frac{Y_{2f}^0}{R_{1f}^0}\right)\right]^2}. \quad (18)$$

如果知道了具体的激光参数( $i_0, i_2, \psi_1, \psi_2$  和  $a$ )和具体的谱参数( $H_p$  中的各项),就可以仿真  $1f$  和  $2f$  信号。激光参数可由实验室测定<sup>[14]</sup>,谱参数也可通过实验室测量<sup>[16]</sup>或查分子数据库(如 HITRAN)得到。这样仿真就可完全“镜像”实验而无需标定。这个模型对任何的光学深度、调制幅度、环境条件( $T, P, \chi$ )都是有效的。文献[15]指出:在光学薄、线性强度调制( $i_2 = 0$ )、FM/IM 相移为  $\pi$  时,模型可简化,对于浓度测量带来很大方便。

### 2.3 温度和速度测量方法

无论是直接吸收还是波长调制谱, TDLAS 基本的温度测量方法都是双线测温法,即同时探测来自相同分子的两个具有不同温度依赖关系的吸收跃迁<sup>[5,7,11]</sup>。

对于直接吸收谱,由两条吸收跃迁的积分吸光度之比来获得温度的值。同时测量具有同样压力、浓度和路径长度的两个跃迁的吸光度,根据(3)式和(4)式,两个吸光度积分之比简化为线强度之比,即

$$R = \frac{A_1}{A_2} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = \frac{S(T_0, \nu_1)}{S(T_0, \nu_2)} \times \exp\left[-\left(\frac{hc}{k}\right)(E_1'' - E_2'')\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right], \quad (19)$$

式中  $\nu_1, \nu_2$  是两条吸收谱线在频率空间的积分,则由测量线型的积分面积之比可确定温度。

类似于直接吸收谱, WMS 也使用双线信号之比来测量温度。为了获得温度,首先给定  $\chi_i$  的名义期望值,然后建立两吸收谱线 WMS- $2f/1f$  信号峰值高度比  $R_1$  对温度和压力的仿真数据库<sup>[14-15]</sup>,即

$$R_1 = \frac{C_{2f/1f}(\nu_{01})}{C_{2f/1f}(\nu_{02})} \approx F(T, P). \quad (20)$$

式中  $\nu_{01}, \nu_{02}$  是两条吸收谱线的中心频率。一旦独立获得压力,通过测量的 WMS- $2f/1f$  峰值比与仿真数据库对比即可获得温度。

TDLAS 速度测量依赖于多普勒效应。如果气流具有平行于光束路径方向的速度分量,吸收线的中心频率将出现频移,频移量可表示为<sup>[1,2,8]</sup>

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{\mathbf{U} \cdot \mathbf{q}}{c} = \frac{U_{\text{parallel}}}{c}, \quad (21)$$

式中  $\Delta\nu$ (单位为  $\text{cm}^{-1}$ )是中心频率的移动量,  $\nu_0$ (单位为  $\text{cm}^{-1}$ )是未移动时的中心频率,  $\mathbf{U}$ (单位为  $\text{cm/s}$ )是气流的速度矢量,  $\mathbf{q}$  是沿激光束传播方向的单位矢量,  $U_{\text{parallel}}$  是平行于光束方向的速度分量。

实际上,用与流速方向成不同角度的两光束吸收线的中心频差来确定相对频移量更为方便。将激光器输出激光分成强度相等的两束,一束与法向成  $\theta$  角指向上游,另一束以相同的角度指向下游,两束光的中心频差

$$\Delta\nu_\theta = \nu_0 (2 \sin \theta) \frac{U}{c}. \quad (22)$$

速度测量的分辨率取决于中心频率  $\nu_0$ 、光束夹角  $2\theta$ (如图 2 所示)以及可测量的最小频移量  $\Delta\nu$ 。因此通过增大两条光束的夹角可增大频移量,也即增大了速度测量的分辨率。然而多数发动机设备的空间约束限制了夹角范围,通常不超过  $90^\circ$ 。

## 3 传感器设计

### 3.1 传感器结构

传感器分别用直接吸收和波长调制(WMS- $2f/1f$ )两种方法测量温度和速度。为简化硬件结构,直接吸收用时分复用方案,两个激光器在时间上交替扫描,每个激光器都只有一半时间在工作。波长调制用频分复用方案,两个激光器的调制频率选择不同, WMS 信号可根据各自的频率进行解调,因而对每条光路可只用一个探测器而无需借助色散器件。

传感器的结构示意图如图 2 所示。两个光纤耦合输出的 DFB 激光器,输出激光经合束后,分成强度相等的两份,用单模光纤引导到测试区,准直发射后经过楔形窗口,分别向上游和下游穿过流场。穿出流场的光束用大直径的耦合透镜捕获后经多模光纤传输进入光电探测器和数据采集卡。数据采集卡同时也作为激光器的调制信号发生器。在被测流场外的自由光程部分(测试区窗口外侧附近及探测器)用干燥氮气进行净化以避免空气中水蒸气对测量造成干扰。

### 3.2 吸收谱线的选择

TDLAS 传感器设计的首要任务是选择目标分子,在燃烧和推进的研究中,作为碳氢燃料燃烧的主要产物之一,  $\text{H}_2\text{O}$  是有吸引力的目标分子。  $\text{H}_2\text{O}$  在近红外和中红外区都有较强的转振谱,然而当前的绝大多数  $\text{H}_2\text{O}$  吸收测量系统都工作在近红外区的  $2\nu_1, 2\nu_3$  和  $\nu_1 + \nu_3$  带( $1.3 \sim 1.5 \mu\text{m}$ ),因为光纤耦合

的通信半导体激光器和光纤器件在这个波长范围有成熟的商业产品。由于  $2v_1, 2v_3$  和  $v_1 + v_3$  带有几千条吸收谱线, 选取适当的吸收谱线对传感器的性能至关重要。传感器在超声速燃烧设备上进行测试, 吸收线的选择以超声速气流条件下基于吸收谱的温度和速度测量为目标, 按照吸收线强度大于  $10^{-4} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$  的要求, 在  $1340 \sim 1470 \text{ nm}$  范围

(通信半导体激光器容易达到) 进行筛选。被测流场的温度为  $650 \text{ K} \sim 900 \text{ K}$ , 压力为  $0.5 \sim 0.6 \text{ atm}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  的摩尔分数为  $12\% \sim 20\%$ , 吸收路径长度为  $14.14 \text{ cm}$ 。按照 Zhou 等<sup>[17]</sup> 确定的选线准则, 从 HITRAN2008 数据库中选出一对吸收线参数如表 1 所示。

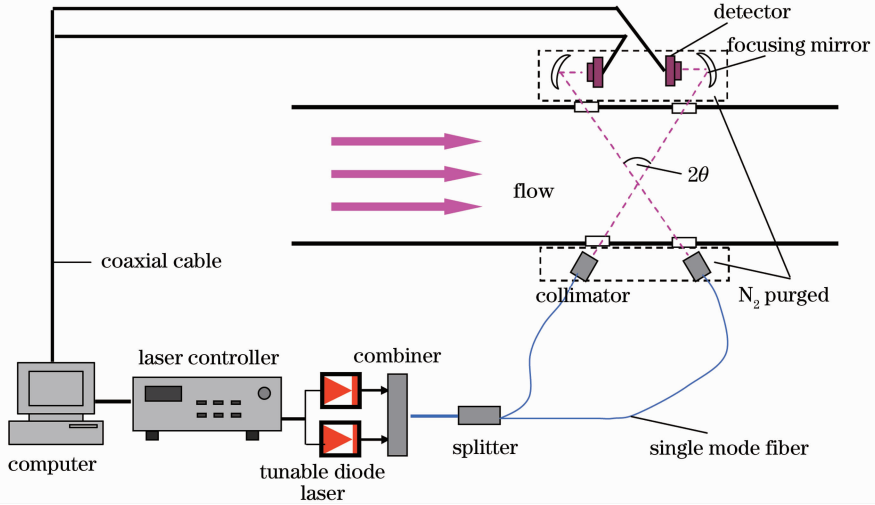


图 2 传感器结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of the sensor

表 1 两条吸收谱线的基本谱参数

Table 1 Basic spectroscopic parameters of the two absorption lines

Wavelength /nm	Wavenumber / $\text{cm}^{-1}$	Line strength /( $\text{cm}^{-2}/\text{atm}$ )	Lower state energy / $\text{cm}^{-1}$
1391.7	7185.6	$1.97 \times 10^{-2}$	1045.06
1341.44	7454.4	$1.86 \times 10^{-4}$	1962.51

## 4 温度和速度测量

TDLAS 传感器在中国科学院力学研究所超声速燃烧实验室(LHD)的超燃直连式试验台上测量温度和速度。LHD 的超燃直连台采用“烧氢补氧”的方法加热空气, 可以提供最高总温度  $2100 \text{ K}$ , 最大总压为  $4.5 \text{ MPa}$ , 最大流量为  $2.5 \text{ kg/s}$ ,  $10 \text{ s}$  的高温燃气。试验台为立式结构, 高温燃气由底部进入试验台, 燃烧室在隔离段下游。燃气中氧气含量与大气中的相当, 可以采用马赫数为  $1.8 \sim 3.0$  的喷管, 模拟飞行马赫数在  $5 \sim 7$  范围内的燃烧室运行情况。

TDLAS 传感器安装在位于超燃直连台喷管和燃烧室之间的隔离段, 隔离段上游安装马赫数为 2 的喷管模拟马赫数约为 5 的飞行焔。隔离段总长度为  $48 \text{ cm}$ , 内流道为矩形截面, 宽度为  $10 \text{ cm}$ , 高度从  $5.6 \text{ cm}$  均匀过渡到  $6.186 \text{ cm}$  (一侧有  $0.7^\circ$  的扩张角), 壁厚厚度为  $2.5 \text{ cm}$ 。为了增大吸收信号强度, 传感器安装在宽度方向, 上下游光束夹角  $2\theta = 90^\circ$ , 隔离段外部光路用纯净氮气净化。

通过改变总温选择了 3 个工况点, LHD 的设备模型所预测的工况点流场参数如表 2 所示。

表 2 LHD 设备模型预测的流场参数

Table 2 Flow parameters predicted by LHD facility

Operation condition	Total temperature /K	Total pressure /atm	Isolater static temperature /K	Isolater velocity /( $\text{m/s}$ )	$\text{H}_2\text{O} / \%$
1	1105	5.7	670	1030	12.1
2	1290	5.4	770	1120	15.5
3	1685	5.3	900	1216	20.1

对每个工况点分别用直接吸收和波长调制两种方法得到数据。直接吸收用时分复用方式,扫描频率为 1 kHz,最大测量带宽为 500 Hz。波长调制用频分复用方式,扫描频率为 1 kHz,1392 nm 和 1341 nm 激光器的调制分频率分别设定在 180 kHz 和 240 kHz,最大测量带宽为 1 kHz。必须说明的是:由于每次测试只用一种方法,而在同样的设定工况点,预测的流场参数也有所不同(最大为 4%),表中数据与每次测试的实际参数并不完全一致。

在测量时对直接吸收和波长调制的原始信号进行平均处理(每 10 个信号平均一次),因而直接吸收测量带宽为 50 Hz,波长调制带宽为 100 Hz。另外,对于波长调制谱,由于所用调制深度很小,忽略了非线性调制效应。

### 4.1 速度测量结果

图 3 给出了第 1 个工况点直接吸收和波长调制的速度测量结果。

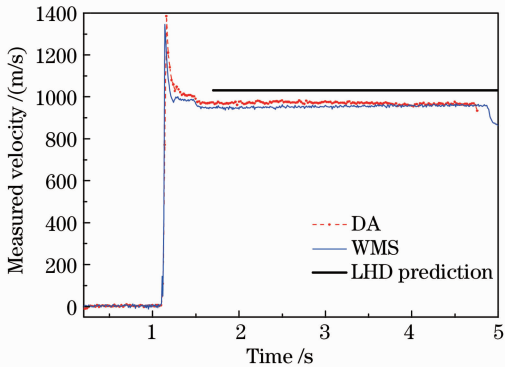


图 3 第 1 个工况点的速度测量结果

Fig. 3 Measured velocity at the first operation condition

由图 3 可以看出,经过初始的起动暂态过程(氢气和氧气阀打开引起的气流涌动)后,直接吸收和波长调制的测量结果的一致性很好。TDLAS 速度结果比 LHD 预测结果低约 6%,速度偏低可能是受到流场中的非均匀性和边界层效应的影响。

图 4 给出了 3 个工况点,直接吸收和波长调制的速度测量结果。由图 4 可以看出,在 3 个工况点,波长调制谱的测量速度比直接吸收略低(约 1.4%)。可能是因为直接吸收测量时,扫描范围很宽,在进行时频转换时标准具可产生 20 个以上的峰值,相比之下,波长调制谱扫描范围较小,频率校准时只有 4 个标准具的峰进行拟合,误差较大。整体而言,波长调制谱测量结果的离散度小于直接吸收,说明波长调制谱有更好的测量信噪比。另外,TDLAS 速度结果比 LHD 预测结果普遍偏低(约 5.5%)。

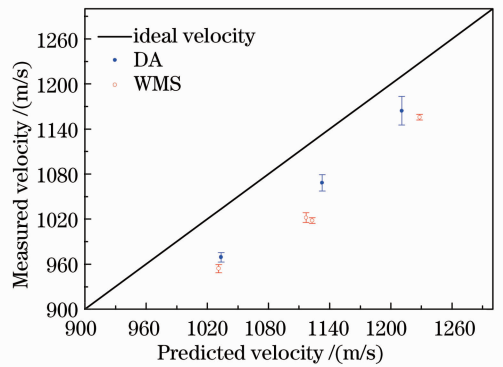


图 4 3 个工况点的速度测量结果

Fig. 4 Measured velocity at three operation conditions

### 4.2 温度测量结果

图 5 给出了第 3 个工况点,直接吸收和波长调制的温度测量结果。

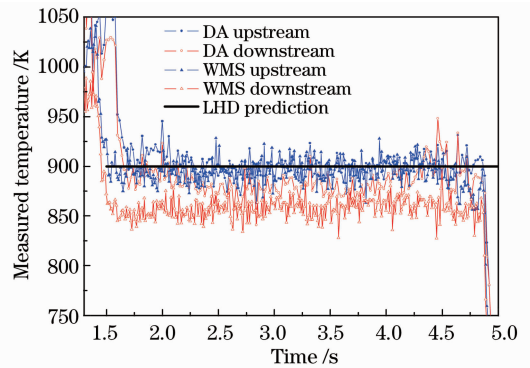


图 5 第 3 个工况点的温度测量结果

Fig. 5 Measured temperature at the third operation condition

由图 5 可以看出,上游光束的测量结果与 LHD 预测值非常接近(差值小于 1.2%),而下游光束与预测值偏差较大(直接吸收约 2.2%,波长调制约 4.7%)。

图 6 给出了 3 个工况点,直接吸收和波长调制

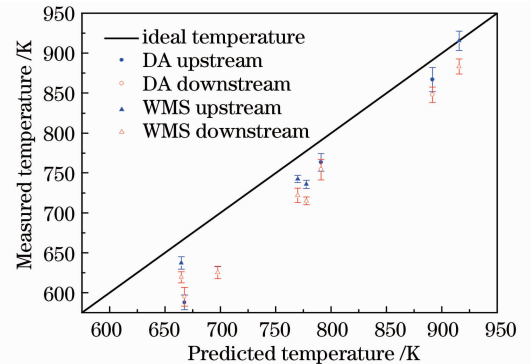


图 6 3 个工况点的温度测量结果

Fig. 6 Measured temperature at three operation conditions



的温度测量结果。由图 6 可见,在 3 个工况点, WMS 的测量温度和直接吸收比较接近(相差约 1.7%),而在同一个工况下,上游光束的测量值高于下游光束,这种差别主要应来自于流场的非均匀性。整体而言, TDLAS 结果普遍低于 LHD 的预测值(相差约 5%),而当温度越高时,越接近预测值。

必须指出: LHD 的预测值是根据进气的流量和成分计算得到的,其准确程度尚待进一步评估,因此 LHD 的预测值并不能作为判定 TDLAS 测量结果的绝对标准。

## 5 结 论

开发了一种可调谐半导体激光吸收传感器,在 LHD 的超燃直连试验台上,应用扫描波长直接吸收谱和免标定波长调制谱测量超声气流的温度和速度。在 3 个工况点的多次试验结果表明,两种方法都实现了较高的测量精度(测量结果与 LHD 预测值的一致性约 5%),而波长调制谱有更高的测量信噪比,充分验证了 TDLAS 技术对于恶劣流场环境的诊断能力以及传感器设计的有效性。通过优化设计,传感器有潜力广泛应用于多种发动机和地面测试设备。

## 参 考 文 献

- 1 M G Allen. Diode laser absorption sensors for gas-dynamic and combustion flows [J]. *Meas Sci & Technol*, 1998, 9(4): 545—562.
- 2 L S Chang, C L Strand, J B Jeffries, *et al.*. Supersonic mass-flux measurements via tunable diode laser absorption and nonuniform flow modeling [J]. *AIAA Journal*, 2011, 49(12): 2783—2791.
- 3 M G Allen, M F Miller, B L Upschulte. Diode Laser Sensor for Aero-Engines: Lessons Learned and Future Promises [R]. Albuquerque; 20th AIAA Advanced Measurement and Ground Testing Technology conference, 1998. AIAA-98-2775.
- 4 B L Upschulte, M F Miller, M G Allen, *et al.*. Continuous Water Vapor Mass Flux and Temperature Measurements in a Model Scramjet Combustor Using a Diode Laser Sensor [R]. Reno; 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 1999. AIAA-99-0518.

- 5 R K Hanson, J B Jeffries. *Advances in laser-based sensors for combustion systems* [C]. Tokyo: The 16th Symposium on Smart Control of Turbulence, 2005: 1—12.
- 6 R K Hanson, J B Jeffries. Diode Laser Sensors for Ground Testing [R]. San Francisco; 25th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2006. AIAA-2006-3441.
- 7 X Liu, J B Jeffries, R K Hanson, *et al.*. Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature [J]. *Appl Phys B*, 2006, 82(3): 469—478.
- 8 L C Philippe, R K Hanson. Laser diode wavelength-modulation spectroscopy for simultaneous measurement of temperature, pressure, and velocity in shock-heated oxygen flows [J]. *Appl Opt*, 1993, 32(30): 6090—6103.
- 9 M F Miller, W J Kessler, M G Allen. Diode laser-based air mass flux sensor for subsonic aero-propulsion inlets [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(24): 4905—4912.
- 10 K H Lyle, J B Jeffries, R K Hanson. Diode laser sensor for air mass flux based on oxygen absorption 2: non-uniform flow modeling and aero-engine tests [J]. *AIAA Journal*, 2007, 45(9): 2213—2223.
- 11 M P Arroyo, R K Hanson. Absorption measurements of water vapor concentration, temperature and lineshape parameters using a tunable InGaAsP diode laser [J]. *Appl Opt*, 1993, 32(30): 6104—6116.
- 12 D S Baer, V Nagali, E R Furlong, *et al.*. Scanned- and fixed-wavelength absorption diagnostics for combustion measurements using multiplexed diode lasers [J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(3): 489—493.
- 13 G B Rieker, J T C Liu, J B Jeffries, *et al.*. Diode Laser Sensor for Gas Temperature and H<sub>2</sub>O Concentration in a Scramjet Combustor Using Wavelength Modulation Spectroscopy [R]. Tucson; 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2005. AIAA-2005-3710.
- 14 H Li, G B Rieker, X 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.
- 15 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.
- 16 X Liu, J B Jeffries, R K Hanson. Measurements of spectral parameters of water-vapour transitions near 1388 and 1345 nm for accurate simulation of high-pressure absorption spectra [J]. *Meas Sci & Technol*, 2007, 18(5): 1185—1194.
- 17 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.

栏目编辑: 王晓琰