

doi:10.3788/gzxb20154407.0730001

# 采用 TDLAS 的超音速气流中氧气质量流量检测法

贾良权<sup>1,2</sup>, 刘文清<sup>1</sup>, 阚瑞峰<sup>1</sup>, 刘建国<sup>1</sup>, 姚路<sup>1</sup>, 魏敏<sup>1,2</sup>, 阮俊<sup>1</sup>

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**以激光多普勒频移原理为基础, 结合波长调制可调谐半导体激光吸收光谱技术, 以氧气分子在  $13\,144.5\text{ cm}^{-1}$  附近的吸收谱线为研究对象, 在实验室建立了一套基于波长调制可调谐二极管吸收光谱技术的超音速气流质量流量测量系统. 根据  $\text{O}_2$  分子吸收谱线的二次谐波信号频移, 反演出风洞中气流速度; 再根据二次谐波信号的峰值反演出氧气质量浓度. 实验表明: 在实验室环境下, 系统测量流速达  $707.6\text{ m/s}$ , 氧气质量浓度  $0.49\text{ g/L}$ , 质量流量值  $0.42\text{ kg/s}$ , 测量误差范围  $5.46\%$ . 实验结果可用于采用 TDLAS 测量发动机进气道氧气质量流量的小型化系统研制及飞行实验.

**关键词:**光谱学; TDLAS; 多普勒频移; 质量流量; 浓度; 二次谐波; 波长调制

中图分类号: 文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)07-0730001-6

## Oxygen Mass Flow Detection Method in Supersonic Flow Based on TDLAS

JIA Liang-quan<sup>1,2</sup>, LIU Wen-qing<sup>1</sup>, KAN Rui-feng<sup>1</sup>, LIU Jian-guo<sup>1</sup>,

YAO Lu<sup>1,2</sup>, WEI Min<sup>1,2</sup>, RUAN Jun<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to measure the Oxygen mass flow rate effectively, the absorption of Oxygen molecules around  $13\,144.5\text{ cm}^{-1}$  was studied based on the principle of laser Doppler frequency shift, combined with wavelength modulation spectroscopy and tunable diode laser absorption spectroscopy technology. An experimental system was built for supersonic air mass flow measurement based on the wavelength modulation and tunable diode laser absorption spectroscopy technology. The airflow velocity and Oxygen concentration were retrieved according to the frequency shift and the peak value of the second harmonic signal of  $\text{O}_2$  molecular. The experimental results indicate that, in the laboratory environment, the airflow velocity of the system is  $707.6\text{ m/s}$ , the Oxygen concentration is  $0.49\text{ g/L}$  and the mass flow rate is about  $0.42\text{ kg/s}$ , with a measurement error of  $5.46\%$ . The experimental results can be used in Oxygen mass-flow of engine inlet measurement system miniaturize development and flight experiment by TDLAS.

**Key words:** Spectroscopy; TDLAS; Doppler shift; Mass flow; Concentration; Second harmonics; Wavelength modulation

**OCIS Codes:** 300.6360; 300.6380; 300.6340; 300.1030

## 0 引言

波长调制与可调谐激光二极管吸收光谱技术

(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)相结合, 利用二次谐波信号反演气体信息的方法, 具有非接触测量、动态响应快、测量准确度高、测

**基金项目:** 国家科学仪器重大专项(No. 2014YQ0605370301)、国家科技重大专项(No. GFZX01070204-2012B203)和中国科学院先导专项(No. XDA05040102)资助

**第一作者:** 贾良权(1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为波长调制 TDLAS 质量流量测量方法. Email: lqjia@aiofm.ac.cn

**导师:** 刘文清(1954-), 男, 中国工程院院士, 博导, 主要研究方向为环境监测技术. Email: wqliu@aiofm.ac.cn

**通讯作者:** 刘建国(1968-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为环境污染光学检测新技术、目标散射特性和遥感检测技术等. Email: jgliu@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2015-03-13; **录用日期:** 2015-04-24

<http://www.photon.ac.cn>

量量程大、易小型化<sup>[1-3]</sup>等特点,在痕量气体检测<sup>[4]</sup>、燃烧流程诊断<sup>[5]</sup>、工业生产<sup>[6]</sup>等领域具有广泛的应用,是气体在线检测的重要发展方向。

吸气式发动机质量流量测量法主要采用机械式流量计仪表进行直接测量,容易对流场造成干扰,测量准确度也受到一定影响,因此,迫切需求一种非接触式、耐高温、不干扰流场的新型测量手段.基于波长调制-TDLAS 技术的质量流量测量方法,利用吸收气体的二次谐波信号来反演气体质量流量信息,能够提取微弱的吸收信号,具有很高的信噪比<sup>[7]</sup>,适宜于环境温度、压力变化较小的吸气式发动机进气道测量。

斯坦福大学高温气体动力学实验室 Hanson 等人在 TDLAS 技术的流场测量方面处于领先地位,目前已经将 TDLAS 系统成功应用于超燃冲压发动机飞行实验<sup>[8-9]</sup>. Kent<sup>[10]</sup>对气体流速和浓度的测量实现了气体质量流量的测量,美国 Zolo 公司研发出小型化 TDLAS 测量系统<sup>[9]</sup>.国内 TDLAS 技术测量高超声速流场还处于起步阶段,中科院力学研究所<sup>[11]</sup>、西北核技术研究所<sup>[12]</sup>、中国科技大学<sup>[13]</sup>和中国空气动力研究与发展中心<sup>[14]</sup>等开展了超声速流场吸收光谱诊断方面的研究工作,中国科学院安徽光机所将研发出的小型化 TDLAS 测量系统成功应用于发动机燃烧流场的诊断测量<sup>[15-16]</sup>。

一般测量流速或者浓度的对象采用水汽(H<sub>2</sub>O)等吸收线强较强的气体分子,但发动机进气道中的 O<sub>2</sub> 吸收线强较弱、测量难度大.本文基于多普勒频移原理和 TDLAS 技术,利用实验室超声风洞搭建了氧气质量流量测量系统,以 O<sub>2</sub> 为研究对象,利用 O<sub>2</sub> 分子吸收谱线的二次谐波信号反演了质量流量。

## 1 基本原理

### 1.1 流速测量原理

根据激光多普勒原理,当气流流速在激光传输方向上有速度分量时,激光接收频率与实际激光发生频率之间有一定的偏移,二者频率之差即为多普勒频移,其频移公式为

$$\Delta\nu = \frac{V_{\text{gas}} \times \cos \theta}{c} \times \nu_0 \quad (1)$$

式中,  $\nu_0$  为无频移时气体吸收线中心频率,  $\theta$  为激光束方向和气流速度方向的夹角,  $c$  为光速,  $V_{\text{gas}}$  为气流流速,  $\Delta\nu$  为频率偏移。

实际测量中,由于吸收光程短,吸收较弱,另外压力变化也会引起中心频率的偏移,因此,往往采用图 1 所示的双光路法测量,利用图 2 所示的吸收谱线的二次谐波的频移来反演气体流速。

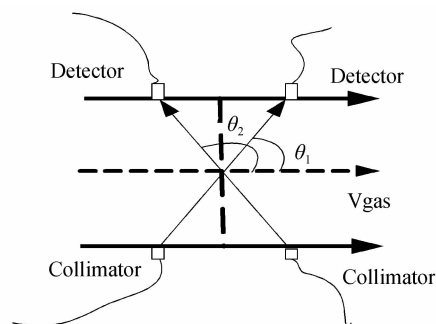


图 1 双光路流速测量示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of double light path velocity measurement

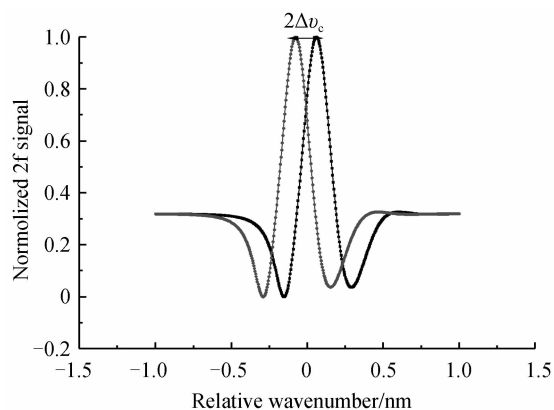


图 2 利用二次谐波频移反演气体流速  
Fig. 2 Using the second harmonic shift inversion gas velocity  
双光路法其流速计算公式为

$$V_{\text{gas}} = \frac{c \Delta\nu_{12}}{\nu_0 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)} \quad (2)$$

式中  $\Delta\nu_{12}$  为两束吸收光谱的频移差值.实验采用双光路吸收光谱的二次谐波方法来反演气体的流速。

### 1.2 浓度反演原理

由 Lamb - Beer 定律可知,二次谐波的峰值与浓度在一定范围内成比例关系,因此在实验过程中,为了测量风洞中氧气气体的百分比浓度,只需要测量出氧气二次谐波信号的峰值与已知百分比浓度的氧气的峰值.如图 3 所示,经过波长调制的激光束通过一个已知

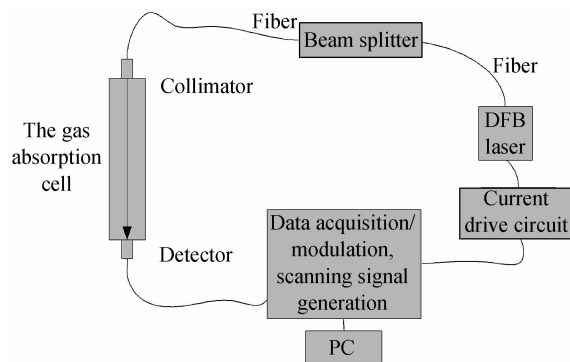


图 3 浓度反演实验框图  
Fig. 3 The experimental diagram of concentration inversion

标准气体浓度的气体吸收池,探测器接收到光信号后,经过放大电路进行放大,再经过数据采集卡进行数据采集,对采集信号进行锁相放大检测,提取得到一个标准浓度氧气的二次谐波信号,作为标定信号。

根据在同温度、同压力环境下测量得到的二次谐波信号的峰值和标定二次谐波信号峰值进行比照,可换算出风洞中氧气百分比浓度.再根据百分比浓度即可计算出氧气的质量浓度。

## 2 实验系统

基于 TDLAS 的风洞质量流量测量原理,在实验室搭建了如图 4 所示的实验系统.系统主要由电子学和光学部分组成,电子学部分包括温度控制电路,电流驱动电路,信号发生器,函数信号发生器,两通道高速数据采集卡,计算机.光学部分有风洞实验段、DFB 激光器、分束器、准直器、探测器等.其工作原理为:利用混合气体中的氧气的吸收光谱来测量气体流速,采用波长为 761 nm 激光器选取  $13\ 142.5\ \text{cm}^{-1}$ ,  $13\ 144.5\ \text{cm}^{-1}$ ,  $13\ 146.6\ \text{cm}^{-1}$  三条吸收谱线,激光器最大功率为 5 mW.实验中注入到测量区域的有效功率约为 2.5 mW.由 ITC102 型温度控制电流控制器,信号发生器产生调制和扫描两路信号,扫描信号是频率为 100 Hz、峰峰值为 1.2 V 的锯齿波;调制信号是频率为 50 kHz、峰峰值为 40 mV 的正弦波,调制信号和扫描信号叠加后,送入电流控制器,电流控制器输出信号接入 DFB 激光器,激光器输出信号通过一分二的光纤分束器,接入风洞实验段的两路准直器中,进入探测器,探测器输出信号较弱,在输出端对探测器输出电压信号进行放大到合适的观察范围,再利用数据采集卡对放大器输出信号进行采集,风洞中气体吸收有效光程约为 5 cm,探测器探测到信号后,通过同相放大电路放大后,进入数据采集卡进行采集.每个周期采样 120 000 个点。

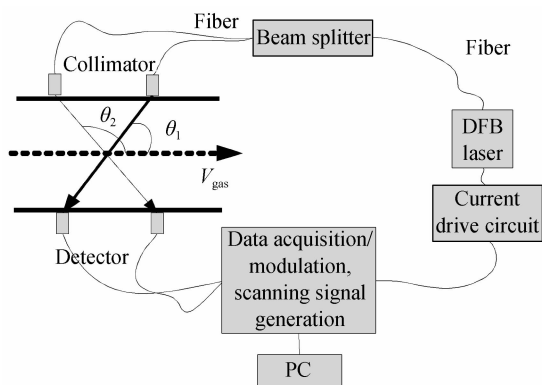


图 4 基于 TDLAS 原理的氧气流速测量系统  
Fig. 4 Oxygen flow rate measurement system based on TDLAS theory

实验过程中环境压力为一个大气压、温度为

296 K,变化范围在  $\pm 5\ \text{K}$  范围内,根据激光光谱学原理,结合 Hitran 数据库得知,压力频移等参量变化在合理范围内,在处理数据的时候环境变化产生的偏差在合理范围内予以忽略考虑。

实验中一个扫描周期采集的信号如图 5 所示,图中三个矩形框的位置是三个吸收谱线位置,从图中可以看出氧气吸收线很弱,几乎很难观察到。

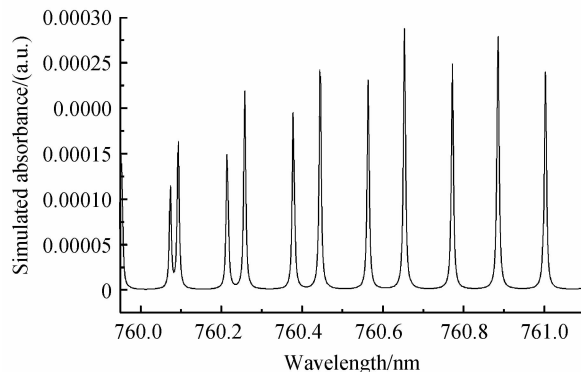
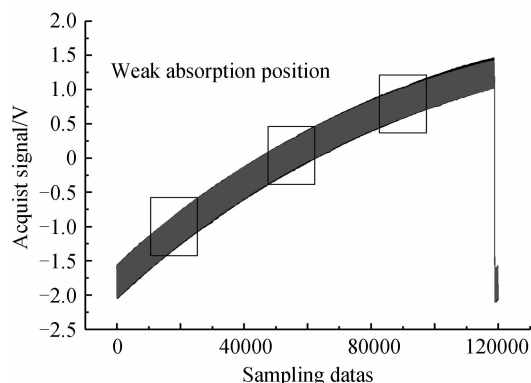
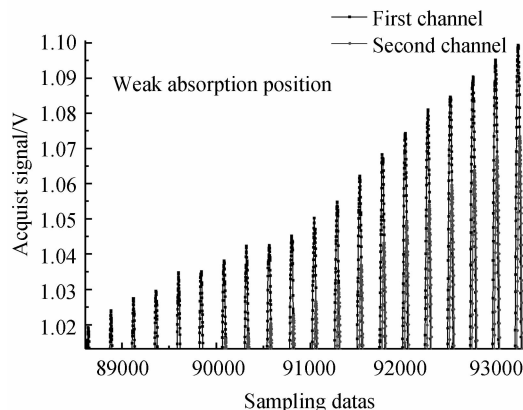


图 5 模拟 760 nm~761 nm 氧气分子吸收谱线  
Fig. 5 Simulated oxygen molecular absorption spectrum of 760 nm~761 nm



(a) The original data of two channel acquisition



(b) Absorption position

图 6 两路通道采集的原始数据及吸收位置

Fig. 6 The original data of two channel acquisition and the absorption position

将采集到的数据进行二次谐波信号提取,一次实验提取的二次谐波信号波形如图 7 所示。

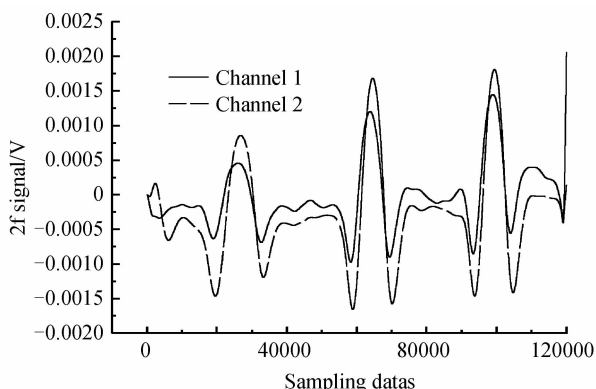


图7 两路通道的二次谐波信号波形

Fig.7 The second harmonic signal waveform of two channel

实验中两路激光束与气流流速方向存在一个夹角,分别为  $123^\circ$  和  $57^\circ$ . 实验过程中,由于准直器和探测器都是在风洞外,为了避免空气中氧气对其影响,应尽量将探测器准直器靠近风洞,并将其密封,实验中利用氮气吹扫密封窗至实验结束.

### 3 数据处理与分析

#### 3.1 氧气浓度反演

根据浓度反演原理,在浓度反演过程中,采用充满了百分比浓度为 99.999% 的纯氧、吸收光程约为 18 cm 吸收池,激光束通过吸收池,采集了一个常温常压下氧气分子的吸收信号,对其提取二次谐波信号作为标定信号,并和常温常压下风洞中氧气吸收信号提取的二次谐波进行比较,处理过程中两路信号应在相同解调参量下进行,并对三个吸收峰的二次谐波信号分别进行归一化处理,一次测量中的浓度反演信号如图 8.

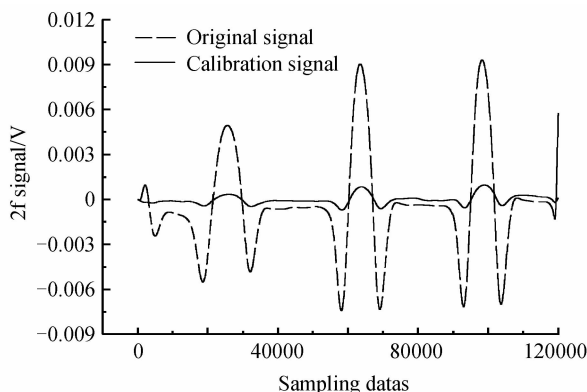


图8 利用二次谐波信号反演浓度

Fig.8 Using the second harmonic signal inversion concentration

取流速稳定段数据,根据其二次谐波峰值反演出氧气的浓度值,四次实验取得 12 个氧气百分比浓度,对其进行累加可求得风洞中氧气的平均百分比浓度为:38.11%,其反演结果如图 9 所示(图中  $t_2$  时间段),计算出其百分比浓度标准差为  $MSE=0.88\%$ . 换算成质量浓度约为 0.49 g/L.

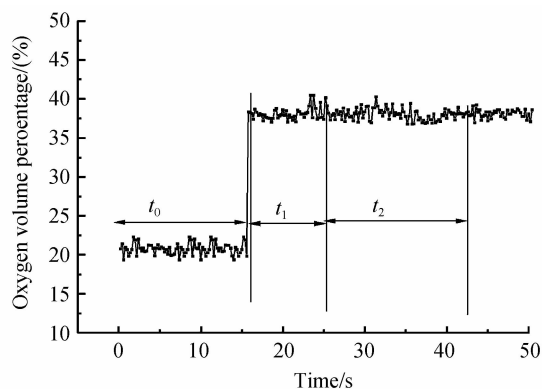


图9 氧气浓度百分比

Fig.9 The concentration of oxygen percentage

#### 3.2 气体流速反演

从图 10 中可以看到,  $t_0$  是风洞启动前时间,  $t_1$  为启动段,  $t_2$  为流速稳定段,根据数据稳定情况观察选取. 取风洞启动后气流流速稳定段为有效数据,将实验测量出的 12 个频移值,分别计算出流速均值、修正值、标准差以及与理论误差的百分比,其结果见表 1 所示.

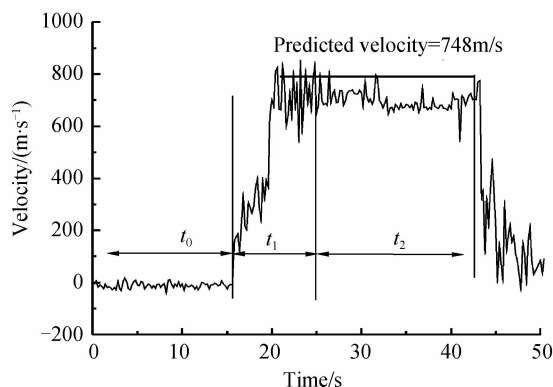


图10 氧气流速反演结果

Fig.10 Velocity inversion results of Oxygen

表1 流速反演结果

Table 1 Velocity inversion results

Times	Velocity/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	Modified value/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	Standard deviation/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	Theoretical error/ (%)
1	698.9	-13.7	34.9	4.73%
2	696.7	-12.7	25.3	5.16%
3	699.5	-11.6	30.8	4.93%
4	709.4	-9.9	26.4	3.84%
5	713.2	-8.3	29.8	3.54%
6	703.2	-9.4	29.9	4.73%
7	694.5	-11.9	31.7	5.56%
8	687.3	-12.8	35.8	6.40%
9	695.6	-13.7	34.1	5.17%
10	685.4	-11.9	35.7	6.78%
11	681.2	-10.7	32.1	7.50%
12	683.7	-9.8	30.8	7.28%
Average	695.7	-11.4	31.4	5.47%

从表中可见,流速均值约为 695.7 m/s. 流速的标准差约为 31.4 m/s,流速的最低值是 681.2 m/s、最高速度为 713.2 m/s,流速测量值与理论流速值的误差范围约 6.99%.

由于电路系统本身的原因导致系统存在一个偏差,为此,在风洞未启动之前,先采集两路信号,对其二次谐波的波动范围进行测量,测量结果(即修正流速)如表 1 所示,取其平均值-11.4 m/s 作为修正值.修正后的流速值为 707.6 m/s.

根据修正后的测量值和理论值 748 m/s 计算出多次测量平均相对误差为 5.47%. 修正后的流速值与理论值的存在约 41.9 m/s 的差值,这可能是由于风洞边界层和流场的不均匀性的影响导致<sup>[13-14]</sup>.

### 3.3 氧气质量流量计算

根据流速值和浓度值,考虑到风洞有效截面积为 40 mm×30 mm,反演出氧气的质量流量,将 12 个质量流量值绘出如图 11 所示曲线,计算出的质量流量的均值为 0.42 kg/s,均方差约为 0.01 kg/s,误差范围为 5.46%. 与理论差值约为 7.9% (取设计理论值为 0.39 kg/s).

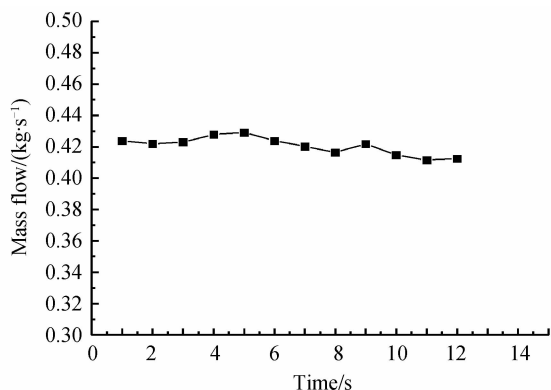


图 11 质量流量反演结果

Fig. 11 The results of mass flow inversion

### 3.4 检测极限

质量流量测量系统的检测极限是可以检测出最小响应对应的质量流量,反映了测量系统的检测能力,本系统中质量流量检测极限主要受到系统的噪音等因素影响.定义系质量流量检测极限等于质量流量标准差的 3 倍,即

$$S_{\text{limit}} = 3 \times \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta M - \Delta \bar{M})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中  $S_{\text{limit}}$  是系统检测极限,  $\Delta M$  测量质量流量,  $\Delta \bar{M}$  为质量流量测量均值.

根据表 1 中数据,可以计算出其检测极限约为 0.02 kg/s.

## 4 结论

本文介绍了多普勒频移测量流速及二次谐波测量

浓度原理,利用波长调制技术和 TDLAS 技术相结合,在实验室搭建了超音速 O<sub>2</sub> 质量流量测量系统进行了实验,实验结果表明该方法能够解决测量过程中光程短、吸收弱的困难,有效地检测出了超音速风洞中的氧气质量流量,具有噪音抑制能力好,提取信号能力强等特点.实验结果为下一步氧气质量流量测量的小型化设备研制做了准备.

### 参考文献

- [1] KAN Rui-feng, LIU Wen-qin, ZHANG Yu-jun, *et al.* Tunable diode laser absorption spectrometer monitors the ambient methane with high sensitivity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(9): 1217-1220.
- [2] 阚瑞峰,刘文清,张玉钧,等.可调谐二极管激光吸收光谱法监测环境空气中甲烷的浓度变化[J]. *中国激光*, 2006, **32**(9): 1217-1220.
- [3] HUANG Jian-qiang, ZHAI Bing, HE Qi-xin, *et al.* A temperature controller for near-infrared semiconductor laser used in gas detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **43**(6): 0614003.
- [4] 黄渐强,翟冰,何启欣,等.用于气体检测的近红外半导体激光器温控系统[J]. *光子学报*, 2014, **43**(6): 0614003.
- [5] ZHANG Zhi-rong, SUN Peng-shuai, XIA Hua, *et al.* Modulation parameters influence and optimal selection of tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **44**(1): 0114002.
- [6] 张志荣,孙鹏帅,夏滑,等.可调谐半导体激光吸收光谱技术的调制参量影响及优化选择[J]. *光子学报*, 2015, **44**(1): 0114002.
- [7] CHEN Dong, JIA Zhao-li. Signal analysis of tunable diode laser based wavelength modulation spectroscopy[J]. *Journal of Atmospheric And Environmental Optics*, 2008, **3**(3): 193-198.
- [8] 陈东,贾兆丽.可调谐半导体激光波长调制[J]. *光谱信号分析大气与环境光学学报*, 2008, **3**(3): 193-198.
- [9] ZHANG Chun-xiao, WANG Fei, LI Ning, *et al.* Ammonias gas concentration and velocity measurement using tunable diode laser absorption spectroscopy and optical signal cross-correlation method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(10): 2597-2601.
- [10] 张春晓,王飞,李宁,等.可调谐半导体激光吸收光谱技术光信号相关法氨气浓度流速同时测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(10): 2597-2601.
- [11] CHE Lu, DING Yan-jun, PENG Zhi-min, *et al.* Theoretical derivation and experimental research of harmonic signals based on TDLAS[J]. *Applied Physics*, 2012, **7**(2): 92-97.
- [12] 车路,丁艳军,彭志敏,等. TDLAS 技术中谐波信号的理论推导与实验研究[J]. *应用物理*, 2012, **7**(2): 92-97.
- [13] CHANGL 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.
- [14] 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.
- [15] KENT H L, JEFFRIES J B, HANSON R K, *et al.* Diode-laser sensor for air-mass flux 2: nonuniform flow modeling and aeroengine Tests[J]. *AIAA Journal*, 2007, **45**(9): 2213-2223.
- [16] LI Fei, YU Xi-long, CAI Wei-wei, *et al.* Uncertainty analysis of velocity measured by diode-laser absorption

- spectroscopy in a scramjet facility[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(20): 4788-4797.
- [11] YANG Bin, HE Guo-qiang, LIU Pei-jin, *et al.* TDLAS-based measurements of parameters for incoming flow hot-firing test of air-breathing rocket engine[J]. *Chinese Journal of 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实验参量测量[J].中国激光,2011,**38**(5):0508006.
- [12] GU Jun-qing, XU Sheng-li. 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.
- [13] ZHANG Liang, LIU Jian-guo, KAN Rui-feng, *et al.* On the methodology of measuring high-speed flows using tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(3): 0342141-0342146.  
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):0342141-0342146.
- [14] WANG Guang-yu, HONG Yan-ji, PAN Hu, *et al.* Diode laser absorption sensor for measurement of temperature and velocity in supersonic flow[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(9): 0912009.  
王广宇,洪延姬,潘虎,等.二极管激光吸收传感器测量超声流速流场的温度和速度[J].光学学报,2013,**33**(9):0912009.
- [15] CHANGL S, STRAND C L, JEFFRIES J B, *et al.* Supersonic mass-flux measurements via tunable diode laser absorption and non-uniform flow modeling[J]. *AIAA Journal*, 2011, **49**(12): 2783-2791.
- [16] YAO Lu, LIU Wen-qing, XU Zhen-yu, *et al.* The research and development of a compact TDLAS system to measure scramjet combustion temperature [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, **2**(1): 010001-010006.  
姚路,刘文清,刘建国,等.小型化 TDLAS 发动机测温系统的研究及进展[J].实验流体力学,2015,**2**(1):010001-010006.