

波长调制-TDLAS技术测量风洞中氧气流速方法研究

贾良权^{1,2} 刘文清¹ 阚瑞峰¹ 刘建国^{1*} 姚路^{1,2} 许振宇¹ 戴云海¹ 魏敏^{1,3}

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, 安徽 合肥 230031

²中国科学院大学, 北京 100049

³中国科学技术大学, 安徽 合肥 230031

摘要 为了有效地测量风洞中的气体流速,以激光多普勒频移原理为基础,结合波长调制可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术,利用HITRAN数据库,选取氧气(O₂)分子在13144.5 cm⁻¹附近的吸收谱线作为研究对象。在软件中建立了气体流速测量模型,模拟分析了流速测量结果;在实验室中利用超声风洞装置,建立了一套基于波长调制-TDLAS技术的流速测量系统,通过实验,提取出O₂的二次谐波信号,根据O₂分子吸收谱线的二次谐波信号的频移量反演风洞中的气流速度。实验结果表明,在实验室环境下,系统测量流速达到707.6 m/s,符合超声风洞的设计,测量误差范围为5.47%。实验结果为基于波长调制-TDLAS方法测量流速的小型化系统研制以及飞行实验进行了前期准备。

关键词 光谱学; 流速测量; 可调谐二极管激光吸收光谱; 波长调制; 多普勒频移; 风洞

中图分类号 O346

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0715001

Study on Oxygen Velocity Measurement in Wind Tunnel by Wavelength Modulation - TDLAS Technology

Jia Liangquan^{1,2} Liu Wenqing¹ Kan Ruifeng¹ Liu Jianguo¹ Yao Lu^{1,2}

Xu Zhenyu¹ Dai Yunhai¹ Wei Min^{1,3}

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

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

³University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract In order to effectively measure gas flow rate in wind tunnel, based on the principle of laser Doppler frequency shift, combined with wavelength modulation tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) technology, using HITRAN database, oxygen (O₂) molecular absorption spectral line near 13144.5 cm⁻¹ is selected as the research object. A gas flow measurement model is built in the software, the flow velocity measurement results are simulated and analyzed. Supersonic wind tunnel devices are used in the laboratory to set up a set of wavelength modulation flow measurement system based on TDLAS technology. Through the experiment, second harmonic signal of O₂ is extracted. According to the second harmonic of O₂ molecular absorption spectral line frequency shift, the flow velocity in the wind tunnel is reversed. The experimental results show that, in the laboratory environment, velocity measured by the system reaches 707.6 m/s. The experimental results are consistent with the supersonic wind tunnel design, and the measurement error is 5.47%. The results prepare for the research of system miniaturization, which measures flow rate based on wavelength modulation - TDLAS, and flight experiments.

收稿日期: 2014-12-29; 收到修改稿日期: 2015-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(61108034)、国家自然科学基金青年基金(61205151)、中国科学院先导专项(XDA05040102)

作者简介: 贾良权(1984—),男,博士研究生,主要从事波长调制TDLAS质量流量测量方法方面的研究。

E-mail: ljia@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954—),男,中国工程院院士,博士生导师,主要从事环境监测技术方面的研究。

E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

*通信联系人。E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

Key words spectroscopy; velocity measurement; tunable diode laser absorption spectroscopy; wavelength modulation; Doppler frequency shift; wind tunnel

OCIS codes 300.1030; 300.6260; 300.6340; 300.6360

1 引 言

波长调制法引入可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术中,通过提取二次谐波分量,反演气体浓度、流速、温度等信息,极大地提高了TDLAS测量的精度和灵敏度^[1-3]。波长调制-TDLAS技术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、测量精度高、测量量程大、易小型化等特点,是目前用于气体在线检测发展的重要方向^[4-6]。

国内外用于超声速流场流速测量中的TDLAS技术,主要有直接吸收法和波长调制法两种。在吸收较弱、噪声干扰较大的情况下,一般采用波长调制方法,再利用锁相放大器来提取其二次谐波信号来反演气体流速。

国外TDLAS技术起步较早,发展也比较成熟。斯坦福大学高温气体动力学实验室Hanson等^[7-9]在TDLAS技术的流场测量方面处于领先地位,目前已经将TDLAS系统成功地应用到超燃冲压发动机飞行实验中。国内TDLAS技术测量高超声速流场还处于起步阶段,其中中国科学院力学研究所^[10]、西北核技术研究所^[11]、中国科技大学^[12]、中国空气动力研究与发展中心^[13]等都开展了超声速流场吸收光谱诊断方面的研究工作。而一般测量流速或者浓度的对象采用水汽(H₂O)等吸收线强较强的气体分子,对于发动机进气道中的O₂,由于其吸收线强较弱、测量难度大,鲜有相关文献报道,然而O₂是发动机燃烧重要的助燃剂,对这一领域研究具有重要意义。

本文基于多普勒频移原理和波长调制-TDLAS技术,利用实验室超声风洞搭建了流速测量系统,以O₂为研究对象,利用O₂分子吸收谱线的二次谐波信号反演了气体流速,为下一步实验系统的小型化研制提供实验指导。

2 基本原理

2.1 波长调制谐波检测原理

当一束强度为 I_0 ,频率为 ν 的激光,通过光程为 L 的气体池,输出光强 I 与 I_0 关系为

$$I(\omega) = I_0(\omega) \exp[-\sigma(\omega)LN], \quad (1)$$

式中 $\sigma(\omega)$ 为吸收系数, L 为吸收光程长度, N 为吸收气体的浓度。

当激光器的中心频率 ω_L 受到频率为 ω_m 的正弦波调制时,其瞬时频率可表示为

$$\omega = \omega_L + \delta\omega \cos(\omega_m t), \quad (2)$$

式中 $\delta\omega$ 为调制幅度。激光束通过样品吸收池后,其强度可以用 $I(\omega_L)$ 的余弦傅里叶级数来表示:

$$I(\omega_L, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \omega_L \cos(n\omega_m t), \quad (3)$$

$I(\omega_L)$ 每个谐波分量用锁相放大器可以测出:

$$A_n(\omega_L) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} I_0(\omega_L + \delta\omega \cos \theta) \exp[-\sigma(\omega_L + \delta\omega \cos \theta)LN] \cos(n\theta) d\theta, \quad (4)$$

式中 $\theta = \omega_m t$ 。

对于 10^{-6} 量级的弱吸收气体而言, $\sigma LN \ll 1$,可得到

$$A_n(\omega_L) = \frac{2I_0NL}{\pi} \int_0^{\pi} -\sigma(\omega_L + \delta\omega \cos \theta)LN \cos(n\theta) d\theta, \quad (5)$$

对(5)式中的 $\sigma(\omega)$ 进行泰勒级数展开得到

$$A_n(\omega_L) = \frac{2^{1-n} I_0NL}{n!} \delta\omega^n \left. \frac{d^n \sigma}{d\omega^n} \right|_{\omega=\omega_L}, \quad (6)$$

可以看出 n 次谐波的幅值正比于吸收系数 $\sigma(\omega)$ 的 n 次导数、原始光强 I_0 、吸收光程长度 L 以及吸收气体的浓度 N 。

任意次谐波分量与气体浓度成正比,因此都可以用来表示气体的浓度等特性,实际应用时,一般多使用二次谐波,二次谐波分量为

$$A_2(\omega_L) = \frac{I_0 NL}{4} \delta\omega^2 \frac{d^2\sigma}{d\omega^2} \Big|_{\omega=\omega_L} \quad (7)$$

2.2 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,会造成其他分子吸收光子时的激光接受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,频移大小可通过下式计算:

$$\Delta\nu = \frac{V_{\text{gas}} \cos \theta}{c} \nu_0, \quad (8)$$

式中 V_{gas} 为待测气体流速, ν_0 为无频移时气体吸收线中心频率, θ 为激光传输方向和气流速度方向夹角。

根据多普勒测速原理,实际测量过程中有两种衍生的方法,一种是采用双光路测量方法,如图1所示。当成一定角度的两束激光穿过气流后产生一个相对频移 $\Delta\nu_{12}$,由(8)式可得

$$\Delta\nu_{12} = \frac{V_{\text{gas}} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{c} \nu_0, \quad (9)$$

从而计算得到气体流速为

$$V_{\text{gas}} = \frac{c \Delta\nu_{12}}{\nu_0 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}, \quad (10)$$

式中 θ_1 、 θ_2 为激光束与气流方向的夹角。

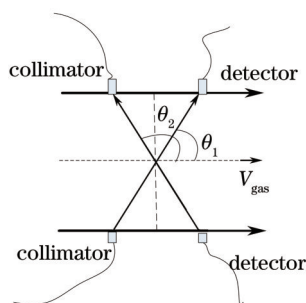


图1 双光路流速测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of double light path velocity measurement

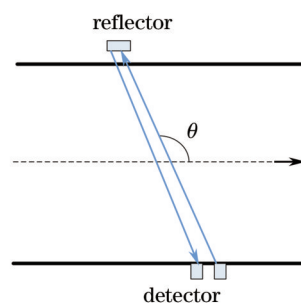


图2 单束光路反射测量气体流速示意图

Fig.2 Schematic diagram of single beam reflection measurement of gas flow velocity

另外一种方法是采用单路激光来回反射方法,如图2所示。一束激光穿过气流,与气流成一定夹角,通过反射镜平行反射回来,由于激光来回沿着气流方向分别向中心波长两边发生频移(红移和蓝移),因此吸收线上在中心频率两边出现两个不同的吸收峰,如图3所示,两个峰之间的偏移量为

$$2\Delta\nu = \frac{V_{\text{gas}} \cos \theta}{c} \nu_0, \quad (11)$$

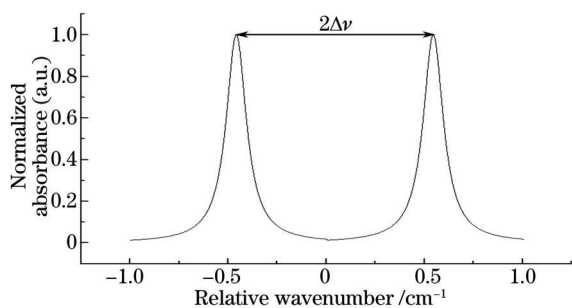


图3 模拟一路光束来回反射吸收光谱之间的多普勒频移
Fig.3 Simulation of the Doppler frequency shift of absorption spectrum of one beam back and forth reflection

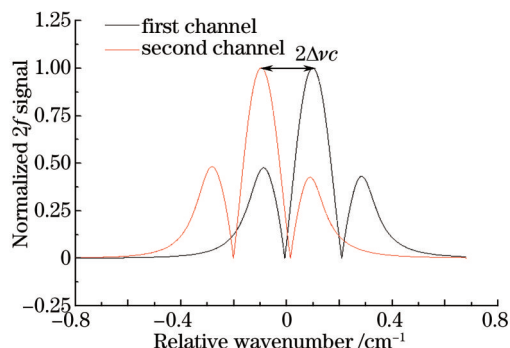


图4 利用二次谐波反演气体流速
Fig.4 Inversion of gas velocity by using the second harmonic

计算得到流速为

$$V_{gas} = \frac{2\Delta\nu c}{v_0 \cos \theta} \quad (12)$$

实际测量中,由于吸收光程短、吸收线强弱等原因,往往采用双光路或者单光路反射方法,利用吸收谱线的二次谐波频移来反演,如图4所示。

在实验过程中采用双光路吸收光谱的二次谐波方法来反演气体的流速。

3 模拟仿真

3.1 系统模型

根据实验要求,基于 Lambert-Beer 定律和多普勒频移测量流速原理,利用 Voigt 线型函数产生光谱吸收函数 $\phi(\nu)$,将调制正弦波 f_{sin} 叠加到锯齿波信号 f_{saw} 中,产生调制扫描信号,将光谱吸收函数加入调制扫描信号中,产生波长调制吸收光谱信号 I_1 。根据多普勒频移原理产生频移后的吸收光谱信号 I_2 ,再对两路信号 I_1 、 I_2 进行解调,得到两路二次谐波信号 V_{out1} 、 V_{out2} ,根据两路二次谐波信号,计算其相对频移。流速测量系统模型如图5所示。

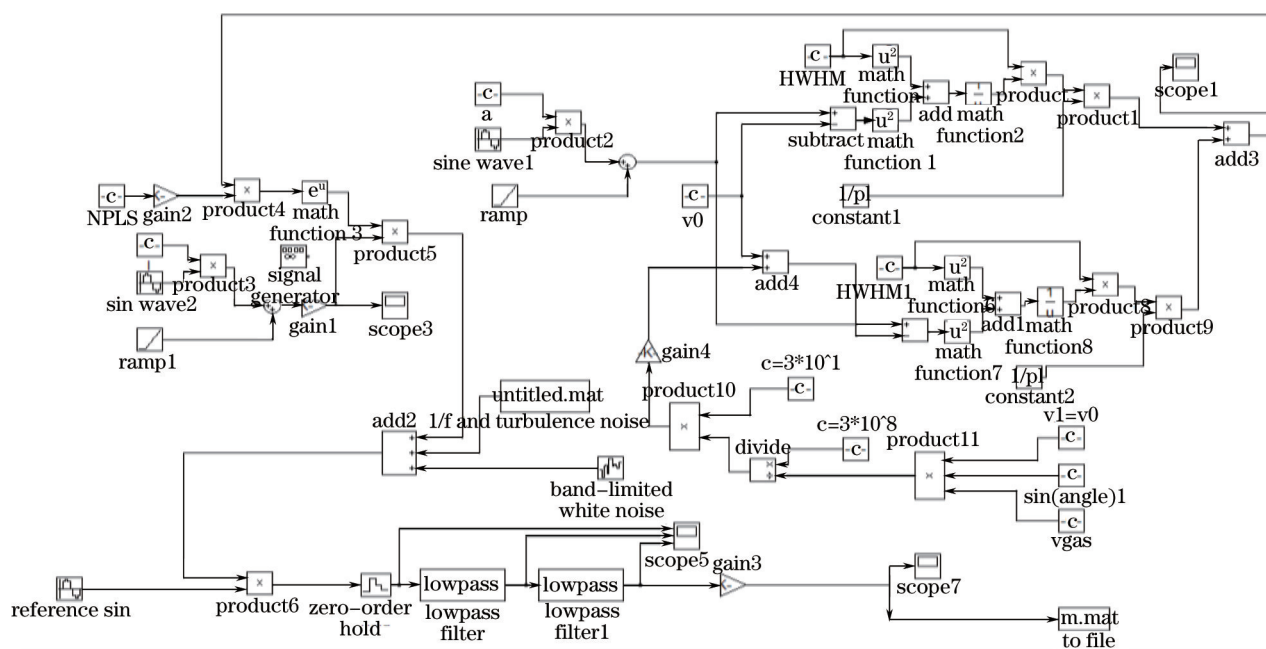


图5 流速测量系统模型

Fig.5 Flow velocity measurement system model

3.2 仿真结果

根据多普勒双光路测速原理,建立 Simulink 模型,选取 13144.5 cm^{-1} 的 O_2 吸收谱线,采用 Voigt 线型计算,

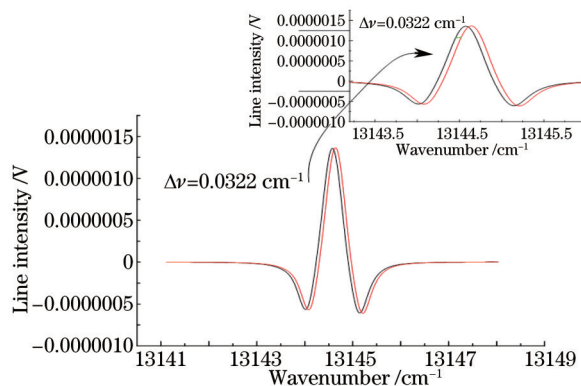


图6 O_2 在 2.2 Mach 流速时二次谐波频移的波形

Fig.6 Second harmonic frequency shift waveform under O_2 velocity of 2.2 Mach

设置调制系数为 2.2, 波数扫描范围为 $13141\sim 13148\text{ cm}^{-1}$, 气体流速 V 设置为 2.2 Mach, 约 748 m/s, 温度设置为 296 K, 气压为 1 atm, 光程为 5 cm, 激光束与气流夹角为 57° , 锯齿波扫描频率选取 100 Hz, 正弦波调制频率为 50 kHz, 采样频率选取 20 Msps。模拟结果如图 6 所示, 相对频移约为 0.0322 cm^{-1} 。图中红色和黑色曲线分别为两路光束的吸收光谱信号。

4 实验系统

基于 TDLAS 的风洞流速测量原理, 在实验室搭建了如图 7 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和计算机。光学部分有风洞实验段、分布反馈式 (DFB) 激光器、分束器、准直器、探测器等。其工作原理为: 利用混合气体中氧气的吸收光谱来测量气体流速, 激光器采用波数为 13144.5 cm^{-1} , 由 ITC102 型温度、电流控制器, 信号发生器产生调制和扫描两路信号, 扫描信号为频率为 100 Hz、峰峰值为 1.2 V 的锯齿波; 调制信号为频率为 50 kHz、峰峰值为 40 mV 的正弦波, 调制信号和扫描信号叠加后, 送入温度、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, 在输出端将探测器输出电压信号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, 数据采集后进入计算机进行后续数据处理。

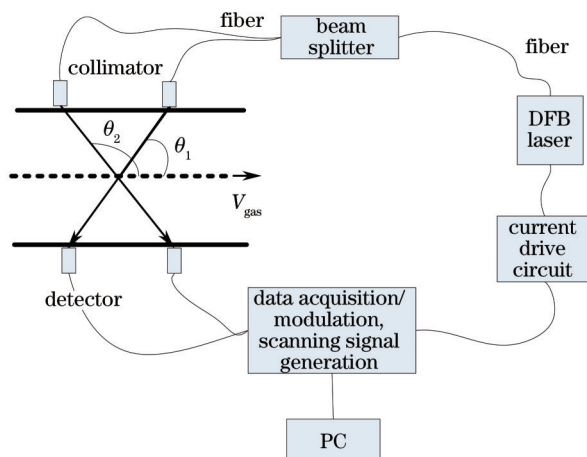


图7 基于TDLAS原理的氧气流速测量系统

Fig.7 Oxygen flow rate measurement system based on TDLAS theory

风洞中气体吸收有效光程约为 5 cm, 氧气体积分数约为 38.11%, 激光器的输出功率约为 2.5 mW, 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 1.2×10^5 个点。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° 和 57° 。

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的影响, 应尽量将探测器和准直器靠近风洞并将其密封, 实验前开始用氮气吹扫直至实验结束。

5 数据处理与分析

5.1 二次谐波信号的提取

实验中选取波数为 13144.5 cm^{-1} 附近的三条氧气分子吸收谱线, 将采集到的数据进行累加平均, 得到原始数据如图 8 所示, 从图中可以看出吸收较弱, 从扫描原始数据中很难看到明显的吸收峰。噪声干扰较大, 对原始数据进行小波去噪预处理, 再利用相敏检测算法对其进行二次谐波信号的提取, 提取后得到如图 9 所示的二次谐波信号波形。由于激光器在一个周期内扫描三个吸收峰, 因此图中出现三个二次谐波信号, 见图 8 圆圈标示的位置。

5.2 流速反演

如图 9 所示, 对提取的两路二次谐波信号进行比较, 由于系统噪声和放大电路的影响, 对于弱吸收光谱信号, 两路信号幅值有差别, 因此在处理的时候先要对其进行归一化, 并对波长进行定标。另外采用单峰值

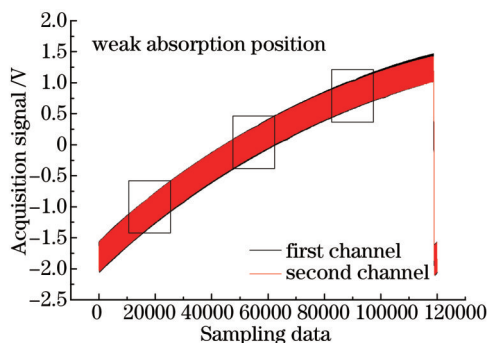


图8 两路通道采集的原始数据

Fig.8 Original data from two channels

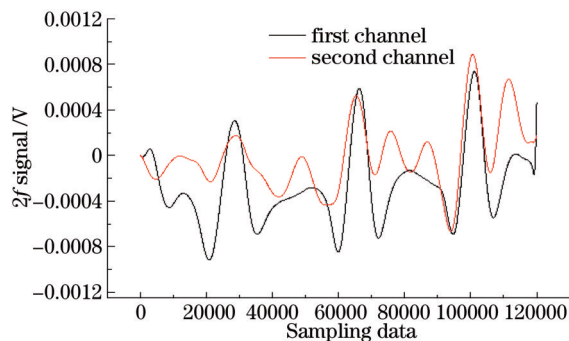


图9 两路通道的二次谐波信号波形

Fig.9 Second harmonic signal waveform of two channels

点进行测量误差较大,为了降低测量误差,实验中扫描三个吸收峰,利用三个吸收峰的相对频移平均值作为一次实验结果。为了提高精度,可将二次谐波波形分割划分为多段,采用其平均值^[14],一次测量有效时间约为 14.8 s,对一次实验测量结果其三个吸收峰的频移均值反演结果如图 10 所示。

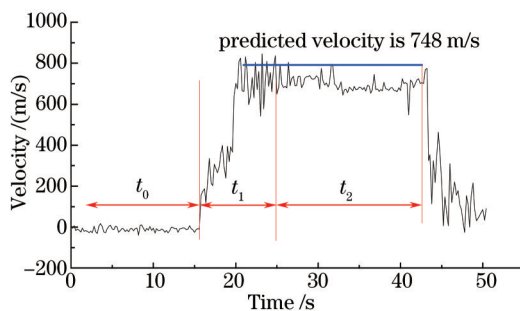


图10 氧气流速反演结果

Fig.10 Oxygen velocity inversion results

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。取风洞启动后气流流速稳定段为有效数据,取实验测量出的 12 个频移值分别计算出流速均值、修正值、标准差、与理论差值以及与理论误差的百分比,结果如表 1 所示。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,流速的最低值为 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为 6.99%。

由于二次谐波的不断扰动和电路系统本身的原因导致系统存在一个固有偏差,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 -11.36 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存在约 41.9 m/s 的差值,这个可能是由于风洞边界层和流场的不均匀性影响导致^[15-16]。

表 1 流速反演结果

Table 1 Velocity inversion results

Times	Velocity/(m/s)	Modified value/(m/s)	Standard deviation/(m/s)	Difference from theoretical values/(m/s)	Theoretical error/%
1	698.9	-13.71	34.9	35.39	4.73%
2	696.7	-12.69	25.3	38.61	5.16%
3	699.5	-11.61	30.8	36.89	4.93%
4	709.4	-9.87	26.4	28.73	3.84%
5	713.2	-8.29	29.8	26.51	3.54%
6	703.2	-9.38	29.9	35.42	4.73%
7	694.5	-11.9	31.7	41.60	5.56%
8	687.3	-12.8	35.8	47.90	6.40%
9	695.6	-13.7	34.1	38.70	5.17%
10	685.4	-11.85	35.7	50.75	6.78%
11	681.2	-10.69	32.1	56.11	7.50%
12	683.7	-9.84	30.8	54.46	7.28%
Average	695.7	-11.36	31.4	41.90	5.47%

5.3 检测极限

流速测量系统的检测极限是可以检测到的最小响应对应的气流速度,反映了测量系统的检测能力,该系统中流速检测极限主要受到系统的噪声影响。定义系统流速检测极限等于流速标准差的3倍,即

$$S_{\text{limit}} = 3 \times \left[\frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^n (\Delta V - \Delta \bar{V})^2 \right]^{1/2}, \quad (13)$$

式中 S_{limit} 为系统检测极限, ΔV 为测量流速, $\Delta \bar{V}$ 为测量流速均值。

利用表1数据计算出系统检测极限为94.2 m/s。

6 结 论

根据多普勒频移流速测量原理,利用波长调制-TDLAS技术测量超声风洞中的O₂气体流速。在Matlab软件中建立模型,模拟了多普勒频移流速反演过程;在实验室中利用风洞搭建了O₂流速测量系统;基于波长调制-TDLAS技术采用双光路测量方法,两束光路夹角为57°,有效吸收光程约为5 cm,对2.2 Mach混合气体气流进行测量,利用提取出的O₂的二次谐波信号的频移反演出O₂气体流速。实验结果表明,利用波长调制-TDLAS法测量得到气体流速约为707.6 m/s,与理论值的误差约为5.47%;利用一般信号检测极限原理,提出了流速检测极限方法,对流速检测极限进行了分析,利用多次测量结果计算出实验室风洞系统的流速检测极限为94.2 m/s。

参 考 文 献

- 1 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. Tunable diode laser absorption spectrometer monitors the ambient methane with high sensitivity[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(9): 1217-1220.
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.
- 2 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. Absorption measurements of ambient methane with tunable diode laser[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(4): 1927-1930.
阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱法测量环境空气中的甲烷含量[J]. 物理学报, 2005, 54(4): 1927-1930.
- 3 Chen Dong, Jia Zhaoli. Signal analysis of tunable diode laser based wavelength modulation spectroscopy[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(3): 193-198.
陈 东, 贾兆丽. 可调谐半导体激光波长调制光谱信号分析[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(3): 193-198.
- 4 He Junfeng, Kan Ruifeng, Xu Zhenyu, *et al.*. Derivative spectrum and concentration inversion algorithm of tunable diode laser absorption spectroscopy oxygen measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0430003.
何俊峰, 阚瑞峰, 许振宇, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱氧气测量中的导数光谱处理与浓度反演算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0430003.
- 5 Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yabai, *et al.*. Laser temperature compensation used in tunable diode-laser absorption spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0515002.
袁 松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱中激光器温度补偿[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0515002.
- 6 Hu Yajun, Zhao Xuehong, Zhang Rui, *et al.*. Research on the effect of light intensity modulation on line shape of the second harmonic in the wavelength modulation technology[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1130002.
胡雅君, 赵学珏, 张 锐, 等. 波长调制技术中光强调制对二次谐波线型的影响研究[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1130002.
- 7 Che Lu, Ding Yanjun, Peng Zhimin. Theoretical derivation and experimental research of harmonic signals based on TDLAS[J]. Applied Physics, 2012, 2(3): 92-97.
车 路, 丁艳军, 彭志敏. TDLAS技术中谐波信号的理论推导与实验研究[J]. 应用物理, 2012, 2(3): 92-97.
- 8 L S Chang, J B Jeffries, R K Hanson. Mass flux sensing via tunable diode laser absorption of water vapor[J]. AIAA Journal, 2010, 48(11): 2687-2693.
- 9 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]. Applied Optics, 1993, 32(30): 6090-6103.
- 10 M S Brown, D L Barone, T F Borhorst, *et al.*. TDLAS-based measurements of temperature, pressure, and velocity in the isolator of an axisymmetric scramjet[C]. Nashville: 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010: 6989-6996.

- 11 F Li, X Yu, W Cai, *et al.*. Uncertainty analysis of velocity measured by diode-laser absorption spectroscopy in a scramjet facility[C]. Grapevine: 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2013: 697-706.
- 12 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实验参数测量[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0508006.
- 13 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.
- 14 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): 034214.
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): 034214.
- 15 Wang Guangyu, Hong Yanji, 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.
- 16 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.

栏目编辑: 吴秀娟