

基于吸收光谱技术的气流速度测量研究

韩雨佳, 陈 钻, 薛志亮, 吴迎春, 吴学成
(浙江大学热能工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 气体运动速度的非接触在线测量在发动机等高速流场实验研究中具有重要意义。基于吸收光谱技术中吸收谱线的多普勒频移效应, 设计并搭建了高速气流测速系统, 对经过拉瓦尔喷管加速的高速气流速度进行了实时在线检测。实验选用 H_2O 在 1392 nm 附近的特征吸收谱线, 基于 LabVIEW 程序进行数据采集与处理得到实时流速。在此基础上, 分析了该系统的速度测量极限, 为后续系统进一步优化及整体装置的开发奠定了基础。

关键词: 吸收光谱; 多普勒频移; 速度测量; LabVIEW

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.06.008

Study on air velocity measurement based on absorption spectroscopy

HAN Yu-jia, CHEN Zuan, XUE Zhi-liang, WU Ying-chun, WU Xue-cheng
(Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Non-contact on-line measurement of gas velocity is of great significance in the experimental study of high-speed flow field such as engines. Based on the Doppler frequency shift effect of absorption line in gas absorption spectrum technology, a high-speed airflow velocity measurement system is designed and constructed, and the speed of airflow accelerated by Laval nozzle is measured online in real time. In the experiment, the characteristic absorption line of H_2O near 1392 nm is selected, and data acquisition and processing are conducted based on LabVIEW to obtain real-time velocity. On this basis, the speed measurement limit of the system is analyzed, which lays a foundation for further optimization of the follow-up system and development of the overall device.

Key words: absorption spectroscopy; Doppler shift; velocity measurement; LabVIEW

1 引 言

对于高速流场, 如燃烧流场、发动机流场等, 其气流速度对于空气动力学理论研究和实际工程设计具有重要意义^[1]。流速测量方法一般分为接触测量和非接触测量, 传统的测量方法如毕托管差压法、热线/热膜测速技术以接触测量为主, 这些方法响应慢、对流场有干扰, 不适合高速流场测量, 非接触测量方法有粒子成像测速技术(PIV)^[2]、分子示踪速度测量技术(MTV)^[3]、瑞利散射测速技术^[4]等, 这几种方法均采用高功率激光器作为光源, 难以系统

化且成本较高。

在可调谐二极管激光吸收光谱技术中, 当气流速度在激光传输方向上有速度分量时, 会使得气体特征吸收谱线频率相比于无速度分量时的频率有一偏移, 两者频率之差即为多普勒频移^[1], 其大小正比于气流速度, 因此可以通过测量所选特征谱线的频移量来计算得到气流速度。该方法属于非接触测量, 具有实时在线、精度高、响应快、量程大和易小型化等特点, 并可以同时在线测量温度、组分浓度、速度和流量等参数^[5]。

作者简介: 韩雨佳(1994 -), 男, 硕士研究生, 主要从事吸收光谱分析。

通讯作者: 吴迎春(1986 -), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事先进激光测量技术及燃料颗粒动力学方面的研究。

E-mail: wycgsp@zju.edu.cn

收稿日期: 2018-10-20; **修订日期:** 2018-11-15

TDLAS 测速最早在国外得到应用并迅速发展, Philippe 和 Hanson^[6] 于 1993 年提出该方法并获得测量专利。目前斯坦福大学高温气体动力学实验室的 Hanson 等^[7-10] 引领 TDLAS 流场测量技术的发展, Lyle 等^[7-8] 通过测量气流速度和浓度, 实现了实时测量质量流量; We he 等^[9] 测量了高速气流中的温度、H₂O 分压和气流速度; Chang 等^[10] 在 NASA 兰利中心的 DCSCTF 高速高温流动中进行了质量流量、温度和速度的精确测量。

国内也已逐渐开展高速气流 TDLAS 测速方面的研究工作, 杨斌等^[11] 采用双吸收谱线, 测量得到了吸气式发动机来流中的温度、H₂O 浓度和气流速度。张亮等^[1] 验证了 TDLAS 在风洞中进行高速气流流速实时在线测量的可行性。谷俊青等^[12] 选用 H₂O 的吸收谱线, 实现了超声速风洞中流场速度的测量。宋俊玲等^[13] 选用 H₂O 的两条吸收谱线, 实现了超声速直连台隔离段内超声速气流温度、组分浓度、速度和质量流量等多参数快速在线测量。贾良权等^[14-15] 采用 O₂ 的吸收谱线, 根据波长调制法实现了超声速风洞中气流速度的测量。屈东胜等^[16] 利用两条 H₂O 吸收谱线的谐波信号, 测量得到了超燃直连台隔离段内的超声速气流的温度、H₂O 组分浓度、压强、速度以及质量流量等参数。

本文将气体吸收光谱技术与多普勒频移原理结合, 研发了气体光谱吸收技术测速硬件、软件系统, 并选用 H₂O 在 1392 nm 附近的特征吸收谱线, 对速度约为 100 m/s 的气流进行了实验测量验证, 同时分析了该系统的速度测量极限及影响因素。

2 基本原理

TDLAS 技术是基于 Beer-Lambert 定律, 其示意图如图 1(a) 所示, 它描述了激光穿过均匀气体介质前后透射光强与初始光强的关系, 如式(1)所示:

$$\frac{I_t}{I_0} = \exp[-PS(T)XL\phi] \quad (1)$$

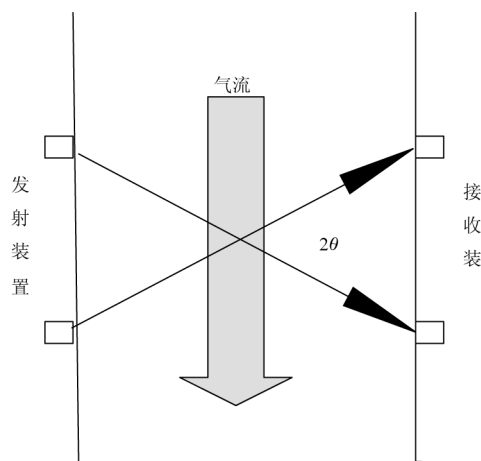
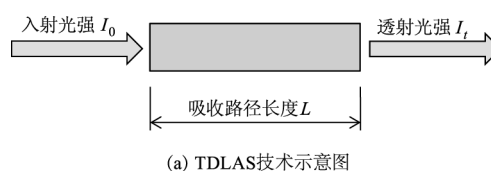
其中, I_t 为透射光强; I_0 为入射光强; P 为气体压力, atm; $S(T)$ 为线强, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$; 可在 HITRAN 数据库中根据所选用气体的特征谱线查询得到; X 为气体浓度; L 为路径长度, cm; ϕ 为线型函数; 满足归一化条件 $\int \phi dv = 1$ 。

TDLAS 测速的基本原理是多普勒效应其示意图如图 1(b) 所示, 分光器将同一激光器产生的激光

分为相同的两束, 当其交叉通过待测流场时, 由于气流速度在两束激光传输方向上具有相反的速度分量, 两束激光的吸收谱线将分别产生多普勒频移^[17]。两束激光气体吸收谱线的多普勒频移量为 $\Delta\nu$ (cm^{-1}), 可由两束激光根据式(1)得到的 $-\ln(I_t/I_0)$ 的中心位置处理得到, 然后按式(2)开展流场速度计算:

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

其中, ν_0 表示吸收谱线中心频率, cm^{-1} ; θ 表示两束激光夹角的一半; u 表示被测流场速度, m/s; c 为光速。



(b) 测速原理示意图

图 1 TDLAS 技术和 TDLAS 测速原理示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of speed measurement principle and technical of TDLAS

3 实验系统

基于 TDLAS 的高速气流测速系统如图 2 所示, 利用信号发生器 AFG3022C (Tektronix) 产生 10 ~ 170 mV、200 Hz 的线性度很好的锯齿波, 加载到中心电流为 105 mA 的激光器电流控制器 LDC205C (Thorlabs) 上, 同时使用激光器温度控制器 TED200C (Thorlabs), 设定激光器温度为 35 °C, 从而调制 DFB 激光器 (Nanoplus) 产生包含所选用的特征谱线且波长范围为 1392.16 ~ 1392.38 nm 激光, 激光经光纤分束器 50 : 50 分为两束光后以 36.87° 的夹角通过待测流场, 由同一型号的两个 InGaAs 探

测器 PDA10CS2 (Thorlabs) 在同一增益下接收光信号并将其转化为电信号,随后通过接线盒 BNC-2110 (NI) 传输到数据采集卡 PCI-6132 (NI) 上,采集卡以 500 kHz 的采样频率进行数据采集。最后在计算机上,由基于 LabVIEW 自行编写的软件进行数据处理得到实时频移,从而计算得到流速。

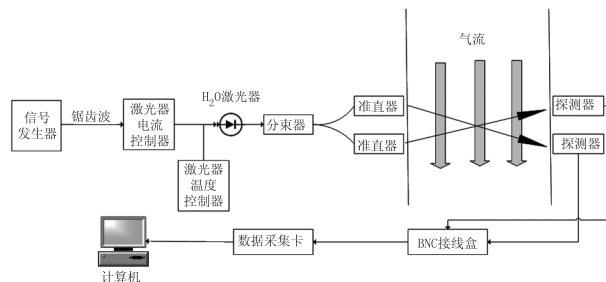


图2 基于 TDLAS 的速度测量系统

Fig. 2 Velocity measurement system based on TDLAS

高速气流由大容量压气机释放的空气经由拉瓦尔喷管加速得到,同时利用毕托管测量其流速,以便与 TDLAS 测量结果进行对比。本文选用空气中含量较高的 H_2O 来进行速度测量,查询 HITRAN 数据库可知, H_2O 在 1392 nm 附近有大量吸收谱线,且该波长的 DFB 激光器较为成熟,因此选用 1392.3293 nm 作为特征吸收谱线进行测速实验。基于 LabVIEW,编写 TDLAS 测速软件,流程示意图如图 3 所示。软件采用模拟多通道多采集模式,同时采用生产者-消费者模式,由生产者部分实时采集数据并加入队列,消费者部分对采集到的数据进行处理。

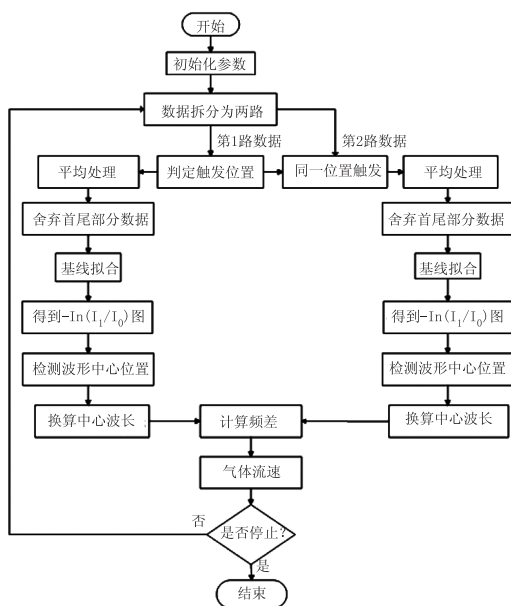


图3 程序流程示意图

Fig. 3 Program flow diagram

程序运行时,首先设置采样通道、采样模式、采样频率、锯齿波频率等初始参数,然后利用 LabVIEW 中的索引数组模块将数据分为两路,分别对应两个探测器。然后根据两个锯齿波之间的突降进行数据处理程序的触发,判定得到第 1 路数据的触发位置后,因两路激光是同步的,所以使第二路数据也在同一位置触发,然后分别进行多次平均处理,根据采样情况,舍弃首尾部分采样点数,再根据直接吸收信号中吸收峰的位置,设置选取的两端线性部分进行基线拟合时所需的采样点数,从而得到入射光强 I_0 的拟合公式及其相关系数,随后处理得到 $-\ln(I_t/I_0)$,并将两路放在一起观察频移情况。采用 LabVIEW 中的波峰检测功能得到波形中心位置,进而根据已知波长扫描范围可换算得到其对应的波长,此即中心波长。由两路激光的中心波长可换算得到频差,从而计算得到气流速度。

4 实验结果及分析

实验过程中,锯齿波扫描频率为 200 Hz,数据采集卡采样频率为 500 kHz,因此每个波形由 2500 个采样点组成,同时开头和结尾各舍弃 200 个因触发而不稳定的采样点,只保留 2100 个有效数据点,并进行多次平均以平滑处理。两探测器的直接吸收信号如图 4 所示,激光经光纤分束器 50:50 分为两束后,经过同样的光程,被设置为相同增益的同一型号的两个探测器接收,由图 4 可知两探测器信号中吸收峰在同一位置。

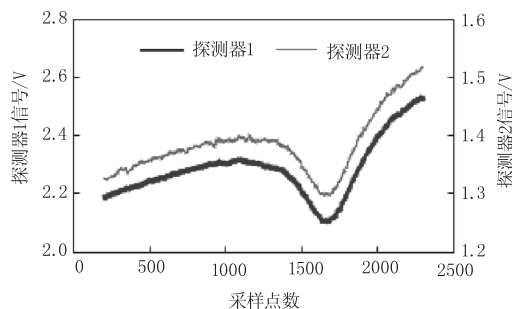


图4 两探测器直接吸收信号

Fig. 4 Direct absorption signals of two detectors

选取探测器信号两端线性部分进行拟合,得到原始光强信号 I_0 ,通过计算 $-\ln(I_t/I_0)$ 得到吸收光谱,因实验气流速度不够高,其造成的频移较小,因此进行拟合及归一化处理,得到两路信号吸收光谱如图 5 所示,可以观察到两光束有较小的频移产生。

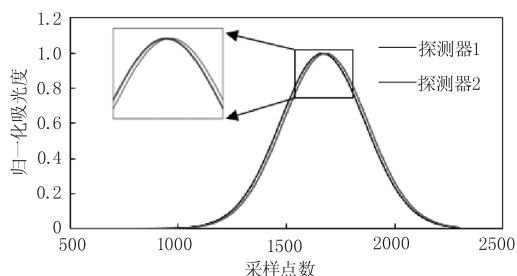


图5 两探测器归一化吸收光谱

Fig. 5 Normalized absorption spectrum of two detectors

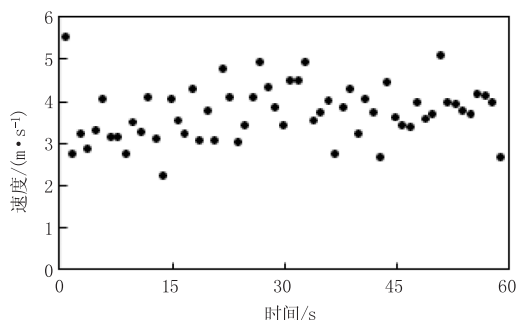


图6 未加载气流时测速结果

Fig. 6 Velocity measurement results when airflow is not loaded

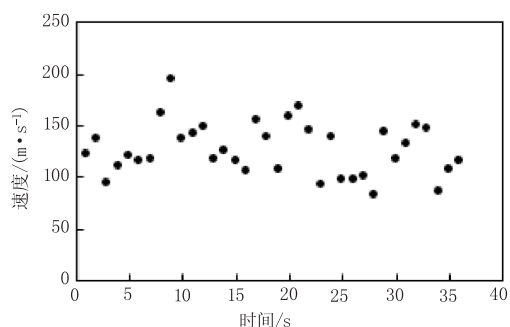


图7 加载气流时测速结果

Fig. 7 Velocity measurement results when airflow is loaded

实验时使用程序实时检测两光束频移,并计算得到气流速度,未加载气流时测量结果如图6所示,平均流速为3.7 m/s,标准差为0.99 m/s。加载气流后如图7所示,扣除背景后平均气流速度为122 m/s,标准差为25 m/s,同时使用毕托管进行测量,得到气流速度为116 m/s,两者相对误差为5.1%。

根据光路及软件的已知条件,并进行部分合理假设,可进行理论上的精准度分析。已知信号发生器输出锯齿波频率设定为200 Hz,采集卡采样频率为500 kHz,由波长计MS9710C测得激光器输出波长为1392.16 ~ 1392.38 nm,选用H₂O特征谱线中心波长为1392.3293 nm (7181.2091 cm⁻¹),两束交叉激光夹角为36.87°,气流方向垂直于两束激光夹角法线。假设激光器输出波长随扫描电流均匀变化,程序计算得到的多普勒频移准确,分辨率极限为

1个采样点的位移。

由已知条件,可得H₂O吸收峰所在采样点位置为1923.86,取整约为1924,因多普勒效应产生频移后,在1个采样点的分辨率极限下,假设此时波形中心位于第1923个采样点,对应的波长为1392.3292 nm (7182.2093 cm⁻¹),由此可得产生的频移为3.9204 × 10⁻⁴ cm⁻¹。代入公式(2),计算得到该系统的气流速度测量极限为25.9 m/s。

在其他条件不变的前提下,两束激光夹角、采样点数分辨率极限等因素对速度测量极限的影响分别如图8、图9所示。速度测量极限随两束激光夹角的增加而下降,但减小速度逐渐变慢,且夹角过大不利于光路布置。结合实际光路,60°~90°左右的夹角较为合适。如若对采集到的原始信号进行拟合,得到拟合公式,则可较精确的计算得到其频移,采样点分辨率极限可小于1。图9中采样分辨率极限大于1时,进行了上述取整操作,此时仅能分辨出整数个采样点。对原始信号进行拟合,假设可以精确测量得到吸收峰所在位置,使得分辨率极限小于1个采样点,达到超分辨。由图9可知速度测量极限随采样点分辨率极限近似线性变化,因此进行拟合,尽量使得软件分辨率极限降低,能显著降低测速极限。

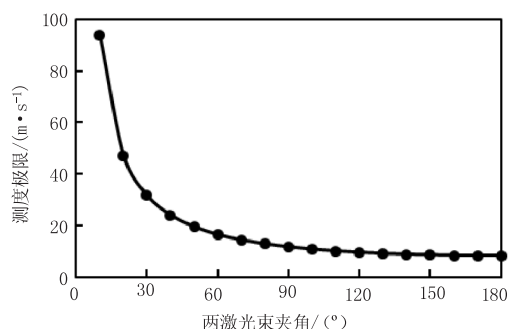


图8 测速极限随两激光束夹角变化

Fig. 8 The speed limit varies with the angle between the two laser beams

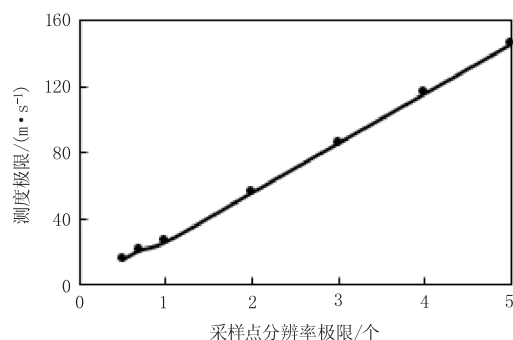


图9 测速极限随采样点分辨率极限变化

Fig. 9 The speed limit varies with the resolution limit of the sample point

4 结 论

本文基于吸收光谱技术中特征吸收谱线的多普勒频移效应,利用搭建的高速气流测速系统,对经过拉瓦尔喷管加速的高速气流进行了气流速度测量,并基于 LabVIEW 编写了速度测量软件进行实时测量,测量结果相对误差为 5.1%,同时分析了该系统的速度测量极限及其影响因素。实验结果表明,基于 TDLAS 的速度测量系统可以实现对高速气流的实时在线检测。后续可进行如下改进:1)进一步加大大气流速度,以测量不同工况下的流速;2)改进实验系统和测速软件,提高测量结果的稳定性并减小误差;3)提高采样频率,对测量信号进行拟合,从而进一步降低速度测量极限,并实现瞬态高速气流的测量。

参考文献:

- [1] ZHANG Liang, LIU Jianguo, KAN Ruifeng, et al. On the methodology of measuring high-speed flows using tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Acta Phys. Sin., 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.
- [2] LI Jun, Su Ming. Experiment on turbine blade unsteady flow with PIV [J]. Huazhong Univ. of Sci. & Tech (Nature Science Edition), 2007 (S1): 133–135. (in Chinese)
李军, 苏明. 涡轮叶栅非定常流动的 PIV 实验 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007 (S1): 133–135.
- [3] YE Jingfeng, Li Guohua, Hu Zhiyun, et al. The hydroxyl tagging velocimetry for boundary layer velocity measurements in high speed flow [C]// National Shock Wave and Shock Tube Academic Conference. 2012. (in Chinese)
叶景峰, 李国华, 胡志云, 等. 用于高速流场附面层速度测量的 HTV 技术 [C]// 全国激波与激波管学术会议. 2012.
- [4] CHEN Aiguo, CHEN Li, LI Zhihui, et al. Research on application of Rayleigh scattering velocity measurement in hypersonic low density wind tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2017, 31(06): 51–55. (in Chinese)
陈爱国, 陈力, 李志辉, 等. 瑞利散射测速技术在高超声速流场中应用研究 [J]. 实验流体力学, 2017, 31(06): 51–55.
- [5] YANG Bin, QI Zongman, YANG Huinan, et al. Velocity measurement method based on TDLAS for combustion flow [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015 (6): 516–520. (in Chinese)
杨斌, 齐宗满, 杨荟楠, 等. 基于 TDLAS 的燃烧流场速度测量方法 [J]. 燃烧科学与技术, 2015 (6): 516–520.
- [6] 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.
- [7] 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(9): 2204–2212.
- [8] Lyle K H, 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.
- [9] We he S, Baer D, Hanson R, et al. Measurements of gas temperature and velocity in hypervelocity flows using diode-laser sensors [J]. AIAA Journal, 2008.
- [10] 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(49): 2783–2791.
- [11] 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 Journal of Lasers, 2011, 38(5): 219–224. (in Chinese)
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试实验参数测量 [J]. 中国激光, 2011, 38(5): 219–224.
- [12] 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. (in Chinese)
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] SONG Junling, HONG Yanji, WANG Guangyu, et al. Measurement of supersonic flow parameters using laser absorption spectroscopy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(11): 3510–3515. (in Chinese)
宋俊玲, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于激光吸收光谱技术的超声速气流参数测量 [J]. 红外与激光工程, 2014,

- 43(11):3510–3515.
- [14] JIA Liangquan, LIU Wenqing, KAN Ruifeng, et al. Study on oxygen velocity measurement in wind tunnel by wavelength modulation-TDLAS technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7):304–311. (in Chinese)
贾良权, 刘文清, 阚瑞峰, 等. 波长调制-TDLAS 技术测量风洞中氧气流速方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7):304–311.
- [15] JIA Liangquan, LIU Wenqing, KAN Ruifeng, et al. Oxygen mass flow detection method in supersonic flow based on TDLAS[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(7):67–72. (in Chinese)
贾良权, 刘文清, 阚瑞峰, 等. 采用 TDLAS 的超音速气流中氧气质量流量检测法[J]. 光子学报, 2015, 44(7):67–72.
- [16] QU Dongsheng, HONG Yanji, WANG Guangyu, et al. Study on mass flux measurement methods of gas based on scanning wavelength modulation spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016(9):145–154. (in Chinese)
屈东胜, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于扫描波长调制光谱的气体质量流量测量方法研究[J]. 中国激光, 2016(9):145–154.
- [17] HUANG Bin. Experimental investigations on outlet combustion flow field of RBCC engine by using TDLAS technique[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015. (in Chinese)
黄斌. 基于 TDLAS 的 RBCC 发动机出口燃烧流场诊断实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.