

# 基于检测分子瑞利散射光多普勒频移的流场多点速度测量

王 晟 邵 珺 李国华 赵新艳 胡志云 刘晶儒

西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

**摘要** 为了解决传统光学测速技术需要添加示踪粒子的局限, 发展了采用固体石英法布里-珀罗标准具检测流场固有分子瑞利散射光的多普勒频移来测量流场速度的技术。介绍了该技术的工作原理, 主要分析了标准具性能参数、环境温度变化对系统测速性能的影响。建立了空间分辨的多点测速系统, 通过光路设计, 解决了环境温度变化对测量准确性的影响和提高了瑞利散射信号收集强度。通过高精度的数据处理方法, 获得了马赫数 1.5 喷管出口自由射流的的空间多点速度分布。结果表明, 建立的测速系统和数据处理方法能够实现流场速度的精确测量。

**关键词** 测量; 散射; 多点速度测量; 多普勒频移; 法布里-珀罗标准具

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1015002

## Multi-Point Velocity Measurement of Gas Flow Field Based on Detecting the Doppler Frequency Shift of Molecular Rayleigh Scattering

Wang Sheng Shao Jun Li Guohua Zhao Xinyan Hu Zhiyun Liu Jingru

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710024, China

**Abstract** The velocity of gas flow field is measured by using Fabry - Perot etalon to detect the Doppler frequency shift of molecular scattering. The working principle of velocity measurement system is introduced. The effects of performance of Fabry - Perot etalon and change of environmental temperature on the velocity measurement are analyzed. The multi-point velocity measurement system is set up. The unshifted incident laser signal and the shifted Rayleigh scattered signal are recorded simultaneously in order to eliminate the effect on the velocity measurement when the positions of interference fringes are changed due to the change of environmental temperature. A couple of large aspherical lens are used to enhance the taking intensity of Rayleigh scattering signal. Through high precision data transform means, the multi-point velocity results of high speed cold crossflow are obtained. The research results show that this method has the capability for velocity measurement of gas flow field with high dependability.

**Key words** measurement; scattering; multi-point velocity measurement; Doppler frequency shift; Fabry-Perot etalon

**OCIS codes** 120.1740; 120.2230; 300.6390

### 1 引 言

应用激光非接触光学诊断技术<sup>[1-3]</sup>诊断超燃冲压发动机、航空发动机等多种发动机的燃烧流场, 获得流场各种参量信息, 对发动机的优化设计和仿真模型的验证, 燃烧效率和发动机性能的提升以及污染物排放控制等方面具有十分重要的科学意义和实用价值。在发动机燃烧流场诊断参量中, 温度和速度是两个最基本的参量, 通过流场静温和速度的测量, 可以计算流场总温, 提供发动机燃烧效率等信息。在流场温度测量方面, 光学诊断技术中的相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)技术<sup>[4-5]</sup>, 是公认测温精度较高、可靠的技术, 适用

收稿日期: 2015-04-29; 收到修改稿日期: 2015-05-20

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1306)

作者简介: 王 晟(1977—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事燃烧流场激光诊断方面的研究。E-mail: wangsheng@nint.ac.cn

于冷流场、气体燃烧流场、固体推进剂燃烧场等大多数流场。而在流场速度测量方面,大多数测量技术,如粒子图像测速(PIV)技术<sup>[6]</sup>、平面多普勒测速(PDV)技术<sup>[7]</sup>等,属于间接测量,测量时需要示踪粒子,示踪粒子在本身活性、耐高温性、流场跟随性等方面的限制,会影响这些技术在发动机流场诊断时的可靠性和适用范围。发展一种直接、可信度较高和适用范围较宽的速度测量技术,对发动机流场的诊断测试具有重要意义。

利用流场分子与激光作用后产生的瑞利散射信号的多普勒频移来测量流场速度的方法,采用的是流场固有分子,测量直接,无需添加示踪粒子,并且检测的速度为流场瞬时速度。该方法在实际应用时,主要存在两方面问题:1) 由于气体分子的瑞利散射截面较小(532 nm 激光,氮气的散射微分截面为  $6.2646 \times 10^{-32} \text{ m}^2$ ),分子瑞利散射光信号太弱,检测困难;2) 流场分子散射光的多普勒频移量较小,典型当流场速度变化 100 m/s,散射光频率的改变量约为 0.3 GHz。

法布里-珀罗标准具是一种高分辨干涉分光仪器,适用于超精细结构、激光模式、谱线<sup>[8-9]</sup>等多种实验现象的观测研究。法布里-珀罗标准具用来分辨瑞利散射光,采用像增强 CCD 分别记录静止空气和流场气体的瑞利散射光的干涉图像,通过测量散射光干涉图像与静止空气干涉图像间的多普勒频移差,就能获得流场的速度。

20 世纪 90 年代,美国国家航空航天局(NASA)研究中心采用法布里-珀罗标准具分析流场分子的瑞利散射光获得流场密度、速度和温度信息<sup>[10]</sup>。2006 年,NASA 研究中心报道了采用该测速技术和 CARS 测温技术结合的综合诊断技术,并在标准燃烧火焰中实现流场温度、速度及  $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2$  组分的测量<sup>[11]</sup>。

早期研究一般采用两片石英玻璃结构的空气隙标准具,环境温度变化和振动会对标准具的稳定性产生影响,限制了该技术的工程应用。本文建立了采用固体石英标准具检测散射光的空间多点测速系统。在光路中增加了参考光路,同时记录未频移的激光干涉信号和瑞利散射干涉信号,消除了温度变化引起的干涉条纹漂移对测量精度的影响;采用了大口径非球面透镜,提高了信号的收集强度;通过高精度的数据处理方法,获得了马赫数 1.5 喷管自由射流出口的空间多点速度分布。

## 2 法布里-珀罗标准具测速原理及影响因素分析

### 2.1 基本原理

法布里-珀罗标准具的测速原理如图 1 所示。探测区域的激光信号通过焦距为  $f_c$  透镜整形为平行光进入标准具,由于多光束干涉激光信号在石英玻璃表面形成等倾干涉条纹,再通过焦距为  $f_L$  透镜聚焦成像到像增强 CCD 表面上。

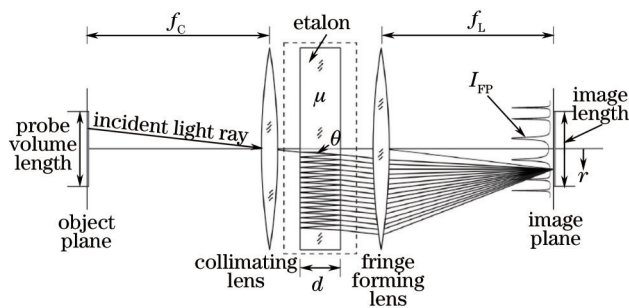


图 1 系统测速工作原理

Fig.1 Working principle of velocity measurement system

去掉图 1 中两个透镜中间虚线框所示的标准具,探测区域与 CCD 上的图像为物像对应关系。加入标准具后,当探测区域信号为扩展光源时,在 CCD 上表现为满足特定倾角的干涉极大条纹的圆环;当探测区域信号为线光源时,在 CCD 上表现为满足特定倾角方向的干涉斑。光路设计时,将入射激光聚焦成线光源,通过透镜收集的瑞利散射信号在标准具上则形成干涉斑,而引入扩展光源的参考入射激光,则形成干涉圆环,如图 2(a)所示。当探测区域具有一定流速时,瑞利散射光会发生多普勒频移,即图 2(a)中红色干涉斑的中心与蓝色干涉环中心发生偏离。不同干涉斑的频移情况分别反映了探测区域对应空间点的流场速度情况,通过这种光路设计,能够获得流场多点的速度信息。

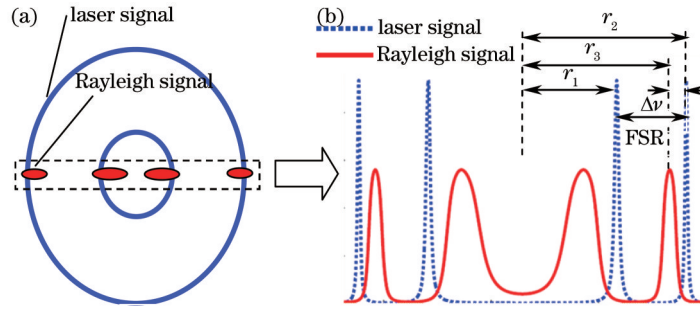


图2 典型干涉条纹(a)及径向光强分布(b)示意图

Fig.2 (a) Schematic of the interference image; (b) spectral distribution along radial

数据处理时,需要将 CCD 记录的干涉图像转换为沿圆环径向方向上的光强分布曲线,如图 2(b)所示。测量瑞利散射干涉斑和入射激光干涉环的空间径向距离,通过(1)式计算获得瑞利散射干涉斑的频移值:

$$\Delta\nu \approx f_{\text{FSR}} \times \frac{\sqrt{f_L^2 + r_3^2} - \sqrt{f_L^2 + r_2^2}}{\sqrt{f_L^2 + r_2^2} - \sqrt{f_L^2 + r_1^2}}, \quad (1)$$

式中  $f_L$  为成像镜头有效焦距,  $r_3$  为干涉斑中心在 CCD 上的径向距离,  $r_1$  和  $r_2$  分别为两侧相邻干涉峰中心在 CCD 上的径向距离。FSR 为标准具可测自由光谱范围,定义为

$$f_{\text{FSR}} = \frac{c}{2nd}, \quad (2)$$

式中  $c$  为光速,其大小与材料折射率和厚度有关。

散射光的多普勒频移与流场速度存在以下关系:

$$\Delta\nu_D = \frac{1}{\lambda} |\mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_o)| = \frac{2v \cos \delta \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda}, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  是入射激光波长,  $\mathbf{e}_o$  是入射光的单位向量,  $\mathbf{e}_s$  是粒子散射光的单位向量,  $v$  为流场分子的速度大小,  $\delta$  为速度矢量与  $(\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_o)$  矢量的夹角,  $\alpha$  为入射光和散射光单位向量的夹角。

## 2.2 测速影响因素分析

### 2.2.1 标准具性能影响

测速系统的测速精度和测速范围主要由标准具的分辨本领和自由光谱范围决定。标准具的仪器函数如下:

$$I_{\text{FP}} = \frac{1}{1 + (2F_R/\pi)^2 \sin^2 \frac{\psi}{2}}, \quad (4)$$

式中  $F_R = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$ , 为与反射率有关的精细度,  $R$  为标准具反射率,  $\psi = \frac{4\pi nd \cos \theta}{\lambda}$ , 即相位改变。

对于单色扩展光源,标准具的分辨本领由其形成干涉峰的半峰全宽决定:

$$\theta_{\text{FWHM}} = \frac{f_{\text{FSR}}}{F_R} = \frac{c}{2nd} \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}. \quad (5)$$

从(5)式可以看出,标准具反射率越高,腔长越长,则条纹越细锐,标准具的分辨本领就越强,测速的精度就越高。而实际测速精度还与 CCD 像元物理尺寸、探测光线宽、成像透镜焦距及数据处理方法等有关。定义标准具的测速精度由实际测量的干涉峰的半峰全宽决定。数据处理时,通过数据的插值和拟合运算可进一步提高系统的测速精度。

系统的测速范围主要与标准具的自由光谱范围有关。通过(2)、(3)式可计算得到相应的测速范围。

### 2.2.2 环境温度变化影响

标准具使用时,环境温度的变化会引起标准具折射率和厚度的变化。融石英的折射率温度系数约为  $\Delta n/\Delta T \approx 1.28 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1[2]}$ , 线性热膨胀系数为  $\alpha = 5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ , 由于温度引起的标准具厚度变化为

$$d = d \pm 2\alpha \Delta T d. \quad (6)$$

根据(6)式和(2)式,当环境温度变化 1 K 时,引起厚度为 1 cm 标准具的自由光谱范围变化 0.11 MHz,影响较小。而对测速影响最大是,当材料折射率和厚度发生变化时,满足光线干涉极大的倾角 $\theta$ 也会发生变化,导致干涉极大条纹在 CCD 上的位置会发生移动,引起测量的偏差。

沿干涉环中心水平方向上形成的干涉条纹光强分布曲线可表示为

$$G(r) = \int_{-\infty}^{\infty} S_i(\lambda) I_{rp}(\lambda, r) d\lambda, \quad (7)$$

式中  $r = f_L \theta$ ,  $S_i(\lambda)$  为入射激光的高斯线型函数。分子瑞利散射光干涉斑的光强分布曲线将(7)式中的  $S_i(\lambda)$  替换为瑞利散射光谱函数  $S_R(\lambda)$ , 其线型函数通过 Tenti S6 模型<sup>[13]</sup> 计算得到。

根据(7)式模拟的环境温度变化引起干涉条纹移动如图 3 所示。当温度变化 1 K 时,对应的漂移约为 8 GHz。在实验测量时,如果环境温度变化较大,就无法确定散射光干涉斑的偏移是由于温度引起的还是由于流场速度引起,导致测量产生较大的误差。

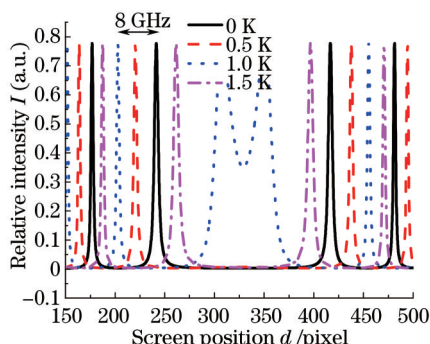


图 3 环境温度变化引起干涉极大条纹位置的移动

Fig.3 Position shift of interference fringes caused by change of environmental temperature

### 3 多点测速系统

建立同时记录基准参考光的多点测速系统,如图 4 所示。系统包括激光器、探测光路、接收检测光路、参考光路和采集设备组成。激光器采用种子注入锁定的可调谐 Nd:YAG 激光器,其二倍频 532 nm 激光作为探测光,其线宽为  $0.0042 \text{ cm}^{-1}$  (二倍频)。探测光路由半波片和透镜组成,半波片用来调节激光的偏振方向,透镜 L1 将激光束聚焦到探测区域。从探测光分出小部分能量不经过流场直接耦合到标准具中作为频率基准参考光。接收检测光路包括小  $f$  数非球面透镜 L2、大  $f$  数非球面透镜 L3、整形透镜 L4 和固体石英标准具。透镜 L2 通过增加收集半角来接收正向的散射光,透镜 L3 用来调节系统  $f$  数,透镜 L4 用来将收集光整形为平行光。固体标准具的自由光谱范围约为 10 GHz,反射率为 90%,理论精细度为 29,标准具测速范围为 0~3800 m/s,测速分辨率为 65 m/s,通过数据拟合处理可进一步提高系统的测速精度。采集由像增强 CCD 完成,通过 300 mm 镜头 L5 将标准具形成的干涉条纹成像到像增强 CCD 的光敏面上,数据通过计算机存储处理。由于

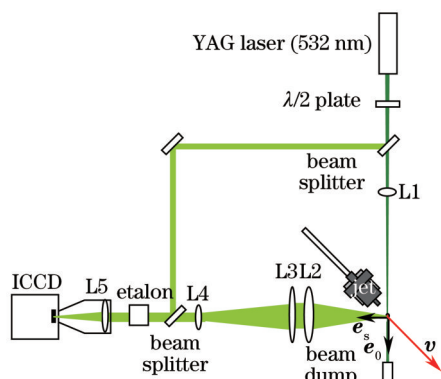


图 4 多点测速系统示意图

Fig.4 Schematic of the multi-point velocity measurement system

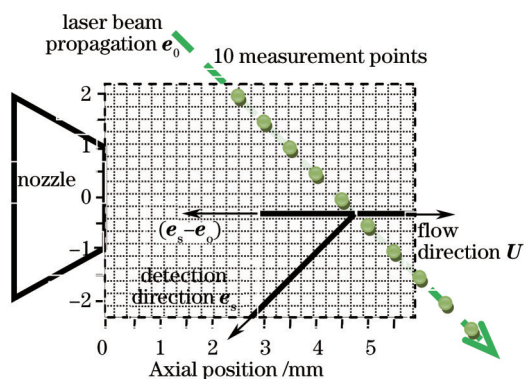


图 5 测量位置示意图

Fig.5 Schematic of measurement locations

入射激光聚焦为线光源,线光源上满足特定倾角关系的点,在标准具上形成干涉极大光斑,每个干涉斑的偏移情况反映了对应空间点散射光的多普勒频移情况。实验采用马赫数 1.5 拉瓦尔喷管获得高速气流,喷管出口口径为 2 mm,气源为压缩空气。测量点位置示意如图 5 所示。喷管气流方向与入射光成 45°,入射光矢量和散射光矢量的差矢量方向与流场方向平行,即光路测量得到的速度方向为高速喷管气流的主方向。由于  $(\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_0)$  与速度方向相反,检测的频率为负值。

## 4 数据处理方法及流场多点测速结果

### 4.1 数据处理

#### 4.1.1 干涉圆环圆心和半径测量

图 6 为静止空气的干涉测量图像。数据处理需要将干涉图像转换为沿圆环径向方向上的光强分布曲线,首先确定干涉圆环的圆心位置。采用强度为标准高斯分布的圆环作为掩模,通过与测量的干涉图像进行相关检测运算<sup>[14]</sup>进行匹配,确定圆心和每个干涉环对应的半径。典型匹配结果如图 7 所示,其中红线为与干涉环中心匹配的模拟圆环。

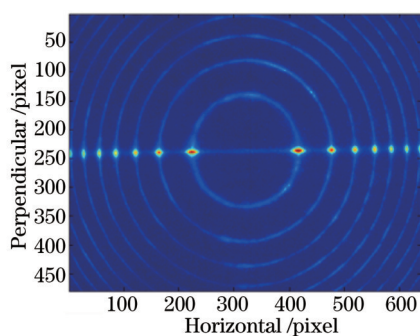


图 6 静止空气的标准具干涉周期图像

Fig.6 Interference fringe pattern image of still atmosphere

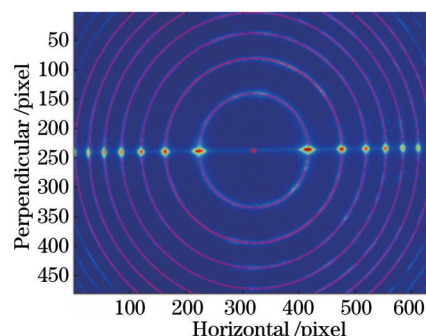


图 7 干涉环圆心和半径匹配结果

Fig.7 Matched result of interference fringe center and radius

#### 4.1.2 干涉图像坐标变换

在测量散射光干涉斑的偏移前,需要将干涉图像转换为以极径和极角为坐标轴的图像。图 8 为静止空气干涉图像的转换结果,而图 9 为流场干涉图像的转换结果。其中,竖线为参考光形成干涉圆环的转换图像,其垂直度与干涉圆环圆心的测量精度有关。每条竖线代表的频率是相同,而相邻竖线频率间隔为标准具自由光谱范围(约 10 GHz)。与图 8 相比,图 9 中流场散射光的中心位置与干涉环竖线中心明显存在偏差,这种偏差是由于多普勒频移引起的。

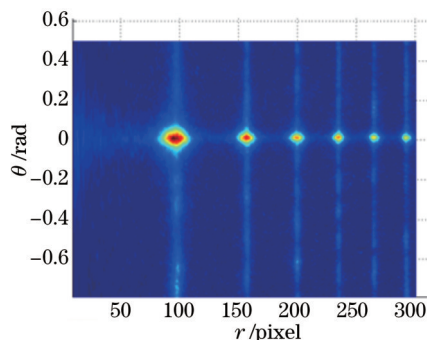


图 8 静止空气干涉图像的转换结果

Fig.8 Transformed result of still air interference fringe

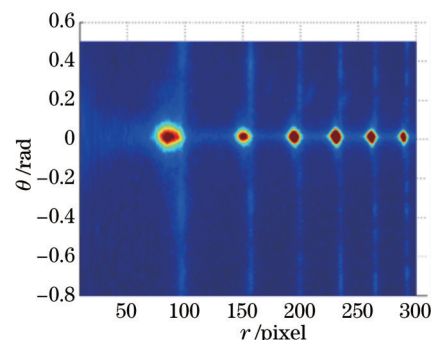


图 9 流场干涉图像转换结果

Fig.9 Transformed result of gas flow interference fringe

#### 4.1.3 散射斑中心频移测量及速度计算

通过阻尼最小二乘法<sup>[15]</sup>曲线拟合确定每个散射斑中心偏移,测量前需要将沿径向的光强分布曲线通过(1)式转换为频率方向的曲线。典型拟合结果如图 10 所示,散射斑中心的偏移即为散射斑的多普勒频移值。再通过(3)式即可获得流场对应点的速度值。图 10 中散射斑中心的频移为  $(-1.291 \pm 0.005)$  GHz,计算得到流

场对应点的速度为(486±2) m/s。

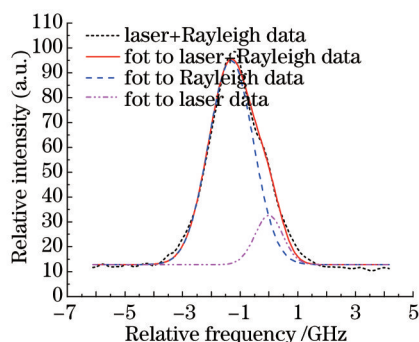


图 10 干涉光谱曲线拟合结果

Fig.10 Fitted results of interference spectral curve

#### 4.2 流场多点测速结果

图 11 为喷管出口 2~7 mm 处的典型多点测量结果。其中,图 11(a)为获得的流场干涉图像,图 11(b)为换算得到对应空间点的速度。图 11(b)中红线为多项式拟合曲线,结果还待与数值模拟的结果进行验证。

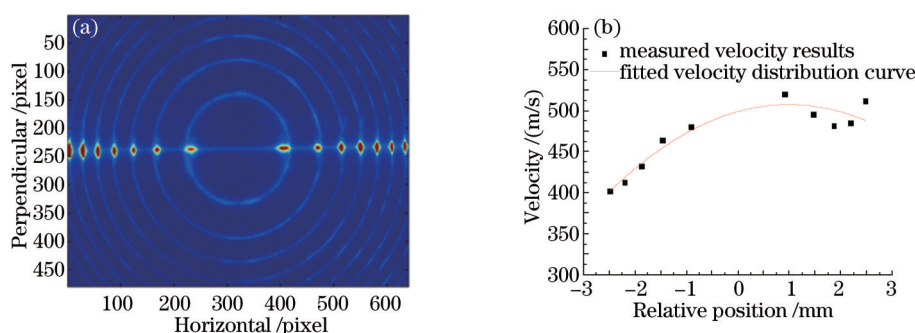


图 11 多点测速典型结果。(a) 流场干涉图像;(b) 速度测量值

Fig.11 Typical results of the multi-point velocity measurement. (a) interference image; (b) measurement results

## 5 结 论

基于固体石英法布里-珀罗标准具检测分子瑞利散射光的多普勒频移的方法,建立了空间分辨的流场多点测速系统。通过分析,确定采用实际测量的干涉环半峰全宽作为标准具的测速精度依据。采用同时记录未频移的入射光和频移的瑞利散射光的方法能够有效解决环境温度变化引起干涉条纹的漂移对系统测速的影响。通过干涉环的圆心精确定位,参考光光谱和瑞利散射光光谱中心的高精度拟合测量,计算获得了马赫数为 1.5 喷管出口自由射流的空间多点速度分布。结果表明,建立的测速系统和数据处理方法能够实现流场速度的精确测量。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Zhenrong, Zhu Feng, Li Guohua, *et al.*. Research on spontaneous Raman scattering excited by XeF(C-A) laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1114001.  
张振荣, 朱 峰, 李国华, 等. 基于 XeF(C-A)激光激励的自发拉曼散射技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1114001.
- 2 Han Changcai, Cao Na, Lei Lan, *et al.*. Study on a method for segmentation of atomization field holography in a combustion chamber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 080901.  
韩长材, 曹 娜, 雷 岚, 等. 燃烧室雾化场全息图像分割方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 080901.
- 3 Hu Zhiyun, Liu Jingru, Guan Xiaowei, *et al.*. Study on laser diagnostics applied to combustion and flame[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(5): 702-706.  
胡志云, 刘晶儒, 关小伟, 等. 燃烧场参数的激光诊断技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(5): 702-706.
- 4 Zhang Lirong, Hu Zhiyun, Ye Jingfeng, *et al.*. Mobile CARS temperature measurements at exhaust of supersonic combustor[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0408007.

- 张立荣, 胡志云, 叶景峰, 等. 移动式 CARS 系统测量超声速燃烧室出口温度[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408007.
- 5 Moore D S, Schmidt S C, Shaw M S. Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy of shock-compressed liquid nitrogen/argon mixtures [J]. Journal of Chemical Physics, 1994, 101(5): 3488-3494.
- 6 Adrian R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23(01): 261-304.
- 7 McKenzie R L. Measurement capabilities of planar Doppler velocimetry using pulsed lasers[J]. Appl Opt, 1996, 35(6): 948-964.
- 8 Wang Yanyong, Liu Jianhui, Li Shichen, *et al.*. Stable and simple structure passively *Q*-Switched single longitudinal mode laser[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(5): 531-535.  
王衍勇, 刘俭辉, 李世忱, 等. 稳定的简单结构被动调 *Q* 单脉冲单纵模激光器[J]. 中国激光, 2004, 31(5): 531-535.
- 9 Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin, *et al.*. Spectral selection in He-Ne laser by internal F-P etalon[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 3108-3113.  
梁 晶, 龙兴武, 张 斌, 等. 一种内置法布里珀罗标准具选择 He-Ne 激光器内谱线的方法[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 3108-3113.
- 10 Seasholtz R G. Fiber optic coupled Rayleigh scattering diagnostic for point measurement of gas density, velocity and temperature[C]. 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 1998.
- 11 Bivolaru D, Danehy P M, Grinstead K D, *et al.*. Simultaneous CARS and interferometric Rayleigh scattering[C]. 25th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2006.
- 12 Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. J Opt Soc Am, 1965, 55(10): 1205-1209.
- 13 Tenti G, Boley C D, Desai R C. On the kinetic model description of Rayleigh-Brillouin scattering from molecular gases[J]. Canadian Journal of Physics, 1974, 52(4): 285-290.
- 14 Ramsey Marc C, Pitz Robert W. template matching for improved accuracy in molecular tagging velocimetry[J]. Exp Fluids, 2011, 51(3): 811-819.
- 15 Wang Sheng, Hu Zhiyun, Zhang Zhenrong, *et al.*. Temperature estimation of coherent anti-Stokes Raman scattering spectra using Levenberg-Marquarat algorithm[J]. High Power and Particle Beams, 2012, 24(11): 2565-2570.  
王 晟, 胡志云, 张振荣, 等. 阻尼最小二乘算法 CARS 光谱温度拟合[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(11): 2565-2570.

栏目编辑: 何卓铭