

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

正交两速度分量同时测量的多点干涉瑞利散射测速技术

王晟*, 张振荣, 瞿谱波, 邵珺, 叶景峰

(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:为了在极端燃烧条件下高精度测量发动机的流场速度,提出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获得流场速度。介绍了多点干涉瑞利散射测速技术的基本原理,分析了散射光接收方向与测量速度分量方向的关系。建立了正交两速度分量同时测量的多点测速系统。获得了流场干涉周期图像,采用图像相关检测法精确确定了干涉环的圆心位置;基于阻尼最小二乘法拟合光谱曲线得到了散射光干涉斑的多普勒频移,并计算了相应的速度。获得了在喷管出口1.5~7 mm处马赫数为1.5时,自由射流在 x - y 平面内正交的两个速度分量,并给出了 x - y 平面内多点速度矢量图。结果表明,该测速系统能够实现流场正交两速度分量的同时测量。

关键词:瑞利散射;多点速度测量;流速测量;多普勒频移;法布里-珀罗标准具

中图分类号:O436.1;TB937 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152313.0000

Orthogonal two-component multi-point interferometric Rayleigh scattering velocimeter

WANG Sheng*, ZHANG Zhen-rong, QU Pu-bo, SHAO Jun, YE Jing-feng

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

* Corresponding author, E-mail:wangsheng@nint.ac.cn

Abstract: To obtain the flow field velocity of an engine with high dependability at extreme combustion condition, the velocity of gas flow field was measured by using Fabry-Perot etalon to detect the Doppler frequency shift of molecular scattering. The working principle of a multi-point interferometric Rayleigh scattering velocimeter was introduced, and the correlation between collecting direction of scattering light and the direction of measured velocity component was analyzed. Then, an orthogonal two-component multi-point velocity measurement system was set up. Based on the measured interference fringe image, the center of interference fringe was measured by template match, the Doppler frequency shift of Rayleigh scattering was obtained through a fitting spectrum curve by with Levenberg-Marquarat algorithm and the corresponding velocity was calculated. The orthogonal two-components with a Mach air flow of 1.5 were obtained at an x - y plane, and the multi-point velocity vector graph in the x - y plane was given. The research results show that this velocity measurement system

收稿日期:2015-05-26;修订日期:2015-06-11.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室科研基金资助项目(No. SKLLIM1306)

can simultaneously measure the orthogonal two-component velocities with high dependability.

Key words: Rayleigh scattering; multi-point velocity measurement; flow velocity measurement; Doppler frequency shift; Fabry-Perot etalon

1 引 言

发动机燃烧流场的实验及测量是发动机研制的重要环节。目前,航空吸气式发动机技术正在向高温、高压强、高马赫数、高湍流等极端燃烧条件方向发展。常规的接触式传感器测量手段已无法满足测试要求,而基于激光和光谱的燃烧流场激光诊断方法^[1-4]成为发动机燃烧流场实验定量测量的重要工具。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,通过测量流场的静温和速度可以计算流场总温,提供发动机燃烧效率等信息。粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)^[5]是比较常用的流场速度测量技术,在湍流场测量方面发挥重要作用。但 PIV 技术属于间接测量,测量时需要添加示踪颗粒物,示踪颗粒物存在自身活性、耐高温性、流场跟随性等方面的问题,在高温、高超音速流场中会发生示踪颗粒物的集聚和烧熔,从而使得 PIV 在极端燃烧条件下的高精度定量测量变得困难。

干涉瑞利散射测速技术(Interferometric Rayleigh Scattering Velocimeter, IRS)^[6]利用法布里-珀罗标准具来检测流场中固有分子的瑞利散射光的多普勒频移,从而获得流场速度。该技术无需添加示踪粒子,测量直接,测量的速度为流场瞬时速度矢量,具有较高的可信度和宽的适用范围。20 世纪 90 年代,美国的 Seasholtz 首先开展了采用标准具测量流场分子的多普勒频移来获得流场参数的研究。早期采用的是空气隙标准具,为了减小环境温度和振动对测量的影响,标准具需要放置到特殊房间。从测试台收集的散射信号需要经过光纤传输到标准具进行光谱分析,由于光纤口径有限,一次实验只能获得流场单点的参数。2000 年后该技术得到突破,固体石英标准具取代了空气隙标准具。与空气隙标准具相比,固体标准具对环境振动不敏感,标准具可以直接放在测试现场,由于收集透镜面对的流场区域增大,一次实验可以获得流场多点的速度。2006 年,美国国家航空航天局(NASA)研究中心报道了该测速技

术和 CARS 测温技术相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 N_2 、 O_2 、 H_2 组分的测量^[7]。

由于散射光的多普勒频移与探测方向有关,要获得完整的速度矢量,必须在两两正交的 3 个方向上同时探测,相应地就需要 3 套测量系统。本文提出了采用一套测量装置同时测量正交两速度分量的方法。在收集光路中,采用凹球面球反射镜将背向散射光反射并聚焦返回到原探测点,与前向散射光一起收集到检测光路中,经过标准具干涉后成像到像增强 CCD 上。数据处理时分别拟合两个方向上的散射光干涉信号,获得信号的多普勒频移,并计算得到 x - y 平面正交两个方向上的速度分量。

2 多点干涉瑞利散射测速原理

激光与流场分子作用后会产生瑞利散射光,瑞利散射光谱中包含了流场状态信息,如图 1 所示。瑞利散射光的强度直接与流场分子密度成正比,流场温度会影响瑞利散射光光谱的宽度,由于多普勒效应,流场的速度会导致接收到的瑞利散射光的中心频率发生偏移。根据多普勒效应,瑞利散射光的频移量与流场速度存在以下关系:

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

式中: λ 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, \mathbf{v} 为流场探测点速度, δ 为速度矢量与 $(\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_o)$ 矢量的夹角, β 为入射光和散射光单位向量的夹角,典型的空关系如图 2 所示。

从图 2 可以看出,测量得到的速度分量方向与散射光和入射光的差矢量 $(\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_o)$ 方向有关。一般散射光的接收方向与入射光方向垂直,当接收方向为散射光的前向方向 \mathbf{e}_s 时,如图 3(a) 所示,测量的速度矢量就为速度 \mathbf{v} 的分量 $\mathbf{v}_{//}$;而当接收方向为散射光的背向方向 \mathbf{e}_s' 时,如图 3(b) 所示,测量的速度矢量就为速度 \mathbf{v} 的分量 \mathbf{v}_{\perp} 。 $\mathbf{v}_{//}$ 和

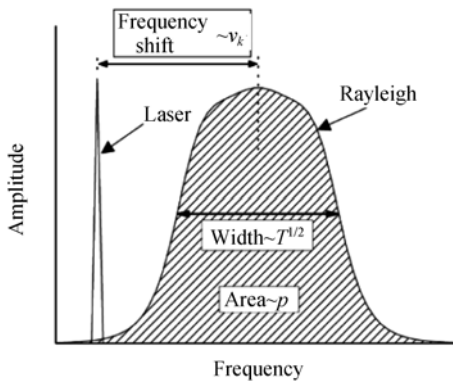


图 1 瑞利散射光谱图
Fig. 1 Rayleigh scattering spectra

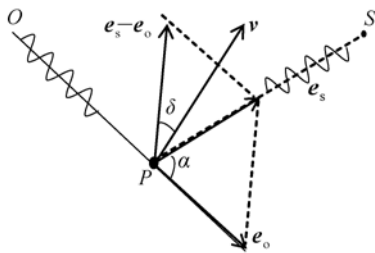


图 2 光源 O、微粒 P 和光检测器 S 之间的空间关系
Fig. 2 Geometric layout of light source, particle and detector

v_{\perp} 能够确定水平面内的速度分量,再加上垂直方向上的速度分量,就可以获得完整的速度矢量。

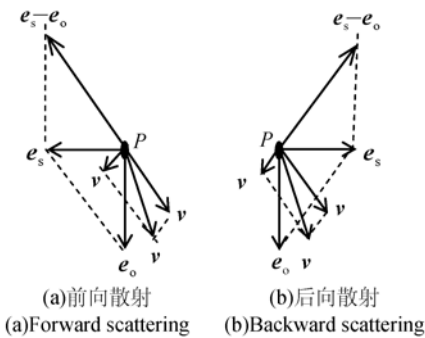


图 3 水平面正交两速度分量的探测布局
Fig. 3 Schematic layout of incident light, detector and flow

由于流场分子散射光的多普勒频移量较小,当流场速度变化 100 m/s,散射光频率的最大改变量约为 0.3 GHz,需要采用高分辨的法布里-珀罗标准具分光。法布里-珀罗标准具进行分光测速的工作原理如图 4 所示。图中,探测区域的激光信号通过焦距为 f_c 的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 的透镜聚焦成像到像增强 CCD 表面上。CCD 上干涉条纹的位置与激光波长和特定倾角 θ 有关。通过测量干涉条纹的移动,就可以获得激光波长的偏移量。

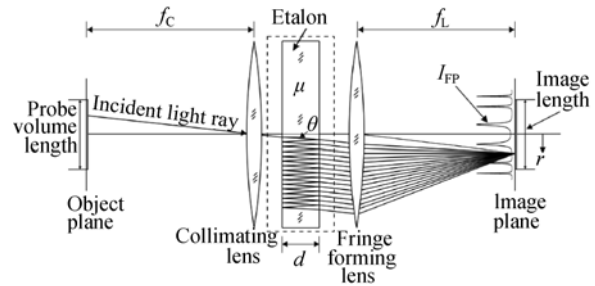


图 4 系统测速工作原理
Fig. 4 Principle of velocity measurement system

去掉图 4 中两个透镜中间的标准具,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 5 (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 5 (a) 中红色干涉斑的中心与蓝色干涉环中心发生偏离(彩图见期刊电子版)。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。

数据处理时,需要将 CCD 记录的干涉图像转

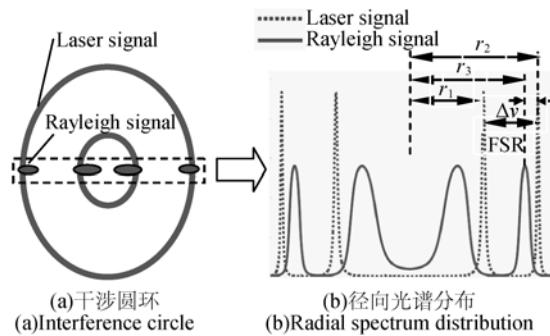


图 5 多点测速干涉图像示意图
Fig. 5 Schematic of interference image for multi-point velocity measurement

换为沿圆环径向方向上的光强分布曲线,如图 5 (b)所示。当频移较大,散射光的干涉斑中心与入射光的干涉环中心能够分辨时,可以直接测量瑞利散射干涉斑和入射激光干涉环的空间径向距离,通过公式(2)计算获得瑞利散射干涉斑的频移值。

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

其中: f_L 为成像镜头的有效焦距, 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 为标准具可测的自由光谱范围,定义为:

$$FSR = \frac{c}{2nd}, \quad (3)$$

其中 c 为光速。FSR 与材料折射率 n 和厚度 d 有关。

当频移较小时,需要采用曲线拟合的方法获得各自中心。径向方向上的光强分布曲线可表示为:

$$G(r) = g_L \int_{-\infty}^{\infty} S_L(\lambda) I_{FP}(\lambda, r) d\lambda + g_R \int_{-\infty}^{\infty} S_R(\lambda, \Delta\nu) I_{FP}(\lambda, r) d\lambda + B_{noise}, \quad (4)$$

其中: g_L 和 g_R 分别为参考入射激光信号和瑞利散射光信号的强度, $S_L(\lambda)$ 和 $S_R(\lambda)$ 分别为各自的线型函数。通过 Tenti S6 模型^[8]模拟得到瑞利散射光谱的线型函数。 $r = f_L \theta$, θ 为光线倾角, $\Delta\nu$ 为散射光的多普勒频移。根据公式(1)获得对应的流场速度分量值。

I_{FP} 为标准具的仪器函数,其表达式为:

$$I_{FP} = \frac{1}{1 + (2F_R/\pi)^2 \sin^2 \frac{\psi}{2}}, \quad (5)$$

其中: $F_R = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R}$,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。

3 正交两速度分量同时测量的多点测速系统

建立正交两速度分量同时测量的多点测速系统,如图 6 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。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 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 L_1 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 数的非球面透镜 L_2 、大 f 数的非球面透镜 L_3 、整形透镜 L_4 、凹球面反射镜和固体石英标准具。透镜 L_2 通过增加收集半角来接收前向的散射光,透镜 L_3 用来调节系统 f 数,透镜 L_4 用来将收集光整形为平行光。与透镜 L_2 共焦点对向放置的凹球面反射镜用来接收背向的散射光并将其反射到前向光路中,与前向接收的散射光一起进入标准具中。固体标准具的 FSR 约为 10 GHz,反射率为 90%,理论精细度为 29,标准具测速范围为 $0 \sim 3800 \text{ m/s}$,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。信号采集由像增强 CCD 完成,通过 300 mm 镜头 L_5 将标准具形成的干涉条纹成像到像增强 CCD 的光敏面上,最后通过计算机存储处理数据。

微调凹球面反射镜将背向接收散射光形成的干涉斑与前向接收散射光形成的干涉斑在垂直方向分开,CCD 上就记录了两行干涉斑。需要注意的是,收集的背向散射光由于增加了一次反射,因而在 CCD 上的成像在空间上会左右对调,数据处理时需要进行校正。实验采用马赫数 1.5 拉瓦尔

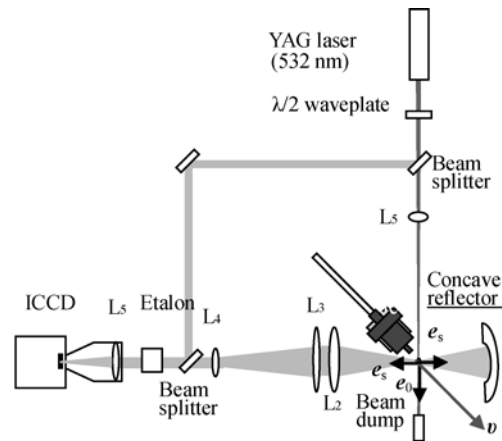


图 6 正交两速度分量同时测量的多点测速系统示意图
Fig. 6 Schematic of multi-point two-component velocity measurement system

的喷管获得高速气流,喷管出口口径为 2 mm,气源为压缩空气。喷管气流方向与入射光成 25.5° ,测量点位置如图 7 所示,其中轴向定位 X 轴,喷管径向定位 Y 轴。

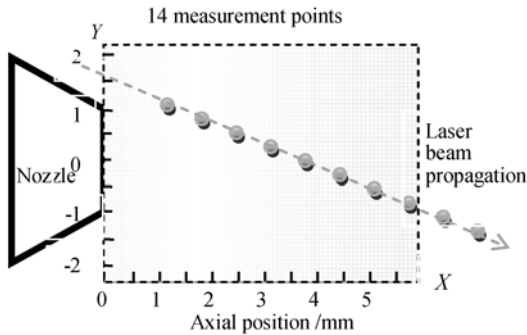


图 7 测量位置示意图

Fig. 7 Locations of measurement points

4 数据处理方法及正交两速度分量的流场多点测量结果

4.1 数据处理

4.1.1 干涉圆环圆心和半径测量

图 8 为获得典型的两速度分量干涉测量图像。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^[9]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 9 所示(彩图见期刊电子版),其中红线为与干涉环环心匹配的模拟圆环。

4.1.2 干涉图像坐标变换

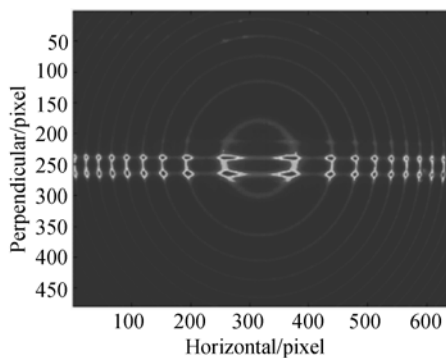


图 8 流场干涉测量图像

Fig. 8 Interference fringe image of flow

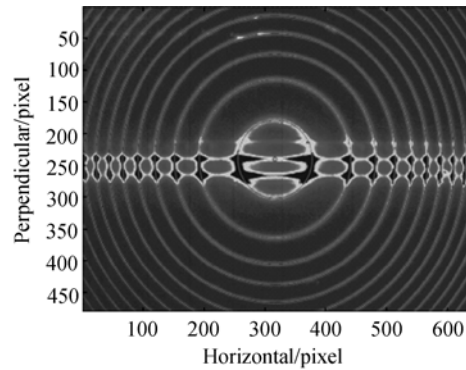


图 9 干涉环圆心和半径匹配结果

Fig. 9 Matched result of interference fringe center and radius

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 10 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(约为 10 GHz)。上层为背向散射光的干涉斑,而下层为前向散射光的干涉斑。从图 10 可以看出,流场散射光干涉斑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。

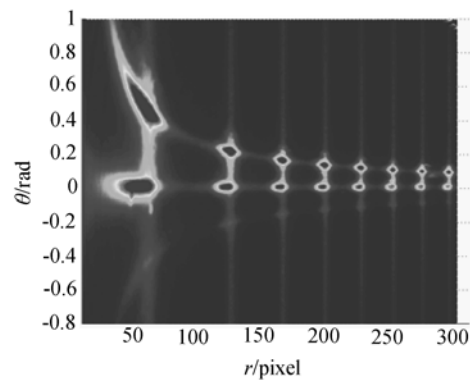


图 10 流场干涉图像转换结果

Fig. 10 Result of transformation for gas flow interference fringes

4.1.3 散射斑中心频移测量及速度计算

图 10 中,每条竖线可以确定参考入射激光的光谱分布,再根据公式(4)通过阻尼最小二乘法^[10-11]曲线拟合确定每个散射斑的中心偏移 $\Delta\nu$ 。

拟合结果如图 11 和图 12 所示。其中,图 11 为典型前向散射的干涉光谱曲线拟合结果,图 12 为背向散射的干涉光谱曲线拟合结果。图中,散射斑中心的偏移即为散射斑的多普勒频移值,通过公式(1)即可获得流场对应点的速度。图 11 中前向散射斑中心的频移为 (0.944 ± 0.005) GHz,计算得到流场对应点的速度分量 v_{\parallel} 为 (355 ± 2) m/s。图 12 中背向散射斑中心的频移为 (0.423 ± 0.007) GHz,计算得到流场对应点的速度分量 v_{\perp} 为 (159 ± 3) m/s。

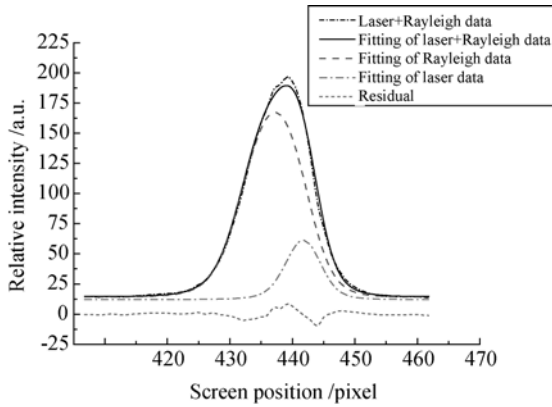


图 11 前向散射的干涉光谱曲线拟合结果

Fig. 11 Fitting results of forward scattering interference spectrum curves

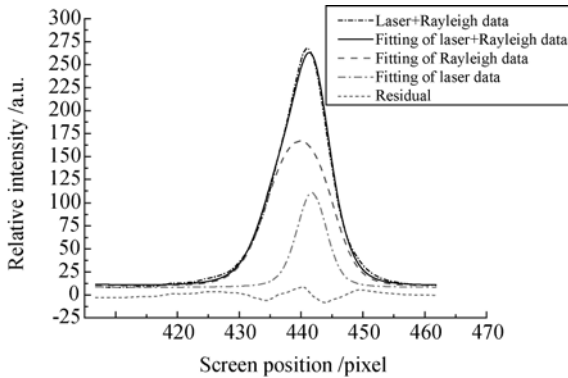


图 12 背向散射的干涉光谱曲线拟合结果

Fig. 12 Fitting results of backward scattering interference spectrum curves

4.2 正交两速度分量的流场多点测量结果

图 13 为喷管出口 1.5 ~ 7 mm 处的典型正交两速度分量的多点测量结果。图 14 为根据 V_{\parallel} 和 V_{\perp} 计算得到的 x - y 平面的(即轴向-径向平面)流场速度矢量图。矢量的起点为对应流场的空间位置,箭头指向在 x - y 平面的速度方向,矢量长度代

表速度大小。从图中可以看出,在靠近喷管轴心的流场速度方向与 x 轴平行,而偏离轴心的流场速度方向向外,与流场的规律基本吻合。

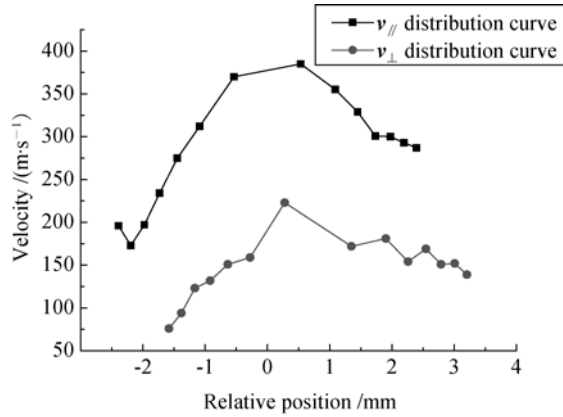


图 13 典型正交两速度分量的多点测量结果

Fig. 13 Typical results of multi-point two-component velocity measurement

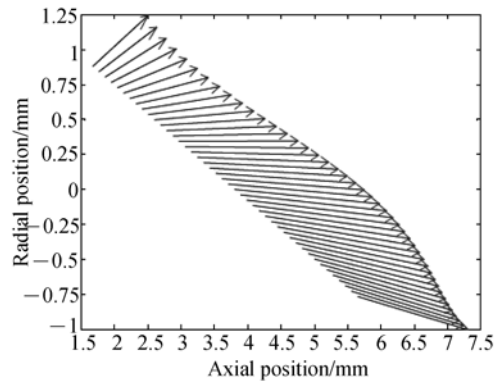


图 14 x - y 平面流场速度矢量图

Fig. 14 Velocity vector graph of flow in x - y plane

5 结 论

本文建立了正交两速度分量同时测量的多点干涉瑞利散射测速系统,采用凹球面球反射镜将背向散射光反射并聚焦返回到原探测点,与前向散射光一起收集到检测光路中,实现了正交两个方向上速度分量的测量。采用图像相关检测的方法精确确定了干涉环的圆心位置,采用阻尼最小二乘法拟合光谱曲线得到了散射光干涉斑的多普勒频移,并计算相应的速度。获得了马赫数为 1.5 喷管出口 1.5 ~ 7 mm 自由射流在 x - y 平面内正交的两个速度分量,并给出了速度矢量图,其速度分

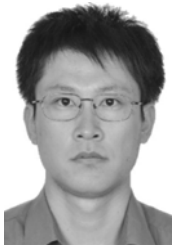
布与流场基本吻合。实验结果表明,该测速系统

能够实现流场正交两速度分量的同时测量。

参考文献:

- [1] 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.
HU ZH Y, LIU J R, GUAN X W, *et al.*. Study on laser diagnostics applied to combustion and flame[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(5): 702-706. (in Chinese)
- [2] 刘晶儒,胡志云,张振荣,等.激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2):284-296.
LIU J R, HU ZH Y, ZHANG ZH R, *et al.*. Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 284-296. (in Chinese)
- [3] 张志荣,夏滑,董凤忠,等.利用可调谐半导体激光吸收光谱法同时在线监测多组分气体浓度[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11):2771-2777.
ZHANG ZH R, XIA H, DONG F ZH, *et al.*. Simultaneous and on-line detection of multiple gas concentration with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2771-2777. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 23(1):261-304.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] RAMSEY M C, PITZ R W. Template matching for improved accuracy in molecular tagging velocimetry [J]. *Exp. Fluids*, 2011, 51:811-819.
- [10] 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.
WANG SH, HU ZH Y, ZHANG ZH R, *et al.*. Temperature estimation of coherent anti-stokes Raman scattering spectra using Levenberg-Marquardt algorithm [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11):2565-2570. (in Chinese)
- [11] 侯俊峰,王东光,邓元勇,等. 斯托克斯椭圆偏仪的非线性最小二乘拟合偏振定标[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8):1915-1922.
HOU J F, WANG D G, DENG Y Y, *et al.*. Nonlinear least-square fitting polarization calibration of Stokes ellipsometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 1915-1922. (in Chinese)

作者简介:



王 晟(1977 -),男,山东乳山人,硕士,工程师,1999年于天津大学获得学士学位,2008年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: wangsheng@nint. ac. cn



张振荣(1974 -),男,陕西蒲城人,硕士,副研究员,1997年于西北工业大学获得学士学位,2004年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: zhangzhenrong@nint. ac. cn