文章编号：1000-5773(2012)04-0402-07

具有速度谱分辨能力的角色散FP干涉测量技术*

陈光华，李泽仁，刘　俊，刘寿先，彭其先，袁树云，阳庆国

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳　621900）

摘要：发展了可用于速度谱诊断的角色散Fabry-Perot干涉测量技术，使不同频移探测激光形成的干涉条纹在空间分离，从而可对单一或混合运动源引起的多普勒频移成分进行检测，并给出物体速度谱分布。利用Fabry-Perot干涉测量技术，开展了激光驱动铝箔飞片实验。随着驱动激光能量的变化，观察到了铝箔飞片的不同速度谱分布，包括没有速度空间分散的速度谱、分裂成几片并以不同速度飞行的离散速度谱、碎片云或射流状态下的连续速度谱分布，此外还观测到了冲击下铝箔/玻璃界面分离引起的条纹分裂现象。

关键词：Fabry-Perot干涉仪；角色散；速度谱；激光驱动飞片

中图分类号：O521.3；TN247　　**文献标识码**：A

1　引　言

基于多普勒频移原理的激光干涉测速技术，包括任意反射面速度干涉仪（Velocity Interferometer System for Any Reflector，VISAR）[1-3]、光子多普勒速度仪（Photon Doppler Velocimetry，PDV）[4-5]和Fabry-Perot干涉仪[6-12]，可以非接触测量瞬态高速运动物体的速度历史，在爆轰波与冲击波研究、材料动态特性研究等动高压物理研究中具有广泛的应用。目前针对单一物体或运动源（如飞片、飞层、弹丸）的速度测量，采用VISAR和PDV测速技术均可以获得理想的结果。但是对于多个运动源的多普勒频移混合情况，如飞片碎裂成几块或形成碎片云、射流，以及多个透明反射界面同时运动，目前还没有成熟有效的测量方法。虽然线/面成像VISAR测速技术有可能对空间可区分的大块碎片进行诊断，PDV技术有可能对若干离散的速度历史进行诊断，但是对于碎片云、射流等密集混合运动源，是无法测量的。针对这种情况，本研究发展了角色散Fabry-Perot（FP）干涉测速技术，可以对单一运动源或混合运动源引起的多普勒频移成分进行检测。

2　测量原理

角色散FP干涉仪利用多光束干涉，在镜头焦平面形成细锐的同心圆环状干涉条纹，干涉环直径与激光的多普勒频移有关，条纹半高宽远小于条纹间距。根据这一特点，不同速度的物体反射的激光将形成不同直径（峰-峰距离）的干涉环，从而可以被分别检测，如图1所示，其中：D_{kj}的下标k表示运动源编号，j表示条纹级数，r为距干涉环中心的距离，I为相对光强。图1中分属不同k的干涉环亮度不同，表示对应运动源的反射光强不同。

*　**收稿日期**：2011-11-01；**修回日期**：2012-04-28

基金项目：国家自然科学基金（11075145）

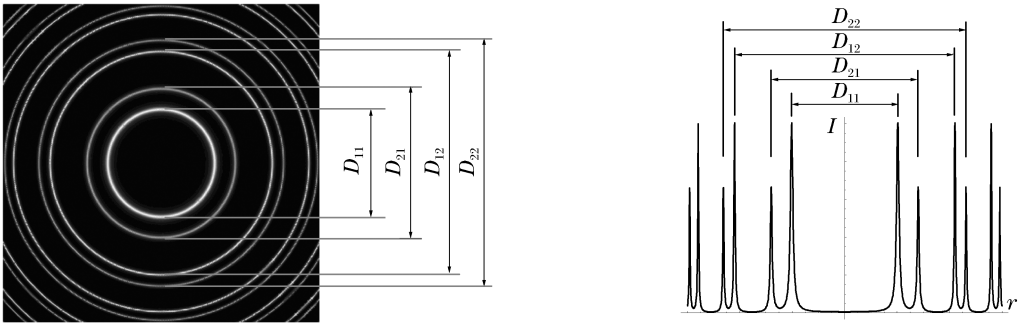
作者简介：陈光华（1973－），男，硕士，副研究员，主要从事瞬态激光干涉测试技术研究.

E-mail：chenghmail@yahoo.com.cn

当入射激光、反射激光和物体运动方向在同一直线上时,干涉环直径与相应运动源速度有如下关系

$$u = K\frac{D_{kj}^2 - D_{kj0}^2}{D_{li}^2 - D_{l(i-1)}^2} \tag{1}$$

式中:D_{kj0}、D_{kj} 分别为运动源 k 的 j 级干涉环静态和动态时的直径,D_{li} 和 $D_{l(i-1)}$ 分别为任意时刻运动源 l 的任意相邻两级干涉环直径,K 为 FP 干涉仪的条纹常数。



(a) FP interference rings　　(b) Radial intensity distribution

图 1　具有离散速度谱特征的 FP 干涉环及其径向光强分布模拟结果

Fig. 1　Simulated diagrams of FP interference rings and their radial intensity distribution with feature of discrete spectrum of velocities

速度谱可分为离散速度谱和连续速度谱:当若干分立的物体以不同的速度运动时,速度谱类似线状光谱,为离散速度谱;当物体在一定速度范围连续分布时,如碎片云和射流,速度谱类似连续光谱,为连续速度谱。速度谱随时间的变化形成速度谱历史。离散速度谱的谱线强度表示运动源的反射光强度。在某些情况下,若不关心运动源的反射光强度而只关心运动源的速度历史,如测量多个透明界面的运动速度时,则速度谱历史可用同一坐标系下绘制的若干条速度历史曲线来表示,采用(1)式可以计算出每个运动源的速度历史。

对于连续速度谱,必须考虑反射光强度,将速度谱表示成 $I_s(u)$,代表速度为 u 的粒子群的反射光强所占权重。反射光强与粒子的密度、质量、尺寸和种类有关,在一定条件下可以从速度谱推断出粒子的密度-速度分布、质量-速度分布或尺寸-速度分布。FP 干涉环的光强分布是各个速度粒子群反射光形成的基元 FP 干涉环光强分布的线性叠加,可表示成

$$I(r) = \int_{-\infty}^{\infty} I_s(u) I_e(u,r)\,\mathrm{d}u \tag{2}$$

式中:$I(r)$为 FP 干涉环的相对光强分布,$I_e(u,r)$代表速度为 u 的粒子群的基元 FP 干涉环相对光强分布。假设干涉仪标准具两端面的反射率相同,且标准具没有吸收损耗,则

$$I_e(u,r) = \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2}\sin^2\left(\frac{\omega_0\tau}{2} + \frac{\pi u}{K} - \frac{\omega_0\tau r^2}{4f^2}\right)\right]^{-1} \tag{3}$$

式中:R 为标准具端面反射率,ω_0 为静态时进入干涉仪的激光角频率,τ 为静态时激光在标准具两个端面之间反射一个来回所需的时间,f 为干涉仪镜头焦距。

给定一个半高宽为 300 m/s、平均速度为 1 000 m/s 的模拟连续速度谱分布,K=1 000 m/s,R=0.9,FP 干涉环和光强分布曲线如图 2 所示,其中 $I_e(u,r)$中 u=1 000 m/s。

利用(3)式,(2)式可以变换成卷积形式,即

$$g(u) = I\left[\left(\frac{4\pi f^2 u}{\omega_0\tau K}\right)^{1/2}\right] = I_s(u) \otimes I_e(-u,0) \tag{4}$$

(4)式提供了一种利用傅立叶变换反演速度谱分布的方法。实际上,还可以采用更简单的处理方法。当 $R\to 1$ 时,$I_e(u,r)$具备 δ 函数的某些性质,即:r 一定时,只有当 u 取特定值时,$I_e(u,r)=1$,当 u 取其它值时,$I_e(u,r)=0$,因此有

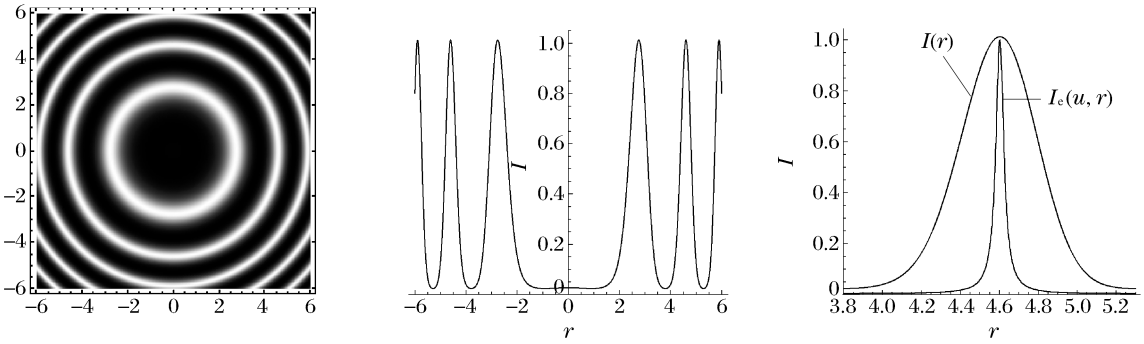
$$I(r) \propto I_s\left[\frac{K\omega_0\tau(r^2-r_a^2)}{4\pi f^2}\right]=I_s\left(K\frac{r^2-r_a^2}{r_i^2-r_{i-1}^2}\right) \tag{5}$$

式中：r_a 为静态时待处理干涉条纹的波峰到环心的距离，r_i 和 r_{i-1} 分别为静态时任意两级相邻干涉条纹的波峰到环心的距离。由(5)式可推出

$$I_s(u) \propto I\left\{\left[\frac{u}{K}(r_i^2-r_{i-1}^2)+r_a^2\right]^{1/2}\right\} \tag{6}$$

真正的 FP 标准具的端面反射率通常不会超过 98%，因此 $I_e(u,r)$ 也就不会象 δ 函数那样尖锐，但是只要 $I_e(u,r)$ 的条纹半高宽远小于 $I(r)$ 的条纹半高宽，就可以采用(6)式进行近似处理。

对于连续速度谱测量，还需要确定最大谱宽和谱分辨率。最大谱宽就是 FP 系统的条纹常数 K，如果速度谱的宽度超过一个条纹常数，则相邻干涉条纹的光强分布将发生重叠。谱分辨率 Δu 由条纹精细度 S 和条纹常数 K 共同决定，且 $\Delta u=K/S$，其中条纹精细度 $S=\pi\sqrt{R}/(1-R)$。



(a) FP interference rings　(b) Radial intensity distribution　(c) $I(r)$, $I_e(u,r)$

图 2　具有连续速度谱特征的 FP 干涉环及其径向光强分布模拟结果

Fig. 2　Simulated diagrams of FP interference rings and their radial intensity distribution with feature of continuous spectrum of velocities

3　系统结构

测量系统采用中国工程物理研究院流体物理研究所自行研制的固定腔角色散 FP 干涉测速系统[11]，如图 3 所示。该系统由单频连续激光器(波长 532 nm)、光纤探头、激光准直器、标准具、镜头和条纹相机组成，条纹常数和最大谱宽为 1 000 m/s，条纹精细度约 20，谱分辨率约 50 m/s。条纹相机的狭缝沿干涉环直径方向截取干涉环，获得干涉环径向光强分布随时间的变化。

光纤探头为双透镜双光纤结构，中心发射透镜与接收透镜同轴，发射透镜将发射光纤出射的激光聚焦在直径约 1 mm 的光斑范围内，光斑距探头约 60 mm，接收透镜收集光斑照明区域内物体的反射激光并耦合到接收光纤中。利用该探头可以对直径为 1 mm 范围内的物体速度谱进行测量。当光斑照明区域内物体不同部位的速度谱不同时，测量到的谱线形状与光斑光强分布有关；当光斑照明区域内物体的速度谱处处相同时，测量到的谱线形状与光斑光强分布无关。

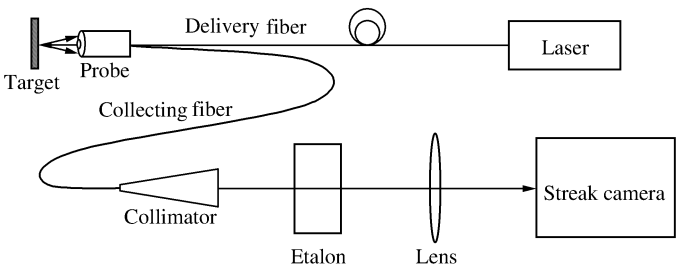


图 3　角色散 FP 干涉测速系统布局

Fig. 3　Layout of angular dispersion-type FP interferometer

4 实　验

利用脉冲激光驱动铝箔,测量铝箔飞片、碎片、碎片云等速度谱。实验装置如图 4 所示:将调 Q 受激布里渊散射压缩 Nd:YAG 激光器作为驱动源,波长为 1 064 nm,脉冲半高宽约 150 ps,最大脉冲能量约 300 mJ,光束直径约 9 mm;铝箔厚度为 7 μm,通过硅油粘贴在玻璃基底上;驱动激光经透镜压缩后辐照在铝箔表面,辐照光斑直径约 2 mm;探测激光辐照铝箔另一面。

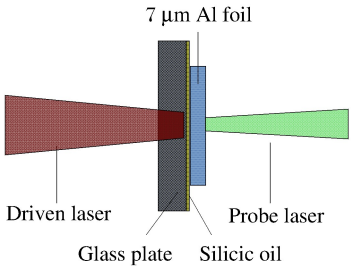
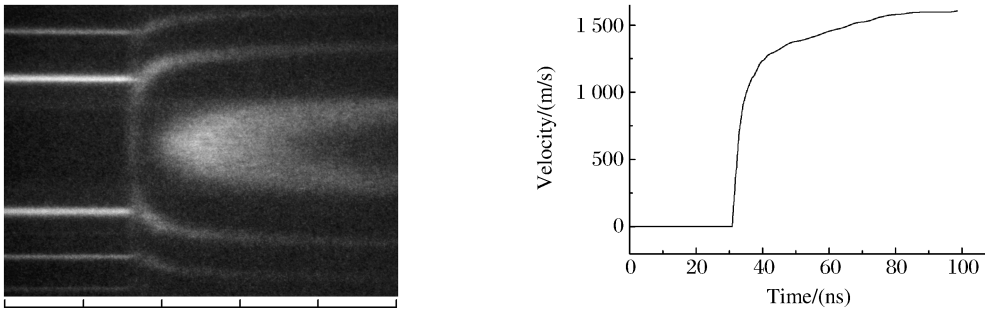


图 4　激光驱动铝箔装置

Fig. 4　Experimental set of laser driven aluminum foil

当驱动激光能量约为 250 mJ 时,获得的条纹扫描图像如图 5(a)所示,其中扫描方向为从左至右。对图 5(a)中的动态条纹和静态条纹进行比较,发现动态条纹没有分裂,并且基本没有发生展宽(靠近轴线的条纹本身较宽),因此可以判断铝箔是以平整的姿态飞出,可作为单一运动源处理。对条纹进行处理后得到速度曲线,如图 5(b)所示。

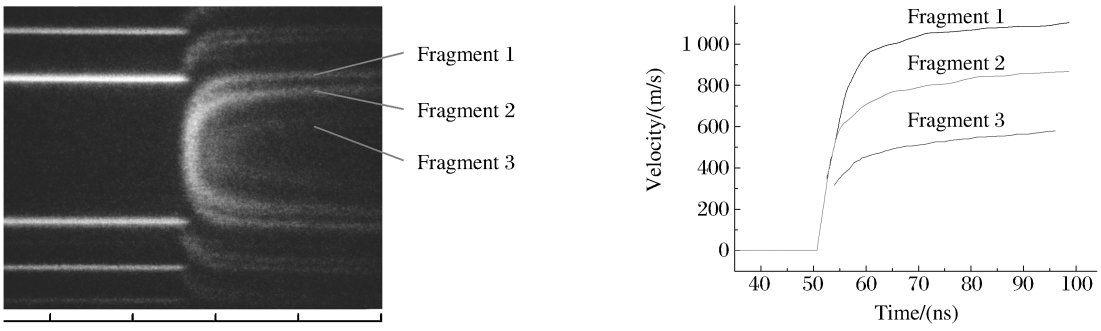


(a) Streak record of fringes, 20 ns/div　　(b) Velocity history

图 5　激光能量约 250 mJ 时的扫描图像和铝箔飞片速度历史

Fig. 5　Streak record and velocity history of aluminum foil when the laser energy is about 250 mJ

当驱动激光能量约为 68 mJ 时,获得的条纹扫描图像如图 6(a)所示。从图 6(a)中可以看到两组明显的条纹和一组不明显的条纹,这是铝箔碎裂引起的,其中两个碎片反射的探测激光较强,形成了两组明显的条纹,一个碎片反射的探测激光较弱,形成了一组不明显的条纹。对每组条纹进行处理,分别得到了 3 个碎片的速度曲线,即离散速度谱历史曲线,如图 6(b)所示。

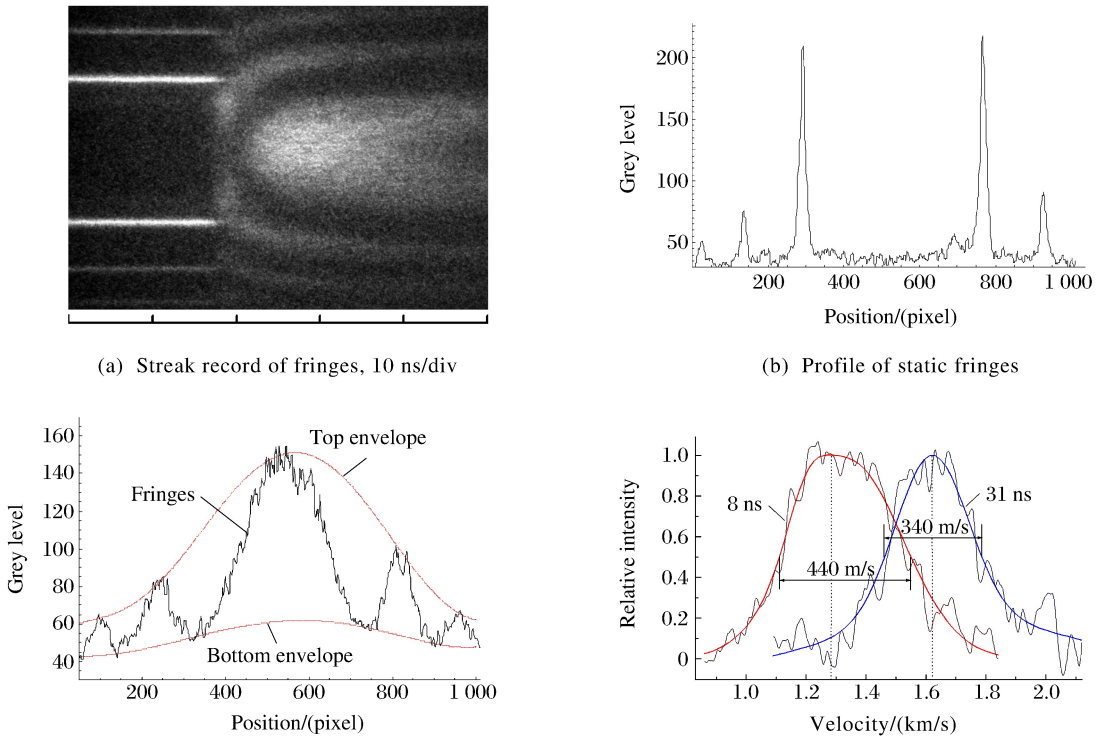


(a) Streak record of fringes, 20 ns/div　　(b) Discrete velocity spectrum history

图 6　激光能量约 68 mJ 时的扫描图像和铝箔碎片离散速度谱

Fig. 6　Streak record and discrete velocity spectrum of aluminum foil fragments when the laser energy is about 68 mJ

当驱动激光能量约为 120 mJ 时，获得的条纹扫描图像及铝箔碎片速度谱如图 7 所示。图 7(a)中，飞片起跳后的扫描条纹明显展宽，这是由于铝箔飞片变成碎片云，碎片云速度的空间分布具有较大的分散性。比较静态和动态条纹的剖面线形，可以看出，静态条纹的半高宽远小于动态条纹的半高宽，因此可利用(5)式进行速度谱反演计算。从图 7(c)中可以看出，条纹振幅不一致，并且有本底存在，因此处理时需要利用条纹包络曲线扣除本底使振幅一致。图 7(d)给出了飞片起跳后 8 ns 和 31 ns 两个时刻的碎片云速度谱分布。8 ns 时，谱线最大值对应的速度值即最可几速率为 1 280 m/s，表明该速度的碎片群有最大反射光强度，假设碎片群面积与反射光强度成正比，则该速度的碎片群占有最大面积；谱线半高宽为 440 m/s，表明大部分碎片集中在该速度范围内。31 ns 时，碎片云的最可几速率为 1 620 m/s，谱线半高宽为 340 m/s，可见最可几速率随时间增大，碎片集中度也随时间增大，即速度分散性随时间减小。



(a) Streak record of fringes, 10 ns/div

(b) Profile of static fringes

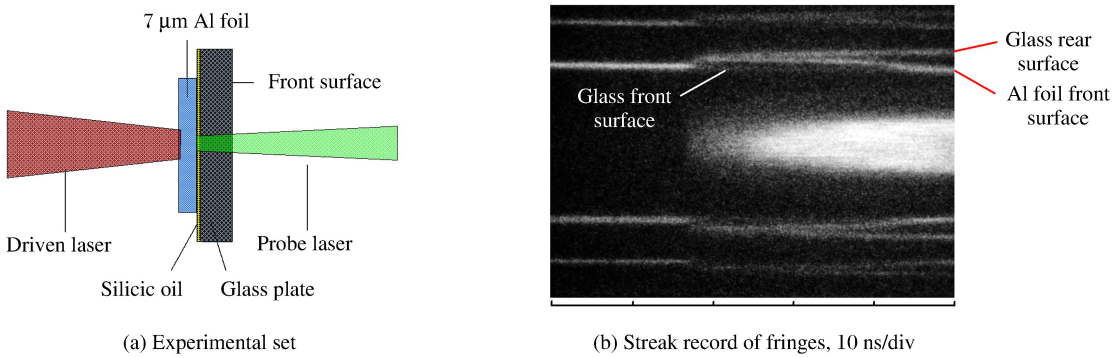
(c) Profile of dynamic fringes at 8 ns after the flyer jumping

(d) Continuous velocity spectrum at 8 ns after the flyer jumping

图 7 激光能量约 120 mJ 时的扫描图像、条纹剖面和铝箔碎片云连续速度谱

Fig. 7 Streak record, profiles of fringes and continuous velocity spectrum of aluminum foil fragment cloud when the laser energy is about 120 mJ

改变激光驱动方式，将驱动激光和探测激光的入射方向对调(实验装置见图 8(a))，此时玻璃基板起到窗口作用，得到的扫描图像如图 8(b)所示。从图 8(b)中可以看到两组动态条纹。经初步判断，这两组动态条纹对应两个运动界面，一个是铝箔前表面，一个是与铝箔接触的玻璃后表面。从条纹可以判断出：铝箔前表面速度有一个跳变，随后前表面速度逐渐降低；玻璃后表面速度在跳变后仍缓慢上升，表明铝箔/玻璃界面发生了分离。伴随动态条纹的还有一组从静态条纹水平延伸的弱条纹，这是由玻璃前表面反射激光形成的，表明前表面处于静止状态。该实验结果表明，对于空间位置不可区分的物体速度谱，角色散 FP 干涉测速系统具有一定的诊断能力。



(a) Experimental set　　(b) Streak record of fringes, 10 ns/div

图 8　激光能量约 242 mJ 时的激光驱动铝箔装置和条纹扫描图像

Fig. 8　Experimental set of laser driven aluminum foil and streak record when the laser energy is about 242 mJ

5　结　论

角色散 FP 干涉测量技术的特点在于具有很高的速度谱分辨能力。当探测激光的路径上有多个运动界面或物体时(如透明介质的前后表面、被测物体界面以及冲击波界面等),或者测点的不同区域具有速度差异时(如飞片破碎),因反射光中同时存在多个不同多普勒频率成分或者连续多普勒频率分布,普通的激光干涉测速技术无法分辨,采用角色散 FP 干涉测量技术可以解决这一难题,获得飞片、碎片、射流、多层界面等物体的速度谱诊断(包括离散速度谱和连续速度谱诊断)结果,并且对于空间可区分和空间不可区分物体的速度谱均具备诊断能力。

References:

[1] Barker L M, Hollenbach R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface [J]. J Appl Phys, 1972, 43(11): 4669-4675.

[2] Hemsing W F. Velocity sensing interferometer (VISAR) modification [J]. Rev Sci Instrum, 1979, 50(1): 73-78.

[3] Chen G H, Li Z R, Liu Y K, et al. Flyer velocity measurement using double-sensitivity VISAR [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(1): 70-74. (in Chinese)
陈光华,李泽仁,刘元坤,等. 用双灵敏度 VISAR 测量铜飞片自由面速度 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(1): 70-74.

[4] Strand O T, Goosman D R, Martinez C, et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques [J]. Rev Sci Instrum, 2006, 77(8): 083108.

[5] Wang D T, Li Z R, Wu J R, et al. An optical-fiber displacement interferometer for measuring velocities of explosively-driven metal plates [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(1): 105-108. (in Chinese)
王德田,李泽仁,吴建荣,等. 光纤位移干涉仪在爆轰加载飞片速度测量中的应用 [J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1): 105-108.

[6] Durand M, Laharrague P, Lalle P, et al. Interferometric laser technique for accurate velocity measurement in shock wave physics [J]. Rev Sci Instrum, 1977, 48(3): 275-278.

[7] Gidon S, Behar G. Instantaneous velocity field measurements－Application to shock wave studies[J]. Appl Opt, 1986, 25(9): 1429-1433.

[8] McMillan C F, Goosman D R, Parker N L, et al. Velocimetry of fast surfaces using Fabry-Perot interferometry [J]. Rev Sci Intrum, 1988, 59(1): 1-20.

[9] Goosman D R. Formulas for Fabry-Perot velocimeter performance using both stripe and multifrequency techniques [J]. Appl Opt, 1991, 30(27): 3907-3923.

[10] Goosman D R. The multibeam Fabry-Perot velocimeter: Efficient measurement of high velocities, UCRL-52000-96-7 [R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1996: 12-20.

[11] Chen G H, Liu S X, Liu Q, et al. Fabry-Perot interferometry for high-speed flyer velocities measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(11): 111201. (in Chinese)
陈光华,刘寿先,刘 乔,等. 用于高速飞片测量的法布里珀罗干涉测速技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(11): 111201.

[12] Chen G H, Liu S X, Li Z R, et al. Application analysis of angular dispersion Fabry-Perot velocity interferometry [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(6): 585-591. (in Chinese)
陈光华,刘寿先,李泽仁,等. 角色散 FP 干涉测速技术应用与分析 [J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 585-591.

Angular Dispersion-Type Fabry-Perot Interferometer with Velocity Spectral Resolution

CHEN Guang-Hua, LI Ze-Ren, LIU Jun, LIU Shou-Xian,
PENG Qi-Xian, YUAN Shu-Yun, YANG Qing-Guo

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: An angular dispersion-type Fabry-Perot interferometer is developed to measure the velocity spectrum. Using this interferometer, the interference fringes with different Doppler shift are separated from each other in space, then the Doppler shift arise from a single moving source or multiple moving sources can be detected, and consequently the velocity spectra are obtained. The laser-driven aluminum foil experiments are conducted by the angular dispersion-type Fabry-Perot interferometer. Different kinds of velocity spectrum are obtained as the driving laser energy is changed, including velocity spectrum without velocity dispersion in space, discrete spectrum corresponding to a few pieces of broken aluminum foil with different speed, and continuous spectrum caused by fragment cloud or jet. Moreover, the fringe splitting caused by foil/glass interface separation under shock pressure loading is also observed.

Key words: Fabry-Perot interferometer; angular dispersion; velocity spectrum; laser-driven flyer