

文章编号: 1001-1455(2011)06-0585-07

角色散 FP 干涉测速技术应用与分析^{*}

陈光华¹, 刘寿先¹, 李泽仁¹, 李 涛^{1,2}, 蒙建华¹, 郭江建¹, 刘 乔¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 发展了固定腔结构的角色散 FP 干涉测速系统, 干涉仪结构紧凑, 采用固定腔标准具, 实现了干涉条纹永久免调, 并且条纹常数的标定非常简单。该系统可用于靶面反射光强动态变化很大的场合, 在电炮驱动 Mylar 膜飞片实验中, 光强变化达 100 倍时仍然获得了很好的结果。分析了标准具厚度误差、标准具端面不平行、干涉条纹动态展宽和扫描图像畸变等因素对系统测量精度的影响以及系统的速度和时间分辨能力。

关键词: 爆炸力学; 速度测量; 电炮; 角色散 FP 干涉仪; 固定腔

中图分类号: O384; O436.1

国标学科代码: 130 · 3599

文献标志码: A

基于多普勒频移原理的激光干涉测速技术在高压物理、冲击波与爆轰波、材料状态方程、材料本构关系和动态响应特性、各种动高压加载技术的研究中应用广泛。目前发展的激光干涉测速技术包括 VISAR(测量任意反射面的速度干涉仪系统)^[1-4]、PDV(光子多普勒速度仪)^[5-6]和 FPI(Fabry-Perot 干涉仪)^[7-12]。VISAR 和 PDV 均得到了发展和应用, VISAR 得益于多年的发展, 是最成熟的一种技术, PDV 技术得益于近年来光电探测器和数字示波器带宽的极大提高, 也逐步获得了应用。而对 FP 干涉测速技术的研究不多^[13-14], 事实上, FP 干涉测速技术在一些著名实验室(如 LLNL)应用广泛^[9-12]。

角色散 FP 干涉仪与其他测速技术相比, 最直观的区别是测量信号形式上的改变, 前者记录的是条纹空间位置随时间的变化, 后者记录的是光强度随时间的变化。角色散 FP 干涉仪利用的是多光束干涉原理, 干涉条纹是很锐的细条纹, 空间位置只与激光的频率有关, 不受从靶面返回的散射激光的光强变化的影响。测出条纹位置的变化量就知道了多普勒频移即目标速度的大小。因此 FP 干涉仪可用于接收光强动态变化很大的场合, 而采用光强记录方式的测量系统则易受散射激光强度变化影响。此外, FP 干涉仪还具有体积小、调节简单、标定简单、具备速度谱分辨能力等特点。

本文中, 建立了一套角色散 FP 干涉测速系统, 下面将介绍该系统的工作原理、在电炮驱动 Mylar 膜实验中的速度测量结果, 并对该系统的测量精度、速度分辨能力和时间分辨能力进行分析。

1 系统结构和测量原理

角色散 FP 干涉测速系统由激光器、光纤探头、激光准直器、标准具、无穷远成像镜头和条纹相机组成, 如图 1 所示。激光器发出的 532 nm 波长的单频连续激光经光纤探头照射在目标靶的测量点上, 反射激光经探头和接收光纤进入光束准直器。光束在标准具内多次反射和透射, 最后经无穷远成像镜头在焦平面上形成细锐的同心圆环状干涉条纹, 如图 2 所示。条纹相机的狭缝位于镜头的焦平面上, 并且横穿同心圆环的中心。该系统在结构上的最大特点是采用了固定腔结构的干涉腔, 一个固体玻璃标准具就构成了干涉腔, 因此该系统的干涉条纹是完全免调的。

在无穷远成像镜头的焦平面上形成的干涉条纹的相对光强分布可表示成

$$I(\theta) = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)\sqrt{\gamma}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2 \gamma})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2 \gamma} \sin^2(\frac{2\pi n_1 h \cos\theta}{\lambda})} \quad (1)$$

^{*} 收稿日期: 2010-07-21; 修回日期: 2011-06-18

作者简介: 陈光华(1973—), 男, 硕士, 副研究员。

式中： R_1 和 R_2 分别为标准具两个端面的光反射率，通常 $R_1=R_2$ ， γ 为材料的光吸收导致的光经过一个来回后的透过率， λ 为激光波长， n_λ 为标准具材料对波长 λ 的折射率， h 为标准具厚度， θ 为入射光进入标准具后与端面法线的夹角。只有当 θ 取某些特定值时光强才取得极大值，激光的多普勒频移引起特定 θ 值的变化，从而引起干涉环直径 D 的变化。从干涉环直径可以反推频移的大小，从而算出物体速度。

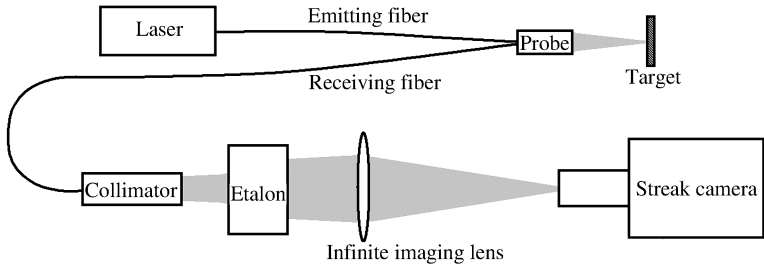


图 1 FP 干涉测速系统结构示意图

Fig. 1 Experimental arrangement for velocity measurement with FPI

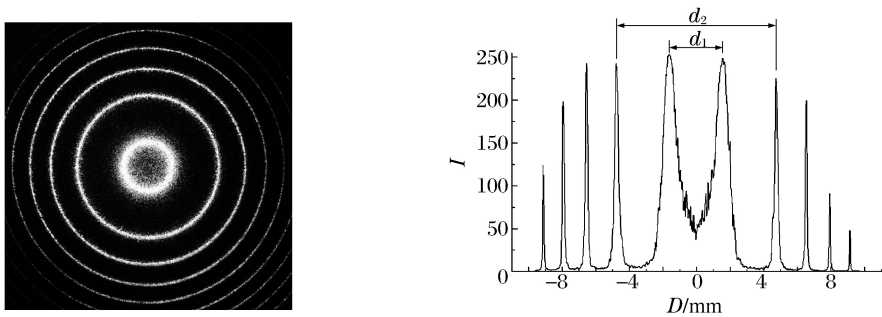


图 2 静态环状 FP 干涉条纹及其光强分布

Fig. 2 The static ring FP fringes and their intensity distributions

当探测激光入射方向、反射方向和目标速度方向一致时，可定义条纹常数 K 为引起条纹移动一个周期对应的速度变化量，

$$K = \frac{\lambda_0}{2\tau(1 + \sigma)} \tag{2}$$

式中： τ 为光在标准具来回反射一次所需的时间， $\tau = 2n_0h/c$ ； σ 为条纹常数修正系数（与标准具材料色散有关）， $\sigma = -\frac{\lambda_0}{n_0} \frac{dn}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0}$ ， λ_0 为静态时的激光波长， n_0 为标准具材料对该波长的折射率。可见 FP 干涉仪的条纹常数表达式与 VISAR 是一样的，但 σ 不同，需根据具体情况而定。目标速度为

$$u = K \frac{2}{\cos\alpha + \cos\beta} \frac{d_j^2 - d_{j0}^2}{d_i^2 - d_{i-1}^2} \tag{3}$$

式中： d_i 和 d_{i-1} 是任意相邻两级条纹（干涉环）的直径， d_{j0} 是任意 j 级条纹静态时的直径， d_j 是该级条纹动态时的直径， α 为入射激光与目标速度方向的夹角， β 为反射激光与目标速度方向的夹角。 $d_i^2 - d_{i-1}^2$ 近似为一个常数，即两个相邻干涉环之间的环形区域的面积是相同的，该特性可以用于校验记录的条纹是否是干涉产生以及扫描图是否有畸变。实际计算时，当第 j 级动态条纹超出图像边界或到达环心时，用 $j-1$ 或 $j+1$ 级动态条纹接着计算，并将两段速度曲线衔接。

2 实 验

测量目标为电炮驱动的 Mylar 膜飞片。电炮装置参数为：电容 56 μF ，电压 12.27 kV，铝桥箔厚 50 μm ，Mylar 膜厚 0.25 mm，飞片直径 10 mm。FP 干涉测量系统的参数为：条纹常数 1 km/s，相机满屏，记录长度 10 μs 。光纤探头发射的激光聚焦在 Mylar 膜飞片中心直径约 0.7 mm 的圆形区域，探头口

径对测点的张角小于 0.2 rad 。飞片和光纤探头装置如图 3 所示。为了提高激光的反射率并阻挡电爆炸时的强烈发光进入测量系统,在 Mylar 膜与空气接触的一面镀上约 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚的铝反射膜。为进一步过滤杂散光,在光束准直器上安装了中心波长 532 nm 、通带半高宽 1 nm 的窄带干涉滤光片。为了防止聚焦后的激光烧蚀铝反射膜和 Mylar 膜,在激光器出光口安装了声光开关,控制激光的照射时间。电炮的负载电流如图 4 所示。

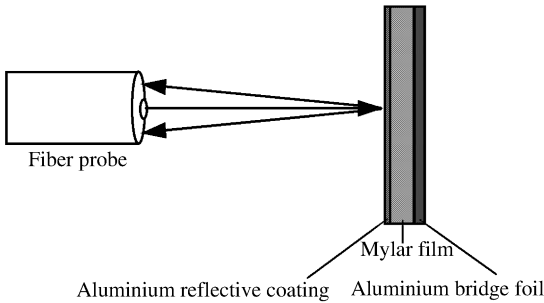


图 3 Mylar 膜飞片和光纤探头

Fig. 3 The mylar film flyer and fiber probe

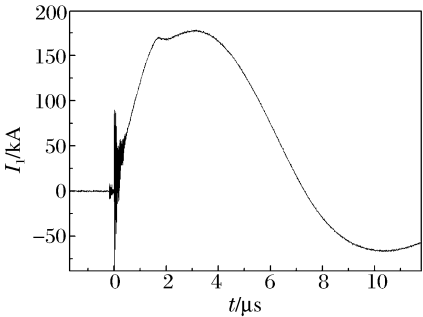


图 4 脉冲电流曲线

Fig. 4 The current pulse versus time

实验获得的条纹扫描图像如图 5 所示,图 5(a)为原始图像,图像的扫描方向为从左至右,图像左边的初始直条纹表示飞片还没有运动。从图 5 中可以看出,条纹的亮度在飞片启动后约 $0.5\text{ }\mu\text{s}$ 就急剧降低,以至肉眼几乎不能分辨,说明接收光强在急剧降低。图 5 中最亮的条纹和可处理的最暗的条纹的亮度相差 100 倍。为了有好的显示效果,对原始图像中有速度信息的一部分(白框包围区域)进行了增强处理,包括倾斜校正、截取、暗处增强、长宽比例调整等,最终效果如图 5(b)所示。对图 5 进行数据处理得到的飞片速度历史、位移历史和加速度历史如图 6 所示,可以看出,飞片开始加速很缓慢,启动后约 $0.9\text{ }\mu\text{s}$ 加速度达到最大,约 7 Gm/s^2 ,到 $2.7\text{ }\mu\text{s}$ 时速度达到 5 km/s ,整个过程飞片的加速基本平滑。

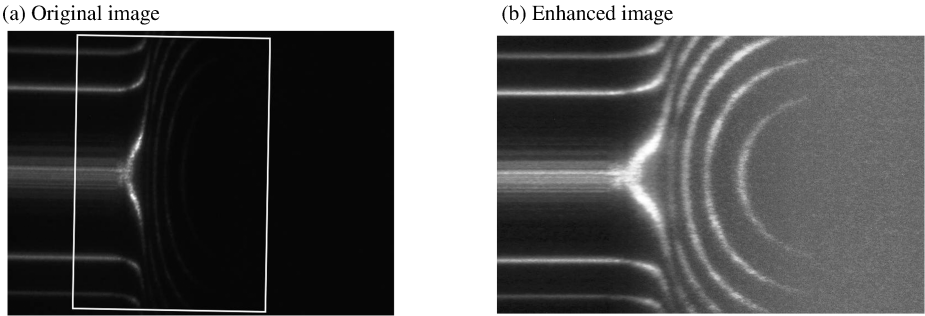


图 5 条纹扫描图像

Fig. 5 The swept fringes recorded by streak camera

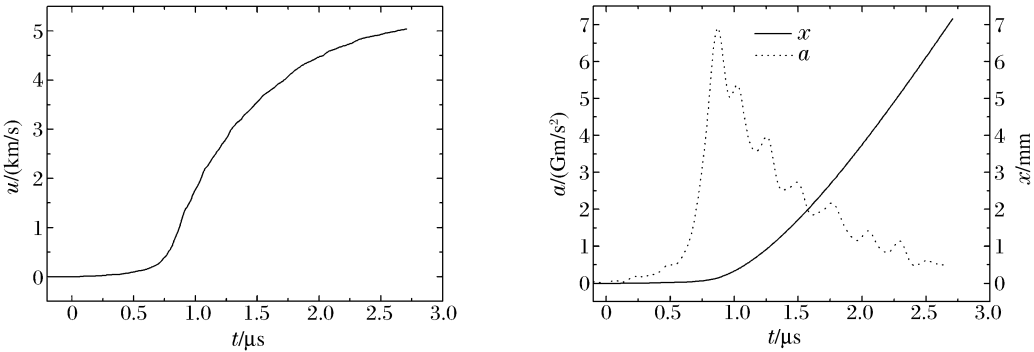


图 6 Mylar 膜飞片的自由面速度、位移和加速度历史

Fig. 6 The free surface velocity, displacement and acceleration histories of Mylar flyer

3 影响测量精度的因素

3.1 条纹常数

从式(3)可知,影响 FP 干涉测速系统测量精度的因素主要由条纹常数和干涉条纹 2 部分组成。从式(2)可推知,条纹常数误差由标准具厚度误差、标准具材料折射率误差和激光波长误差决定。这里不考虑材料折射率误差和激光波长误差。对条纹常数误差影响最大的是标准具厚度误差。该 FP 系统的干涉腔由一块厚 25.8 mm 的 UBK7 玻璃标准具组成,厚度的测量采用游标卡尺就可以达到 0.01 mm 精度,对应的条纹常数相对误差为 0.04%。因此该 FP 系统的条纹常数的标定是非常简单和精确的。与之对比,VISAR 系统结构复杂,干涉腔由多个分立和可调的光学元件组成,长度的标定不仅复杂,而且很难达到 0.1 mm 的精度。

3.2 干涉条纹

3.2.1 标准具端面不平行对干涉条纹的影响

不平行的端面引入了标准具不同部位的厚度差异。由公式(1)可知,标准具厚度 h 变化时,条纹极大值位置将移动。如图 7 所示,上下光束经过的标准具厚度不同,产生的条纹极大值位置将不对称,条纹向标准具变厚的方向移动;同时,不平行还会使焦平面发生倾斜,导致条纹锐度变化。假如标准具不平行度为 $1\text{ }\mu\text{rad}$,产生第 i 级条纹的激光在标准具端面与光轴相距约 1 cm,则第 i 级条纹极大值位置将移动约 $(d_i^2 - d_{i-1}^2)/50d_i$ 。不过,由于上下条纹移动方向相同,条纹直径的变化将远小于该值,对应的速度测量误差远小于 0.04 个条纹常数。实际应用中,为了减小不平行度的影响,应尽量缩小进入标准具的光束口径。

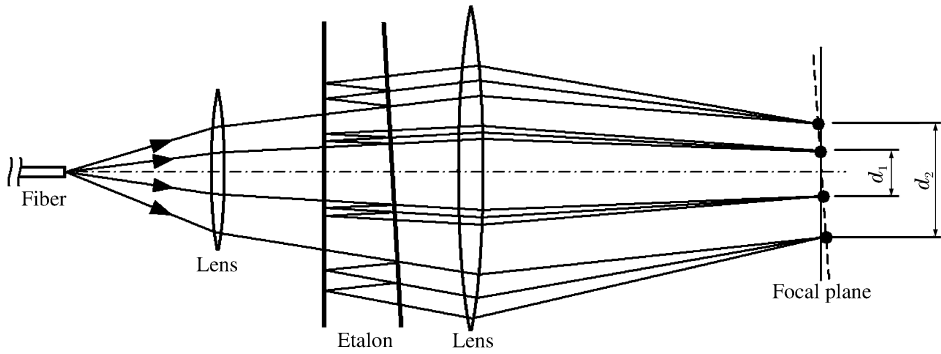


图 7 标准具端面不平行导致条纹位置变化示意图

Fig. 7 Schematic illustration of fringe shift induced by unparallel etalon surfaces

3.2.2 无穷远成像镜头畸变

无穷远成像镜头如果有畸变,条纹直径也将产生变化。不过,由于镜头的视场角很小,不超过 1° ,镜头本身也采用了消色差设计,所以畸变可以忽略。

3.2.3 条纹极大值位置判读误差

将条纹半高宽代入公式(3),可得到条纹极大值位置移动一个半高宽对应的速度偏差约等于 $K/2S$, S 为相邻条纹的平方距离与条纹平方半高宽的比值(即条纹精细度)。对于 $R_1 = R_2 = 0.88, \gamma = 0.98$ 的系统,理论上 $S \approx 23$ 。因此当条纹极大值位置判读精度达到条纹半高宽的 $1/5$ 的时候(通常的干涉计量都能达到该水平),由极大值位置判读误差引起的速度测量误差将小于 0.01 个条纹常数。

3.2.4 狭缝位置的偏离

条纹相机的狭缝如果偏离干涉环的圆心,会引入条纹直径在判读上的偏差,但 $d_i^2 - d_{i-1}^2$ 和 $d_j^2 - d_{j0}^2$ 的值并没有变化,因此不会引入速度测量误差。狭缝如果偏离无穷远成像镜头的焦平面,干涉条纹锐度降低,条纹判读精度将下降。

3.2.5 条纹相机的空间分辨率和畸变

条纹相机的点扩展函数使得干涉条纹被展宽,尤其是条纹锐度很高时,从而导致条纹极大值位置的判读精度下降。受点扩展函数的影响,位置快速变化的条纹将出现动态展宽,这是条纹的弥散斑在相机狭缝叠加的结果。如图 8 所示,假设干涉条纹本身为无限细,点扩展函数半高宽为 a ,则静态扫描条纹的半高宽也为 a ,但是动态扫描条纹的半高宽 b 显著增大,并且条纹变化越快,展宽越大。

条纹相机的扫描图像有一定的固有畸变,这在图像的上下边缘反映比较明显。由于速度计算对于边缘条纹直径的变化更敏感,增大了速度测量误差。假设靠近边缘的第 j 级动态条纹相对静态条纹有 ϵ 的畸变,则速度测量误差约 $2K\epsilon d_j^2/(d_i^2 - d_{i-1}^2)$ 。例如,在狭缝上出现 3 对条纹,第 3 对动态条纹有 0.5% 的畸变,其速度测量误差为约 0.02 个条纹常数。为了减小图像畸变对测量结果的影响,可以对畸变进行标定,再对动态实验图像进行消畸变处理。

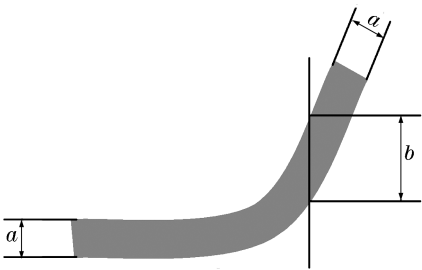


图 8 扫描条纹的动态展宽示意图
Fig. 8 Schematic illustration of dynamic broadening of swept fringe

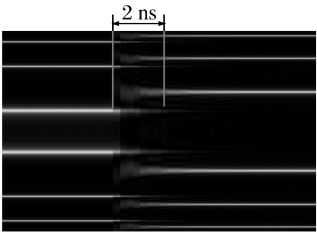
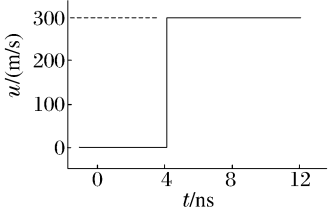
4 速度分辨和时间分辨

FP 干涉测速系统的速度分辨能力由条纹常数和条纹精细度决定。条纹精细度理论上只与标准具的端面反射率和材料吸收系数有关,有 $S = \pi(R_1R_2\gamma)^{1/4}/(1 - \sqrt{R_1R_2\gamma})$ 。实际上,条纹精细度还与条纹相机的空间分辨能力有相关。若条纹能分辨到半高宽的 $1/f$,则速度分辨为 K/fS 。

对于时间分辨能力,因为条纹相机的时间分辨很快,所以只考虑标准具的影响。通常,时间分辨可以认为是:以第 1 束光到达探测器的时间为零点,干涉光强达到最大值的一定比例所需的时间,设该比例为 ρ ,则所需时间为 $\tau(\ln(1 - \sqrt{\rho})/\ln(R\sqrt{\gamma}) - 1)$ 。通常取 $\rho = 70\%$,则此处系统时间分辨约 3.2 ns;若取 $\rho = 50\%$,则为 2.1 ns。

给定标准具参数,通过数值模拟给出的理想阶跃速度的 FP 干涉图像如图 9(a)所示,可以看出,在速度发生阶跃的情况下,条纹会产生交错,原条纹逐渐变弱,新条纹逐渐增强,持续约 2 ns。当速度曲线具有双曲正切函数形式,10%~90%上升沿为 2 ns 时,模拟干涉图像如图 9(b)所示,条纹上升沿与速度

(a) Velocity is a step function of time



(b) Velocity is a hyperbolic tangent function of time

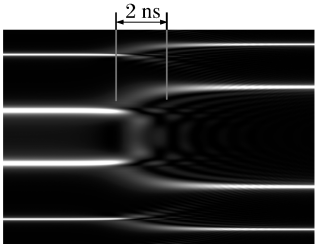
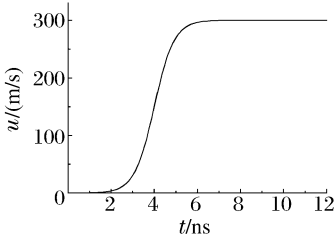


图 9 FP 干涉仪时间分辨能力模拟

Fig. 9 Simulation for temporal resolution of FP interferometer

曲线基本吻合。根据数值模拟的结果,可认为该系统的时间分辨为 2 ns,即 $\rho=50\%$ 对应的时间。

将速度分辨和时间分辨相乘得到速度时间分辨积,该值越小则系统综合性能越好。可以发现,速度时间分辨积与条纹常数无关,对于 $R=0.88, \gamma=0.98, \sigma=0.019$,条纹可以分辨到半高宽的 1/5 的系统,取 $\rho=50\%$,则速度时间分辨积为约 $\lambda/30$ 。

将 VISAR 系统的速度时间分辨积与 FP 系统对比。一般认为 VISAR 的时间分辨为 τ ,速度分辨为 1/20 个条纹常数,则速度时间分辨积为约 $\lambda/40$,可见 2 个系统的速度时间分辨积基本相当。在条纹常数相同时,FP 系统的时间分辨能力比 VISAR 差,但是速度分辨能力更好。采用大条纹常数,FP 系统可获得与 VISAR 相当的时间分辨和速度分辨能力,但是由于条纹相机的记录长度有限,往往为了获得较长的记录时间而牺牲时间分辨能力。

5 速度谱分辨

角色散 FP 干涉仪的细锐条纹位置由目标速度决定,当测点反射的激光含有不同的速度源产生的多普勒频移信息时,干涉条纹将同时出现在不同的径向位置,且条纹亮度由对应速度源反射的激光强度决定,只要记录下条纹分布,就可以分辨出速度的谱分布。图 10 为激光处于多模状态时的静态干涉图,反映了角色散 FP 干涉仪的频谱分辨能力,也间接反映了速度谱分辨能力。

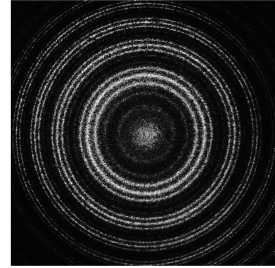


图 10 激光具有多个频率时的 FP 干涉图
Fig. 10 FP interferogram with multi-frequency laser

6 结 论

实验验证了角色散 FP 干涉仪是一种可靠、易用的速度测量系统。从仪器结构和实验结果来看,干涉仪具有以下特点:首先,采用整块玻璃结构的固定腔标准具,实现干涉条纹永久免调,干涉仪结构紧凑,使用方便;其次,检测的是细锐条纹的位置而非光强,因此适用于靶面反射光强动态变化很大的场合;第 3,干涉腔长度测量简单而且精确,引入的条纹常数测量误差很小;第 4,条纹的高锐度决定了干涉仪具有较高的测量精度;第 5,具有和 VISAR 系统基本相同的速度分辨和时间分辨能力;最后,也许是最重要的特征,角色散 FP 干涉仪具有速度谱分辨能力。有关速度谱测量的研究结果将另文发表。

参考文献:

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

[2] Hemsing W F. Velocity sensing interferometer (VISAR) modification[J]. Review of Scientific Instruments, 1979, 50(1):73-78.

[3] 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.
CHEN Guang-hua, LI Ze-ren, LIU Yuan-kun, et al. Flyer velocity measurement using double-sensitivity VISAR [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001,15(1):70-74.

[4] 陈光华,李泽仁,刘元坤,等. VISAR 数据处理新方法及程序[J].爆炸与冲击,2001,21(4):315-320.
CHEN Guang-hua, LI Ze-ren, LIU Yuan-kun, et al. VISAR data reduction method and program[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(4):315-320.

[5] Strand O T, Goosman D R, Martinez C, et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques[J]. Review of Scientific Instruments, 2006,77(8):083108.

[6] 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.
WANG De-tian, LI Ze-ren, WU Jian-rong, et al. An optical-fiber displacement interferometer for measuring veloc-

- ities of explosively-driven metal plates[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009,29(1):105-108.
- [7] Durand M, Laharrague P, Lalle P, et al. Interferometric laser technique for accurate velocity measurement in shock wave physics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1977,48(3):275-278.
- [8] Gidon S, Behar G. Instantaneous velocity field measurement: Application to shock wave studies[J]. *Applied Optics*, 1986,25(9):1429-1433.
- [9] McMillan C F, Goosman D R, Parker N L, et al. Velocimetry of fast surfaces using Fabry-Perot interferometry[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1988,59(1):1-20.
- [10] Goosman D R. Formulas for Fabry-Perot velocimeter performance using both stripe and multifrequency techniques[J]. *Applied Optics*, 1991,30(27):3907-3923.
- [11] Goosman D R. The multibeam Fabry-Perot velocimeter: Efficient measurement of high velocities[R]. Lawrence Livermore National Laboratory: Science and Technology Review, 1996:12-20.
- [12] Druce R L, Roeske F, Souers P C, et al. Propagation of axially symmetric detonation waves[R]. UCRL-JC-145022, 2002.
- [13] 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.
- CHEN Guang-hua, LIU Shou-xian, LIU Qiao, et al. Fabry-Perot interferometry for high-speed flyer velocities measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010,47(11):111201.
- [14] 唐孝容,李剑峰,张大勇,等. 高速运动飞片的 F-P 干涉测速技术研究[J]. *激光技术*, 2007,31(2):172-174.
- TANG Xiao-rong, LI Jian-feng, ZHANG Da-yong, et al. Measurement of high-speed flyer using F-P cavity interferometer[J]. *Laser Technology*, 2007,31(2):172-174.

Application analysis of angular dispersion Fabry-Perot velocity interferometry*

CHEN Guang-hua¹, LIU Shou-xian¹, LI Ze-ren¹, LI Tao^{1,2},

MENG Jian-hua¹, GUO Jiang-jian¹, LIU Qiao¹

(1. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*

2. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: A fixed-cavity angular dispersion Fabry-Perot velocity interferometer was developed by applying a solid etalon to realize that this interferometer's structure was compact, the interference fringes obtained by it were adjustment-free and its fringe constant could be easily and accurately calibrated. This interferometer was used in the experiment with an electric gun to accelerate a 10-mm-diameter, 0.25-mm-thick Mylar flyer. The interferometer gave good results even when the intensity of light reflected from the target changed 100 times. The measurement accuracy of the system was analyzed by taking account of etalon thickness error, unparallel etalon surfaces, fringe broadening, image aberration, and so on. And the velocity resolution and the temporal resolution were also analyzed.

Key words: mechanics of explosion; velocity measurement; electric-gun; angular dispersion Fabry-Perot interferometer; fixed-cavity

* Received 21 July 2010; Revised 18 June 2011

Corresponding author: CHEN Guang-hua, chenghmail@yahoo.com.cn