

用于高速飞片测量的法布里-珀罗干涉测速技术

陈光华 刘寿先 刘乔 蒙建华 李泽仁 彭其先 李涛 刘俊

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 利用多普勒频移效应,法布里-珀罗(F-P)干涉测量技术可用于瞬态高速运动物体的速度历程测量。研制了一套F-P干涉测速系统,包括激光器、光纤探头、F-P干涉仪和条纹相机。F-P干涉仪的条纹常数为1000 m/s,系统的时间分辨为纳秒级,速度分辨率可达到10 m/s。F-P干涉仪采用固定腔结构设计,干涉条纹无需调节,大大简化了实验操作。利用该系统进行了化爆加载飞片速度测量和电炮驱动飞片速度测量。测量到的化爆加载下的飞片速度达到了2 km/s,电炮驱动飞片的速度达到了5 km/s。

关键词 测量;法布里-珀罗干涉;速度测量;多普勒频移;飞片

中图分类号 O436.1

OCIS 120.0120 120.2230 120.3940

文献标识码 A

Fabry-Perot Interferometry for High-Speed Flyer Velocities Measurement

Chen Guanghua Liu Shouxian Liu Qiao Meng Jianhua Li Zeren
Peng Qixian Li Tao Liu Jun

(Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Fabry-Perot (F-P) interferometry can be applied to velocity history measurement for high-speed moving objects by using the Doppler effect. A F-P interferometer system has been developed with nanosecond temporal resolution and velocity resolution of 10 m/s. The system consists of a laser, a fiber probe, a F-P interferometer cavity and a streak camera. The fringe constant of the F-P interferometer is 1000 m/s. The interferometer cavity is a solid etalon, so the interference fringes need not to be adjusted and moreover greatly simplified the experiment operations. By using the system, the velocity measurements for explosive-driven flyers and electric-gun driven flyers are completed. The measured velocity of the explosive-driven flyer reaches 2 km/s, and the electric-gun driven flyer is 5 km/s.

Key words measurment; F-P interference; velocity measurement; doppler shift; flyer

1 引言

基于法布里-珀罗(F-P)干涉仪的激光干涉测速技术是研究高压物态方程、材料动态特性和本构关系等的有力工具,在冲击波物理与爆轰波物理、流体动力学等研究领域具有广泛的用途^[1~7]。也常用于高压声速测量^[8]、风速测量^[9]和应变测量等领域。F-P干涉测速系统可测量在几纳秒时间内就从静止加速到几十米每秒到几十千米每秒的物体运动速度,国外已将该技术作为爆轰冲击实验的基本诊断技术。F-P干涉测速利用的是多普勒频移效应和多光束干涉原理,干涉条纹在空间上的位置与激光的频移有关,即与飞片的速度有关。由于空间条纹的位置不受系统接收光强变化的影响,也不受光电响应特性的影响,因此F-P干涉测速技术有很好的稳定性。另外F-P干涉仪还具有速度谱分辨能力,当测量区域和路径上的光反射体具有速度分散性时,该分辨能力尤为重要。

收稿日期: 2010-04-27; **收到修改稿日期:** 2010-06-28

作者简介: 陈光华(1973—),男,硕士,主要从事干涉测试技术方面的研究。E-mail: chen_guanghua@sina.com

2 F-P 干涉测速原理

2.1 基于多普勒频移效应

如图 1 所示,激光从运动物体表面反射后,角频率 ω 将发生改变,设初始角频率为 ω_0 ,入射激光波矢与物体运动方向成 α 角,反射激光波矢与入射激光波矢之间的夹角为 β ,物体运动速度为 u 。反射后的激光角频率 ω 为

$$\omega = \frac{c + u \cos \alpha}{c - u \cos \beta} \omega_0. \quad (1)$$

通常情况下,入射激光、反射激光和物体表面的运动方向基本都在一条直线上,且 $u \ll c$,这时有

$$\omega = \left(1 + \frac{2u}{c}\right) \omega_0. \quad (2)$$

2.2 干涉条纹

F-P 干涉仪的核心部件是由两个反射率约 90% 的平行平面组成的标准具,可把入射光束分解为多光束,多光束在透镜焦平面形成细锐的干涉环,形成亮条纹的条件为

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_\lambda h \cos \theta = 2m\pi, \quad m \text{ is integer}. \quad (3)$$

式中 δ 为相邻两束透射光之间的相位差, λ 为激光波长, n_λ 为标准具介质对波长 λ 的折射率, h 为两平面之间的距离, θ 为光束与平面法线的夹角。由于多普勒频移效应引起激光波长的变化,所以只有 θ 角也相应改变才能保证满足亮条纹条件,也就是说在焦平面上的亮条纹的位置是随着 λ 的改变而改变的。测得某一级亮条纹位置随时间的连续变化,便测得了物体的连续速度。利用条纹相机可以记录条纹位置随时间的变化过程。干涉环被条纹相机的狭缝截取,狭缝上的条纹成像在光阴极上,再通过电子束扫描和荧光屏转换的方式被底片或 CCD 接收,形成条纹扫描图像,如图 2 所示。

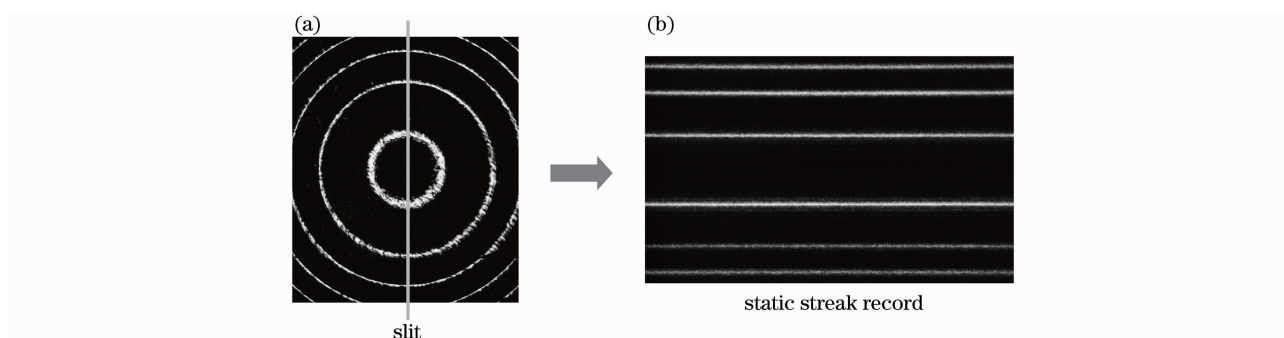


图 2 F-P 干涉环(a)和静态扫描条纹(b)

Fig. 2 F-P interference rings (a) and static steak record (b)

2.3 条纹常数

当入射激光、反射激光和物体表面的运动方向在一条直线上时,使条纹向外移动一个条纹间距的速度变化量为条纹常数。当标准具两个反射面之间的介质为空气时,根据(2),(3)式,可以求出条纹常数 K 为

$$K = \lambda_0 / (2\tau), \quad (4)$$

式中 $\tau = 2nh/c$,为光在标准具来回反射一次的时间,由于实际系统中 θ 角小于 1° , (4) 式已忽略了 θ (以下同样处理)。

当标准具两个反射面之间的介质为玻璃时,必须考虑玻璃材料的色散对条纹常数的修正。令条纹向外移动一个条纹间距的激光波长为 λ_1 ,物体静止时的激光波长为 λ_0 ,则有

$$2h \left(\frac{n_1}{\lambda_1} - \frac{n_0}{\lambda_0} \right) = 1, \quad (5)$$

式中 n_1 和 n_0 分别为玻璃对波长 λ_1 和 λ_0 的折射率。将折射率 n_1 对 λ_0 做泰勒级数展开,展开到一级,即可求出波长改变量(假设 h)为

$$(\Delta\lambda)_{S,R} = \frac{\lambda_0 \lambda_1}{2h \left(\lambda_0 \frac{dn}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0} - n_0 \right)}. \quad (6)$$

根据(2),(6)式可求出条纹常数为

$$K = \frac{\lambda}{2\tau(1+\sigma)}, \quad (7)$$

$\sigma = -\frac{\lambda_0}{n_0} \frac{dn}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0}$, 式中 σ 为条纹常数修正系数。

2.4 速度计算

因为 θ 角很小,(3)式可写成

$$\frac{2}{\lambda} n_\lambda h \left(1 - \frac{\theta^2}{2} \right) = \text{Int} \left(\frac{2n_\lambda h}{\lambda} \right) - i, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

式中 Int 是对表达式的数值向下取整,对于相邻的两级条纹,有

$$\theta_i^2 - \theta_{i-1}^2 = \frac{\lambda}{n_\lambda h} \approx \frac{\lambda_0}{n_0 h}. \quad (9)$$

考虑到实际情况下激光的频率改变量与频率的比值是很小的,如物体速度小于 15 km/s 时该比值小于 0.01%,因此 $\theta_i^2 - \theta_{i-1}^2$ 可以看成是一个常数。

对于同一级条纹,其动态 θ 值与静态 θ 值的关系为

$$\theta_j^2 - \theta_{j_0}^2 \approx \frac{2n_\lambda}{\lambda} \left(\frac{\lambda_0}{n_0} - \frac{\lambda}{n_\lambda} \right). \quad (10)$$

从(6),(9)和(10)式可得

$$\frac{\Delta\lambda}{(\Delta\lambda)_{S,R}} = \frac{\theta_j^2 - \theta_{j_0}^2}{\theta_i^2 - \theta_{i-1}^2}. \quad (11)$$

利用波长改变量与速度改变量成正比, θ 角与条纹直径成正比,以及(1)式,可得

$$u = K \left(\frac{2}{\cos \alpha + \cos \beta} \right) \left(\frac{D_j^2 - D_{j_0}^2}{D_i^2 - D_{i-1}^2} \right). \quad (12)$$

(12)式即为 F-P 激光干涉测速技术的速度计算公式。式中 D_j 和 D_{j_0} 是任意一级条纹动态时和静态时的直径, D_i 和 D_{i-1} 是任意两级相邻条纹的直径。

3 测量系统

F-P 干涉测速系统由激光器、激光收集和传输系统、干涉仪和条纹相机组成,如图 3 所示。光源采用连续输出的单纵模激光器,波长为 532 nm,能量 1~10 W。光纤耦合器将激光耦合进发射光纤,经光纤探头将激光照射在飞片表面的待测点上,光纤探头再收集从测点反射的激光并耦合进接收光纤。采用光纤作为传光介质可以大大增加测量系统的灵活性。

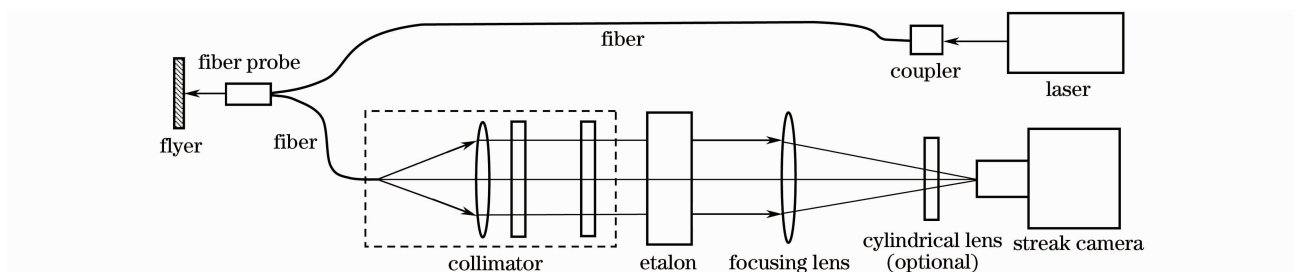


图 3 F-P 干涉测速系统

Fig. 3 Schematic layout of the F-P interferometer

光束准直器控制激光进入标准具的发散角,从而控制形成的干涉环的数量,一般在相机的狭缝上出现 2~3 对干涉条纹是合适的。这里的标准具采用整块玻璃的固定腔结构,免去了干涉条纹的调节,简化了实验操作。该标准具对应的条纹常数为 1000 m/s。标准具的两个反射面的反射率约为 90%,反射面的面形精

度均好于 $\lambda/20$, 平行度好于 $5 \mu\text{rad}$ 。球面透镜使多光束在透镜后焦面上形成圆环状的干涉条纹。根据需要, 短焦距柱面透镜沿与相机狭缝垂直的方向压缩干涉条纹以提高激光能量利用率。记录系统采用条纹相机以获得高时间分辨率, 其狭缝长度方向沿干涉环直径布置, 宽度通常为几微米到几十微米, 这样可以记录下干涉环的直径随时间的变化。

考虑到飞片的表面是漫反射面, 光纤探头口径有限, 且整个测量过程通常不超过几个微秒, 因此进入干涉仪的总激光能量是很少的。为了使时间分辨需达到纳秒量级, 需提高信噪比, 这需要更多的激光能量, 或者说增加相机狭缝上的干涉条纹的亮度。可以采用几种方式提高光能量, 首先采用非轴对称扩束的光束准直器。该准直器由一个球面透镜准直器和一个柱面镜扩束器组成, 球面透镜准直器使光束发散角尽量小, 柱面镜扩束器控制光束沿狭缝方向的发散角以获得需要形成的条纹数, 这样形成的干涉条纹是点状的, 如图 4 所示, 从而提高了干涉条纹的亮度。其次在狭缝前面增加一个短焦距的柱面透镜, 二者之间的距离等于柱面透镜的焦距, 柱面的轴与狭缝方向相同, 可以沿与狭缝垂直方向压缩干涉条纹, 从而增加狭缝上的干涉条纹的亮度。这种方式形成的干涉条纹不是全场锐利的, 只有一个窄条区域是锐利的, 但是考虑到狭缝本身的宽度很小, 因此并不影响实际使用。如果需要获得全场锐利的单向压缩条纹, 可以采用一组正交的柱面透镜来实现。增加激光能量利用率的方法还可以采用增加狭缝宽度来实现, 但这会牺牲一定的时间分辨率。此外, 采用在标准具的反射面上开缝的方法, 可以提高除中心干涉条纹以外的条纹的亮度^[4]。

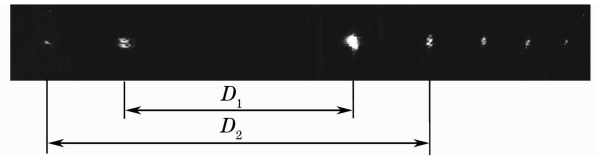


图 4 点状 F-P 干涉条纹

Fig. 4 Dot-like F-P fringes

4 实 验

利用该系统进行了爆轰加载飞片速度测量。爆轰加载实验装置如图 5 所示。激光经光纤探头垂直入射到飞片表面, 光纤探头距离飞片约 70 mm, 钢飞片厚度为 1.5 mm, T/Γ 炸药尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。在 T/Γ 炸药与飞片之间安装有铜箔探针, 用来产生一个同步触发信号。实验中雷管爆炸驱动传爆药柱爆轰, 传爆药柱再驱动 T/Γ 炸药爆轰, T/Γ 炸药的爆轰波传入钢飞片形成压缩冲击波, 冲击波在钢飞片内传播并到达飞片的自由面, 然后反射形成稀疏波, 稀疏波在飞片与爆轰产物接触的一面反射后形成压缩波又到达飞片自由面, 自由面的速度就在这种反复的脉冲波加载下不断升高。图 6 给出了两发实验中获得条纹扫描图像。

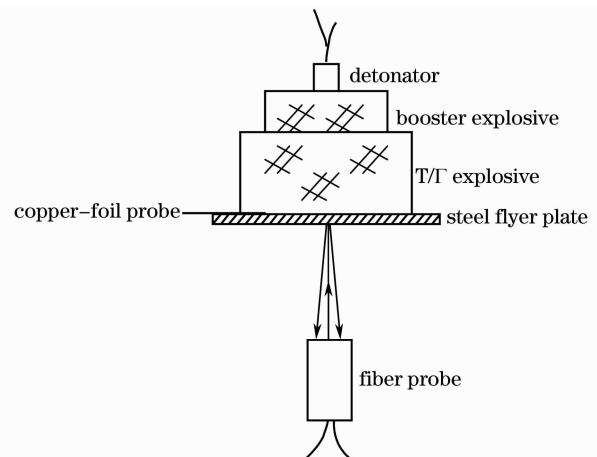


图 5 爆轰加载飞片装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the explosive device

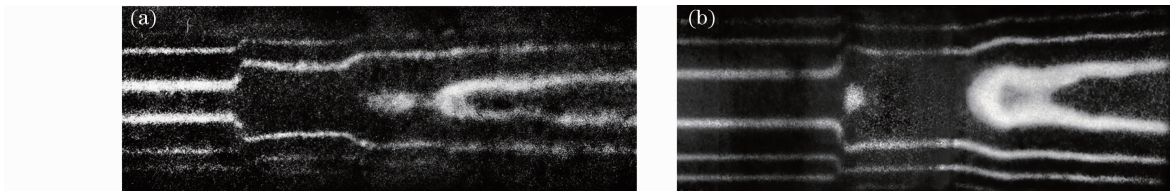


图 6 钢飞片的条纹扫描图像

Fig. 6 F-P records of the steel flyer plate

图 7 为从图 6(a) 中处理得到的飞片自由面的速度曲线。可以看出, 飞片自由面的速度在启动后约 50 ns 内在弹性前驱波作用下先从零加速到了约 100 m/s, 然后在压缩冲击波的作用下极快地上升到约 1.5 km/s, 由于该过程极快, 超出了系统的时间分辨率, 出现了条纹丢失现象, 如图 8 所示。图 8 是图 6(a) 的局部放大图, 可以看出条纹是断开的。假如条纹没有丢失, 则处理出来的第一个上升沿的峰值速度只有 500 m/s, 根

据爆轰物理判断这是不可能的。假如丢失了两个条纹，则速度将达到 2.5 km/s,判断这也与理论不符。因此判定丢失了一个条纹,左下方的条纹应与右上方的条纹相连,这样处理出来的速度就是 1.5 km/s。第一个上升沿过后,自由面速度缓慢下降,到第二个压缩波到达自由面时,速度又经历了一次较快的上升,但比第一次慢许多,条纹也没有丢失。同样还有第三个、第四个等更加缓慢的上升沿,由于记录长度的限制,没有记录到最终的速度,在 2 μs 时,速度为 2.05 km/s。对速度曲线求导得到的加速度曲线如图 9 所示,可看出曲线上出现了若干个峰,第一个峰是弹性前驱波引起的,紧接着是冲击波产生的一个很高的峰(因为丢条纹,峰值无法知道),该峰与第三个峰以及第三个峰与第四个峰之间的时间间隔均为 0.64 μs。

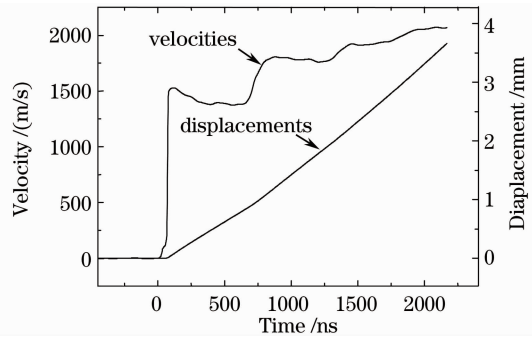


图 7 钢飞片自由面的速度-时间曲线和位移-时间曲线
Fig. 7 Free surface velocity-time and displacement-time graphs

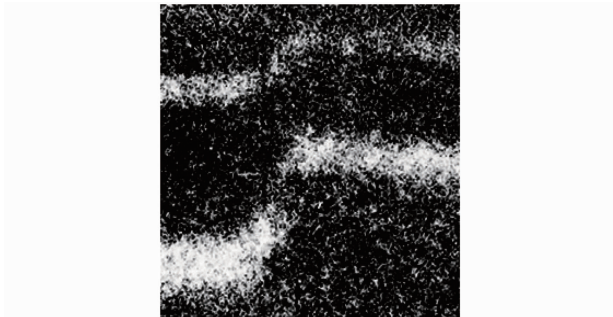


图 8 图 6(a)局部放大图
Fig. 8 Expanded view of Fig. 6(a)

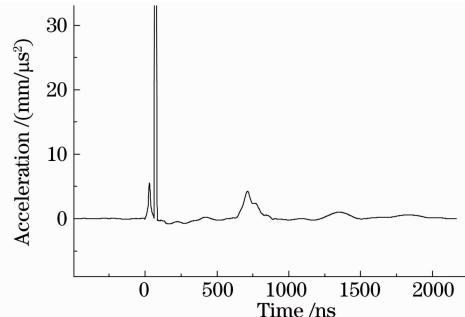


图 9 钢飞片自由面的加速度曲线
Fig. 9 Free surface acceleration of the steel flyer plate

利用该系统还测量了电炮驱动飞片速度。飞片装置如图 10 所示,铝桥箔厚 50 μm,米勒膜厚 0.25 mm,米勒膜上镀一层铝反射膜。铝桥箔在 170 kA,上升沿 1.2 μs 的脉冲电流作用下发生电爆炸并驱动米勒膜飞片。图 11(a)为条纹扫描图像,图 11(b)为处理得到的速度-时间曲线。

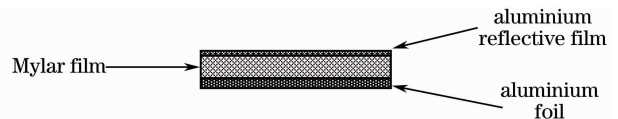


图 10 米勒膜飞片装置示意图
Fig. 10 Schematic diagram of the Mylar flyer

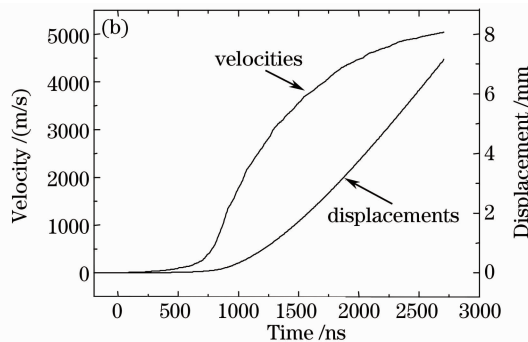
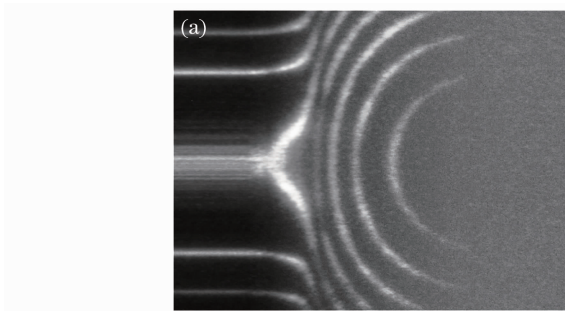


图 11 (a)米勒膜飞片的条纹扫描图像及(b)速度-时间曲线和位移-时间曲线
Fig. 11 (a) Fringe image and (b) velocity-time and displacement-time graphs of the Mylar flyer

从图中看出飞片的速度是平滑上升的,与爆轰加载下的跳跃式上升方式有很大不同。在 2.7 μs 时飞片速度达到了 5.04 km/s,位移为 7.16 mm。

5 结 论

建立了一套可用于高速飞片测量的 F-P 干涉测速系统,系统的条纹常数为 1000 m/s,采用条纹相机记录动态干涉条纹。该系统具有纳秒级的时间分辨率,速度分辨率达到 10 m/s。利用该系统进行了爆轰加载飞片速度测量和电炮驱动飞片速度测量。测量的爆轰加载下的飞片速度达到了 2 km/s,电炮驱动飞片的速度达到了 5 km/s。

参 考 文 献

- 1 M. Durand, P. Laharrague, P. Lalle *et al.*. Interferometric laser technique for accurate velocity measurement in shock wave physics[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1977, **48**(3): 275~278
- 2 S. Gidon, G. Behar. Instantaneous velocity field measurement: application to shock wave studies[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(9): 1429~1433
- 3 C. F. McMillan, D. R. Goosman, N. L. Parker *et al.*. Velocimetry of fast surfaces using Fabry-Perot interferometry[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(1): 1~20
- 4 D. R. Goosman. Formulas for Fabry-Perot velocimeter performance using both stripe and multifrequency techniques[J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(27): 3907~3923
- 5 W. C. Prinse, L. K. Cheng, H. J. Verbeek *et al.*. Application of a velocity interferometer to high speed phenomena[C]. *SPIE*, 1996, **2869**: 1042
- 6 Chen Guanghua, Li Zeren, Liu Shouxian *et al.*. Free surface velocity measurement of an explosive loading flyer plate by Fabry-Perot interferometer[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2006, **5**(4): 369~371
陈光华, 李泽仁, 刘寿先 等. Fabry-Perot 干涉仪测量爆轰加载下的飞片自由面速度[J]. *信息与电子工程*, 2006, **5**(4): 369~371
- 7 Tang Xiaorong, Li Jianfeng, Zhang Dayong *et al.*. Measurement of high-speed flyer using F-P cavity interferometer[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(2): 172~174
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
- 8 Li Min, Cui Qiliang, Li Fangfei *et al.*. The velocity and elastic constants in oxygen under high pressures and high temperature[J]. *Chinese J. High Pressure Physics*, 2008, **22**(3): 286~290
李 敏, 崔启良, 李芳菲 等. 高温高压条件下液态氧的声速及弹性系数研究[J]. *高压物理学报*, 2008, **22**(3): 286~290
- 9 Fahua Shen, Hyunki Cha, Jihui Dong *et al.*. Design and performance simulation of a molecular Doppler wind lidar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**: 593~597