

文章编号: 1001-3806(2007)02-0172-03

## 高速运动飞片的 F-P 干涉测量技术研究

唐孝容, 李剑峰\*, 张大勇, 陶彦辉, 刘海涛

(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实验室, 绵阳 621900)

**摘要:** 为了测试在冲击波或爆轰波作用下各种材料样品的自由面速度随时间变化的过程, 提出了一种利用法布里-珀罗 (F-P) 光学共振腔的选频特性进行多普勒频移绝对量的检测来连续测量飞片运动速度的方法, 建立了一套基于此方法的测量装置, 并利用金属箔电爆炸驱动聚酰亚胺薄膜飞片装置对所研制的 F-P 干涉测速仪进行了原理性实验验证。利用所研制的 F-P 干涉测速仪测量了飞片速度在 60ns 的时间内由静止加速到大于 3km/s 的速度的全过程, 测量数据的不确定度小于 5%。与其它激光测速装置相比, 该干涉仪具有体积小、结构简单紧凑和成本低的特点, 在爆轰物理与冲击波物理实验研究中具有较好的应用前景。

**关键词:** 激光技术; 多普勒效应; 法布里-珀罗光学共振腔; 选频

中图分类号: O348.11 文献标识码: A

### Measurement of high-speed flyer using F-P cavity interferometer

TANG Xiaorong, LI Jianfeng, ZHANG Dayong, TAO Yanhui, LIU Haitao

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** In order to measure the velocity history of the reflected surface or the internal particles velocity history of the materials under shock wave conditions on the basis of the frequency-selecting principle of F-P optical resonator a new type of velocity interferometer is developed which makes use of the absolute magnitude of Doppler shift to continuously measure the moving of a flyer speed. The flyer is driven by a electric exploding foil, the magnitude of its speed can reach up to 3km/s within 60ns. Preliminary results show that the uncertainty in data is less than 5%. Compared with other laser interferometers, the lately developed thin cavity interferometer is compact, simple and low cost. So it can be widely used in the detonation and shock wave physics experimental research.

**Key words** laser technique; Doppler effect; Fabry-Perot optical resonator; frequency selection

### 引 言

研究在强冲击波作用下测量各种材料性质的变化过程是目前冲击波物理和爆轰物理学研究的重要内容。对于测量强动载下的物质粒子速度或界面运动速度, 目前常用的有可测量任意反射面的速度干涉仪 (velocity interferometer system for any reflector, VISAR) 和传统的法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 干涉测速仪进行测速<sup>[1-4]</sup>。

由于 VISAR 系统后续结果依赖前期记录, 从而导致误差易累积, 当飞片加速度过大时, 产生的信号频率

会超出系统的响应频率, 在测量中易出现数据丢失。传统的 F-P 干涉测速仪在实际应用时是利用昂贵的高速扫描相机测量环纹直径变化来计算速度的<sup>[5]</sup>。由于其光学共振腔的厚度较大, 其时间响应较慢。

发展一种可应用于测量飞片高加速度高速运动过程的激光干涉测量技术, 对爆轰物理及冲击波物理的研究、促进相应测试技术的发展具有重要意义。作者研究了一种新的利用光学共振腔的选频特性进行多普勒频移绝对量的检测方法, 该方法与传统 F-P 测速方法相比, 具有更快的时间响应速度, 对电子学记录设备性能要求低、体积小、结构简单、成本低等特点。最近, 美国 LLNL 实验室也正在对多普勒频移绝对量测量技术研究。2004 年, 在 LLNL 的大型爆轰实验室、二级轻气炮以及内华达实验场成功地进行了数十发气炮及化爆加载实验, 并计划将该技术装备到内华达地下次临界爆轰实验室 ULA 和 JASPER 次临界气炮实验室<sup>[6]</sup>。这些实验的结果表明, 多普勒频移绝对量测量

基金项目: 中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金资助项目 (034500)

作者简介: 唐孝容 (1975-), 女, 助理研究员, 硕士研究生, 现从事光电子学测试技术方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: jianfeng81@sohu.com

收稿日期: 2006-01-11; 收到修改稿日期: 2006-03-01

技术是非常有价值的诊断技术。国内基于多普勒频移绝对量测量技术主要应用于振动、微位移、超声等准静态测量领域,构成工业压力传感器、水听器等产品,而基于多普勒频移绝对量测量技术的研究在爆轰物理及冲击波物理研究中涉及高速飞片等相关应用报道较少。

### 1 测量原理

激光干涉测速技术在原理上是利用光学多普勒效应。频率为  $f_0$  的激光入射到以速度  $v(t)$  运动的物体表面上,由于多普勒效应,从物体表面反射回来的信号光频率为<sup>[7]</sup>:

$$f(t) = f_0 [1 + 2v(t)/c] \quad (1)$$

式中,  $c$  为真空中的光速。反射光与入射光频率之差称为多普勒频移  $\Delta f$ , 它携带了物体运动速度的信息,由 (1) 式可知, 频率的变化  $\Delta f$  为:

$$\Delta f = f(t) - f_0 = 2v(t)f_0/c \quad (2)$$

传统的 F-P 干涉测速仪是试验样品在外力作用下运动时, 返回仪器的光束因多普勒效应使其波长发生变化, 经过 F-P 干涉仪将波长变化转换为环纹直径变化, 再由变相管扫描相机进行时间分辨记录。因此, 速度-时间信息是环纹直径-时间变化得到的。为提高系统的分辨能力, 在变相管扫描相机上得到清晰的图像, 就需要使用较厚的 F-P 标准具, 一般采用 50mm ~ 100mm 厚的体积较大的标准具, 其时间分辨能力一般约为 5ns, 这对研究爆轰过程中的高速飞片运动过程常常是不够的。

F-P 光学共振腔对于不同频率的光具有不同的透过率<sup>[8]</sup>:

$$T(f) = 1/[1 + F \sin^2(\Phi/2)] \quad (3)$$

式中,  $F = 4R/(1-R)^2$ ;  $\Phi = (\pi n f / c) \cos \varphi$ ;  $R$  为 F-P 光学共振腔的一个表面对入射光的反射率;  $f$  为出射光频率;  $\varphi$  为光线在内表面的入射角;  $l$  为 F-P 腔的腔长;  $n$  为介质折射率。一束平行光正入射于 F-P 腔, 则透射场也是一束平行光。光在 F-P 腔内多次反射和透射而相干, F-P 腔将入射光的连续宽光谱改变为透射光的准分立谱<sup>[8]</sup>, 这样, F-P 光学共振腔就起到了选频的作用。

选取合适的参数, 调节 F-P 腔的腔长, 使激光器的中心频率  $f_0$  透过, 从而使靶面运动产生的多普勒频移

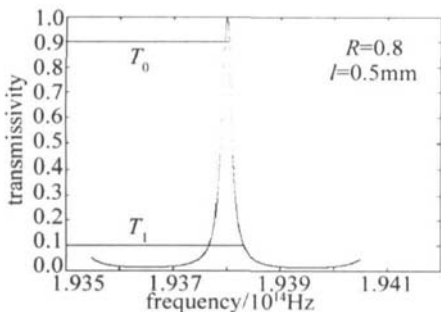


Fig 1 Relation of frequency and transmissivity

落在透过峰的线性区域<sup>[9]</sup>。图 1 是激光器的中心频率  $f_0 = 1.94 \times 10^{14}$  Hz 时, 相对透过率与频率的关系。线性区域  $T_0$  到  $T_1$  的频率变化  $\Delta f \approx 20$  GHz, 由 (2) 式可推知这一系统可测飞片运动速度的上限为 15.5 km/s。

新型 F-P 干涉测速仪的测试原理如图 2 所示。

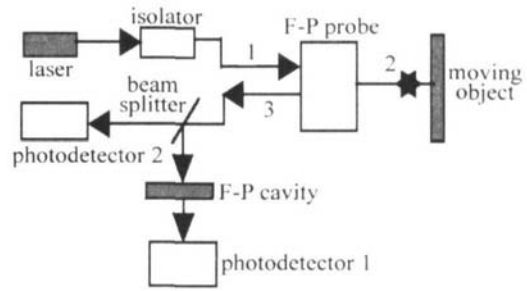


Fig 2 Schematic layout for test

从图 2 可见, 激光器发出的激光经过光隔离器后由 F-P 光探头端口 1 到端口 2 照射靶面, 并携带多普勒频移从靶面返回到光探头端口 3 再经过光分束器分成两束, 一束光垂直通过 F-P 光学共振腔产生干涉, 由光电探测器测量相干所产生的透射光强  $I_1$ ; 另一束光直接由光电探测器监测光强  $I_0$ 。F-P 光探头是由一个带孔双凸接收透镜和双凸发射透镜组成, 该探头具有接收效率高和景深可调的优点<sup>[10]</sup>。由此可以得到相对透射率  $T(f) = I_1/I_0$ , 以消除被测物体表面反射率变化及其它非多普勒效应引起的反射光强变化的影响。由 (3) 式可推导出:

$$T(f) = \frac{1}{1 - \frac{2R}{(1-R)^2} \left[ \cos 2\pi \left( K + \frac{2\pi f l}{c} \right) - 1 \right]} \quad (4)$$

式中,  $K$  值可通过电探针测得的飞片末速度来确定, 然后根据 (4) 式就反解出频率  $f$  进而可以得到速度-时间曲线。

### 2 实验设计及结果分析

实验采用波长为 532nm、线宽为 5MHz、输出功率为 1W 的固体激光器; F-P 腔长约为 1mm, F-P 薄腔的一个端面对入射光的反射率为 0.8, 中间介质为空气, 入射光垂直入射到 F-P 腔; 光电探测器的带宽为 6GHz, 增益为 3500V/W, 噪声等效功率为 15pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。利用金属箔电爆炸驱动聚酰亚胺薄膜飞片装置对所研制的 F-P 干涉测速仪进行了原理性实验验证, 实验装置测试示意图见图 3。当强大的脉冲电流通过金属桥箔时, 桥箔发生爆炸, 由此产生的等离子体迅速膨胀并加速飞片运动<sup>[11]</sup>。各参数如下: 铜桥箔尺寸是 0.6mm × 0.6mm × 0.004mm; 聚酰亚胺薄膜飞片尺寸是  $\varnothing 0.7$ mm × 0.025mm; 蓝宝石炮膛尺寸是  $\varnothing 0.7$ mm × 0.5mm; 充电电压是 2.5kV。

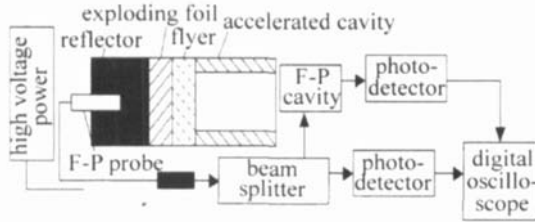


Fig 3 Schematic layout for electric exploding foil and experimental setup

图 4 所示为实验测得的原始信号: 由于光电开关的特性, 所以导致该信号末端出现振荡。图 5 为利用

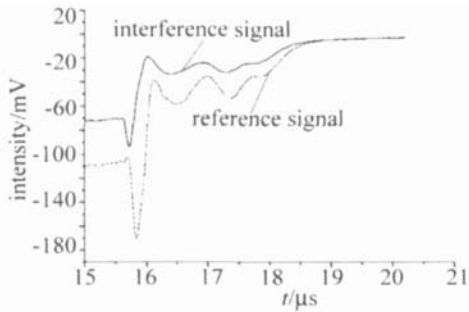


Fig 4 Original signals from electric exploding foil by F-P

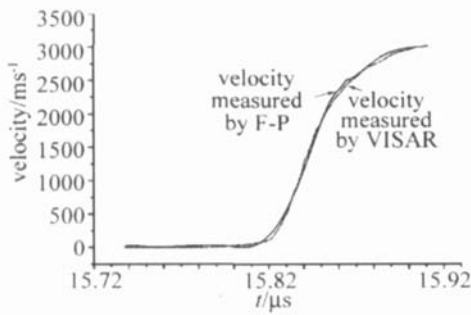


Fig 5 The velocity of flyer driven by electric exploding foil

所研制的薄腔 F-P 干涉测速仪测量得到的飞片速度与利用 VISAR 在相同条件下测得的实验结果比较。图中细实线为 F-P 干涉仪测得的速度曲线, 细虚线为 VISAR 测得的速度曲线。从图 5 可知: 两者有很好的 consistency, 相差不到 2%。但它们之间稍有些差异。

分析如下, 由 (4) 式可推导得到:

$$\frac{2lf}{c} = K + \frac{\arccos \left\{ 1 - \frac{(1-R)^2}{2R} \left[ \frac{1}{T(f)} - 1 \right] \right\}}{2\pi} \quad (5)$$

由 (5) 式可知, F-P 腔长、反射率及激光器中心频率  $f_0$  的精确测量对实验结果有一定影响。通过电探针测得的飞片末速度来确定  $K$  值; 激光器带有温度稳定系统, 线宽为 5MHz; F-P 薄腔端面反射率  $R = 0.8$  所

以, 主要可能有以下原因: F-P 腔长测得不够准确; 激光器中心频率  $f_0$  有漂移; F-P 薄腔端面反射率  $R$  有偏差; 该 F-P 干涉测速仪有更好的时间响应特性。

### 3 结论

实验测试结果与 VISAR 在相同条件下测得的实验结果有很好的 consistency, 说明了利用光学共振腔的选频特性进行多普勒频移绝对量的检测能方便地测量高速运动飞片的速度。该干涉仪体积小、结构紧凑、成本较低。但也有些细节和新的技术问题有待解决, 有关更细致的工作将在以后开展。感谢王桂吉、熊信、谭福利、谷卓伟等在实验中所给予的大力支持和帮助。

### 参考文献

- [1] BARKER L M, HOLLENBACK R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface [J]. J. Appl. Phys., 1972, 43(11): 4669~4675.
- [2] GOOSMAN D R. The multi-beam Fabry-Perot velocimeter: efficient measurement of high velocities [A]. Science and Technology Review [C]. California Lawrence Livermore National Laboratory, 1996. 12~20.
- [3] MCMILLAN C F, PAKER N L, GOOSMAN D R. Efficiency enhancements for Fabry-Perot used in velocimetry [J]. Appl. Opt., 1989, 28(5): 826~827.
- [4] SUBIAS J, ALONSO R, VILLUENDAS F *et al*. Wavelength selective optical fiber couplers based on longitudinal Fabry-Perot structures [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(7): 1129~1135.
- [5] HU Sh L. Laser interferometry for measuring velocities [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2001. 142~146 (in Chinese).
- [6] LLNL. S&TR research highlights [EB/OL]. www.lln.gov/str/JrAug04/pdfs/07\_04\_4.pdf 2004-07-17.
- [7] WENG J D, TAN H, HU Sh L. A new all-fiber velocity interferometer system for any reflector [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 533~536 (in Chinese).
- [8] YAO J Q. Laser technology [M]. Changsha Hunan Science & Technology Press, 1998. 67~71 (in Chinese).
- [9] BELOUSOV P Y, DUBNITSHEV Y N. The application of an optical Doppler frequency discriminator in a laser velocimeter [J]. Opt & Laser Technol, 1977, 9(10): 229~231.
- [10] SWEAT W C. Depth of focus in velocity interferometers system for any reflector systems [J]. Review of Science Instrument, 1992, 63(5): 2945~2949.
- [11] REN L, XIE G D, YANG Zh Y. The numerical simulation of exploding foil initiator [J]. Initiating Explosive, 2001(1): 14~19 (in Chinese).

(上接第 165 页)

- [7] DN J C. Laser transformation hardening [J]. Surface Engineering, 2002, 18(1): 14~31.
- [8] LEVCOVICI S M, LEVCOVICI D T, MUNTEANU V *et al*. Laser surface hardening of austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000, 9(5): 536~540.

- [9] YILBAS A S, SHU J S Z, SAM I M. Thermal analysis of laser heat treated engineering alloys [J]. Surface Engineering, 1997, 13(2): 149~156.
- [10] CHEN T L, GUAN Y H, WANG H G *et al*. Study on austenite transformation during laser heating [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(1~3): 546~549.