

测量角度对激光干涉测速的影响分析*

彭其先, 刘乔, 刘俊, 陈光华, 邓向阳, 李泽仁

(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, 四川 绵阳 621900)

摘 要:对现有激光干涉测速技术中不同的照明角度和测量角度进行了分析, 讨论了入射激光和反射激光的角度对测速结果的影响, 并结合理论分析进行了实验设计和动态测试, 测试结果与理论分析吻合, 表明倾斜测试时, 其测量结果均低于靶的真实运动速度. 对于一维运动的平面靶, 可以通过测量结果除以测量角度的余弦值进行修正而得到靶的真实运动速度. 透镜口径等因数对测速结果的影响在 1% 以内.

关键词:应用光学; 干涉; 多普勒频移; 速度; 爆轰

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)04-0809-4

0 引言

任意反射面激光干涉测速系统 (Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR) 及其技术, 经过最初的发明^[1]到大量的推广, 逐渐成熟, 目前已经广泛应用于冲击波物理与爆轰物理研究领域, 可对高速运动事件进行非接触的连续性测试, 研究冲击与爆轰状态下材料的动态特性^[2-5], 并大量应用于相关研究工作中, 如氢气炮实验^[6-7]、爆轰实验^[8]、内弹道测量、电炮测试^[9-10]等, 为相关课题研究提供了大量翔实的实验数据.

随着研究的深入, 对测试结果的精度提出了越来越高的要求. 本文从测试系统中的光纤探头入手, 就光纤探头测试角度对测试的影响进行了分析讨论, 并结合分析设计了实验, 实验结果与理论预期吻合.

1 多普勒频移与入射角和反射角的关系

光源 O 、运动靶 P 和静止的光检测器 S 之间的相对位置如图 1. 照射光的频率为 f_0 , 靶 P 的运动速度矢量为 U , f_s 是散射光的频率, e_s 是散射光单

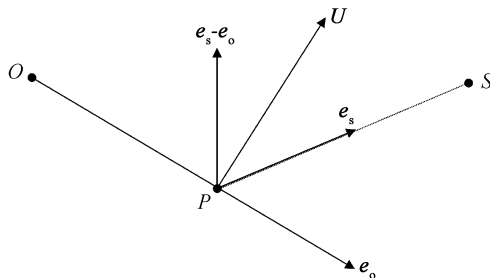


图 1 光源、靶和检测器布置图
Fig. 1 Setup of light, target and detector

位向量, e_0 是入射光单位向量, 则有^[11]

$$f_s = f_0 \left[1 + \frac{U \cdot (e_s - e_0)}{c} \right] \quad (1)$$

散射光与光源之间的频率差称为多普勒频移 f_D

$$f_D = f_s - f_0 = 1/\lambda |U \cdot (e_s - e_0)| \quad (2)$$

探测器测量到的多普勒频移 f_D 对应的速度 W 为

$$W = \frac{\lambda}{2} f_D = \frac{|U \cdot (e_s - e_0)|}{2} \quad (3)$$

2 激光干涉测速中几种测量角度分析

2.1 垂直入射/垂直测量对测量结果的影响

实际应用中这种情况较多, 也是实验者设计时追求的, 如图 2. 照明光源照射的是靶上的一个质点, 该质点在靶上没有横向的运动, 测量的结果可以较好地代表靶的整体运动速度. 此时, $e_s = -e_0$, U 与 $(e_s - e_0)$ 之间的夹角为零度, 则式(3)可写为

$$W = U$$

由于测量方向与靶运动方向一致, 因而, 测量到的速度 W 即是靶的运动速度 U .

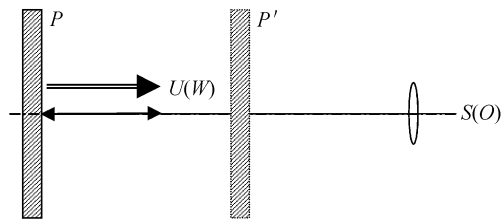


图 2 垂直入射/垂直测量布置图
Fig. 2 Perpendicular in/ Perpendicular out of the laser

2.2 斜入射/斜探测 (同侧) 对测量结果的影响

如图 3, 此时, $e_s = -e_0$, U 与 $(e_s - e_0)$ 之间的夹角为 θ , 则式(3)可写为

$$W = U \cos \theta$$

式中, 由于 $\cos \theta < 1$, 因而, 探测器测量到的速度 W

* 中国工程物理研究院科学技术基金(20050433)资助
Tel: 0816-2484142 Email: qxpeng@126.com
收稿日期: 2006-11-08

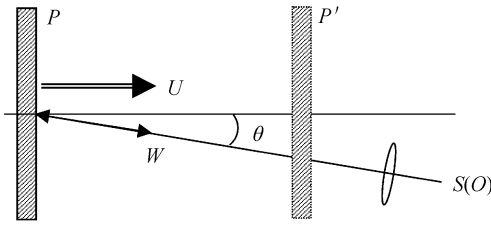


图3 同侧斜入射/斜探测布置
Fig. 3 Tilted in/tilted out of the laser (on the one side of the normal)

比靶的运动速度 U 小. 图4是根据上式绘制的 W/U 随 θ 变化的曲线. 由图可见, 在 $\theta < 8^\circ$ 的情况下, 探测器测量到的速度 W 与靶的运动速度 U 的偏差可以控制在 1% 以内.

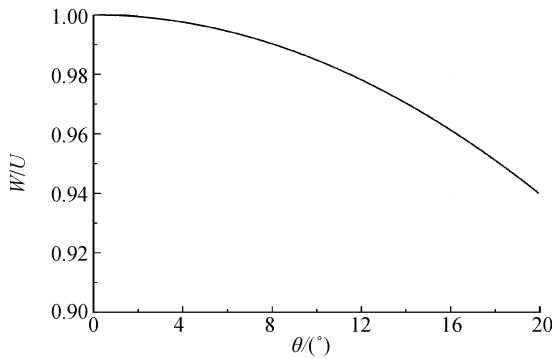


图4 同侧斜入射/斜探测模拟结果
Fig. 4 Simulated result of Fig. 3

2.3 垂直入射/斜探测对测量结果的影响

如图5. 此时, U 与 e_o 在同一直线上(反向), e_s 与 e_o 之间的夹角为 θ , 则式(3)可写为

$$W = U(1 + \cos \theta)/2$$

此时, 由于 $\cos \theta < 1$, 因而, 探测器测量到的速度 W 比靶的运动速度 U 小.

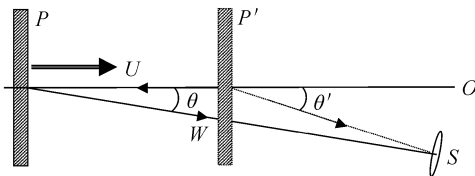


图5 垂直入射/斜探测布置图
Fig. 5 Perpendicular in/tilted out of the laser

与 2.3 节不同的是, 随着靶的运动, θ 也随之变化, 且越来越大, 因而探测器测量到的速度 W 也比真实的 U 越来越小, 二者偏离的幅度与探测器的摆放位置和测量距离有关.

以激光干涉测速中的实际应用进行估算. 初始时刻, 探测器(光纤探头)一般放在偏离靶面法线方向约 10 mm 的横向位置, 距离靶 80 mm, 其能测量的最近工作距离约在 50 mm, 则初始时刻 $\cos \theta = \cos(\arctan(10/80)) = 0.992$, $W = 0.996U$, 最近工作距离时 $\cos \theta = \cos(\arctan(10/50)) = 0.981$, $W = 0.991U$, 偏差都在 1% 以内.

2.4 斜入射/斜探测(异侧)对测量结果的影响

如图6. U 与 e_s 和 e_o 之间的夹角都为 θ (简化起见), 则式(3)可写为

$$W = \frac{|U \cdot (e_s - e_o)|}{2} = U \cos \theta$$

该式与 2.2 节的表达式相同. 不同的是随着靶面的运动, 类似 2.3 节中的情况也会在此出现. 从图6中可以看出, 由于入射光与探测器分布于靶面法线两侧, 探测器测量到的速度 W 也比真实的 U 越来越小, 并且比 2.3 节中的情况更利害. 这种情况在实验中应用的较少.

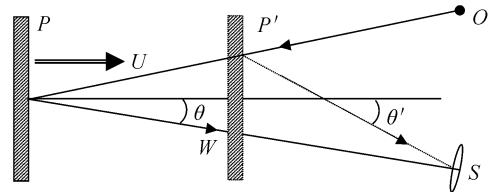


图6 斜入射/斜探测(异侧)布置图
Fig. 6 Tilted in/tilted out of the laser (two side of the normal)

2.5 透镜口径对测量结果的影响

这种情况类似于 2.3 节中的垂直入射, 斜探测. 文献[12]将这种情况处理为以多普勒频移 f_D 为中心, 带宽为 $f_D(1 - \cos \theta)$ 的光锥, 其中 θ 是透镜边缘对测试点的张角. 对于 $F/5$ 的收集透镜, 其边缘引入的频移偏差小于 0.5%.

考虑到收集透镜边缘引入的频移偏差是最大的, 文献[13]从频率随透镜口径变化的关系进行了分析, 通过对透镜上不同孔径处接受的不同频率光信号进行积分, 计算了透镜口径对最终的频移的影响. 计算结果表明, 用 $F/5$ 的收集透镜, 其引入的测量误差远低于 0.1%.

综合两种考虑, 结合实际应用, 收集透镜对测速的影响可以忽略不计.

3 实验设计与测量结果

针对以上分析, 设计了炸药爆轰通过空气隙驱动钢飞片的实验. 实验布局如图7.

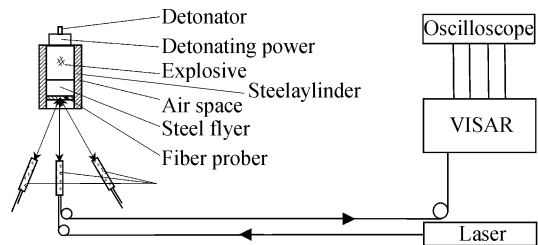


图7 实验布局
Fig. 7 Experimental setup

雷管 (Detonator) 起爆后, 通过传爆药柱 (Detonating power) 引爆主炸药 (Explosive), 主炸

药爆炸后,其爆轰产物通过空气隙(Air space)驱动钢飞片(Steel flyer),使钢飞片平稳地加速到较高速度,并且在飞行的过程中保持比较好的平面性。

激光器输出的相干激光通过光纤和光纤探头(Fiber prober)传输到钢飞片上,照明钢飞片.反射光由光纤探头收集后,通过另一根光纤输入激光干涉测速仪(VISAR),由激光干涉测速仪对因钢飞片运动而引起的多普勒频移信号光进行干涉检测.干涉信号经光电转换后由示波器(Oscilloscope)进行记录,并用专用的数据处理程序对信号进行处理,得到飞片的运动速度。

实验设计时,有针对性的考虑了实际应用中的情况.结合 2.1 节、2.2 节的分析,在钢飞片前面沿不同的入射角,分别布置了 0° 、 20° 、 30° 三个测试探头,每一个探头的发射和接受在同一方向上。

图 8 是处理后三个探头测量到的钢飞片速度-时间曲线.曲线 1 是 0° 探头测量到的结果,按照 2.1 节的分析,其代表了钢飞片的真实运动速度。

曲线 2、3 分别代表 20° 和 30° 两个探头测量到的结果.按照 2.2 节的分析,分别用 $\cos 20^\circ$ 和 $\cos 30^\circ$ 对其进行处理,对应得到曲线 4 和 5.从图中可以看出,曲线 1、4、5 吻合很好,在最大速度处的速度偏差小于 1%,而现有系统的测量偏差约 2%~3%,测量结果的偏差在系统偏差之内,因而,用曲线 4、5 是可以代表垂直测量的钢飞片的运动速度曲线 1。

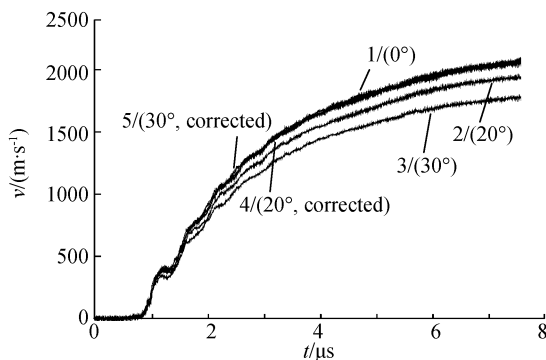


图 8 实验结果
Fig. 8 Experimental result

4 结论

实际应用中,在一次实验中只采用以上分析的测量角度中的一种,各类测量角度引入的测量偏差不会出现叠加,因而,可以得出以下结论:1) 现有激光干涉测试中,采用倾斜测试时,其测量到的速度结果均比靶的真实运动速度低.2) 对于一维运动的平面靶,其测量结果是真实运动速度的 $\cos \theta$ 倍(θ 是入射角).3) 对于非一维运动平面靶如大板实验等,控制光纤探头的测试角小于 8° ,其测试偏差可以控制在 1% 以内,对实验结果带来的影响较小.4) 透镜

口径对现有测试方式的测试结果带来的影响可以忽略。

参考文献

- [1] BARKER L M, HOLLENBACH R E. Laser interferometer for measure high velocities of any reflecting[J]. *J Appl Phys*, 1972, **43**(11):4669-4675.
- [2] HEMSING W H. Velocity sensing interferometer (VISAR) modification[J]. *Rev Sci Instrum*, 1979, **50**(1):73-78.
- [3] LI Zeren. JSG-1 Laser velocity interferometer and applications [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1989, **7**(3):271-275.
李泽仁. JSG-1 型激光速度干涉仪的性能及其应用实例[J]. 爆炸与冲击, 1989, **7**(3):271-275.
- [4] CHEN Guang-hua, LI Ze-ren, LIU Yuan-kun. VISAR data reduction method and program [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, **21**(4):316-320.
陈光华, 李泽仁, 刘元坤. VISAR 数据处理新方法及程序[J]. 爆炸与冲击, 2001, **21**(4):316-320.
- [5] HE Bi, JIANG Xiao-hua, LI Ze-ren, et al. Flyer velocity measurement of a exploding foil initiation system using a double-sensitivity VISAR [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, **25**(1):31-34.
何碧, 蒋小华, 李泽仁, 等. 用双灵敏度 VISAR 测试爆炸箔起爆器的飞片速度[J]. 爆炸与冲击, 2005, **25**(1):31-34.
- [6] YU Jin-quan, XIAO Ya-bin, ZHOU Xian-ming, et al. Study on sound velocity and unloading path for single crystal LiF under shock compression [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005, **19**(3):206-212.
于锦全, 肖亚斌, 周显明, 等. 冲击压缩下单晶 LiF 高亚声速及卸载路径研究[J]. 高压物理学报, 2005, **19**(3):206-212.
- [7] YU Yu-ying, TAN Hua, HU Jian-bo, et al. Sound velocity measurements for Shock-Compressed LY12 aluminum alloy by using VISAR technique [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2006, **20**(2):145-152.
俞宇颖, 谭华, 胡建波, 等. 利用 VISAR 测量 LY12 铝在冲击压缩下的声速[J]. 高压物理学报, 2006, **20**(2):145-152.
- [8] JIANG Xiao-hua, CHEN Lang, FENG Chang-gen, et al. The phenomenon of spallation in a copper plate due to explosive loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, **23**(6):569-572.
蒋小华, 陈朗, 冯长根, 等. 炸药爆炸驱动下铜板的层裂现象 [J]. 爆炸与冲击, 2003, **23**(6):569-572.
- [9] DENG Xiang-yang, ZHAO Jian-heng, MA Dong-li, et al. Experimental study on velocity of a film flyer driven by electrical gun [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, **25**(4):382-384.
邓向阳, 赵剑衡, 马冬莉, 等. 电炮驱动薄膜飞片的运动速度 [J]. 爆炸与冲击, 2005, **25**(4):382-384.
- [10] PENG Qi-xian, MA Ru-chao, LI Ze-ren et al. Photomultiplier under pluse light [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5):620-623.
彭其先, 马如超, 李泽仁, 等. 光电倍增管脉冲性能研究 [J]. 光子学报, 2002, **31**(5):620-623.
- [11] SHEN Xiong. Laser doppler velocimetry and applications [M]. Beijing: Press of Qinghua University, 2004:9.

- 沈熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:9.
- [12] HU Shao-lou. Laser interferometry for measuring velocities [M]. Beijing: Press of the National Defence Industry, 2001: 10.
- 胡绍楼. 激光干涉测速技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2001:10.
- [13] WILLIAM C S, CRUMP O B. Using a fast lens to collect the signal in a VISAR system[J]. *Rev Sci Instrum*, 1991, **62**(12): 2946-2949.

Analysis of Incident Angle and Its Influence on Laser Velocity Interferometry

PENG Qi-xian, LIU Qiao, LIU Jun, CHEN Guang-hua, DENG Xiang-yang, LI Ze-ren

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang Sichuan 621900, China*)

Received date:2006-11-08

Abstract: The different incident angle and measurement angle in velocity interferometry used are classified, the influence of the angle of the incident laser and reflect laser on the results is discussed. The experiments are designed and dynamic testing is carried out. The experiments results are agreed well with the theoretic analyzing. It shows that the velocity measured under tilting goes smaller than the true velocity of the target. To the one dimension movement, the true velocity of the target can be gotten by the experimental results divided by the cosine of the measuring angle. The other factors, such as the diameter of the collecting lens, bring the influence to the results just within 1%.

Key words: Applied optics; Interference; Doppler shift; Velocity; Detonation.



PENG Qi-xian was born in 1970. He got his B. D. in photo-electric science and technology department of Sichuan University in 1994. In 1999, he earned his M. D. in applied optics of China Academic of Engineering Physics. His research interests focus on photo-electric technology in fast events, such as VISAR technology and shock emission in shock wave physics and detonation physics areas.