

激光干涉测速技术在火炮内弹道研究中的应用

彭其先, 蒙建华, 刘俊, 马如超, 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: 为了将激光干涉测速技术应用于火炮内弹道研究中, 介绍了任意反射面激光干涉测速技术, 针对 37 mm 直径滑膛火炮设计了长测量景深的光纤探头, 选择了条纹常数为 100 m/s 的高灵敏度激光干涉测速仪, 结合任意反射面激光干涉测速技术进行了 2 发火炮实验, 实验测量的火炮弹丸最高速度为 1 200 m/s, 最长运动距离 1.7 m, 实验结果证明了该测试技术在火炮研究中的可行性和可靠性。

关键词: 内弹道; 速度测量; 激光干涉; 多普勒频移; 火炮

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-499X(2008)03-0096-04

Laser Velocity Interferometry for Interior Ballistic Research

PENG Qi-xian, MENG Jian-hua, LIU Jun, MA Ru-chao, LI Zeren

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

Abstract: In order to apply laser Interferometry in the research of interior ballistic, the laser Velocity Interferometry System for Any Reflector (VISAR) was introduced. A wide range fiber probe was designed for the 37 mm caliber slip artillery, and a high sensitivity interferometry with velocity per fringe 100 m/s was used. Two shots were carried out by using laser velocity interferometry. The experiment shows that the projectile goes as long as 1.7 m and reaches a velocity of 1 200 m/s. The result shows that the VISAR can be used in the interior ballistic research and works well.

Key words: interior ballistic; velocity measurement; laser interference; doppler shift; artillery

炮弹在膛内的速度、加速度及弹底压力是火炮及炮弹发射系统设计的关键参数, 因而, 该参数的测量对于发展内弹道理论, 研究新型火炮、轻武器以及对武器进行校验等有重要的意义。

目前, 确定弹丸在膛内连续运动的弹道参数主要是利用微波干涉测量技术^[1,2]和采用数值模拟^[3~5]的方法。数值模拟是通过外弹道参数测量校验计算程序, 并由计算程序外推内弹道的运动参数, 由于计算程序是基于一定假设条件下的理想推算, 且采用的是外弹道测试数据对程序进行校验, 不是内弹道真实的运动状态, 因而计算程序得到的内弹

道运动参数有其不确定性。微波干涉技术测量的是弹丸位置随时间的变化关系, 受限于微波本身的波长(cm 级或数 mm 级), 当被测弹丸的速度较小, 如弹丸在挤进段的运动, 由于弹丸速度低, 运动距离小, 微波干涉测量的结果不确定度较大。同时, 在测量小口径武器时(数 mm), 由于膛壁回波对干涉信号干扰较大, 应用较为困难, 测量中的分辨率较难令人满意。而文献[6]中的光学方法是根据弹丸的旋转进行测量的, 对于不旋转的内弹道, 如滑膛炮则无法采用该技术。

收稿日期: 2007-02-10

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金(20050434)

作者简介: 彭其先(1970—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为光学和光电子技术。

用于炮弹内弹道参数测量的激光干涉测量系统是以激光作为信息载体的测量系统,它能以数 m/s 的分辨率精确地连续测量炮弹从起飞到出炮口的速度,进而得到位移、加速度及弹底压力,给火炮和炮弹发射系统的设计与检测提供重要的实验参数.测量直径从几 mm 的手枪子弹到几百 mm 的炮弹,也可用于轻气炮弹丸在轻气炮膛内的速度、加速度、位移及弹底压力的实验测量,具有广泛的应用领域.国外已经将该技术应用于滑膛炮^[7]和轻气炮^[8]的实验研究中.

1 激光干涉测速原理

任意反射面激光干涉测速 (Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR) 技术,可对高速运动物体进行非接触的连续性测试,其时间分辨可达 ns,空间分辨可达亚 μm,速度分辨可达数 m/s,因而被作为主要的诊断手段之一,广泛应用于冲击波物理与爆轰物理研究领域,研究冲击与爆轰状态下材料的动态特性^[9~12].

采用标准具作为延迟器件的 VISAR,其原理即广角迈克尔逊干涉仪,结构如图 1 所示.

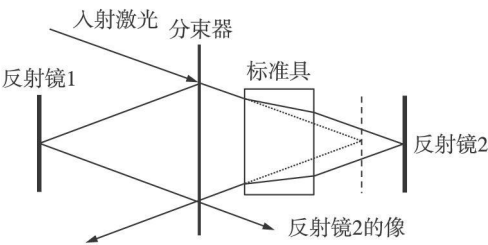


图 1 VISAR 结构简图

因样品运动而引入多普勒频移的入射激光进入干涉仪,经分束器分为左右两光臂,右边的光路安置有一标准具,在光学成像上使端反射镜 2 与反射镜 1 关于分束器共轭,从而使反射镜 1 和反射镜 2 在空间方向完全是成像关系,保证了干涉的空间性要求.

在时间上,右边光路中因标准具的引入,光在标准具中的传播速度变慢,使得在合束时右边光路比左边光路延迟时间 τ ,VISAR 测量速度的依据就是左光路的 t 时刻与右光路的 $t-\tau$ 时刻两多普勒光相干涉产生的干涉图,并由此干涉图解析出速度信息.

VISAR 中的延迟时间 τ 及条纹常数 F 与标准具长度 L 的关系为^[12]

$$\tau=\frac{2L}{c}(n-\frac{1}{n})$$

(1)

$$F=\frac{\lambda_0}{2\tau}=\frac{c\lambda_0}{4(n-1/n)}\frac{1}{L}$$

(2)

式中, c 为真空内的光速, n 为标准具折射率, λ_0 为照明激光波长.

同时,所测试样品速度 $v(t)$ 与条纹常数之间有^[12]: $v(t)=FN(t)$,式中, $N(t)$ 是记录到的干涉图随时间变化的个数.

实验中,当被测对象运动时,由被测物反射的漫反射激光携带着多普勒信息,经过 VISAR 的干涉后形成随时间变化的干涉环,该干涉环由光电探测器进行转换放大后,由示波器记录下来.由于采用推-挽式结构^[12],因而共有 4 个光电探测器,输出的四路信号具有一定位相关系.采用 ORI-VISAR98 程序^[13],该程序采用极坐标法作为计算内核,首先对四路信号中两两反相的信号作减法,降低噪声,提高信号幅度,得到两路相位差为 90° 的信号,用这两路信号分别作为坐标轴的 x 轴、 y 轴,拟合得到极坐标下椭圆(相角)随时间的变化,通过该椭圆得到计算所需参数,推算出被测物飞片的运动速度,进而分析其加速度、位移等信息.

2 实验装置及测试系统

图 2 是本工作中使用的实验装置及测试系统方框图.雷管起爆后,点燃火药,火药燃烧推动铝弹丸运动.激光通过发射光纤和光纤探头照射到铝弹丸前表面,铝弹丸前表面漫反射光经光纤探头收集和信号光纤传输后,输入干涉仪.

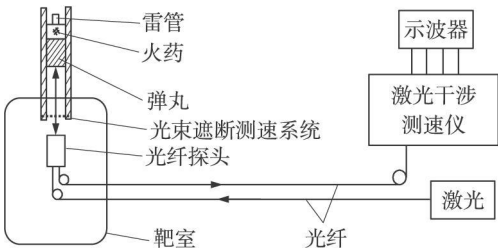


图 2 实验装置及测试系统

铝弹丸从起飞到加速直至出炮口的速度由激光干涉测速系统全程记录,同时,在出炮口处安装有光速遮断测速装置^[14],以将该测量结果与激光干涉测速结果进行对比.

图 3 是实验中使用的高灵敏度激光干涉测速仪,其条纹常数是 100 m/s,图 4 是针对火炮内弹道测量

而设计的长景深光纤探头及实验支撑靶架.

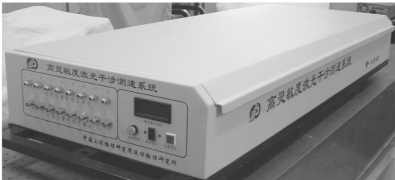


图 3 干涉仪照片

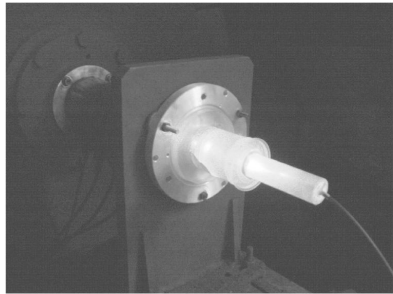


图 4 光纤探头与靶架

3 实验结果

实验共设计并进行了 2 发,其目的是验证测试技术的可行性和通过 2 发相同的实验检验测量的重复性.图 5 是一发实验中示波器记录到的原始干涉信号,其中 1、2、3、4 路信号与推-挽 VISAR 中四路信号对应,1 与 3 是反相信号,2 与 4 是反相信号,该信号的信噪比优于 20,共记录到约 11 个干涉条纹,按照文献[12]的分析,该测量结果的不确定度约为 5 m/s,按照使用中系统带宽约 100 MHz 计算,对应的空间分辨率为 50 nm.图 6 是 2 次实验得到的弹丸在膛内的速度过程.

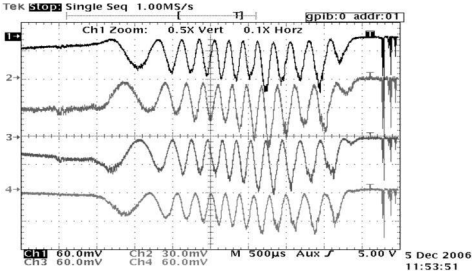


图 5 原始干涉信号

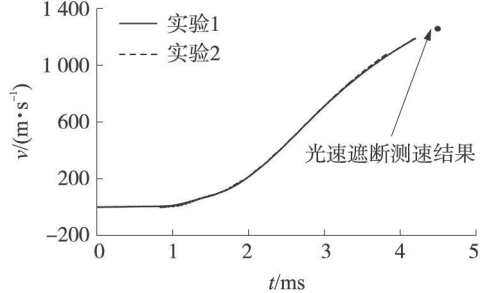


图 6 速度-时间曲线及 2 发实验的重复性

4 讨论与分析

实验结果表明,激光干涉测试技术用于火炮内弹道中的弹丸速度测量是成功的,其测量的重复性也很好,3.62 ms 处,速度约 1 000 m/s,2 发之间的速度偏差为 10 m/s.

实验是在室内进行,整个火炮和发射弹丸与气炮靶室密封连接,实验时进行抽真空,因气炮靶室空间有限,因而光纤探头放置离出炮口很近,而光纤探头的最近工作距离需要大于 0.5 m,因而实验没有测量到弹丸出炮口的速度.从实验的速度-时间曲线结果看,弹丸在测量最后时刻尚处于加速过程中,从推导得到的位移-时间曲线(图 7)和速度-位移曲线(图 8)也可以看出这一特点.如果实验在空间较大的实验场地进行,这一问题可以得到解决.

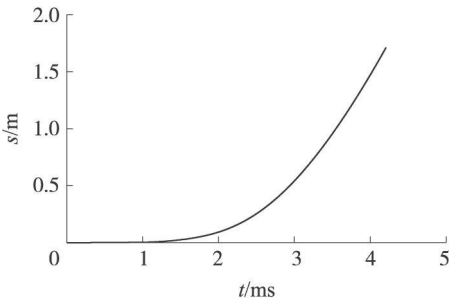


图 7 位移-时间曲线

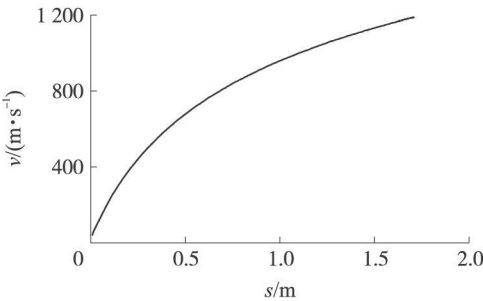


图 8 速度-位移曲线

将速度-时间曲线对时间进行微分,得到弹丸的加速度随时间的变化过程,如图 9 所示.可以看出,在时间约为 1.2 ms 处,加速度有一个波动,文献[1, 15]也观测到了这一现象,虽然在信号的幅度上不太一致,但在现象上是吻合的.

由于该实验是采用滑膛炮加载手段直接测量弹丸的运动速度,因而测量结果反映的是弹底压力和摩擦力共同作用下弹丸的真实运动状态.其加速度的波动直接与弹底压力和摩擦力的波动相关.经分析,可能是由于装药原因引起的弹底压力波动,这与

文献[1,15]分析的原因不同.

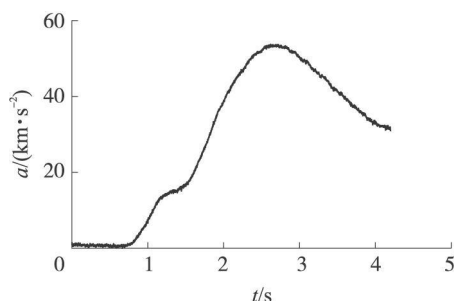


图9 加速度变化过程

5 结束语

针对内弹道弹丸运动的物理特性,设计了长景深的光纤探头,选择了高灵敏度的激光干涉仪,结合滑膛炮进行了动态实验,实验结果表明了该测试技术在火炮及内弹道研究中的应用是可行的,其测量结果稳定可靠.

参考文献

- [1] 杨敏涛. 微波干涉仪在武器研制中应用[J]. 火炮发射与控制学报, 1996, (4): 23—27.
YANG Mintao. Applications of microwave interferometry in the amament research [J]. Journal of Artillery Shoot and Control, 1996, (4): 23—27. (in Chinese)
- [2] 马玲, 蔡征宇, 程风雷, 等. 毫米波测速雷达的测速原理[J]. 弹道学报, 2003, 15(4): 87—91.
MA Ling, CAI Zhengyu, CHENG Fenglei, et al. The principle of microwave velocity radar [J]. Journal of Ballistics, 2003, 15(4): 87—91. (in Chinese)
- [3] 杨国来, 陈运生, 闵建平. 计及火炮运动的内弹道修正模型[J]. 兵工学报, 2001, 22(1): 127—129.
YANG Guolai, CHEN Yunsheng, MIN Jianping. An amendatory interior ballistic model taking into consideration motions of the gun [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(1): 127—129. (in Chinese)
- [4] 张浩, 周彦煌. 埋头弹火炮挤进过程研究[J]. 弹道学报, 2006, 18(1): 76—79.
ZHANG Hao, ZHOU Yanhuang. Research on the engraving process of CTA [J]. Journal of Ballistics, 2006, 18(1): 76—79. (in Chinese)
- [5] 邢恩峰, 钱建平, 赵国志. 炮弹模拟发射过程的动力学建模与试验[J]. 弹道学报, 2005, 17(2): 13—18.
XING Enfeng, QIAN Jianping, ZHAO Guozhi. A dynamic model and its experiments on simulating the shoot of ammunition [J]. Journal of Ballistics, 2005, 17(2): 13—18. (in Chinese)
- [6] 何迪和, 刘宪清, 张靖武. 测线膛炮弹丸膛内转速并求其轴向速度[J]. 兵工学报, 1994, 15(4): 4—8.
HE Dihe, LIU Xianqing, ZHANG Jinwu. Measurement of rotating speed and axial velocity of projectiles in the bore of rifled guns [J]. Acta Armamentarii, 1994, 15(4): 4—8. (in Chinese)
- [7] ISBELL W M, FULLER P W W. Wide-range, high-resolution measurements of projectile motion using laser interferometry, high speed photography, videography, and hpotonics [J]. SPIE, 1983, 427: 203—217.
- [8] MUNSON D E, MAY R P. Interior ballistics of a two-stage light gas gun using velocity interferometry [J]. AIAA, 1976, 14(2): 235—242.
- [9] BARKER L M, HOLLENBACH R E. Laser interferometer for measure high velocities of any reflecting [J]. J Appl Phys, 1972, 43(11): 4 669—4 675.
- [10] HEMSING W H. Velocity sensing interferometer (VISAR) modification [J]. Rev Sci Instrum, 1979, 50(1): 73—78.
- [11] 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.
LI Zeren. Performance and application of model JSG-1 laser velocity interferometer [J]. Journal of Explosion and Shock Waves, 1989, 7(3): 271—275. (in Chinese)
- [12] 胡绍楼. 激光干涉测速技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
HU Shaolou. Laser interferometry for measuring velocities [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [13] 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): 315—320.
CHEN Guanghua, LI Zeren, LIU Yuankun. VISAR data reduction method and program [J]. Journal of Explosion and Shock Waves, 2001, 21(4): 315—320. (in Chinese)
- [14] 王翔, 王为, 傅秋卫. 用于一级轻气炮的弹速激光测量系统[J]. 高压物理学报, 2003, 17(1): 75—80.
WANG Xiang, WANG Wei, FU Qiuwei. A system utilizing laser diode for gas-gun projectile velocity measurement [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2003, 17(1): 75—80. (in Chinese)
- [15] 杨敏涛. BS310 微波干涉仪在武器研制中的应用[J]. 测试技术学报, 1996, 10(2, 3): 164—169.
YANG Mintao. Applications of BS310 microwave interferometry in the amament research [J]. Journal of Test and Measurement Technique, 1996, 10(2, 3): 164—169. (in Chinese)