文章编号:1000-5773(2007)04-0383-05

二级轻气炮弹丸速度过程测量实验技术研究*

彭其先,蒙建华,刘寿先,刘 俊,陈光华,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:针对二级轻气炮发射管的特性,设计了测量景深长达 13 m 的光纤探头,选择条纹常数为 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实验,测量了发射口径∅32 mm、长度 12 m 的二级轻气炮弹丸发射过程,测得弹丸运动距离 11.3 m 时的速度为 3960 m/s,与磁测速的结果一致,通过实验测得的速度历史,进而获得弹丸在发射管内的加速度过程,为炮内弹道研究提供了更直接的实验数据。

关键词:应用光学;干涉;多普勒频移;速度;内弹道

中图分类号:O521.3;O439 **文献标识码**:A

1 引 言

轻气炮弹丸在膛内的速度、加速度及弹底压力是轻气炮及发射系统设计的关键参数,实验测量该参数对于完善内弹道理论、研究新型轻气炮、以及对常规武器进行校验等有着非常重要的指导意义。

目前,内弹道参数主要是通过微波干涉测量技术[1-2]直接测量和数值模拟[3-5]的方法计算得到。数值模拟是用计算程序在一定假设条件下的理想推演,并且采用外弹道参数对程序进行校验,因而计算程序得到的内弹道运动参数有其不确定性,很难确定内弹道的真实运动状态。微波干涉测量得到的是弹丸位置随时间的变化关系,受限于微波本身的波长(厘米级或数毫米级),其在测量弹丸速度较小时,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(数毫米),由于膛壁回波对干涉信号干扰较大,应用较为困难,测量中的分辨本领较难令人满意。而文献[6]中的光学方法依赖于弹丸的旋转进行测量,对于不旋转的滑膛炮等则无法采用。

用于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,它能以数米每秒的分辨本领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,给炮弹发射系统的设计与检测提供重要的实验参数。测量直径最小几毫米,测量"景深"达十几米,可以广泛的应用于枪、炮等常规武器和一级、二级气体炮等实验室设备以及相关研究领域。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。

2 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测试,其时间分辨可达纳秒,空间分辨可达亚微米,速度分辨可达数米每秒,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]。

* **收稿日期**:2007-03-26;**修回日期**:2007-05-31

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,硕士,高级工程师,主要从事光电技术研究. E-mail:qxpeng@126.com

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

因样品运动而引入多普勒频移的激光束(Light in)进入干涉仪，经分束器(Splitter)分为左右两光臂，右边的光路安置有一标准具(Etalon)，在光学成像上使端反射镜 3(Mirror 3)的成像位置在反射镜 3 像(Image of Mirror 3)处，反射镜 3 的像与另一端镜反射镜 1(Mirror 1)关于分束器共轭，从而使反射镜 1 和反射镜 3 在空间方向完全是成像关系，保证了干涉的空间性要求。

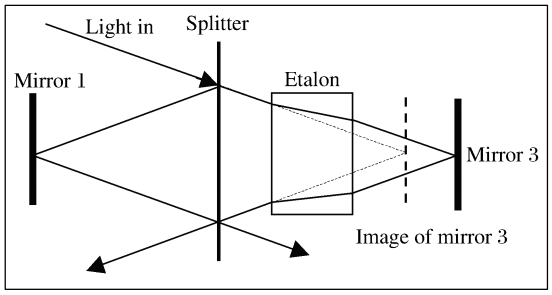


图 1 VISAR 原理结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the VISAR

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存在一时间延迟 τ，VISAR 测量速度的依据就是左光路的 t 时刻与右光路的 t-τ 时刻两多普勒光相干涉产生的干涉图，并由此干涉图随时间的变化，采用 ORI-VISAR98 程序[13]，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

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

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

式中：c 为真空内的光速，m/s；n 为标准具折射率；λ_0 为照明激光波长，m；δ 为标准具色散修正。

同时，所测试样品速度 $v(t)$ 与条纹常数之间有

$$v(t)=FN(t) \tag{3}$$

式中：$N(t)$ 是记录到的干涉图随时间变化的个数。

3 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。

激光通过发射光纤和光纤探头照射到弹丸前表面，弹丸前表面漫反射光再通过光纤探头收集和信号光纤传输后，输入干涉仪(VISAR)。

弹丸从起动到出炮口的速度由激光干涉测速系统全程记录。同时，在炮口处安装有磁测速装置[14]，测量弹丸出炮口时的速度。以此与激光干涉测速结果进行对比。

实验中使用的激光干涉测速仪，其条纹常数是 100 m/(s·Fr)，图 3 是针对发射管口径∅32 mm、长度 12 m 的二级轻气炮内弹道测量而设计的长景深光纤探头及实验支撑靶架，通过光学元件的设计，配合发射和接收光纤的调节，使静态时光纤探头工作“景深”达 13 m。

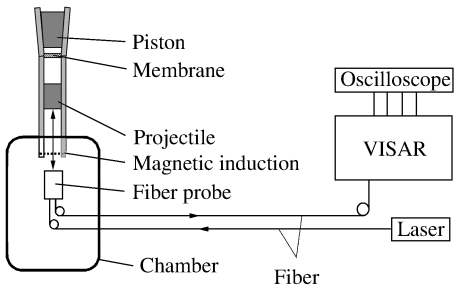


图 2 实验装置及测试系统图

Fig. 2 Experimental setup

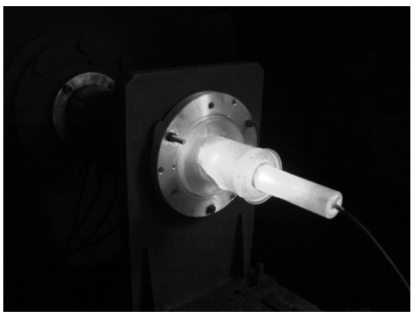


图 3 光纤探头与靶架

Fig. 3 Fiber probe and rack

4　实验结果

图 4 是实验中记录到的速度原始干涉信号,图 5 是磁测速系统记录到的时间关联信号,磁测速系统测量得到的速度为 4 km/s(0.5%)。图 6 是由 VISAR 原始干涉信号经处理后得到的弹丸在发射膛内的速度历程。该速度过程没有记录到磁测速位置处的弹丸速度,但按照速度连续性进行外推,在磁测速位置处的弹丸速度为 4 004 m/s,与磁测速系统测量结果吻合。

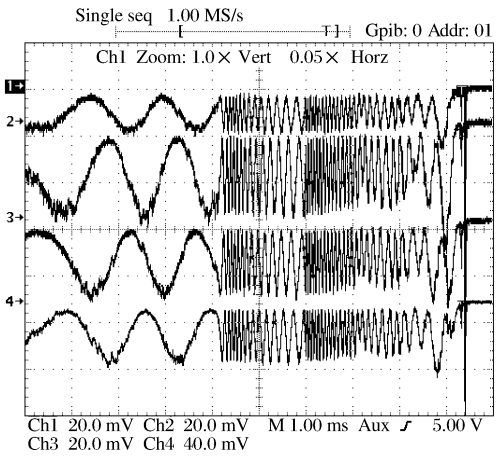


图 4　VISAR 速度干涉信号

Fig. 4　Original signal of VISAR

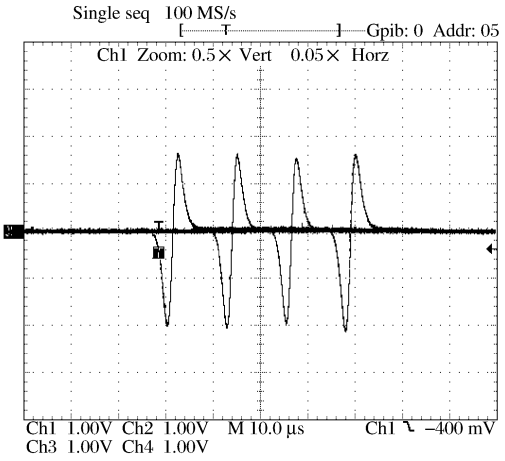


图 5　磁测速信号波形

Fig. 5　Signal of magnetic measurement for projectile velocity

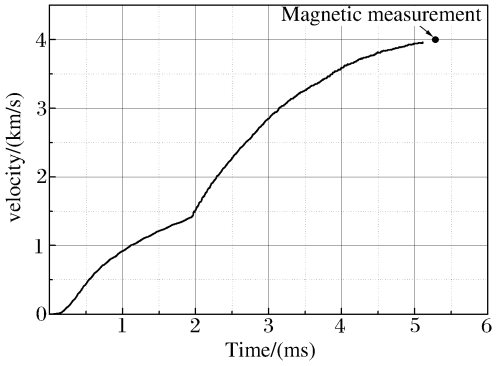


图 6　速度-时间曲线

Fig. 6　Velocity-time history

(3) 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,光纤探头放置离出炮口很近,而实验要求光纤探头的最小工作距离应大于 1.5 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。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。

(4) 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 7。从图中可以看出,该加速度-时间曲线上有两个尖峰,与

5　讨论与分析

(1) 实验结果表明,激光干涉测试技术用于轻气炮内弹道中的弹丸速度测量是可行的,其测量的结果与磁测速测量的结果基本一致。

(2) 图 4 中,在弹丸开始运动前,有一频率较低的信号,分析认为是由于气体炮采用的浮动发射技术,在火药点燃启动推动活塞向前运动的同时,炮管整体向后运动,并带动尚未启动的弹丸向后运动,这一现象与早期高速摄影观测的结果吻合。

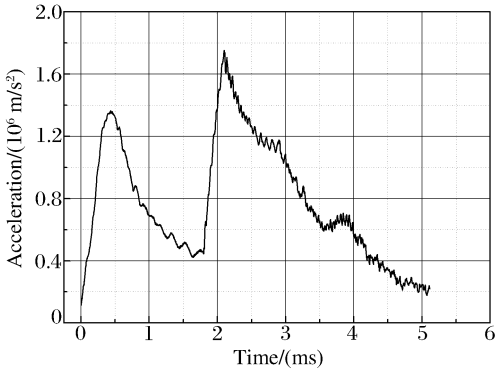


图 7　加速度变化过程

Fig. 7　The history of acceleration

文献[7]中数值模拟的结果和理论解释基本一致,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 VISAR 直接测量弹丸的运动速度。因而测量结果反应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。文献[8]对上述信号的解释是,第一个加速度尖峰是膜片破裂时对弹丸的第一次加速,而第二个尖峰是活塞进入椎形段后,在活塞前端激励起扰动压缩波,该压缩波追赶上弹丸后使其进一步加速。

6 结 论

针对二级轻气炮弹丸运动的内弹道特性和测试需求,设计了长景深的光纤探头,应用高灵敏度的激光干涉仪,对二级轻气炮的弹丸内弹道速度进行了测量,测试结果表明,该测试技术能真实地记录到轻气炮的内弹道速度发展过程,并再现其加速过程,为研究和提升炮的内弹道性能提供可靠的实验数据。

References:

[1] Yang M T. Applications of Microwave Interferometer in the Arms Research [J]. Gun Launch & Control Journal, 1996,4:23-27. (in Chinese)
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 [J]. 1996,4:23-27.

[2] Ma L,Cai Z Y,Cheng F L,et al. The Principle of Microwave Velocity Radar [J]. Journal of Ballistics,2003,15(4):87-91. (in Chinese)
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.

[3] Feng J N,Peng Y W,Lin J D. On Some Problems of Interior Ballistics in a New Type Two-Stage Light Gas Gun with Non-Powder Projection [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1994, 12(3): 477-481. (in Chinese)
冯建宁,彭炎午,林俊德. 新型非火药驱动二级轻气炮内弹道诸问题的研究 [J]. 西北工业大学学报,1994,12(3):477-481.

[4] Yang J Y,Jin Z M,Zhang X B. Numerical Simulation of the Interior Ball Isticprocess in One-Stage Light Gas Gun [J]. Journal of Ballistics,1998,10(4):21-25. (in Chinese)
杨均匀,金志明,张小兵. 一级轻气炮内弹道数值模拟 [J]. 弹道学报,1998,10(4):21-25.

[5] Kasimov V Z,Ushakova O V,Khomenko Y P. Numerical Modeling of Interior Ballistics Processes in Light Gas Guns [J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics,2003,44(5):612-619.

[6] He D H,Liu X Q,Zhang J W. Measurement of Rotating Speed and Axial Velocity of Projectiles in the Bore of Rifled Guns [J]. Acta Armamentarii,1994,4:4-8. (in Chinese)
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,1994,4:4-8.

[7] Isbell W M,Fuller P W W. Wide-Range,High-Resolution Measurements of Projectile Motion Using Laser Interferometry [A]//High Speed Photography,Videography,and Hpotonics Proc of SPIE [C]. 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 Eflecting [J]. J Appl Phys, 1972,43(11):4669-4675.

[10] Hemsing W H. Velocity Sensing Interferometer (VISAR) Modification [J]. Rev Sci Instrum,1979,50(1):73-78.

[11] Li Z R. JSG-1 Laser Velocity Interferometer and Applications [J]. Explosion and Shock Waves,1989,7(3):271-275. (in Chinese)
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.

[12] Hu S L. Laser Interferometry for Measuring Velocities [M]. Beijing:Press of National Defence Industry,2001:149-156. (in Chinese)
胡绍楼. 激光干涉测速技术 [M]. 北京:国防工业出版社,2001:149-156.

[13] Chen H,Li Z R,LiuY K. VISAR Data Reduction Method and Program [J]. Explosion and Shock Waves,2001,21(4):315-320. (in Chinese)
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.

[14] Wang J G. Technology of Gas Gun [M]. Mianyang: Scientific Association of Institute of Fluid Physics, CAEP, 1997:163-166. (in Chinese)
王金贵. 气体炮技术 [M]. 绵阳:中国工程物理研究院流体物研究所科协,1997:163-166.

Motion History Measurement of Projectile Launched by a Two-Stage Light Gas Gun

PENG Qi-Xian, MENG Jian-Hua, LIU Shou-Xian, LIU Jun,
CHEN Guang-Hua, MA Ru-Chao, LI Ze-Ren

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

Abstract: The work was done for the research of interior ballistic. A wide range fiber probe (depth of field is 13 m) was designed for measuring the motion history of projectile launched by a ∅32 mm two-stage light gas gun. The projectile velocity was measured by using a VISAR with velocity per fringe 100 m/s. The obtained result shows the projectile reaches a velocity of 3 960 m/s at the distance of 11.3 m, which is well consistent with the result from the magnetic measurement. The acceleration history of projectile was also obtained by differentiating the velocity profile. This work proved that the VISAR can been used in the interior ballistic research.

Key words: applied optics; interference; Doppler shift; velocity; ballistic