文章编号：1000-5773(2011)02-0133-05

激光干涉测速技术在内弹道弹丸速度测量中的应用研究*

王德田，彭其先，刘　俊，蒙建华，刘寿先，陈光华，刘　乔，邓向阳

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳　621900）

摘要：利用任意反射面激光干涉测速(VISAR)系统以及全光纤位移干涉仪(FDI)，测量了线膛炮弹丸速度，获得了线膛炮弹丸在0～491 μs内从零加速到140 m/s的速度历史，弹丸运动了20.7 mm，出炮口时的弹丸速度为817 m/s。实验结果表明，影响激光干涉测速技术在内弹道测量中应用的主要因素是炮口烟。研究结果对于深入探索激光干涉测速技术在内弹道测量中的应用有重要的参考意义。

关键词：内弹道；速度测量；VISAR；光纤位移干涉仪；线膛炮

中图分类号：O521.3　　**文献标识码**：A

1　引　言

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。这些参数的测量对于发展内弹道理论、研究新型火炮和轻武器以及对武器进行校验等有重要的意义。

确定弹丸在膛内连续运动时的弹道参数的方法主要有数值模拟[1-3]、微波干涉测量技术[4-5]和激光干涉测速技术[6-8]。数值模拟是基于一定假设条件下的理想推演，因而得到的内弹道运动参数具有不确定性。微波干涉技术是通过测量弹丸位置随时间的变化关系获得弹丸速度，它受限于微波本身的波长(厘米级或毫米级)，当被测弹丸的速度较小时，如弹丸在挤进段的运动，由于弹丸的速度较低，运动距离较小，微波干涉测量结果的不确定度相对较大。此外，微波干涉测量技术在测量毫米级小口径武器时，由于膛壁回波对干涉信号的干扰较大，应用较为困难，分辨率较难令人满意；在测量电磁或电热发射的新型动能武器系统时，它还会受到电磁干扰的影响。

激光干涉测量系统是以激光为信息载体的测量系统。它能以极高的速度分辨率精确地连续测量炮弹从起飞到出炮口的速度历程，进而得到位移、加速度及弹底压力，为火炮和炮弹发射系统的设计与检测提供重要的实验参数。激光干涉测量系统既可以测量直径为几毫米的手枪子弹，又可以测量直径达几百毫米的炮弹，在内弹道测量中具有广泛的应用前景。目前，该技术已经成功地应用于滑膛炮[6-7]和轻气炮[8]实验中。但是，上述测量过程的测量条件比较理想，实际情况则非常复杂，比如炮口烟的影响、炮管的抖动等。本研究针对线膛炮弹丸，利用激光干涉测速系统对其速度进行测量，测量过程中考虑了炮口烟、炮管抖动及弹丸旋转等因素的影响。实验结果对深入研究激光干涉测速技术在内弹道测量的应用具有重要的参考意义。

2　测试系统和实验装置

任意反射面激光干涉测速(Velocity Interferometer System for Any Reflector，VISAR)技术，可对

*　**收稿日期**：2010-03-22；**修回日期**：2010-09-28

基金项目：中国工程物理研究院军转民基金(049900)

作者简介：王德田(1983－)，男，硕士，实习研究员，主要从事光电测试技术研究. E-mail：wdtabcd@yahoo.com.cn

高速运动物体进行非接触式连续测试，广泛地应用于冲击波物理、爆轰物理等研究领域[9-11]。VISAR是利用两束多普勒频移光之间的混频得到物体的运动速度。设两束多普勒频移光的延迟为 τ，则物体速度 v 为

$$v = \frac{\lambda_0}{2\tau}N(t) \tag{1}$$

式中：λ_0 为激光波长，$\lambda_0/2\tau$ 为条纹常数，$N(t)$为干涉条纹个数。

全光纤位移干涉仪(Fiber Displacement Interferometer，FDI)采用光纤元器件，具有结构小巧紧凑、易于操作[12-16]等特点。光纤位移干涉仪是利用激光本征光与多普勒频移光直接混频。设多普勒频移光和激光本征光的频率差为 Δf，激光波长为 λ_0，则物体的速度 v 为

$$v = \frac{\lambda_0}{2}\Delta f \tag{2}$$

实验装置如图 1 所示。探头发出的探测光直接照射在弹丸上，从弹丸反射的信号光通过探头收集，并由光纤将信号光传入 VISAR 和 FDI 测试系统，VISAR 和 FDI 输出的干涉信号由光电探测器和示波器记录。VISAR 采用的激光器波长为 532 nm，功率为 400 mW。FDI 采用的激光器波长为1 544 nm，功率为 15 mW。示波器由光幕靶触发。实验前，在弹丸端面粘贴定向反射膜，这样可以大大增强反射信号光强度。

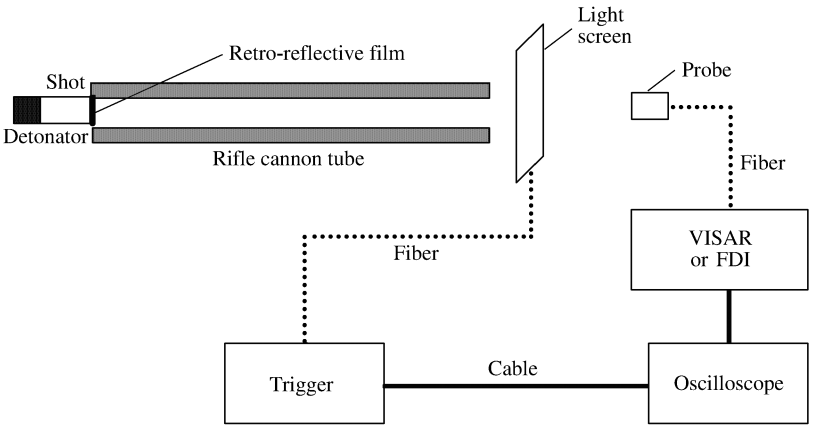


图 1 弹丸速度测量实验装置示意图

Fig. 1 The experimental setup for projectile velocity measurement

3 实验结果与分析

用 VISAR 测量的实验信号如图 2 所示。实验信号可以分为 3 个阶段：(Ⅰ)干涉信号阶段，在这个阶段可以得到弹丸的速度剖面；(Ⅱ)干涉信号消失阶段，由于烟雾的影响，返回 VISAR 中的信号光非常微弱，致使干涉信号消失；(Ⅲ)弹丸出炮口到撞击探头阶段，当弹丸出炮口时，产生杂散光，弹丸撞击探头后，杂散光消失，在此阶段可以获得弹丸出炮口时的平均速度。对图 2 中的实验信号进行数据处理，得到弹丸的速度和位移曲线，如图 3 所示。从图 3 中可以看出，弹丸在 0～491 μs 内从零加速到 140 m/s，弹丸运行了 20.7 mm，弹丸出炮口时的速度为 817 m/s。

用 FDI 测量的实验信号如图 4(a)所示。实验信号同样也分为 3 个阶段：(Ⅰ)干涉信号阶段、(Ⅱ)干涉信号消失阶段、(Ⅲ)干涉信号恢复阶段。与 VISAR 相比，FDI 克服了杂散光的影响，这是由于 FDI 对杂散光有非常强的滤波能力。图 4(b)为第Ⅰ阶段中干涉信号的局部放大图。由图 4(b)可知，在 1.209 99～1.211 03 ms 内共有 14 个条纹，因此这段时间的平均速度为 10.4 m/s。

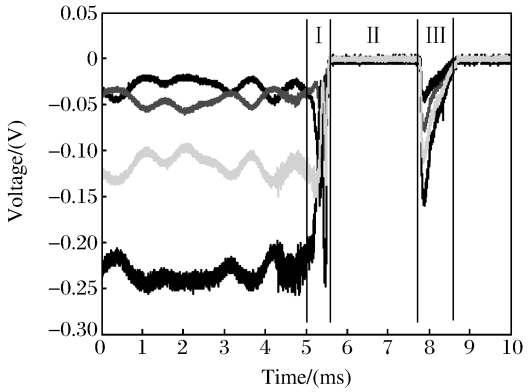


图 2 VISAR 测得的干涉信号

Fig. 2 The interference signals measured by VISAR

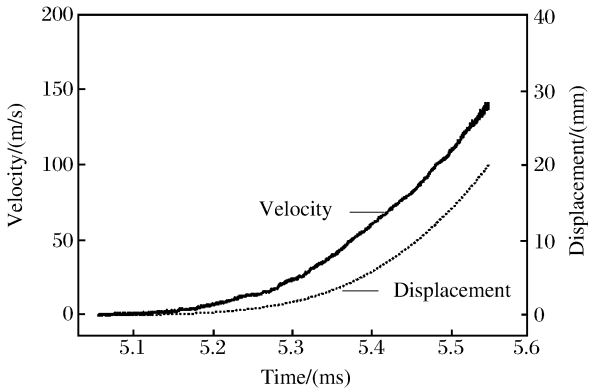


图 3 VISAR 测得的弹丸速度和位移曲线

Fig. 3 The velocity and displacement curves measured by VISAR

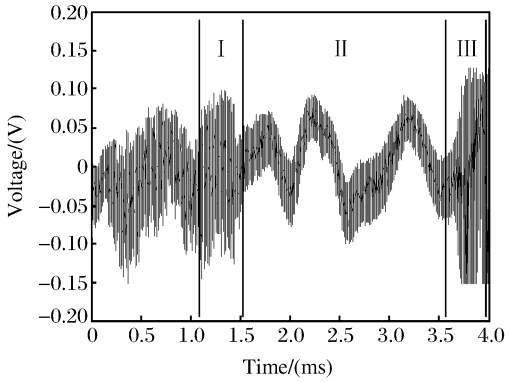


图 4(a) FDI 测得的弹丸速度干涉信号

Fig. 4(a) The interference signals measured by FDI

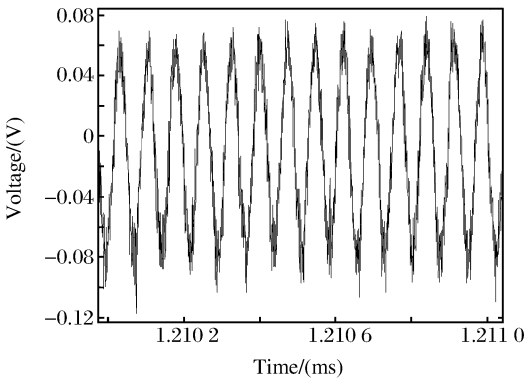


图 4(b) 干涉信号的局部放大图

Fig. 4(b) The partial enlarged drawing of the interference signals

图 5 为 VISAR 和 FDI 测量结果的对比图。从图 5 中可以看出,两种测试技术得到的实验结果具有很好的一致性。本实验采用的 FDI 测试系统的激光功率仅为 15 mW,如果将 FDI 中的激光器功率提高到 1 W,将会显著增加弹丸内弹道的测量距离。

4 结 论

采用 VISAR 和 FDI,对线膛炮弹丸速度进行了测量,获得了线膛炮弹丸在 0～491 μs 内从零加速到 140 m/s 的速度剖面,弹丸运行了 20.7 mm,出炮口时弹丸的速度为 817 m/s。由于受到炮口烟的影响,两种测试技术均没有获得完整的速度曲线。如果采用穿透能力较强的 1 550 nm 激光,适当提高激光功率,将会大大增加 FDI 测试系统的内弹道测量距离。

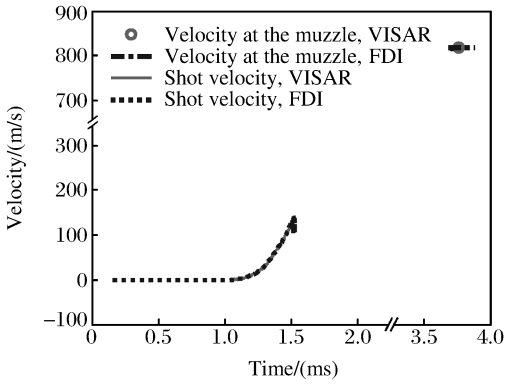


图 5 FDI 和 VISAR 测量的速度对比

Fig. 5 Comparisions of velocity between FDI and VISAR

References:

[1] Yang G L, Chen Y S, Min J P. An Amendatory Interior Ballistic Model Taking into Consideration Motions of the Gun [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(1): 127-129. (in Chinese)
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.

[2] Zhang H, Zhou Y H. Research on the Engraving Process of CTA [J]. Journal of Ballistics, 2006, 18(1): 76-79. (in Chinese)
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.

[3] Xing E F, Qian J P, Zhao G Z. A Dynamic Model and Its Experiments on Simulating the Shoot of Ammuntion [J]. Journal of Ballistics, 2005, 17(2): 13-18. (in Chinese)
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.

[4] Yang M T. Applications of Microwave Interferometry in the Armament Research [J]. Journal of Gun Launch & Control, 1996, (4): 23-27. (in Chinese)
杨敏涛. 微波干涉仪在武器研制中的应用 [J]. 火炮发射与控制学报, 1996, (4): 23-27.

[5] 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.

[6] Isbell W M, Fuller P W W. Wide-Range, High-Resolution Measurements of Projectile Motion Using Laser Interferometry, High Speed Photography, Videography, and Hpotonics [A]//Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering [C]. Geneva, Switzerland, 1983, 427: 203-217.

[7] Peng Q X, Meng J H, Liu J, et al. Laser Velocity Interferometry for Interior Ballistic Research [J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(3): 96-99. (in Chinese)
彭其先, 蒙建华, 刘 俊, 等. 激光干涉测速技术在火炮内弹道研究中的应用 [J]. 弹道学报, 2008, 20(3): 96-99.

[8] Munson D E, May R P. Interior Ballistics of a Two-Stage Light Gas Gun Using Velocity Interferometry [J]. AIAA J, 1976, 14(2): 35-242.

[9] Barker L M, Hollenbach R E. Laser Interferometer for Measure High Velocities of Any Reflecting [J]. J Appl Phys, 1972, 43(11): 4669-4675.

[10] Li Z R. Performances and Applications of Model JSG-1 Laser Velocity Interferometer [J]. Journal of Explosion and Shock Waves, 1989, 9(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, 9(3): 271-275.

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

[12] Strand O T, Goosman D R, Martinez C, et al. Compact System for High-Speed Velocimetry Using Heterodyne Techniques [J]. Rev Sci Instrum, 2006, 77(8): 083108.

[13] Weng J D, Tan H, Wang X, et al. Optical-Fiber Interferometer for Velocity Measurements with Picosecond Resolution [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(11): 111101.

[14] Weng J D, Wang X, Ma Y, et al. A Compact All-Fiber Displacement Interferometer for Measuring the Foil Velocity Driven by Laser [J]. Rev Sci Instrum, 2008, 79(11): 113101.

[15] Wang D T, Li Z R, Wu J R, et al. An Optical-Fiber Displacement Interferometer for Measuring Velocities of Explosively-Driven Metal Plates [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(1): 105-108. (in Chinese)
王德田, 李泽仁, 吴建荣, 等. 光纤位移干涉仪在爆轰加载飞片速度测量中的应用 [J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1): 105-108.

[16] Wang D T, Li Z R, Peng Q X. Direction-Judgable Fiber Displacement Interferometer for Vibration Measurement [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(10): 86-89. (in Chinese)
王德田, 李泽仁, 彭其先. 可判向光纤位移干涉仪在振动测量中的应用 [J]. 光电工程, 2009, 36(10): 86-89.

Application of Laser Velocity Interferometry in Interior Ballistic Projectile Velocity Measurement

WANG De-Tian, PENG Qi-Xian, LIU Jun, MENG Jian-Hua,
LIU Shou-Xian, CHEN Guang-Hua, LIU Qiao, DENG Xiang-Yang

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Using a laser velocity interferometer system for any reflector (VISAR) and a fiber displacement interferometer (FDI), the interior ballistic projectile velocity for rifle cannon was measured. According to the interference signal obtained directly from VISAR and FDI, whose persistence time is 491 μs, the projectile velocity history ranging from 0 to 140 m/s was acquired. Therefore, the measurable displacement of projectile is 20.7 mm. In addition, the shot velocity at the muzzle was also obtained as 817 m/s. The experimental results showed that muzzle smoke is the dominant influencing factor. The research results will provide a valuable reference for the practical application of laser interferometer to interior ballistic measurement.

Key words: interior ballistic; velocity measurement; velocity interferometer system for any reflector; fiber displacement interferometer; rifle cannon