

文章编号:1004-4213(2010)11-2008-4

全光纤速度干涉仪设计及应用*

彭其先, 蒙建华, 王德田, 刘俊, 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:针对冲击波物理与爆轰物理等研究领域中对高速运动物体进行连续速度测量的需求,设计了一种全光纤速度干涉仪.该干涉仪采用单模光纤作为光传输和延迟元件,对 t 和 $t-\tau$ 两个时刻由于速度变化而引起的多普勒差拍信号进行检测.由于两个时刻的两束光信号对应的待测物体速度变化不大,因而两者几乎有相等的频移量,从而大大降低了差拍信号频率.并且,通过光纤长度的改变,灵活调节条纹常量(τ 值),使差拍信号频率不超过记录系统的带宽,从原理上解决记录系统响应带宽受限问题,拓展测速的上限.单模光纤的采用,对漫反射光起到了较好的选模作用,使干涉仪实现了对漫反射靶的测量.实验设计了 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $150\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 两种条纹常量,对低速过程的霍普金森杆实验和高速过程的激光驱动实验分别进行了测试,取得较好结果,证明了该干涉测试技术的有效性.

关键词:干涉;速度;多普勒效应;光纤

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103911.2008

0 引言

激光干涉测速技术由于其非接触、抗电磁干扰、测试准确度高等优点,目前已经广泛应用于对高速运动事件进行非接触的连续速度历史进行测试,研究冲击与爆轰状态下材料的特性^[1-5]等领域.

激光干涉测速技术可以分为位移干涉仪和速度干涉仪.位移干涉仪的测量速度正比于信号频率.由于一般采用数字记录系统记录信号,因而信号频率的最大值取决于记录系统的带宽,也即记录系统的带宽决定了信号的最大频率,相应的决定了测量速度的最大值^[6].速度干涉仪如任意反射面激光干涉测速系统(Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR)^[7-8],虽然没有最大测量速度的限制,但在仪器结构方面较复杂、造价较高.而全光纤 VISAR^[9-10]虽然结构简单、造价低,由于结构上的缺陷,只有一半的光参加干涉,最大对比度只能达到 $1/3$,这有可能是该技术目前还没有较好的高速过程测量结果的原因.

本文介绍的全光纤激光干涉测速仪,结构简单,条纹常量方便可调,能满足高速和低速等不同速度过程的需要,并且能用于漫反射面的测量,参与干涉的光信号对比度可达到 1 ,能得到较好质量的干涉信号.

1 光纤速度干涉仪原理与设计

如图 1,由光纤激光器输出的激光(频率为 f_0)经过单模光纤传输至光纤环形器;通过该光纤环形器后由单模光纤传输至光纤探头;光纤探头将激光引向运动靶面.由靶面反射回的漫反射光经光纤探头收集后进入单模光纤,经过光纤环形器,由光纤环形器另一端口输出,并经过一个 1×2 光纤耦合器分为两路光,这两路光经过不同长度的单模光纤传输后在 3×3 光纤耦合器中合束进行干涉.

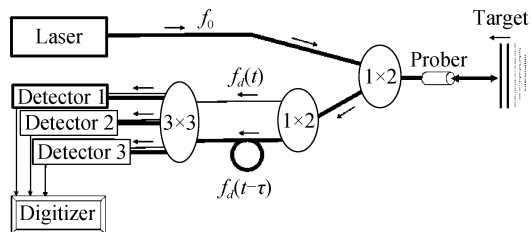


图 1 光纤速度干涉仪结构图

Fig. 1 Structural diagram of the fiber velocity interferometer

设计上使两路光之间有一定的时间延迟(两光路中光纤的长度不同),则在两路光合束时,将产生激光速度干涉仪信号,该干涉信号满足式(1)

$$u(t-\lambda/2) = (\lambda/2\tau) f(t) = (c_0\lambda/2nL) f(t) \quad (1)$$

式中 τ 为两路光之间的相对延迟时间, $u(t-\lambda/2)$ 为 t 时刻到 $t-\tau$ 时刻内靶面运动的平均速度, λ 为激光波长, $F=\lambda/2\tau=c_0\lambda/2nL$ 称之为速度干涉仪的条纹常量, c_0 是真空中光速, n 是单模光纤的折射率, L 是两路光之间的光纤长度差.实验中未采用加窗测

* 中国工程物理研究院科学技术基金(2008B0403038)资助
Tel:0816-2495700 Email:qxpeng@126.com
收稿日期:2010-03-29 修回日期:2010-06-23

试,故式(1)中没有考虑窗口的折射率修正因子。

该干涉仪中通过改变两光路中光纤之间的长度差来调节条纹常量,以适应不同速度过程的测量准确度和信号频率要求。显然,由于光纤的采用,其在调节干涉仪条纹常量方面很方便。同时,由于单模光纤的采用,使得每路光纤中只有一个空间模式的光参与干涉。因而,即使是从漫反射面返回的光,经过该单模光纤系统选模后,一样能形成较好的干涉,从而可对漫反射靶进行测量。

由于在 3×3 光纤耦合器中只有两路光进行干涉,因而,只要两路光的强度调节到相同,则干涉信号对比度可以达到 1。

为了判别速度的加减速过程, 3×3 光纤耦合器采用全对称结构,其输出是相位差为 120° 的三路干涉光信号,采用任意两路干涉信号即可得到速度过程。

2 低速霍普金森杆实验验证

干涉仪设计中采用 1550 nm 的光纤激光器,输出功率 10 mW ,相干长度 1000 m 。为了验证本文设计,在低速过程中进行了霍普金森杆实验,其装置如图 2。采用钢弹丸撞击入射钢杆,用光纤速度干涉仪直接测量入射杆自由面的速度历史。该自由面经过打磨处理,可以认为是漫反射面。干涉仪条纹常量调节为 $1.5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,图 3 是记录到的原始干涉信号,图 4 是由干涉信号处理得到的速度历史。

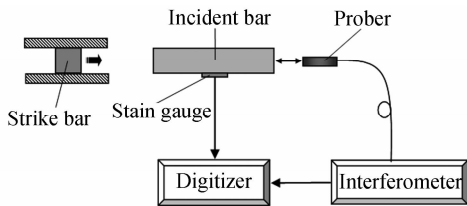


图 2 霍普金森杆实验结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of the hopkinson bar test

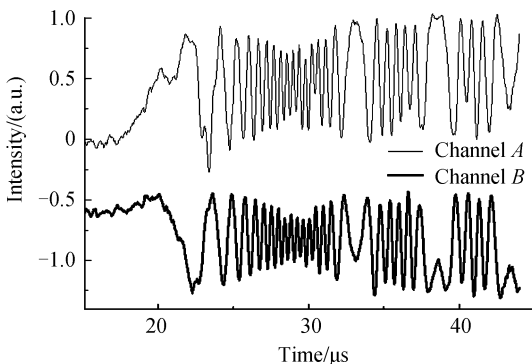


图 3 原始干涉信号

Fig. 3 Interferometer signals

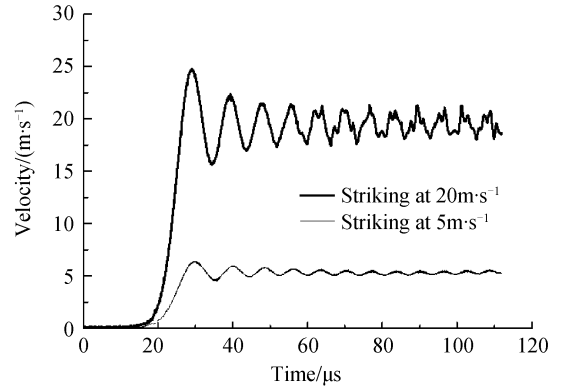


图 4 不同撞击速度获得的自由面速度历史

Fig. 4 Free surface velocity at different velocities

从取得的原始信号可以看出,干涉仪形成的干涉条纹有较好的信噪比,可以达到 20 以上,同时,两个通道之间的位相差与设计的 120° 接近。速度的加减速过程也在两路信号的相位关系变化中清晰体现出来。

从原始信号处理得到的速度时间曲线中,可以清楚看出,由于一维应力波在入射钢杆内多次来回反射,体现在自由面上是速度加载到与弹丸对应的压力值后,在该值附近上下振荡。其振荡的时间周期与应力波在入射钢杆中的传输时间对应,而振荡幅度随时间推移而逐渐变小,这也与应力波在钢杆中传播时能量逐渐耗散的物理过程吻合。实验中分别进行了撞击速度为 $5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $20\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 两种速度下的自由面测试,其速度测量值与理论计算的弹丸撞击对应的压力值(速度)一致,分别约为 $5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $20\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3 激光驱动高速过程测量

在高速过程测量中,采用脉冲激光驱动金属铝膜实现高速加载,实验布局如图 5。激光能量 80 mJ ,脉宽 10 ns ,经过透镜会聚后光斑直径约 3 mm ,对应的功率密度约 $10^8\text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,铝膜厚 $7\text{ }\mu\text{m}$,干涉仪条纹常量调节为 $150\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

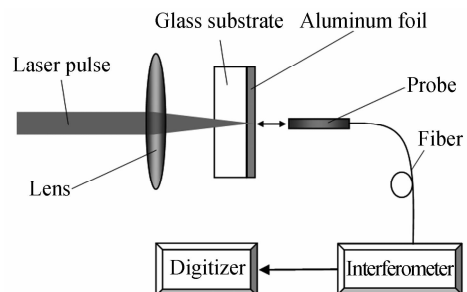


图 5 脉冲激光驱动金属铝飞片测速实验布局

Fig. 5 Experimental layout on the velocity measurement of pulse laser driven metal aluminum flyer

图 6 是取得的两路原始干涉信号. 从原始干涉信号不难看出, 两路干涉信号之间位相关系清晰, 条纹的疏密较好地反映了加速过程中速度变化的速率, 条纹数也较多, 可以有较高的速度分辨力.

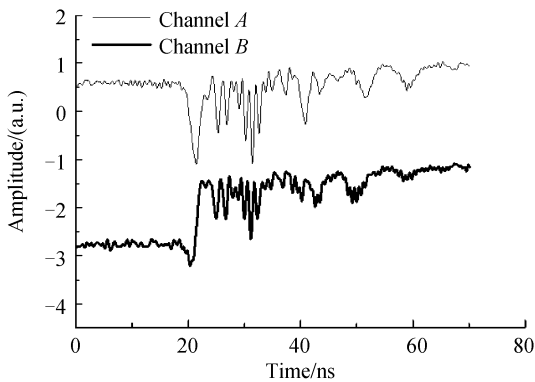


图 6 两路原始干涉信号
Fig. 6 Signals recorded

图 7 对应两路原始干涉信号处理得到的速度历史. 从处理得到的速度结果可以看出, 铝膜的最高速度达到了 $1\ 958\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

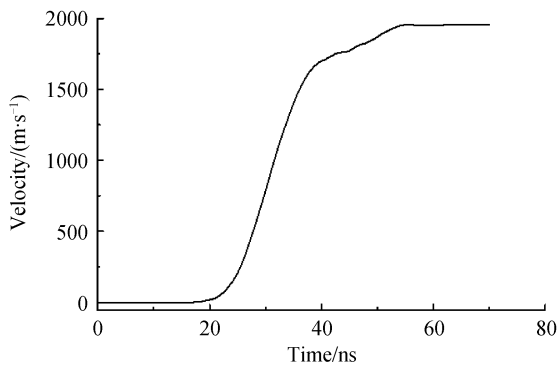


图 7 处理得到的速度历史
Fig. 7 Velocity history

实验中使用的数字示波器带宽为 500 MHz. 若采用位移干涉测试技术对该过程进行测量, 从位移干涉仪的原理分析, 该速度过程要求记录示波器的带宽必须大于 2.5 GHz. 在这一方面, 速度干涉测试技术对记录系统的带宽要求较低, 并且可以根据物理过程的特性, 采用调节延迟光纤长度的方法, 灵活调节条纹常量, 对应产生的条纹频率也在较大范围内实现可调. 因而速度干涉测试技术在这方面有其优势.

4 结论

实验结果表明: 本文设计的全单模光纤速度干涉仪系统具有较好的干涉信号质量; 通过调节延迟臂光纤的长度, 可灵活改变干涉仪的条纹常量; 解决了记录系统响应带宽受限问题; 拓展了测速的上限, 能够满足不同速度范围的物理过程测试需要, 并且对漫反射靶也能方便地进行测试.

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 Ze-ren. 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] PENG Qi-xian, MA Ru-chao, LI Ze-ren, et al. Photomultiplier under pulse 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.
- [5] PENG Qi-xian, LIU Qiao, LIU Jun, et al. Analysis of the incident angle and its influence on the laser velocity interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 809-812.
彭其先, 刘乔, 刘俊, 等. 测量角度对激光干涉测速的影响分析[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4): 809-812.
- [6] 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.
- [7] LI Z R, MA R C, CHEN G H, et al. Multipoint velocity interferometer system for any reflector[J]. *Rev Sci Instrum*, 1999, **70**(10): 3872-3876.
- [8] PENG Q X, LI Z R, WANG D T, et al. Fourpoint bisensitivity velocity interferometer with a multireflection etalon[J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, **78**(11): 113106.
- [9] LEVIN L, TZACH D, SHAMIR J. Fiber optic velocity interferometer with very short coherence length light source[J]. *Rev Sci Instrum*, 1996, **67**(4): 1434-1437.
- [10] WENG Ji-dong, TAN Hua, CHEN Jin-bao, et al. Application of fiber velocity interferometer system for any reflector in high pressure physics[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2004, **18**(3): 225-230.
翁继东, 谭华, 陈金宝, 等. 光纤任意反射面速度干涉系统在高压物理中的应用[J]. *高压物理学报*, 2004, **18**(3): 225-230.

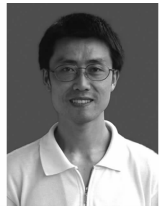
Design and Application of All-fiber Velocity Interferometer

PENG Qi-xian, MENG Jian-hua, WANG De-tian, LIU Jun, LI Ze-ren

(*Laboratory for Shock Waves and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)

Abstract: In order to develop the laser interferometer velocimetry in the experimental research of shock wave physics and explosion physics, an all-fiber velocity interferometer is presented. The single-mode fiber is adopted as optical transmission and delay components for this interferometer, which detects Doppler beat signals caused by velocity change to two moments of t and $t-\tau$. Because of little velocity change of objects to be tested corresponding to two-beam optical signals of two moments, which almost have equivalent frequency shift, and the beat frequency is also significantly lowered. Meanwhile, the fringe constant (value τ) can be flexibly adjusted in accordance with velocity change rate of objects to be tested, thereby making the beat signal frequency caused by velocity change less than the system bandwidth within the time scale of τ , so as to solve the problem of recording system corresponding to bandwidth limitation and extend upper limit of velocity measurement. As result of the adoption of single-mode fiber, only one space pattern in the fiber participates in interference, even the light returned from diffuse-reflection surface can preferably participate in interference after the mode selection of single-mode fiber, thereby realizing the measurement to diffuse-reflection target. Two fringe constants of $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ are adopted to conduct the Hopkinson bar experiment at low-velocity process and laser-driven experiment at high-velocity process. The experimental result proves the feasibility of this interference technique.

Key words: Interferometer; Velocity; Doppler effect; Fiber



PENG Qi-xian was born in 1970. He received the Ph. D. degree in applied optics from China Academy of Engineering Physics in 2009, and 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.