

光纤传输速度干涉仪*

李泽仁 李幼平^{a)} 马如超 谭显祥

(中国工程物理研究院流体物理研究所 成都 610003)

(a)中国工程物理研究院 成都 610003)

摘要 介绍一种用多模光纤传输入射和反射激光的速度干涉仪,阐述了这种干涉仪的原理和结构,并将其与传统的速度干涉仪进行比较。给出了用这种干涉仪测量电爆管的弹丸速度和钨样品在铁飞片冲击压缩下的自由面速度的实验装置和结果。文中最后总结了这种干涉仪的性能及特点。

关键词 激光多普勒技术 光纤传输 速度干涉仪

1 引言

传统的速度干涉仪(VISAR)^[1]具有时间分辨率高,连续测量,测试精度高,对测试目标无扰动等特点。是冲击波和爆轰波物理研究中的主要测试仪器之一,已广泛用于断裂、相变、状态方程等研究^{[2][3]}。但是,传统的速度干涉仪在空气中传输入射和漫反射激光,必须保持光的直线传播性,需要较大的传光空间,以有效地收集漫反射光,且实验应用中要求气炮靶室或爆炸塔必须有传光透明窗。为此我们作了改进,完成了一种用多模光纤传输入射和反射光的速度干涉仪,这种干涉仪不但保持了传统速度干涉仪的特点、技术性能和应用范围,而且克服了它的弱点使传光路径灵活多变,可以任意弯曲,实验中也不需要传光窗,使实验更安全方便。光纤传输速度干涉仪先后应用于测量电爆管的弹丸速度和轻气炮实验中探测钨样品在铁飞片冲击压缩下的自由面速度,均取得了满意的实验结果。本文阐述了这种干涉仪的设计结构,介绍其应用研究的实验装置和结果,最后总结了这种干涉仪的特点和性能。

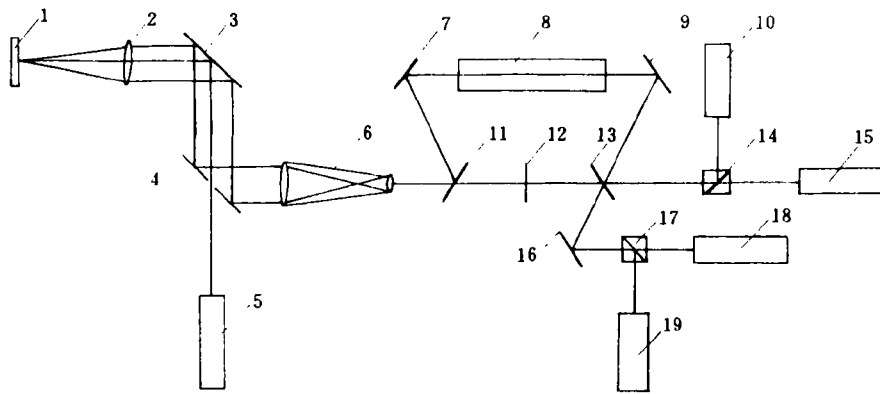
2 光纤传输速度干涉仪的设计结构

2.1 光纤传输速度干涉仪的结构

传统的速度干涉仪在空气中传输入射和反射光,如图1。光纤传输速度干涉仪用多模光纤传输入射和反射激光,其结构如图2,它分为发射和接收两支路,发射支路包括激光器、聚焦透镜 L_1 、发射光纤和成像透镜 L_2 ;接收支路包括透镜 L_2 、接收光纤、透镜 L_3 及干涉系统。在发射支路中,来自激光器的激光被透镜 L_1 聚焦在光纤的入射端面上,光纤将激光传输到样品装置中,并由 L_2 将它成像以照射样品表面。在接收支路中,透镜 L_2 收集来自样

* 本项目得到中国工程物理研究院基金委员会的资助。

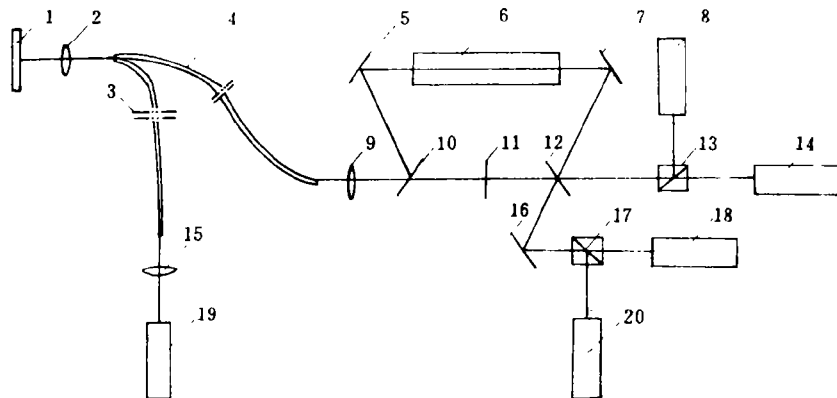
1993年3月10日收到原稿,6月22日收到修改稿。



1. 样品; 2. 透镜; 3. 反射镜; 4. 有孔反射镜; 5. 激光器; 6. 缩径望远镜; 7. 反射镜; 8. 延迟元件; 9. 反射镜; 10. 探测器; 11. 分束镜; 12. $\lambda_0/4$ 波片; 13. 分束镜; 14. 偏振分束镜; 15. 探测器; 16. 反射镜; 17. 偏振分束镜; 18. 探测器; 19. 探测器
 1. Target; 2. Lens; 3. Mirror; 4. Mirror with a hole; 5. Laser; 6. Telescope; 7. Mirror; 8. Etalon; 9. Mirror; 10. Detector; 11. Splitter; 12. $\lambda_0/4$ wave plate; 13. Splitter; 14. Polarizing splitter; 15. Detector; 16. Mirror; 17. Polarizing splitter; 18. Detector; 19. Detector

图1 传统速度干涉仪示意图

Fig. 1 Configuration of the traditional velocity interferometer



1. 样品; 2. 透镜 L_2 ; 3. 发射光纤; 4. 接收光纤; 5. 反射镜; 6. 延迟元件; 7. 反射镜; 8. 探测器; 9. 透镜 L_3 ; 10. 分束镜; 11. $\lambda_0/4$ 波片; 12. 分束镜; 13. 偏振分束镜; 14. 探测器; 15. 透镜 L_1 ; 16. 反射镜; 17. 偏振分束镜; 18. 探测器; 19. 激光器; 20. 探测器
 1. Target; 2. Lens L_2 ; 3. Incident fibre; 4. Receiving fibre; 5. Mirror; 6. Etalon; 7. Mirror; 8. Detector; 9. Lens L_3 ; 10. Splitter; 11. $\lambda_0/4$ wave plate; 12. Splitter; 13. Polarizing splitter; 14. Detector; 15. Lens L_1 ; 16. Mirror; 17. Polarizing splitter; 18. Detector; 19. Laser; 20. Detector

图2 光纤传输速度干涉仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the velocity interferometer with fibre transmission

品表面的漫反射光并将它成像在光纤一端,接收光纤在发射光纤的旁边收集。为了提高接收效率,接收光纤的接收端与发射光纤的出射端紧密贴在一起。漫反射光经光纤传输后先由透镜 L_3 变成所需直径的平行光,再进入干涉系统。在干涉系统中,分束镜将入射光分成两束,一束进入直接支路,另一束进入具有延迟元件的延迟支路,这两束光又在另一分束镜上重新混合相干。进入干涉系统的激光保持与垂直方向成 45° 偏振,直接支路中的 $\lambda_0/4$ 波片使 P 偏振方向的光相对于 S 方向的偏振光延迟了 $\pi/2$ 位相,这样干涉图是两组具有 $\pi/2$ 位相差的干涉图,并由偏振分束镜将它们分离。另外,在图 2 中第二分束镜分出的两部份相干光束分别包含两组 S 和 P 偏振的干涉图,因此共有四组干涉图,且由于传输中的半波损失, $P(S)$ 与 $P(S)$ 分量的干涉图具有 180° 的位相差。干涉图样的变化由光电探测器检测,特别指出,这种干涉仪使用两根光纤发射和接收激光,目的在于消除入射激光在光纤端面上的强反射背景。如果我们采用降低背景杂光的措施,也可以将发射和接收支路合为一体。

2.2 样品运动速度与条纹数 $F(t)$ 的关系

设 t 时刻样品的运动速度为 $v(t)$,样品的位置在 B ,如图 3。由于多普勒效应,反射光的频率由 ν_0 变为 $\nu(t)$,而且 $\nu(t)$ 与样品运动速度的关系为^[4]

$$\nu(t) = \nu_0 \left[1 + \frac{2v(t)}{c} \right] \tag{1}$$

其中: ν_0 是激光的固有频率, c 是真空中光速;同样, $t-\tau$ 时刻反射光的频率为

$$\nu(t - \tau) = \nu_0 \left[1 + \frac{2v(t - \tau)}{c} \right] \tag{2}$$

这里, τ 是延迟时间。光纤传输速度干涉仪的干涉系统仍满足准零程差条件^[6],它使各个漫反射光斑经直接支路与延迟支路传播后的视角程差相等。这样,虽然多模光纤的色散等因素引起各光斑在传输中的光程不同,但仍然是将包含 t 时刻和 $t-\tau$ 时刻多普勒信息的

两光波混频相干。当用光电探测器检测干涉图样时,探测器检测到是 t 和 $t-\tau$ 时刻光波的频率差,其频率为

$$\nu_m(t) = \nu(t) - \nu(t - \tau) = \frac{2\nu_0}{c} [v(t) - v(t - \tau)] \tag{3}$$

经过简单运算后得到^[6]

$$v(t - \frac{\tau}{2}) = \frac{\lambda_0}{2\tau} F(t) \tag{4}$$

其中: λ_0 是激光的原始波长, $F(t)$ 是记录波形的条纹数。系统记录的信号幅度 $y(t)$ 随 $F(t)$ 正弦变化,即

$$y(t) = A_0(t) [1 + \sin(2\pi F(t) + \varphi_0)] \tag{5}$$

其中: φ_0 是初位相, $A_0(t)$ 是振幅。如果考虑到延迟元件的折射率随波长变化的修正因子 δ ^[7],则有

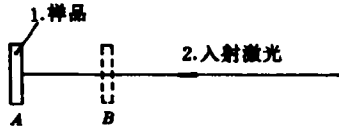


图 3 样品运动示意图

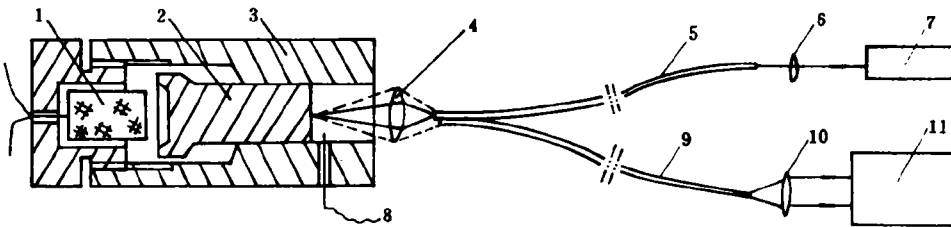
Fig. 3 Schematic diagram of the target movement

1. Target; 2. Incident laser

$$v(t - \frac{\tau}{2}) = \frac{\lambda_0}{2\tau(1 + \delta)} F(t) \quad (6)$$

3 应 用

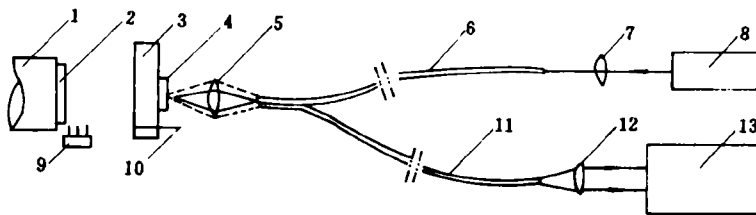
用光纤传输速度干涉仪测量电爆管弹丸速度的实验布置如图 4, 测量钨样品自由面速度的布置如图 5。实验中, 激光器是单频 He-Ne 激光器, 输出功率 15~18mW。透镜 L_1 、 L_2 的焦距是 10.9mm, 孔径是 10.0mm。 L_3 的焦距和直径分别为 50.0mm 和 35.0mm。发射和接收光纤是相同型号的梯度折射率光纤, 芯径 0.1mm, 长约 8.0mm, $N \cdot A$ 等于 0.22, 折射率分布如图 6。干涉仪主体是我们自己研究的 JSG-2 型激光速度干涉仪的主体^[8], 它用光电倍增管监测干涉图样, 示波器记录波形信号。对于电爆管, 弹丸材料是钢, 尺寸为 $\phi 10.0\text{mm} \times 50.0\text{mm}$, 弹丸速度由 DB-060A 电雷管爆炸提供。测量中, 干涉仪的条纹常数是 40.0m/(s · fringe), 示波器的水平扫速是 50.0 $\mu\text{s}/\text{div}$, 垂直灵敏度为 50.0mV/div, 示波器记录的波形信号如图 7(a)。图 5 表示的冲击压缩实验是在一级气体炮上做的, 飞片是 $\phi 50.0\text{mm} \times 2.0\text{mm}$ 的铁, 为了减缓钨中冲击波上升时间, 在钨样品的后表面上贴了一块



1. 雷管; 2. 弹丸; 3. 弹丸套; 4. 透镜 L_2 ; 5. 发射光纤; 6. 透镜 L_1 ;
7. 激光器; 8. 触发探针; 9. 接收光纤; 10. 透镜 L_3 ; 11. 干涉仪
1. Detonator; 2. Projectile; 3. Projectile cover; 4. Lens L_2 ; 5. Incident fibre; 6. Lens L_1 ;
7. Laser; 8. Trigger pin; 9. Receiving fibre; 10. Lens L_3 ; 11. Interferometer

图 4 测量电爆管弹丸速度的实验布置

Fig. 4 Experimental arrangement for measuring projectile velocity of the electric squib



1. 弹丸; 2. 飞片; 3. 有机玻璃; 4. 样品钨; 5. 透镜 L_2 ; 6. 发射光纤; 7. 透镜 L_1 ;
8. 激光器; 9. 刷子探针; 10. 触发探针; 11. 接收光纤; 12. 透镜 L_3 ; 13. 干涉仪
1. Projectile; 2. Flyer; 3. PMMA; 4. Target tungsten; 5. Lens L_2 ; 6. Incident fibre; 7. Lens L_1 ; 8. Laser;
9. Brush pin; 10. Trigger pin; 11. Receiving fibre; 12. Lens L_3 ; 13. Interferometer

图 5 用光纤速度干涉仪测量钨的自由面速度的实验布置

Fig. 5 Experimental arrangement for measuring free surface velocity of tungsten target

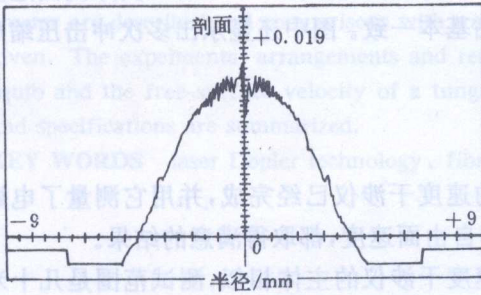


图 6 光纤的折射率剖面分布图
Fig. 6 Refraction index profile of the fibre

5.0mm 厚的有机玻璃。实验中,干涉仪的条纹常数是 $197.55\text{m}/(\text{s} \cdot \text{fringe})$,示波器水平扫速为 $0.5\mu\text{s}/\text{div}$,垂直灵敏度为 $50.0\text{mV}/\text{div}$,信号波形如图 7(b)。

图 8 所示的速度-时间曲线是用式 (5)、(6) 处理得到的。图 8(a) 是电爆管的弹丸运动曲线,显示出加速与减速的交替运动过程,但加速的幅度比减速的大,当速度 v_p 达到 $105.0\text{m}/\text{s}$ 时,很快减速到零。产生突然减速的原因在于弹丸尾部碰到弹托(弹托被固定在平台上),整个运动被阻。钨样品的自由面速度 v_{fs} [图 8(b)] 体现了多

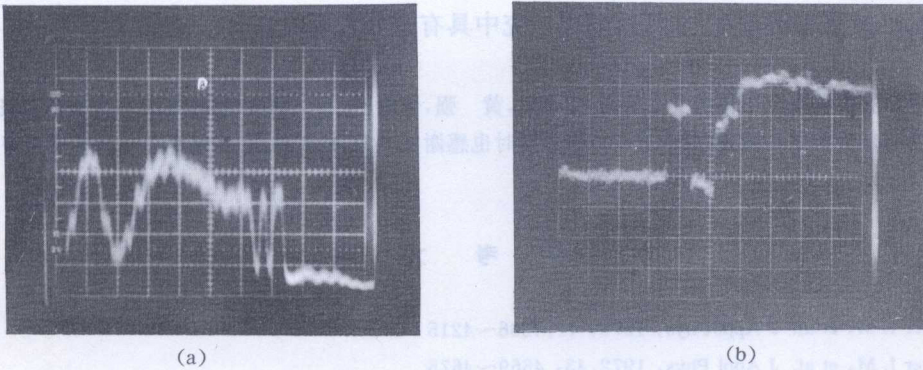


图 7 示波器记录的波形信号
Fig. 7 Signals recorded by oscillograph

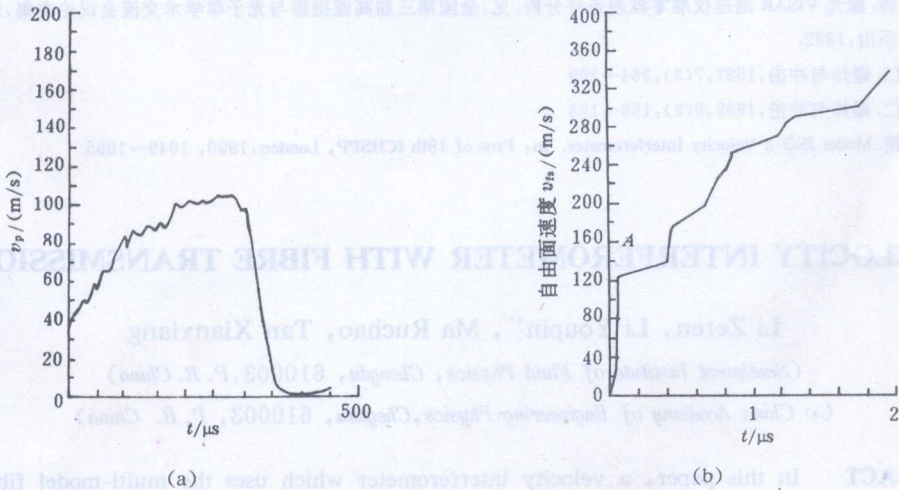


图 8 速度-时间曲线
Fig. 8 Histories of velocity vs time

次加速的过程。对于 667.0m/s 的碰撞速度,预估自由面速度是 150.0m/s,实际测出速度是 139.5m/s[对应图 8(b)的 A 点],与理论预估基本一致。图中还显示出多次冲击压缩后的自由面速度是 365.0m/s。

4 结 论

一种用多模光纤传输入射和漫反射激光的速度干涉仪已经完成,并用它测量了电爆管的弹丸速度和钨样品在铁飞片冲击压缩下的自由面速度,都取得满意的结果。

光纤传输速度干涉仪的干涉主体与传统速度干涉仪的主体相似,测试范围是几十米每秒至几千米每秒,测试误差小于 3%,具有非接触连续测量等特性。由于光纤的芯径很小,可以直接用它做光探针测量微区和内腔表面等的速度。

这种干涉仪在应用中将样品置于透镜 L_2 的像面而不是它的焦面(传统速度干涉仪是置于焦面),因此与传统速度干涉仪相比测量景深更大。

以这种干涉仪为基础可进一步发展成多点测速系统,在一次实验中可以同时探测多点的速度,提高实验效率,在流体物理研究中具有十分重要的意义。

本项目在实验研究中得到了王金贵,王智毅,黄 强,傅秋卫,王 祥,李蕙君等同志的帮助,吴廷烈,刘向东两同志参加了实验,特表示感谢!作者同时也感谢杨成龙,杨森林,岳正普等同志的支持与帮助。

参 考 文 献

- 1 Barker L M, et al. J Appl Phys, 1970, 41: 4206~4215
- 2 Barker L M, et al. J Appl Phys, 1972, 43: 4669~4675
- 3 Chhabildas L C, et al. J Appl Phys, 1980, 51(9): 4799~4805
- 4 Goosman D R, et al. UCRL-52792, 1979, 687~691
- 5 王文林. 激光 VISAR 测速仪准零程差条件分析. 见: 全国第三届高速摄影与光子学学术交流会议论文集, 第三册. 四川乐山: 1982.
- 6 李泽仁. 爆炸与冲击, 1987, 7(3): 264~269
- 7 李泽仁. 爆炸与冲击, 1989, 9(2): 158~163
- 8 马如超. Model JSG-2 Velocity Interferometer. In: Proc of 19th ICHSPP, London; 1990, 1049~1055

VELOCITY INTERFEROMETER WITH FIBRE TRANSMISSION

Li Zeren, Li Youpin^{*}, Ma Ruchao, Tan Xianxiang

(Southwest Institute of Fluid Physics, Chengdu, 610003, P. R. China)

(^{*}) China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003, P. R. China)

ABSTRACT In this paper, a velocity interferometer which uses the multi-model fibres to transmit incident and reflective laser is introduced. The principle and the structure of the interferometer are described and comparisons with traditional interferometer about their specifications are

transmit incident and reflective laser is introduced. The principle and the structure of the interferometer are described and comparisons with traditional interferometer about their specifications are given. The experimental arrangements and results of measuring projectile velocity of an electric squib and the free-surface velocity of a tungsten target are given as well. Finally its functions and specifications are summarized.

KEY WORDS laser Doppler technology, fibre transmission, velocity interferometer