

文章编号: 1001-1455(2009)01-0105-04

# 光纤位移干涉仪在爆轰加载飞片速度测量中的应用\*

王德田<sup>1</sup>, 李泽仁<sup>1</sup>, 吴建荣<sup>2</sup>, 刘寿先<sup>1</sup>, 刘俊<sup>1</sup>, 蒙建华<sup>1</sup>, 彭其先<sup>1</sup>, 陈光华<sup>1</sup>, 刘乔<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 利用光学多普勒效应和外差方法搭建了一台光纤位移干涉仪。装置采用光通信行业中已经发展成熟的器件, 主要由带尾纤的半导体激光器、三端口环形器、光纤探头、宽带探测器以及宽带高采样率示波器等组成。整个装置结构简单, 价格便宜, 采用了信号光和参考光同轴结构, 实现了任意反射面的速度测量, 克服了偏振模式色散的影响, 能够实现长量程测量, 量程达到 20 mm。利用该装置进行了爆轰加载下飞片速度测量, 测量最高速度达到 1 300 m/s, 工作距离达到 20 mm, 同时利用 VISAR 对飞片速度进行了对比测量, 结果表明用两种不同方法所测得的速度曲线吻合很好。

**关键词:** 爆炸力学; 光纤位移干涉仪; 多普勒效应; 爆轰加载飞片; 外差技术; 环形器

**中图分类号:** O384

**国标学科代码:** 130·3599

**文献标志码:** A

## 1 引 言

爆轰物理中, 速度是一个非常重要的观测量。有很多方法能够把飞片驱动到数千米每秒的速度, 例如爆炸、轻气炮和激光。传统测量数千米每秒速度的方法有: 可测量任意反射面的速度干涉仪(VISAR)<sup>[1-2]</sup>和法布(Fabry-Perot)<sup>[3-4]</sup>系统。每种方法都有其优势和劣势。VISAR和法布系统相比, 结构紧凑, 价格也便宜。两个系统都有很高的时间响应, 但是法布系统用条纹相机来记录数据, 所以只有有限的记录长度, 而VISAR利用示波器记录可以有比法布系统长的多的记录长度。两个系统都容易受到速度突变的影响, VISAR系统需要另外的一个标准具来解决条纹跳动的问题。VISAR和F-P系统的数据处理有显著的不同, VISAR利用反射回的两束信号光混频来获得速度信息, F-P系统利用的是照片上条纹的位置。从自由面返回的光强在测量中经常变化, 从而给VISAR的数据分析带来困难, F-P在这方面没有VISAR那样敏感。VISAR的数据分析包括许多参数, 可用来调整获得较好的李萨如图形, F-P系统中的速度历史由胶片中条纹的位置唯一确定, 但是数据受到由条纹相机引起的畸变影响。F-P的最大优势在于它可以测量多个断续的速度, 甚至是一个小区域的速度分布, 而这些VISAR却不能够做到。

光纤位移干涉仪<sup>[5-10]</sup>是一种新的位移和速度测量技术, 其爆轰加载下的动态速度测量接近 1 200 m/s。干涉仪利用外差方法具有许多优势, 且避免了VISAR和F-P的不足。干涉仪由光纤和光纤集成器件构成, 在通信行业, 这些器件已经发展的非常成熟, 所以干涉仪的结构小巧、紧凑, 易于操作而且价格低。干涉仪获得的速度历史直接和拍频的频率相关, 所以不需要额外的部件来解决条纹跳动的问题。数据用示波器记录, 这样可以有较长的记录长度同时避免相机的畸变。最后, 利用傅立叶变换的方法来分析数据可以方便地得到速度, 甚至是断续的速度。光纤位移干涉仪除了可以用于爆轰的速度测量, 还可用于振动、转动的角速度<sup>[8]</sup>测量等, 光纤外差干涉仪的不足是光源采用的 1 550 nm 通信波长, 虽然减小了拍频的频率, 但是给实验操作带来了潜在的危險和调试上的困难, 也导致系统空间分辨率的下降。

目前, 光纤位移干涉仪主要采用两种结构。一种结构如图 1 所示<sup>[5-6]</sup>, 该结构为同轴结构, 减少了外界对系统的影响, 克服了偏振模式色散的影响, 能够实现长量程测量, 可以得到很好的信噪比。另外一种结构(all-fiber displacement interferometer system for any reflector, DISAR)如图 2 所示<sup>[10]</sup>, 信号光和参考光分离, 需要考虑环境和偏振模式色散的影响, 但是这种结构采用 3×3 光纤耦合器, 输出相位差为 120°的三路干涉信号, 可以利用VISAR的数据处理方法对信号进行处理, 从而实现方向的判别。

\* 收稿日期: 2007-08-13; 修回日期: 2007-12-12

基金项目: 中国工程物理研究院预研基金项目(20050434)

作者简介: 王德田(1984—), 男, 硕士。

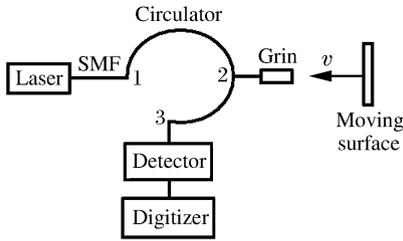


图1 系统装置图

Fig.1 System setup

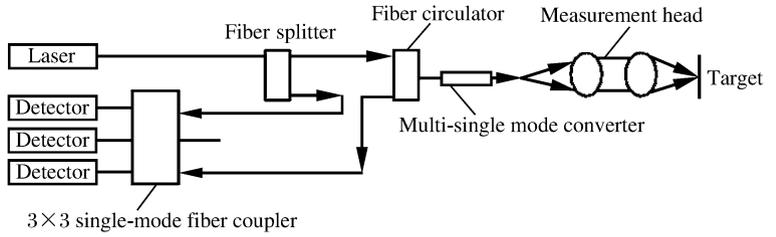


图2 DISAR 结构图

Fig.2 Diagram of DISAR

## 2 光纤位移干涉仪测量原理

光纤位移干涉仪的原理如图3。激光器出射的激光经过光纤耦合器1被分成两束,一束通过光纤耦合器2直接入射到探测器(参考光),另一束光经过探头入射到靶面。从靶面反射和散射的光(信号光,产生多普勒频移)被探头收集也经过耦合器2入射到探测器,参考光和信号光产生差拍信号,被探测器记录,然后通过示波器显示,通过信号处理可以得到靶面运动的速度信息。本文中采用了短时傅立叶变换的方法进行时频分析。

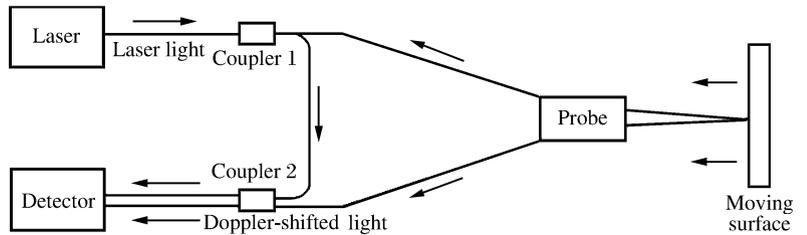


图3 光纤位移干涉仪原理图

Fig.3 Schematic diagram of the fiber displacement interferometer

设信号光强为  $I_0$ , 频率为  $f_0$ , 波长为  $\lambda_0$ , 参考光强为  $I_d$ , 频率为  $f_d$ , 由多普勒效应和光场的干涉公式可得

$$I = I_0 + I_d + 2\sqrt{I_0 I_d} \cos \left[ 4\pi \int_0^t v(t)/\lambda_0 dt + \varphi \right] \quad (1)$$

式中:  $\varphi$  为两光束的初始相位差。令  $N(t) = 2 \int_0^t v(t)/\lambda_0 dt$ , 称为条纹数, 则拍频

$$f_b = f_d - f_0 = 2v(t)/\lambda_0 = dN/dt \quad (2)$$

所以

$$v(t) = \lambda_0 f_b / 2 = (\lambda_0 / 2) dN/dt \quad (3)$$

可知, 速度和条纹数的微分有关, 而和条纹数无关。  $f_b$  可以通过对干涉信号进行时频分析得到, 由于干涉信号  $f_b$  较大, 需要记录系统具有高的带宽  $B$  和采样率  $S$  ( $B \geq 2v_{\max}/\lambda_0$ ,  $S \geq 4B$ ) 来保证记录信号不会发生失真。图4给出了系统带宽  $B$  和采样率  $S$  与可测量的最大速度  $v_{\max}$  的关系。

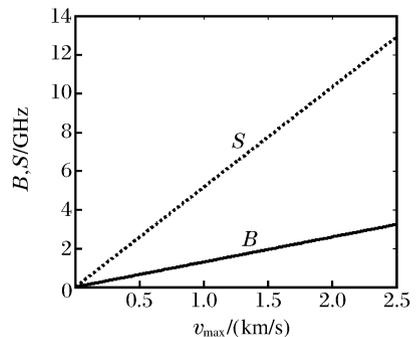
## 3 系统搭建

系统由光源、三端口环形器、光纤探头、探测器、示波器等构成, 如图1所示。激光器出射的激光经过单模光纤入射到环形器的端口1, 从端口2出射, 照射在靶面上, 从靶面发射和散射的光从端口2入射, 从端口3出射, 而参考光同样由探头的回波损耗提供, 信号光和参考光在探测器实现混频。下面介绍一下组成器件。

光源为半导体激光器, 波长 1546 nm, 单纵模, 尾纤输出。光源的选择对于干涉仪至关重要, 与干涉仪的空间分辨率、干涉条纹的对比度以及测量的景深等密切相关, 好的光源应该有好的信噪比和单频特性。三端口环形器: 实现光束的单向传输(即实现光束  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$  的传播)。探头: 干涉仪的探头采用的是光纤探头, 收集效率较高。记录系统(探测器和示波器): 记录系统的带宽决定着干涉仪能够测量的最大速度, 示波器的采样率和干涉仪的时间分辨率密切相关, 好的记录系统应该有足够高的带宽和采样率。

## 4 实验研究

进行了两发传爆药柱驱动铜飞片实验, 并与 VISAR 的测量结果进行比较, 得到了很好的一致性。

图4 系统带宽  $B$  和采样率  $S$  与速度  $v_{\max}$  的关系Fig.4  $B-v_{\max}$  curve and  $S-v_{\max}$  curve

### 4.1 空腔加载爆轰实验

为了得到比较平缓的冲击波前沿,在传爆药柱和飞片之间加了 5 mm 的空气隙。实验装置如图 5 所示,光纤位移干涉仪的探头和 VISAR 的探头对称分布,他们距离飞片中心都是 10 mm。光纤位移干涉仪的探头距离飞片 8 mm, VISAR 探头距离飞片 70 mm。

图 6 为位移干涉仪得到的原始干涉信号。图 7 为位移干涉仪和 VISAR 得到的速度曲线对比图,具有很好的一致性,在 9 μs 的时间内,速度从零加速到 1 142 m/s。

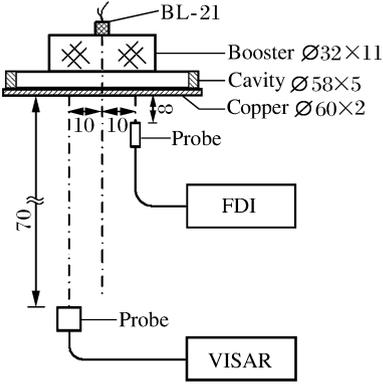


图 5 实验装置示意图  
Fig. 5 Experimental setup

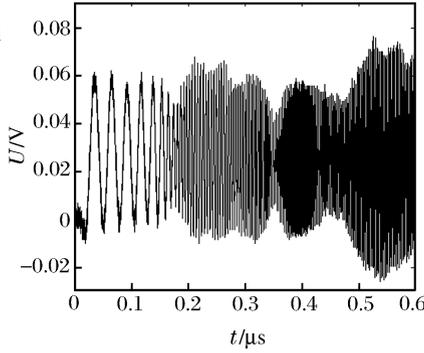


图 6 光纤位移干涉仪原始信号  
Fig. 6 Interference signal of the fiber displacement interferometer

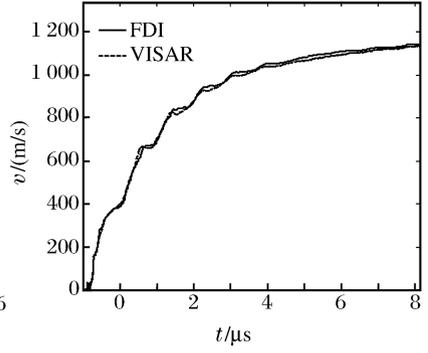


图 7 实测速度  
Fig. 7 The measured velocities

### 4.2 接触爆轰实验

实验装置如图 8 所示,采用两个传爆药柱重叠放置驱动飞片,没有空腔。光纤位移干涉仪的探头和 VISAR 的探头对称分布在以飞片中心为圆心的 10 mm 半径的圆周上。光纤位移干涉仪的探头距离飞片 20 mm, VISAR 探头距离飞片 70 mm。

图 9 为位移干涉仪原始干涉信号,图 10 为位移干涉仪和 VISAR 得到的速度曲线对比图。由于采用了两个传播药柱且没有空腔结构,得到一个陡峭的上升沿,速度曲线的偏差可能由于靶面的偏斜造成。

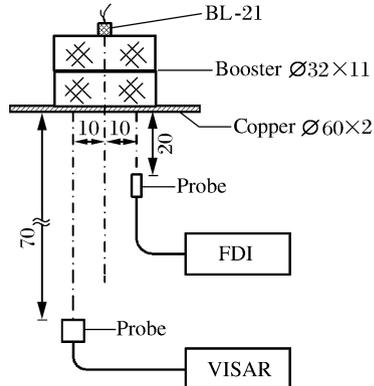


图 8 实验装置示意图  
Fig. 8 Experimental setup

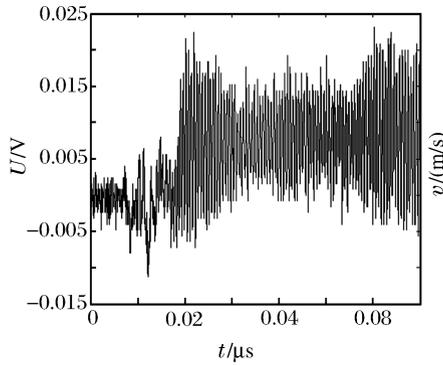


图 9 光纤位移干涉仪原始信号  
Fig. 9 Interference signal of the fiber displacement interferometer

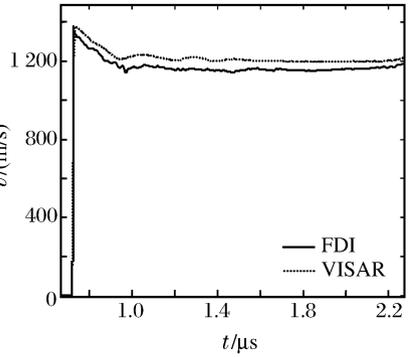


图 10 实测速度  
Fig. 10 The measured velocities

## 5 结 论

与普通的光纤干涉型传感器相比,采用同轴结构,实现了任意反射面的速度测量,克服了偏振模式色散的影响,能够实现长量程测量,工作距离达到 20 mm,同时得到很好的信噪比。利用光通信行业已经发展成熟的器件搭建了光纤位移干涉仪,结构小巧、紧凑,易于操作,而且价格低很多。进行了空腔加载实验和接触爆轰实验,并与标准的测速仪器 VISAR 进行了对比实验,得到了很好的一致性,测量速度已达到 1 300 m/s。证明了位移干涉仪在爆轰物理中应用的可行性,进一步的工作是搭建多点的位移干涉仪。

## 参考文献:

- [1] Barker L M, Hollenbach R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface[J]. Journal of Applied Physics, 1972,11:4669-4675.
- [2] Goosman D R. Analysis of the laser velocity interferometer[J]. Journal of Applied Physics, 1975,46:3516-3524.
- [3] Durand M, Laharrague P, Lalle P, et al. Interferometric laser technique for accurate velocity measurement in shock wave physics[J]. Review of Scientific Instruments, 1977,48:275-278.
- [4] McMillan C F, Goosman D R, Parker N L, et al. Velocimetry of fast surfaces using Fabry-Perot interferometry[J]. Review of Scientific Instruments, 1988,59:1-20.
- [5] Strand O T, Goosman D R, Martinez C, et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques[J]. Review of Scientific Instruments, 2006,77:83-108.
- [6] Strand O T, Berzins L V, Goosman D R, et al. Velocimetry using heterodyne techniques[R]. UCRL-CONF-206034,2004.
- [7] Sargis P D, Molau N E, Sweider D, et al. Photonic doppler velocimetry[R]. UCRL-ID-133075,1999.
- [8] Jaroszewicz L R, Krajewski Z. Optical fibre interometeic system for Doppler effect measurement[J]. Opto-Electronics Review, 2002,10(3):185-191.
- [9] Mercier P, Benier J, Azzolina A, et al. Photonic Doppler velocimetry in shock physics experiments[J]. Journal de Physique IV, 2006,134:805-812.
- [10] WENG Ji-dong, TAN Hua, WANG Xiang, et al. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution[J]. Applied Physics Letters, 2006,89(11):1-3.

## An optical-fiber displacement interferometer for measuring velocities of explosively-driven metal plates

WANG De-tian<sup>1\*</sup>, LI Ze-ren<sup>1</sup>, WU Jian-rong<sup>2</sup>, LIU Shou-xian<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>1</sup>,  
MENG Jian-hua<sup>1</sup>, PENG Qi-xian<sup>1</sup>, CHEN Guang-hua<sup>1</sup>, LIU Qiao<sup>1</sup>

(1. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,*

*Mianyang 621900, Sichuan, China;*

*2. University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)*

**Abstract:** An optical-fiber displacement interferometer was proposed on the basis of the optical Doppler effects and heterodyne technique. The proposed interferometer was assembled by using the components well developed in the telecommunication industry, which consisting of a fiber-pigtailed semiconductor laser, a three-port optical circulator, a fiber probe, a wideband detector, a high-sampling-rate broadband oscilloscope, and so on. The coaxial configuration for the signal light and reference light is adopted so that the proposed interferometer can measure velocities of any reflecting surface and overcomes the effects of polarization-mode dispersion, and its work distance is up to 20 mm. The velocities of the explosively-driven metal plate were measured by the proposed interferometer and compared with those measured by the velocity interferometer system for any reflector. Measured results show the velocities by these two methods are accordant with each other.

**Key words:** mechanics of explosion; fiber displacement interferometer; optical Doppler effect; explosively-driven metal plate; heterodyne technique; optical circulator

\* Corresponding author: WANG De-tian

E-mail address: wdtabc@yahoo.com.cn