

文章编号: 1000-5773(2004)03-0225-06

# 光纤任意反射面速度干涉系统 在高压物理中的应用\*

翁继东<sup>1,2</sup>, 谭 华<sup>1</sup>, 陈金宝<sup>2</sup>, 贾 波<sup>3</sup>, 胡绍楼<sup>1</sup>, 马 云<sup>1</sup>, 王 翔<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 国防科学技术大学应用物理系, 湖南长沙 410073; 3. 复旦大学通信科学与工程系, 上海 200433)

**摘要:**介绍一种全光纤任意反射面速度干涉仪(FVISAR), 论证了采用 SLD 宽光谱光源的全光纤速度干涉仪的等程干涉工作原理。对喇叭振动以及 Hopkinson 压杆加载条件下, 铝样品的自由面速度进行了测量。结果表明: 该 FVISAR 系统工作稳定, 可用于低自由面速度剖面的测量。

**关键词:**多普勒效应; 任意反射面速度干涉系统(VISAR); 光纤耦合器; 自由面速度

**中图分类号:** O521.3 **文献标识码:** A

## 1 引 言

在高压状态方程和冲击波作用下材料物态响应特性的研究中, 可测量“任意反射面的速度干涉仪”技术, 已经成为诊断冲击作用下样品自由面速度剖面或粒子速度剖面的主要技术。该技术简称为 VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) 技术, 这项技术的主要优点在于能够对高速度、高加速度运动的事件进行非接触连续测试。这种技术自问世以来, 经数十年的发展已经成熟, 成为许多重点实验室的一种标准设备, 被广泛用于材料在动态加载下的相应特性研究。冲击波物理与爆轰物理实验室经过近 10 年的研制, 突破了国外的技术封锁, 发展了独特的 VISAR 技术, 已经能够较好地应用于高压状态方程的研究中<sup>[1]</sup>。

20 世纪 90 年代中期, 以色列科学家 L. Levin<sup>[2]</sup>报道了全光纤 VISAR 的原理性研究结果。他利用光纤代替传统 VISAR 的光学元、器件, 通过光纤耦合器使两路激光实现相干, 在测量喇叭膜片振动的实验中, 观察到了清晰的干涉条纹。这种速度干涉技术被称为全光纤 VISAR (All-Fiber VISAR) 或 FVISAR 技术。与传统的 VISAR 相比, FVISAR 在原理上实现了较大的突破, 大大降低了对干涉系统照明光源相干性和光强的要求, 因此这种干涉仪也称为宽光谱光纤任意反射面速度干涉仪, 或白光干涉仪。

在国内, 贾波<sup>[3]</sup>等首先开展了全光纤 VISAR 技术研究, 在 2000 年取得了原理性的突破, 研制成功了原理性 FVISAR 系统。该系统使用激光二极管光源(LD 光源), 利用 Hopkinson 压杆测量了一维应力加载下铝样品的自由面速度剖面, 实验获得了初步成功, 取得了有说服力的数据。表明 FVISAR 技术可用于加速度很高、但运动速度较低(9~30 m/s)的界面或粒子速度剖面的测量。最近, 我们对该系统进行了改进, 采用宽光谱的超辐射激光二极管光源(SLD 光源)代替 LD 光源, 使 FVISAR 信号的稳定性和信噪比得到了较大的提高, 成功地测量了在霍布金森压杆一维应力加载下铝样品的自由面速度,

\* 收稿日期: 2003-09-16; 修回日期: 2003-12-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10232040)

作者简介: 翁继东(1977—), 男, 硕士, 主要研究方向: 光纤传输及激光干涉。

E-mail: wengjd1234@etang.com

实验测量与理论计算的速度剖面基本一致,这表明宽光谱 FVISAR 可用于测量低速下的物体运动速度,同时也证明了数据处理程序的科学性与适用性。

## 2 宽光谱光源 FVISAR 原理

VISAR 干涉系统是基于激光多普勒(Doppler)效应而建立起来的、连续测量运动物体界面速度的一种精密测试技术,严格地说,它不同于一般的光学干涉(如扬氏干涉、双孔干涉),是一种拍频干涉技术。图 1 是传统 VISAR 系统的原理图。

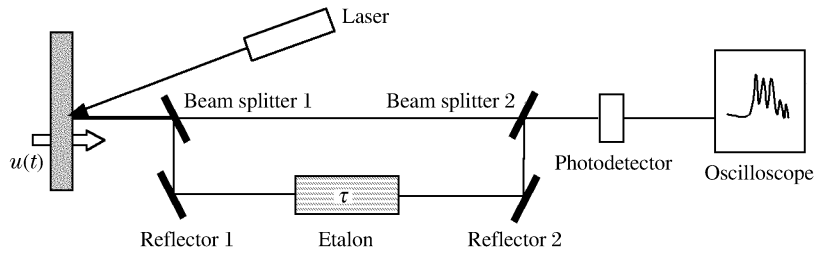


图 1 传统 VISAR 原理图

Fig. 1 A diagram of the traditional VISAR

频率为  $\nu_0$  的激光入射到以速度  $u(t)$  运动的物体表面上,由于多普勒效应,从物体表面反射回来的光信号频率变为  $\nu(t)$

$$\nu(t) = \nu_0 [1 + 2u(t)/c] \tag{1}$$

反射光与入射光频率之差称为多普勒频移  $\Delta\nu$ ,它携带了物体运动速度的信息,由(1)式可知,频率的变化  $\Delta\nu$  为

$$\Delta\nu = \nu(t) - \nu_0 = 2u(t)\nu_0/c \tag{2}$$

式中: $c$  为光速, $u(t)$  为运动物体的速度。从图 1 可见,从运动物体反射回来的、包含了多普勒频移的激光被分束器 1 分为两束,其中一束经反射镜 1 进入具有延迟时间为  $\tau$  的标准具,另一束则不经过标准具,当这两束激光在分束器 2 上相遇时,即可发生拍频相干,形成明暗相间的条纹。可以证明<sup>[4]</sup>, $t$  时刻的条纹总数  $N(t)$  与物体表面的运动速度  $u(t)$  之间的关系可表示为

$$u(t - \tau/2) = N(t)F_v/(1 + \delta) \tag{3}$$

式中: $F_v = \lambda/2\tau$ ,称为 VISAR 系统的条纹常数,它表示单位条纹变化所对应的速度改变量,也称为 VISAR 系统的速度灵敏度, $\lambda$  为激光波长, $\tau$  为标准具的延迟时间; $\delta$  为标准具材料的色散修正因子。为了满足时间相干性的要求,激光的相干长度  $L_0$  应满足  $L_0 > \tau \cdot c$ 。

与传统 VISAR 相比,FVISAR 使用相干长度为毫米量级的 SLD 宽光谱光源,因此在干涉原理上与传统 VISAR 不同,属于所谓“等光程干涉”技术。其基本结构如图 2 所示。

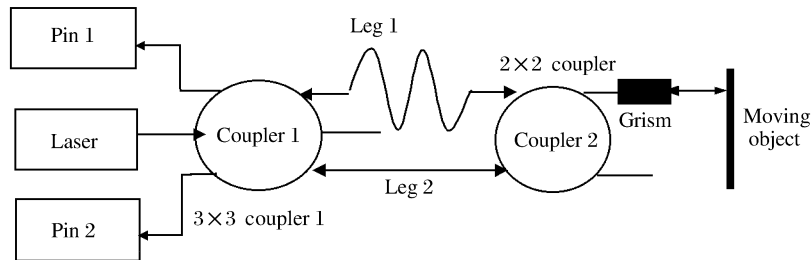


图 2 宽光谱光源 FVISAR 原理图

Fig. 2 A diagram of the wide spectrum laser FVISAR

FVISAR 类似于非平衡马赫-泽德型干涉仪<sup>[5]</sup>。光源输出的激光被耦合器 1 分成两路,分别经光臂 1 和光臂 2 传输至耦合器 2。由耦合器 2 输出一路激光经光纤准直镜引向运动物体的表面,由表面反射回的光再经准直镜汇聚后,重新进入光纤耦合器 2,并被分成两路,分别由光臂 1 和光臂 2 返回耦合器 1。最后,从耦合器 1 输出的两路干涉信号分别被光电探测器 Pin 1 和 Pin 2 记录。由图 2 可知,返回耦合器 1 上的光可以分为 4 种情况:

$L_{11}$ :由耦合器 1 经光臂 1 传输至靶面,靶面反射光沿光臂 1 返回耦合器 1;

$L_{12}$ :由耦合器 1 经光臂 1 传输至靶面,靶面反射光沿光臂 2 返回耦合器 1;

$L_{21}$ :由耦合器 1 经光臂 2 传输至靶面,靶面反射光沿光臂 1 返回耦合器 1;

$L_{22}$ :由耦合器 1 经光臂 2 传输至靶面,靶面反射光沿光臂 2 返回耦合器 1。

在以上 4 种经不同传输路径的光信号中,只有  $L_{12}$  和  $L_{21}$  两路光满足干涉条件,能够发生拍频相干,其它任意两路光的程差太大(远大于 SLD 光源的相干长度)而不能发生干涉。虽然  $L_{12}$  和  $L_{21}$  的光程相等,但是它们携带有不同时刻运动表面的速度信息,因而属于等程差干涉。因此,FVISAR 对光源相干性的要求被大大降低,光源相干长度  $L_0$  只需满足下式即可

$$L_0 > 2u_{\max} \tau \quad (4)$$

式中: $\tau$  为延迟臂的延迟时间, $u_{\max}$  为被测表面的最大速度。

可以证明<sup>[3]</sup>,如果不考虑光强损耗,在光纤耦合器等分光比的情况下,光电探测器 1 和光电探测器 2 端的相干光强的形式可写为

$$I(t) = \frac{1}{9} I_0 + \frac{1}{18} I_0 \cos \left[ \frac{2\pi u(t)}{F_v} + \varphi \right] \quad (5)$$

式中: $I_0$  为  $3 \times 3$  光纤耦合器的输入光强, $F_v = \lambda c / 2n\Delta L$  为条纹常数, $\lambda$  为光源的中心波长, $n$  为光纤媒质的折射率, $\Delta L$  为光臂 1 的延迟光纤长度。此外由于两个输出端的光信号形式基本相同,只是初相位  $\varphi$  相差约  $120^\circ$ ,利用这一点可以区分自由面运动的加速或减速变化<sup>[6]</sup>。使用时,可以通过改变延迟光纤的长度而改变条纹常数。

由于宽光谱光源 FVISAR 实现了完全的空间相干,完全消除了“闲程”,理论上可以采用白光作为光源。但是由于宽光谱光源 FVISAR 的调制度在理想情况下仅为  $1/3$ ,同时光源功率转化为信号功率的最高利用率仅为  $1/9$  左右,由于这些限制,这种系统对探测器提出了比较苛刻的要求。

### 3 SLD 光源改善系统稳定性与信噪比的依据

在单模光纤传输中,不同偏振模式间的传播常数存在微小差异,这种传播常数的差异受外界环境的影响较大。光纤位置移动、光纤弯曲、外界扰动和温度变化等都会对偏振模式形成的传播常数差异造成影响。如果偏振模式色散差异形成的等效光程差异在激光器的相干长度范围内,系统将形成偏振模式色散效应(PMD)造成的干涉效果,这种干涉效应将随外界环境的变化而变化,从而增加了系统的不稳定性,降低系统的信噪比。为了增加系统的稳定性,采取以下措施:

(1) 增加系统传输光纤的长度,以此增大由偏振模式色散引起的等效光程差  $\Delta L_{\text{PMD}}$ ;

(2) 采用宽光谱光源,以此减小光源的相干长度  $L_0$ 。

由以上分析可知,只要满足  $\Delta L_{\text{PMD}} > L_0$ ,即 PMD 效应形成的等效光程差大于激光器的相干长度,偏振模式之间将不能形成稳定的干涉效果,从而消除了偏振模式色散效应对系统稳定性造成的负面影响,提高了系统的稳定性,改善了干涉条纹的信噪比。

### 4 实验设计与实验结果

我们设计的 FVISAR 采用波长为  $1.31 \mu\text{m}$ 、谱宽  $35 \text{ nm}$ 、输出功率约  $0.5 \text{ mW}$  的 SLD 半导体激光器。光电探测器灵敏度小于  $100 \text{ nW}$ ,带宽约  $40 \text{ MHz}$ 。利用两种类型的实验,对所研制的 FVISAR 进行了原理性检验。首先测量喇叭膜片在音频信号调制下的谐振加速度。实验所测示波器的波形如图 3 所示,结果表明,该 FVISAR 系统输出的波形稳定、信噪比较高。

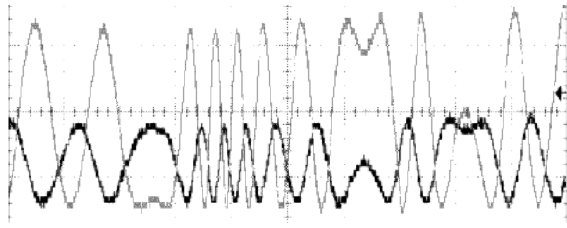


图 3 以喇叭振动为速度调制源的 FVISAR 信号  
Fig. 3 Interferential signals from the harmonic vibration by FVISAR

第二类实验用 Hopkinson 压杆作为低冲击加载装置,利用 FVISAR 系统测量了一维应力下铝样品的自由面速度剖面。实验装置见图 4。实验中撞击杆的速度为 13 m/s,一维应力波通过铝入射杆传入粘贴在铝入射杆另一端的铝样品中,铝样品尺寸为  $\varnothing 14 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。由于应力波的作用导致样品自由面发生运动,当应力波在样品自由面与入射杆/样品界面之间来回反射时,将引起自由面速度的振荡(详见图 6)。图 5 为示波器记录的 FVISAR 两路输出信号。FVISAR 条纹常数为  $2.62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/\text{Fr}$ 。图 6 为经过数据处理后的自由面速度剖面。其中,

粗实线为由 FVISAR 测量得到的速度剖面,细实线为用阻抗匹配法计算的速度剖面,可以看出,两者的符合程度是比较满意的。

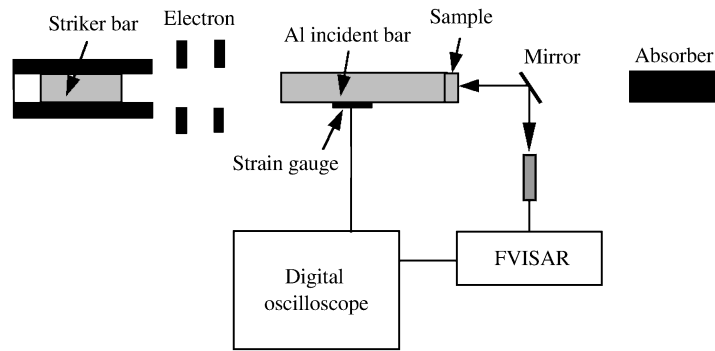


图 4 Hopkinson 杆实验系统示意图  
Fig. 4 Experimental assembly for FVISAR in Hopkinson bar system

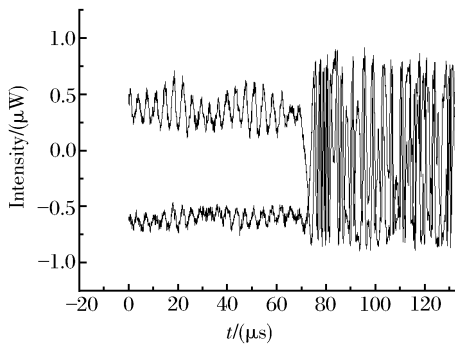


图 5 Hopkinson 实验铝样品自由面的 FVISAR 信号  
Fig. 5 FVISAR signals in Hopkinson bar

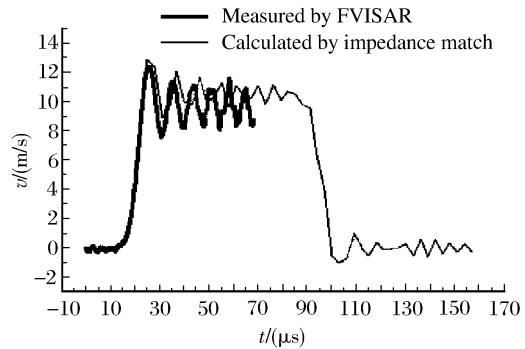


图 6 撞击速度为 13 m/s 时,铝样品的自由面速度剖面  
Fig. 6 Free surface velocity profile of Al at striking velocity of 13 m/s

将撞击杆速度提高到 58.5 m/s,同时采用 300 MHz 带宽的放大器,条纹常数设置为  $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/\text{Fr}$ ,其它实验条件不变。所得的实验信号见图 7。可以看出,信噪比仍然比较理想,值得提出的是由于  $3 \times 3$  耦合器的输出相位差<sup>[6,7]</sup>不一定恰好是  $120^\circ$ ,为此,必须对实验测量到的两路输出信号进行拟合,以求出真实相位差<sup>[7]</sup>。图 8 是对图 7 实验信号进行拟合后获得的利萨如图形,图中细实线为由两路实验信号确定的利萨如图形,对它进行拟合所得的椭圆为图中的粗实线。

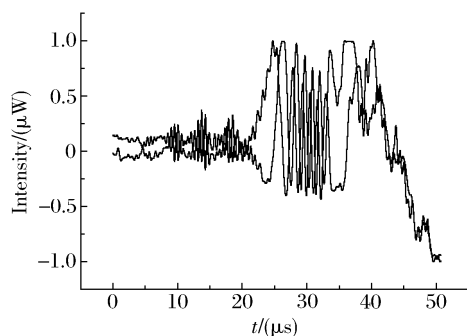


图7 撞击速度为 58.5 m/s 时的 FVISAR 信号  
Fig.7 FVISAR signal when striking at 58.5 m/s

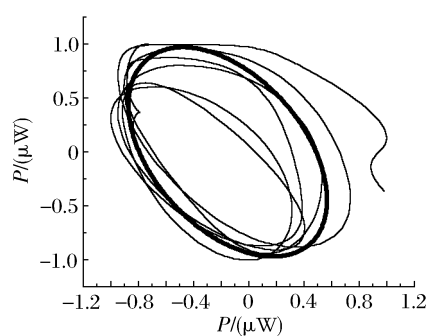


图8 FVISAR 干涉信号的利萨如图形  
Fig.8 The Lissajous figure from FVISAR

经计算,两路信号的实际相位差约为  $113.8^\circ$ 。经处理后的速度剖面如图 9 所示。图中还给出了由阻抗匹配法计算所得的速度剖面,可以看出,实验结果与理论计算比较吻合,另外由于撞击杆速度较高,粘贴在入射杆上的铝样品受到样品前界面拉伸波的作用,有可能脱落,此时仅能记录到局部波形。尽管如此,实测自由面速度的上升前沿和用阻抗匹配法得到的结果还是相当一致的,且实测的速度最大值为 58.2 m/s,与理论值 58.5 m/s 非常接近,从而充分说明了该宽带光源 FVISAR 在测量低速运动的自由面速度的能力。

## 5 结 论

以上实验表明,基于 SLD 光源的 FVISAR 实现了理想的空间相干、等程干涉和方便灵活的延时设置,从而表现出了很好的实用前景,另外,由于实验结果与理论计算结果吻合得很好,从而充分说明了我们所研制的 FVISAR 能测量低速运动的自由面速度,而且也说明了处理程序的科学性与适用性。

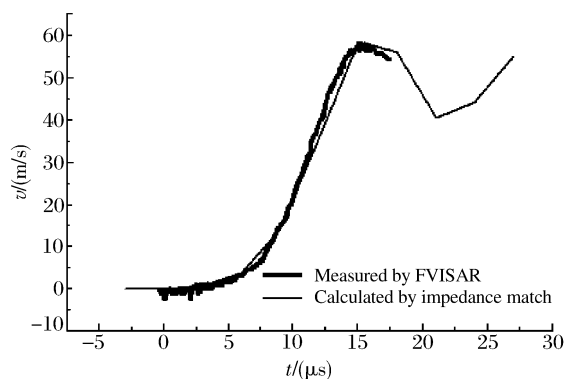


图9 撞击速度为 58.5 m/s 时铝样品的自由面速度剖面  
Fig.9 Free surface velocity profile at striking velocity of 58.5 m/s

## References:

- [1] Hu S L. Laser Interferometry for Measuring Velocities [M]. Beijing: Press of the National Defence Industry, 2001. 142-146. (in Chinese)  
胡绍楼. 激光干涉测速技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 142-146.
- [2] Levin L, Tzach P, Shamir J. Fiber Optical Velocity Interferometer with Very Short Coherence Length Light Source [J]. Rev Sci Instrum, 1996, 67(4): 1434-1437.
- [3] Hu L, Jia B, Ye K Z, et al. All-Fiber White-Light Velocity Interferometric System of any Reflector [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 814-820. (in Chinese)  
胡力, 贾波, 叶昆珍, 等. 全光纤白光任意反射面速度干涉系统 [J]. 光学学报, 2000, 20(6): 814-820.
- [4] Barker L M, Hollenback R E. Laser Interferometer for Measuring High Velocities of Any Reflecting Surface [J]. J Appl Phys, 1972, 43(11): 4669-4675.
- [5] Zhang W, Zhang Z P, Ren Z L. An Improved Fiber-Optic Mach-Zehnder Interferometer [J]. Huazhong Univ of Sci & Tech, 1994, 22(10): 33-35. (in Chinese)

- 张 伟,张志鹏,任志良. 一种改经的光纤马赫-曾德干涉系统 [J]. 华中理工大学学报,1994,22(10):33-35.
- [6] Sheem S K. Fiber-Optic Gyroscope with  $[3 \times 3]$  Directional Coupler [J]. Appl Phys Lett,1980,37(10):869-871.
- [7] Chen G H,Li Z R,Liu Y 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.

## Application of Fiber Velocity Interferometer System for Any Reflector in High Pressure Physics

WENG Ji-Dong<sup>1,2</sup>, TAN Hua<sup>1</sup>, CHEN Jin-Bao<sup>2</sup>, JIA Bo<sup>3</sup>,  
HU Shao-Lou<sup>1</sup>, MA Yun<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>1</sup>

- (1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;*  
2. *Department of Appl. Phys., N. U. D. T., Changsha 410073, China;*  
3. *The Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

**Abstract:** On the basis of traditional velocity interferometer, a fiber velocity interferometer system for any reflector (FVISAR) with wide spectrum laser is illustrated. The important properties of the FVISAR are ideal space interference and convenient delay-time setup. Preliminary tests of FVISAR using Hopkinson Bar system shows that the FVISAR works well for low velocity measurement.

**Key words:** Doppler effect; velocity interferometer system for any reflector (VISAR); optic-fiber couplers; free-surface velocity