

doi: 10.3788/gzxb20124102.0190

时分复用激光干涉测速技术研究

彭其先, 李泽仁, 王德田, 刘俊, 陈光华, 刘寿先, 邓向阳

(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:为了探索和发展瞬态激光干涉测量技术, 本文从理论上对激光差频干涉测速技术进行了分析, 并对该技术的应用基础和发展前景进行了剖析. 基于对该技术中关键技术分析、讨论, 提出了时分复用激光干涉测速技术的概念. 充分利用了激光差频干涉测速技术中的延迟时间 τ , 在时间段 $0 \sim \tau$ 和 τ 之后, 激光干涉分别体现的是测位移技术和测速度技术, 从而可较好地确定冲击与爆轰等物理过程中的第一冲击前沿的速度值(解决条纹丢失的不确定性); 同时在硬件要求不太高(降低对记录用示波器等带宽和采样率的要求)的情况下, 保证有较高的速度测量上限. 结合爆轰与冲击物理过程特性的考虑, 通过选择合适的干涉测试技术参量, 设计并建立了光纤时分复用激光干涉测速系统, 进行了时分复用激光干涉测速技术的初步应用研究, 获得了较好的应用结果, 从而验证了该技术的有效性.

关键词:干涉; 差频; 速度; 位移; 光纤

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)02-0190-5

0 引言

速度作为物态方程和流体动力学研究中的重要参量之一^[1-3], 可以由实验直接进行测量, 并且具有较高的测量准确度, 因而, 研究和针对自由面连续运动速度、波后粒子速度、飞片运动速度等的先进测试技术, 具有直接而重要的需求背景, 其测试水平也成为影响动高压物理研究水平的关键因素之一.

激光干涉测速技术具有非接触测量、时间分辨率高、测速精确度高及测量动态范围大等优点, 已成为冲击波物理和爆轰物理实验研究中的标准技术之一^[4-9]. 因此, 积极探索和研究新的激光干涉测速技术, 提高其性能指标和拓展应用范围, 具有重要的学术意义. 激光干涉测速技术应用最广泛的爆轰加载过程, 其速度突变发生在第一次冲击前沿, 这一过程速度变化很快, 但其达到的速度值一般不是该物理过程的最大值, 而速度的最大值是在样品经过多次冲击加载后达到, 在此多次加载过程中其速度突变的幅度不是太大.

根据上述特点, 本文提出了时分复用激光干涉测速技术, 其基本思路是利用激光干涉测速技术 (Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR) 中的延迟时间 τ , 在 $0 \sim \tau$ 时间

内, 激光干涉体现的是激光干涉测位移技术, 而在 τ 以后的过程中, 激光干涉体现的是激光干涉测速度技术. 这样分时段适应冲击前沿速度变化快, 但速度不是最大的过程; 而第一次冲击后, 速度逐渐达到最大, 但期间速度变化较慢的特点. 该技术的应用, 可以较好地确定第一冲击前沿的速度幅度值(解决条纹丢失的不确定性), 同时在硬件要求不太高(降低对示波器带宽和采样率的要求)的情况下, 保证有较高的速度测量上限.

1 理论分析

光纤速度干涉仪结构如图 1. 由光纤激光器输出的激光 (f_0) 经过单模光纤, 传输至光纤环形器, 经过该光纤环形器后到单模光纤传输至光纤探头, 光

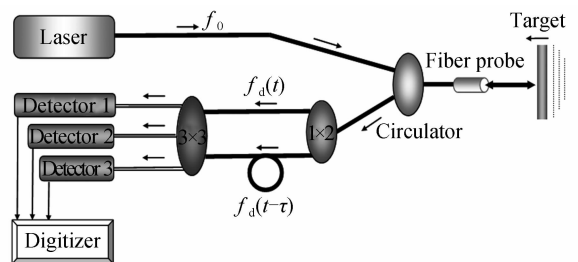


图 1 光纤速度干涉仪结构

Fig. 1 Diagram of fiber velocity interferometer

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金 (No. 2009B0403041) 资助

第一作者: 彭其先 (1970-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为瞬态单次动态过程的光电诊断技术研究. Email: qxpeng@126.com

收稿日期: 2011-09-13; 修回日期: 2011-10-31

纤探头将激光引向运动靶面.由靶面反射回的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,这两路光在 3×3 光纤耦合器中合束进行干涉,输出的三路相位相差为 120° 的干涉信号,由三个探测器进行记录.

VISAR中,直接光路的光波为

$$E_1 = E_{10} \cos [(\omega - \Delta\omega_t)t + \phi_1] \quad (1)$$

延迟光路的光波为

$$E_2 = E_{20} \cos [(\omega - \Delta\omega_{t-\tau})t + \phi_2] \quad (2)$$

假设直接光路和延迟光路的光强相同,并归一化为1,则合束时光波为

$$E = 2 \cos \left[\frac{(2\omega - \Delta\omega_t - \Delta\omega_{t-\tau})t + (\phi_1 + \phi_2)}{2} \right] \cdot \cos \left[\frac{(\Delta\omega_t - \Delta\omega_{t-\tau})t + (\phi_1 - \phi_2)}{2} \right] \quad (3)$$

合束光波信号强度为

$$I = E^2 = 4 \cos^2 \left[\frac{(2\omega - \Delta\omega_t - \Delta\omega_{t-\tau})t + (\phi_1 + \phi_2)}{2} \right] \cdot \cos^2 \left[\frac{(\Delta\omega_t - \Delta\omega_{t-\tau})t + (\phi_1 - \phi_2)}{2} \right] \quad (4)$$

式中 $\cos^2 \left[\frac{(2\omega - \Delta\omega_t - \Delta\omega_{t-\tau})t + (\phi_1 + \phi_2)}{2} \right]$ 项由于 ω 代表激光的光波频率($\sim 10^{14}$ Hz),一般测试仪器响应不过来,作为平均化处理,该项为 $1/2$,则式(4)写为

$$I = \cos [(\Delta\omega_t - \Delta\omega_{t-\tau})t + (\phi_1 - \phi_2)] + 1 \quad (5)$$

式(5)中 $\phi_1 - \phi_2$ 代表直接光路和延迟光路的初始位相差,可以认为是常量,用 ϕ 代表.下面分两种情况讨论.

1.1 当 $t > \tau$ 时

由多普勒效应, $v = \frac{\omega - \omega'}{\omega + \omega'} c_0$,则 $\omega' = \frac{c_0 - v}{c_0 + v} \omega = \left(1 - \frac{2v}{v + c_0}\right) \omega$,由于宏观物体的运动速度与光速相比小得多,即 $v \ll c_0$, ω' 可以写为 $\omega' = (1 - 2v/c_0) \omega$, $\Delta\omega_t = \omega - \omega_t = 2v_t/\lambda_0$, $\Delta\omega_{t-\tau} = \omega - \omega_{t-\tau} = 2v_{t-\tau}/\lambda_0$,代入式(5),有

$$I = \cos \left[\frac{2\tau}{\lambda_0} v_t + \phi \right] + 1 \quad (6)$$

由式(6)可见,光强是速度 v_t 的余弦函数(图2),其周期为 $\lambda_0/2\tau$,即速度每变化 $\lambda_0/2\tau$,干涉输出的信号将经历一个明暗变化.用光电探测器检测出干涉信号随时间的变化过程,即得到靶的速度历史,因此,称该技术为干涉测速度技术.

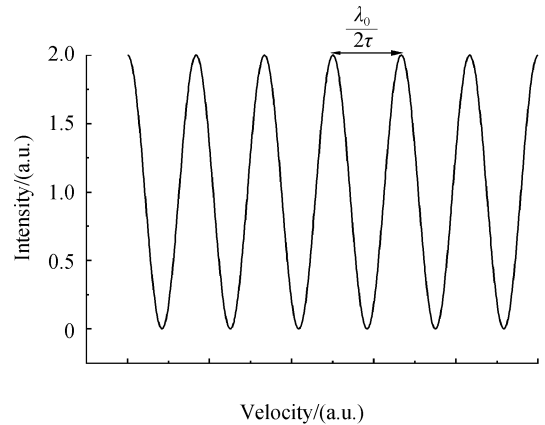


图2 速度干涉仪输出波形

Fig. 2 Output of velocity interferometer

1.2 当 $0 < t < \tau$ 时

此时 $\Delta\omega_{t-\tau} = 0$,表示延迟支路的光无多普勒频移,式(5)转化为

$$I = \cos[\Delta\omega_t t + \phi] + 1 \quad (7)$$

由多普勒效应,此时 $\omega' = (1 - 2v/c_0) \omega$, $\Delta\omega_t = \omega - \omega' = 2v_t/\lambda_0$,代入式(7),有

$$I = \cos \left[\frac{2v_t}{\lambda_0} t + \phi \right] + 1 = \cos \left[\frac{2S(t)}{\lambda_0} + \phi \right] + 1 \quad (8)$$

由式(8)可见,光强是位移 $S(t)$ 的余弦函数(图3),其周期为 $\lambda/2$,即每移动 $\lambda/2$ 的空间距离,干涉输出的信号将经历一个明暗变化.用光电探测器检测出干涉信号随时间的变化过程,即得到靶的位移历史,因此,称该技术为干涉测位移技术.

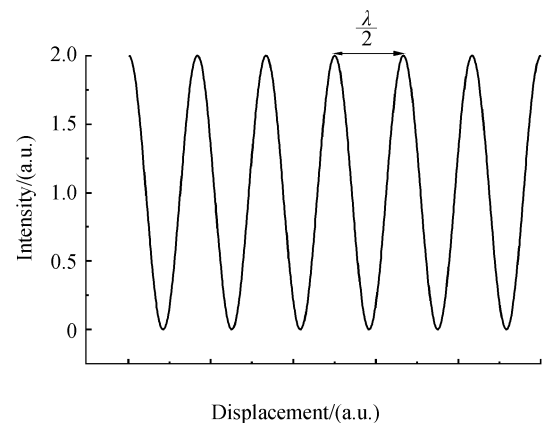


图3 激光位移干涉仪输出波形

Fig. 3 Output of displacement interferometer

将该位移历史对时间进行微分,即得到靶的速度随时间的变化过程.

从上述分析可知,VISAR中,在 $0 \sim \tau$ 时间内,该技术体现的是激光干涉测位移技术,而在 τ 以后的过程中,激光干涉体现的是激光干涉测速度技术.由于对同一过程进行测量时,该技术按时间先后(以

τ 为分界点)顺序出现,因而称该技术为时分复用激光干涉测试技术 (Time-Divided Laser Interference Velocimetry, TDLIV).

2 干涉测速系统建立与实验设计

由上节分析可知,条纹常量(即干涉条纹改变一个所对应的速度变化,取决于延迟时间 τ)的选择至关重要,如选用较小的 τ 值,对应在 τ 时间内的位移较小,较难形成比较多的位移干涉条纹,对位移干涉信号的处理和测量准确度不利.同时,较小的 τ 值对应较大的条纹常量,这会造成在速度干涉过程中测量结果的准确度较差.而在选用较大的 τ 值时,一般离散元件 VISAR 受限于光学标准具的尺寸,很难将 τ 值做得较大,如条纹常量为 100 m/s. fr 的 VISAR,其标准具长度需要达到 450 mm(单次通过),而对应的 τ 值仅仅是 2.7 ns.一般的物理过程很难在如此短的时间之内达到较高的速度,因而该时间值内形成的位移干涉信号也较少(如位移干涉中采用 1 550 nm 的波长,物体运动平均速度 1 km/s,2.7 ns 内可以输出 3.5 个干涉条纹),对依据频率处理速度信息的位移干涉技术而言,信息量太少,处理结果误差较大.

随着光纤速度干涉测量技术的发展^[10-11],对于光纤而言,可以通过调节光纤的长度灵活实现 τ 值在很大范围内的调节.因而拟采用光纤速度干涉测速系统,详细系统结构参见文献^[11].

在速度加载过程的选择上,本文拟采用爆轰加载铜飞片的装置.该过程有较快的速度上升前沿,可以在较短的时间内将飞片加载到较高的速度;而后继的过程持续时间较长,加载过程比较慢,有利于体现出速度干涉测量的特点.实验装置如图 4.

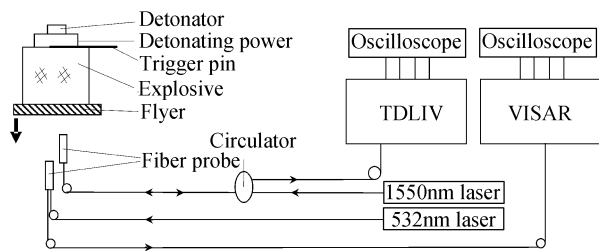


图 4 时分复用激光干涉测速系统装置图

Fig. 4 Experimental layout on velocity measurement of explosive driven metal flyer

雷管起爆后,引爆传爆药柱,由传爆药柱引爆主炸药.在传爆药柱和主炸药之间,采用两根铜箔作探针,由传爆药柱爆轰接通两根铜箔,向测试系统提供触发信号.与主炸药接触的的金属飞片在炸药爆轰能量作用下向前飞行.光纤探头负责将照明激光传输到金属飞片表面,并将飞片对入射激光的漫反射光

收集,送入激光干涉测速仪.当炸药爆轰驱动飞片运动时,由飞片反射的漫反射激光携带着多普勒信息,经过干涉仪的外差干涉和光电探测器的转换放大后,由示波器记录下来,经过数据处理,推算出飞片的运动速度.

为了对时分复用激光干涉测速结果进行印证,采用图 4 的装置进行实验时,同时进行了标准的 VISAR 测速试验,将 VISAR 的测试探头和光纤速度干涉测量探头尽量靠近(实际约为 3 mm),并排放置,使测量的目标点尽可能一致,便于测量结果的比对.

3 实验结果分析

VISAR 结果试验结果如图 5.图 6 是时分复用激光干涉测试结果.

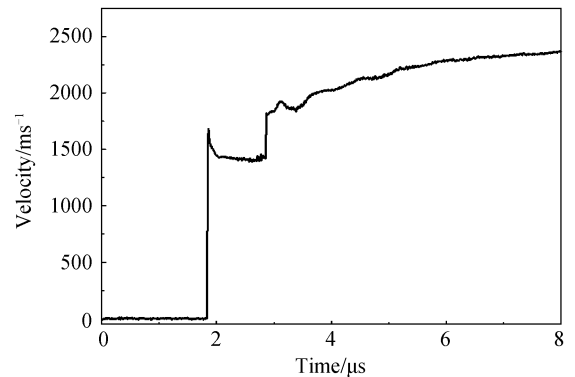


图 5 炸药驱动铜飞片 VISAR 测试结果

Fig. 5 Cu free surface velocity history by VISAR

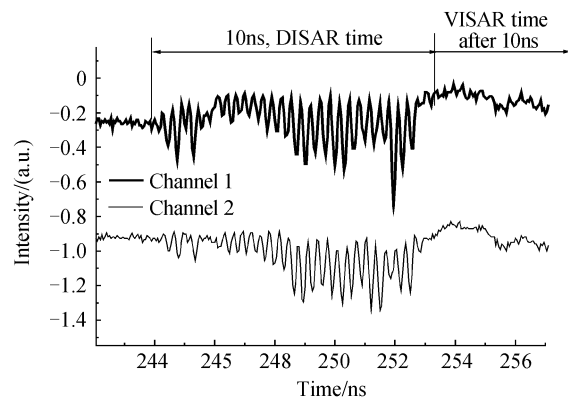


图 6 时分复用激光干涉测速原始信号局部放大

Fig. 6 Focus in signals recorded by TDLIV

分析 VISAR 的测试结果,该加载过程中,飞片从启动到第一冲击结束,用时约 10 ns,此时速度最高达到 1.67 km/s.对 VISAR 测试的速度曲线进行积分,可以得到位移曲线,从中可以算出,此时间(10 ns)内铜飞片的位移约为 16 μ m,对于时分复用激光干涉测速技术来说,此时间内也正是干涉测位移技术发挥作用的时间段,可以产生约 21 个干涉条纹,图 6 也比较好地体现了这一过程.

从图 6 可以看出:在飞片起动 10 ns 后,信号的频率立刻降低;此后时分复用激光干涉测试进入激光干涉测速时段。正如前面所述,一般情况下,激光干涉测速的信号频率会远远低于激光干涉测位移的信号频率。

整个处理结果见图 7。从图中可以看出,时分复用激光干涉测速结果与标准的 VISAR 测试结果基本吻合,特别是在起始段,两者测量的速度值很接近(峰值相对偏差在 2% 以内),这主要是在时分复用激光干涉测速技术中,起始段的激光干涉测位移技术是绝对测量法,所受影响因素减小;而其后的激光干涉测速技术是相对测量法,所受影响因素较多,如两路光之间的强度差、靶面反射光随时间的变化等,均会对数据处理带来较大影响,因而其后的测量结果与 VISAR 测量结果偏差较大。

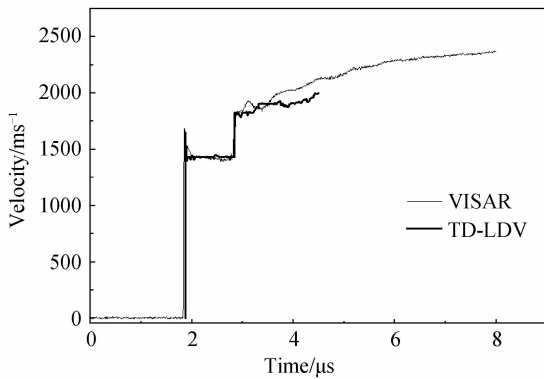


图 7 VISAR 和 TDLIV 测速结果对比

Fig. 7 Results comparison between VISAR and TDLIV

4 结论

通过理论分析激光差频干涉测速技术,提出了时分复用激光差频干涉测速技术,用激光干涉位移测量技术测量 $0 \sim \tau$ 时间内的速度,以弥补 VISAR 在该时间段测速时容易丢条纹的问题;而在时刻 τ 以后,用 VISAR 进行测量,以解决激光干涉位移测量技术的测速上限和需要使用高带宽记录系统的问题,最终实现将激光干涉位移测量技术与 VISAR 技术有效的结合。通过设计爆轰与冲击物理

过程,进行了时分复用激光干涉技术实际应用研究,实际测量了炸药驱动铜飞片速度历史,获得了完整的位移干涉信号和速度干涉信号,测量结果与传统 VISAR 测量结果吻合,验证了上述理论分析可靠、有效。

参考文献

- [1] 孙承伟,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京:国防工业出版社,2000:153.
- [2] 谭华. 实验冲击波物理导引[M]. 北京:国防工业出版社,2007:8-9.
- [3] 陈朗,龙新平,冯长根,等. 含铝炸药爆轰[M]. 北京:国防工业出版社,2004:79.
- [4] BARKER L M, HOLLENBACH R E. Laser interferometer for measure high velocities of any reflecting[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, **43**(11): 4669-4675.
- [5] HEMSING W H. Velocity sensing interferometer (VISAR) modification[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1979, **50**(1): 73-78.
- [6] HE Bi, JIANG Xiao-hua, LI Ze-ren, et al. Flyer velocity measurement of an exploding foil initiation system using a double-sensitivity VISAR[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, **25**(1): 31-34.
何碧,蒋小华,李泽仁,等. 用双灵敏度 VISAR 测试爆炸箔起爆器的飞片速度[J]. 爆炸与冲击,2005, **25**(1): 31-34.
- [7] 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**(8): 3108-3115.
- [8] PENG Q X, LI Z R, WANG D T, et al. Four-point bisensitivity velocity interferometer with a multireflection etalon[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, **78**(11): 3106-3109.
- [9] PENG Qi-xian, MA Ru-chao, LI Ze-ren, et al. A high sensitivity VISAR with multireflection etalon[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, **22**(4): 343-346.
彭其先,马如超,李泽仁,等. 高灵敏度 VISAR 研究与设计[J]. 爆炸与冲击,2002, **22**(4): 343-346.
- [10] HU Li, JIA Bo, YE Kun-zheng, et al. All-fiber white-light velocity interferometric system of any reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 814-820.
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.
- [11] PENG Qi-xian, MENG Jian-hua, WANG De-tian, et al. Design and application of all-fiber velocity interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 2008-2011.
彭其先,蒙建华,王德田,等. 全光纤速度干涉仪设计及应用[J]. 光子学报,2010, **39**(11): 2008-2011.

Time-divided Laser Interference Velocimetry

PENG Qi-xian, LI Ze-ren, WANG De-tian, LIU Jun, CHEN Guang-hua,
LIU Shou-xian, DENG Xiang-yang

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

Abstract: For the further development and exploring the instantaneous laser velocimetry, the laser beat frequency velocity interferometry is analyzed and its applications and future development are discussed. Based on the key technology of it, the concept of time-divided laser velocity interferometry is proposed. It uses the time delay τ in the laser beat frequency velocity interferometry, in which the interferometer is keyed to measure, respectively, the displacement and velocity in the time range $0 \sim \tau$ and above τ , to determine the velocity of the first front edge in the shock process (i. e., solve the uncertainty of fringe losing). In addition, it provides a higher upper bound of velocity measuring with lower hardware requirement (i. e., with lower requirement for the bandwidth and sampling of the oscilloscope). Combining with the consideration of the property of shocking and explosion process, the parameters are selected properly, the fiber time-divided laser velocity interferometer is designed, its primary applications are investigated, and the application results show its effectiveness.

Key words: Interference; Beat frequency; Velocity; Displacement; Fiber