

激光冲击强化靶背面自由表面速度的 全光纤光子多普勒测速法测量

王 健¹, 吴重庆¹, 宋宏伟², 于 涛¹, 许静静¹

- (1. 北京交通大学 发光与光信息技术教育部重点实验室 光信息科学与技术研究所, 北京 100044 ;
2. 中国科学院力学研究所 水动力学与海洋工程实验室, 北京 100190)

摘 要: 用现有的光纤通信器件, 搭建了全光纤光子多普勒速度测量(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)系统; 用 PDV 系统测量了激光冲击强化(Laser Shocking Peening, LSP)靶背面自由表面速度。提出了一种称为微分法的新的 PDV 数据处理方法, 并证明了与传统条纹法相比, 在相同的硬件条件下, 不但提高了测量精度, 而且扩大了测量范围。用微分法对 LSP 实验中的测量数据进行了处理, 实现了运动初始阶段自由表面瞬时速度的精确测量, 因此微分法对冲击波与轰爆炸中瞬态加速过程的数据处理特别适用。

关键词: 测量; 背面自由表面速度; 激光冲击强化; 全光纤光子多普勒测速; 微分法; 条纹法
中图分类号: TH744.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)05-1212-05

Velocity measurement of back-free the surface of target after laser shock peening using all-fiber photonic Doppler velocimetry

Wang Jian¹, Wu Chongqing¹, Song Hongwei², Yu Tao¹, Xu Jingjing¹

- (1. Institute of Optical Information, Key Lab of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: An all-fiber photonic Doppler velocimetry(PDV) system was assembled by using the optical fiber components available in the telecommunication industry. Using the PDV system, the velocity of back-free surface of target after laser shock peening (LSP) was measured. A new data processing method about PDV, called the differential method, was proposed. Compared with the traditional fringe method, it was proved that the differential method could improve measurement accuracy and extend measurement range using the same hardwares. The experimental data in LSP was processed using the differential method, and measurements of instantaneous velocity of back-free surface in the initial motion stage were performed. So the differential method is particularly suitable for the data processing about the transient acceleration process of shock waves and detonation waves.

Key words: measurement; back-free surface velocity; laser shock peening; all-fiber photonic Doppler velocimetry; the differential method; the fringe method

收稿日期: 2011-09-12; 修订日期: 2011-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(60877057); 中国科学院科研装备研制项目(YZ200930)

作者简介: 王健(1963-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光纤传感、光波导理论和光信息处理等方面的研究。Email: jwang@bjtu.edu.cn

0 引言

激光冲击强化是近年来迅速发展起来的一种针对金属材料新型表面改性处理技术^[1]。在高峰值功率密度的短脉冲激光作用下产生的高强度冲击波可显著提高材料的抗疲劳、抗腐蚀、抗磨损等表面机械性能,使零件延寿3~10倍。与现有的冷挤压、喷丸等金属材料表面强化手段相比,LSP具有非接触、无热影响区、可控性强、残余压应力层深、强化效果显著等突出优点。

在LSP试验中,靶背面自由表面速度的测量是一项重要的研究内容。当高能短脉冲激光作用在靶上时,诱导产生的冲击波使靶背面的自由表面产生运动。为了研究冲击波的性质,主要测量自由表面初始阶段的运动速度,然而这一阶段运动的时间非常短(几十ns),且加速度极大($\sim 10^{10}$ m/s²),很难用一般的方法测量,目前应用最广泛的测量工具是任意反射面速度干涉仪(Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR)^[2-4]。

传统VISAR系统的光路由分立光学元件构成。由于光路中含有大量透镜,致使系统结构复杂,调试难度大,而且稳定性也不好。随着光纤技术的成熟和光电子器件的完善,用全光纤速度干涉仪取代由分立器件构成的干涉仪已经成为一种趋势。1996年,以色列的Levin L等人提出了一种全光纤任意反射面速度干涉仪(Fiber Velocity Interferometer System for Any Reflector, FVISAR)测量系统^[5]。随后,许多研究者在此基础上作了大量的研究工作,在测速范围、精度和多点测量等方面都取得了很大进步^[6-7]。

2004年,Strand O T等人又提出了全光纤差拍干涉测速(Heterodyne Velocimetry)的概念^[8],这种测速法也称为光子多普勒测速法(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)。PDV是利用探测器的平方检测特性把参考光和传感光的差拍干涉信号检测出来,然后用高速示波器记录。通过分析示波器显示的干涉信号的周期数(也被称为条纹数)来获得物体的运动速度。在此基础上,Strand O T等人又对PDV系统进行了改进,用一个分束器把激光器发出的光分成四路,使测量点从一个增加到了4个^[9]。随后,其他研究者作了大量的类似工作^[10-12],验证了系统的

可行性,提高了测量精度,扩大了测速范围。PDV系统的结构小巧,紧凑,易于操作而且价格低,不需要额外的器件来解决跳纹问题,测量速度的范围大,这些优点是FVISAR所不具备的。

尽管人们用PDV系统对许多研究对象的速度进行了测量,如轰爆加载下的飞片、二级轻炮发射的弹丸、激光熔化超薄金属层产生的高速粒子,但目前还未见用PDV测量LSP实验中金属靶材背面自由表面速度的报道。为此,在LSP实验中,用自行搭建的PDV系统对铝片背面自由表面的速度进行了测量。另外,考虑到现有的PDV数据处理中所采用的条纹法,得到的速度是一个干涉周期内的平均速度。在自由表面运动的初始阶段,时间短、初速度小,但加速度大,测得干涉信号的变化周期(条纹数)仅有几个,用条纹法很难实现精确计算这个过程的速度。文中提出了一种新的数据处理方法实现LSP实验中瞬时速度的精确测量。

1 PDV测速原理

一个基本PDV的结构如图1所示。其原理为:

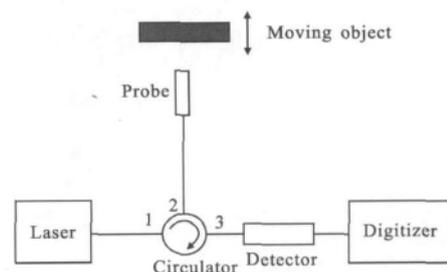


图1 PDV原理图

Fig.1 Principle diagram of PDV system

从激光器发出的光进入三端口光纤环行器的1端口,从2端口出来后通过光纤进入传感探头。探头的表面是一个部分反射的表面,到达探头的光一部分被反射、一部分透射。在探头表面上的反射光不产生多普勒频移,作为参考光。由探头透射的光照射在运动物体上被反射,由于物体的运动,它产生多普勒频移,频移的大小与物体的运动速度有关。被运动物体反射的光被探头接收,进入环行器的2端口,作为传感光。参考光和传感光返回环行器后,从3端口输出进入光探测器。利用探测器的平方检测特性,参考光和传感光的差拍干涉信号被检测出来,然后用高速

示波器记录。通解分析记录的波形和相应的数据,获得物体的运动速度随时间的变化关系。

设到达探测器中参考光和传感光的光场振幅分别为 E_{10} 和 E_{20} , 频率为 f , 相位分别为 $\varphi_1(t)$ 和 $\varphi_2(t)$, 则二者到达探测器中的光场分别为:

$$E_1 = E_{10} \cos[2\pi ft + \varphi_1(t)] \quad (1)$$

$$E_2 = E_{20} \cos[2\pi ft + \varphi_2(t)] \quad (2)$$

因参考光的相位不受物体运动的影响, $\varphi_1(t) = \varphi_{10}$ 为一个常量, 故到达探测器的光强为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[\varphi_2(t) - \varphi_{10}] \quad (3)$$

式中: $I_1 = |E_{10}|^2/2$; $I_2 = |E_{20}|^2/2$ 。设 $t=0$ 时刻物体不动, t 时刻物体的瞬时速度为 $u(t)$, 由于多普勒效应,

$\varphi_2(t) = \varphi_{20} + \frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t u(t) dt$, 其中 $\varphi_{20}(t) = \varphi_2(0)$ 是传感光在 $t=0$ 时的相位。记 $\Delta\varphi_0 = \varphi_{20} - \varphi_{10}$, 公式(3)变为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t u(t) dt + \Delta\varphi_0\right] \quad (4)$$

考虑到系统大都采用高速交流探测器进行探测(为了避免低频干扰和提高检测灵敏度, 其下限频率一般在 10 kHz 以上), 从探测器输出端到达示波器的电压信号应为:

$$V(t) = 2R\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t u(t) dt + \Delta\varphi_0\right] \quad (5)$$

式中: R 为探测器的电压灵敏度。由运动引起的相位变化 $\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t u(t) dt$ 除以 2π 并取其整数部分, 得到的数值为示波器上显示的周期数(条纹数) N , 即

$$N = \text{int}\left[\frac{2}{\lambda} \int_0^t u(t) dt\right] \quad (6)$$

式中: int 表示取整。则物体的运动速度与条纹数随时间变化率的关系为:

$$u(t) = \frac{\lambda}{2} \frac{dN}{dt} = \frac{\lambda}{2\tau(t)} \quad (7)$$

式中: $\tau(t)$ 为示波器显示的干涉周期, 根据公式(7)确定速度的数据处理方法称为条纹法。不难看出: 由公式(7)求出的速度是一个干涉周期内的平均速度, 不能得到一个周期内速度变化的详细过程, 因此在初速度较小、加速度极大且运动时间极短的冲击和轰爆过程中使用这种方法测速精度较差。为此, 提出一种新的数据处理方法。

设公式(5)中的 I_1 和 I_2 不随时间变化, 对公式(5)求时间的一阶导数, 得到物体的运动速度为:

$$u(t) = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\frac{dV(t)}{dt}}{2R\sqrt{I_1 I_2} \sin\left[\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t u(t) dt + \Delta\varphi_0\right]} = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\frac{dV(t)}{dt}}{2R\sqrt{I_1 I_2} \sqrt{1 - \cos^2\left[\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t u(t) dt + \Delta\varphi_0\right]}} = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\frac{dV(t)}{dt}}{2R\sqrt{I_1 I_2} \sqrt{1 - \left[\frac{V(t)}{2R\sqrt{I_1 I_2}}\right]^2}} = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\frac{dV(t)}{dt}}{\sqrt{(2R\sqrt{I_1 I_2})^2 - V(t)^2}} \quad (8)$$

由此可见, 通过示波器获得干涉信号电压 $V(t)$ 后, 再根据公式(8)就能计算出运动物体的速度 $u(t)$ 。考虑到这种新的数据处理方法计算速度时使用了干涉信号的微分 $dV(t)/dt$, 故称此方法为微分法。显然, 采用微分法计算出的是瞬时速度, 比条纹法计算出的平均速度的精度要高的多。

为了证明上述结论, 并考虑到文献中给出的自由表面初始部分运动基本上是初速度为零的匀加速直线运动(激光的功率密度不同时, 加速度不同), 运动时间约为 30 ns^[2], 故数值计算了加速度不同时, 自由表面的运动及由于运动而产生的干涉条纹情况。在此基础上, 分别用微分法和条纹法计算了自由表面的速度, 再把两种方法得到的速度与实际速度进行比较, 得到了加速度不同时速度的最大相对误差(Maximum Relative Error, MRE), 如图 2 所示。

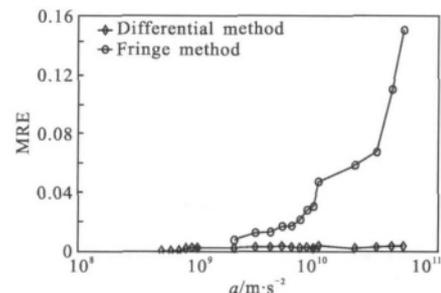


图 2 微分法和条纹法求速度的最大相对误差随加速度的变化关系
Fig.2 Maximum relative errors of velocities obtained from the differential method and fringe method vs the acceleration

可以看出: 微分法得到速度的 MRE 在 0.3% 以下, 而条纹法得到速度的 MRE 一般在 1% 以上, 且随着加速度的增大, MRE 明显增大; 当加速度小于

$2 \times 10^9 \text{ m/s}^2$ 时,由于不能形成完整的干涉条纹,不能用条纹法计算速度。可见微分法计算速度的精度远大于条纹法,尤其在加速度很高的时候;此外,微分法能够测量的范围也更大,因此,它对冲击波与轰爆波中瞬态加速过程的数据处理特别适用。

应该指出:用微分法求速度时,理论上应不存在误差,这里之所以出现误差是因为所采用的示波器的取样率(5 GS/s)不是足够的大,即两个相邻采样点的时间间隔不是足够小,导致求公式(8)中的 dV/dt 时产生误差,从而使求出的速度产生误差。因此,采用取样率更高的示波器,用微分法求速度的误差还会进一步减小,但用条纹法求速度时,采样率对其误差的影响不大。

2 实验装置

按照图1所示的实验原理图搭建了如图3所示的实际测量系统。高能脉冲激光器发出的脉冲激光的功率密度约为 10^9 W/cm^2 ,脉宽为 20~40 ns。

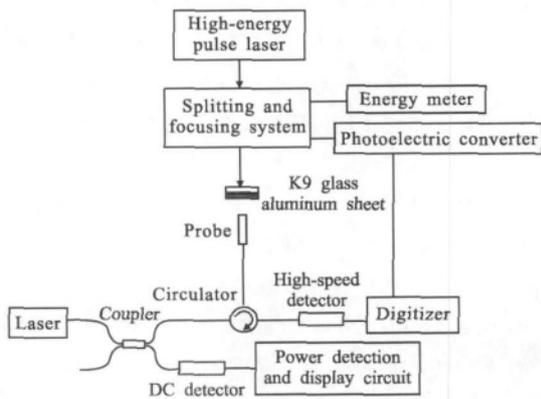


图 3 实验系统框图

Fig.3 Block diagram of experimental system

分光系统的作用一是探测激光器发出的能量,二是通过光电转化器给示波器提供触发信号。K9 玻璃的作用是限制激光产生的高温、高压等离子体使之形成向靶内部传播的高强度冲击波,靶为 1 mm 厚的铝片。PDV 系统中的半导体激光器是由 JDSU 公司生产的,型号为 QCF938/400。此激光器输出光的波长为 1 553.29 nm,线宽为 0.209 6 MHz,输出功率可达 100 mW。激光器的驱动和制冷电路是自行研制的。探头使用自聚焦透镜,焦距为 25 mm。探测器是由 New Focus 公司生产的,型号为 1544-A,带宽为 12 GHz,

低频截止频率为 10 kHz。示波器是由 LeCroy 公司生产的,型号为 SDA500A,带宽为 5 GHz,有 4 个通道。

3 实验结果与分析

由图 3 中的实验系统获得的原始干涉信号如图 4 所示。

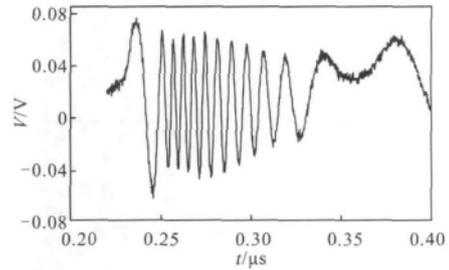


图 4 PDV 系统测得的原始干涉信号

Fig.4 Original interference signal measured by PDV system

可以看出:原始信号中存在着很多“毛刺”,显然这是由高频噪声引起的。这些“毛刺”的存在会使用公式(8)作微分运算时引起很大的误差,为此,通过快速傅里叶变换将信号变换到频域,去掉噪声频率成份后,再变回到时域,得到如图5所示的干涉信号。

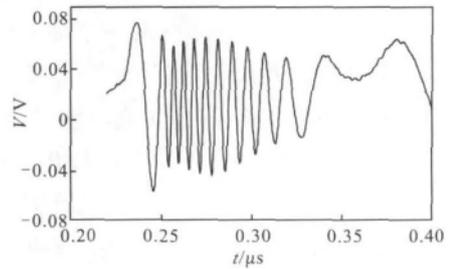


图 5 经过滤波处理后的干涉信号

Fig.5 Interference signal after filtering

应该指出的是:在使用公式(8)计算速度时,假设了干涉信号的峰值不随时间变化,但在测量时,所观测到图 5 中的峰值却随时间变化。这是因为:(1) 物体运动时,传感光的反射面与探头接收面的角度不断发生微小的变化;(2) 物体的反射点不断发生变化,而不同反射点的反射率又不相同。为了能使用公式(8)计算速度,对图 5 中所示的数据进行预处理,修正干涉信号峰值的变化。修正的步骤如下:(1) 找到每半个周期内的极大值和极小值;(2) 将数据的零点移到极大值和极小值的中心;(3) 让所有的极大值和极小值都等于一个固定值(为方便起见,令极大值和极小值分别为 1 和 -1),而中间的其他值按相同的比

例变大或变小。

根据修正后的数据,通过公式(8)得到微分法求出的速度,速度曲线如图 6 中的实线所示,虚线是通过条纹法计算出的速度。

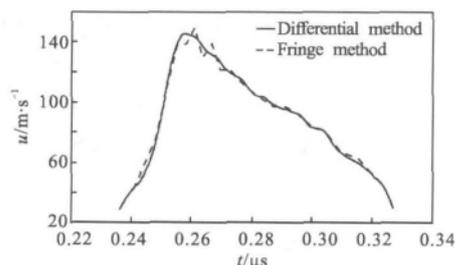


图 6 PDV 系统测得的速度曲线

Fig.6 Velocities curves measured by PDV system

4 结 论

全光纤 PDV 系统比 VISAR 系统更加紧凑,易于操作,而且价格低、测量速度的范围也大,为此,我们用现有的光纤通信器件,搭建了一个 PDV 系统,并且首次用 PDV 系统测量了 LSP 靶背面自由表面速度。在数据处理方面,考虑到传统的条纹法计算出的是一个干涉周期内的平均速度,而这个周期内的速度变化细节不能给出,我们又提出一个称为微分法的新的 PDV 数据处理方法,并证明了与传统条纹法相比,在相同的硬件条件下,不但提高了测量精度,还扩大了测量范围。最后我们用微分法对 LSP 实验中的测量数据进行了处理,实现了运动初始阶段自由表面瞬时速度的精确测量,由此说明微分法对冲击波与轰爆波中瞬态加速过程的数据处理特别适用。

参考文献:

- [1] Wu Bian, Wang Shengbo, Guo Dahao, et al. Research of material modification induced by laser shock processing on aluminum alloy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(10): 1352-1356. (in Chinese)
吴边, 王声波, 郭大浩, 等. 强激光冲击铝合金改性处理研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(10): 1352-1356.
- [2] Berthe L, Fabbro R, Peyre P, et al. Shock waves from a water-confined laser-generated plasma [J]. *J Appl Phys*, 1997, 82(6): 2826-2832.
- [3] Wang Dacheng. Research on parameter optimization of laser strength processing for the slot bottom of shaft end[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(4): 333-337. (in Chinese)
王大承. 轴端沟槽底部激光强化工艺参数优化研究[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(4): 333-337.
- [4] Wang Xiaoping, Wang Dacheng. Optimizing control of laser surface strengthening parameters for processing 20CrMo steel based on BP neural network[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 269-273. (in Chinese)
王小平, 王大承. 基于 BP 神经网络的 20CrMo 钢激光强化工艺参数优化控制 [J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(3): 269-273.
- [5] 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.
- [6] Larry F, Alan D K. Interferometric fiber-optic Doppler velocimeter with high-dynamic range [J]. *IEEE Photon, Technol Lett*, 1997, 9(1): 79-81.
- [7] Hong Guangwei, Jia Bo. All-fiber velocity interferometer for multipoint measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(8): 1097-1100. (in Chinese)
洪广伟, 贾波. 用于多点测试的全光纤速度干涉仪研究 [J]. *中国激光*, 2005, 32(8): 1097-1100.
- [8] Strand O T, Birzins L V, Goosman D R, et al. Velocimetry using heterodyne technique[R]. UCRL-CONF-206034, 2004.
- [9] 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: 083108.
- [10] Jensen B J, Holtkamp D B, Rigg P A, et al. Accuracy limits and window corrections for photon Doppler velocimetry[J]. *J Appl Phys*, 2007, 101: 013523
- [11] Dlan D H, Jones S C. Push-pull analysis of photonic Doppler velocimetry measurements [J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, 78: 076102.
- [12] Weng Jidong, Tan Hua, Wang Xiang, et al. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 111101.