

# 光子多普勒速度测量系统的数据处理技术

王 健 项红亮 毕重连 吴重庆

(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)

**摘要** 光子多普勒速度测量(PDV)系统是一种新型的激光测速系统,可广泛用于冲击波、爆轰波以及其他短时高速运动的测量。数据处理是 PDV 测速技术重要的组成部分,旨在从含有大量噪声的测量数据中获得靶面等运动体的速度信息。在分析 PDV 系统测速原理的基础上,分别采用条纹法、短时傅里叶变换法和小波变换法对激光冲击强化实验中自由靶面运动的 PDV 数据进行了处理。针对其中的去噪、奇异点、小波基的选择等问题,提出了一些独特的处理方法。同时,对 3 种处理方法的误差、实时性、有效性进行了比较。

**关键词** 测量;光子多普勒速度测量;数据处理;条纹法;短时傅里叶变换法;小波变换法

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.s108008

## Data Processing of Photonic Doppler Velocimetry System

Wang Jian Xiang Hongliang Bi Chonglian Wu Chongqing

(Key Laboratory of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology,  
Institute of Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** Photonic Doppler velocimetry (PDV) is a new type of laser velocimetry system. It is widely used in the velocity measurement of the shock wave, detonation wave and other short-time high-velocity movement. Data processing is an important part of it, which purpose is to obtain the velocity information of the moving target from the measurement data mixed with a lot of noise. Based on the PDV principle, target PDV data, obtained from laser shock peening experiment, are processed using the fringe method, short time Fourier transform(STFT) and continuous wavelet transform (CWT). Some unique methods are proposed to eliminate noise, singularities and choose the optimal wavelet. At the same time, the errors, real-timing and validity of the three methods are compared.

**Key words** measurement; photonic Doppler velocimetry; data processing; the fringe method; short time Fourier transform; continuous wavelet transform

**OCIS codes** 280.4788; 280.3340; 070.2025; 100.7410

## 1 引 言

光子多普勒速度测量(PDV)系统具有结构小巧、紧凑、易于操作而且价格低、不需要额外器件来解决跳纹问题,测量速度范围大等优点<sup>[1,2]</sup>,近年来在冲击波、爆轰波以及其他短时高速运动中都得到广泛应用<sup>[3,4]</sup>。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,并用高速示波器记录。通过分析记录的数据,获得物体运动的瞬时速度。数据处理是 PDV 技术的重要组

成部分,选择合适的数据处理方法不但能提高测量速度,实现测量的实时性和普适性,还能提高测量精度。目前,获取速度最基本的方法是条纹法。此外,考虑到干涉信号的幅值和频率不断发生变化,也可采用非平稳信号的处理方法,如短时傅里叶变换、Gabor 变换、威格纳-威利变换以及小波变换等方法获得速度<sup>[4~6]</sup>。由于数据处理方法与测量对象有关,所以对一个具体的测量对象,哪种处理方法更是适合,还需作深入讨论。文献[4~11]中虽然涉及了

收稿日期: 2011-07-13; 收到修改稿日期: 2011-08-25

基金项目: 北京市自然科学基金项目(4112042)资助课题。

作者简介: 王 健(1963—),男,博士,副教授,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。

E-mail: jwang@bjtu.edu.cn

许多测量对象,但却没有包括激光冲击强化中靶自由表面的运动。本文将用条纹法、短时傅里叶变换与小波变换3种方法,对靶自由表面运动的实验数据进行处理,并针对去噪、奇异点和小波基的选择等问题,提出一些独特的处理方法,并比较不同数据处理方法的优缺点。

## 2 PDV 系统测速原理

PDV的基本结构如图1所示。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,再被探头接收,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。

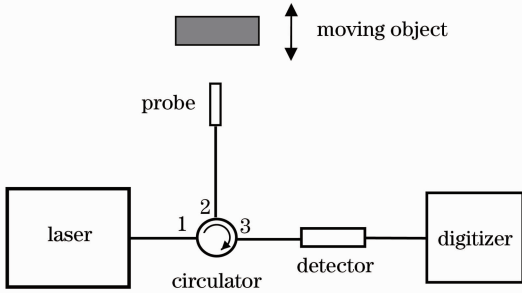


图1 PDV原理图

Fig. 1 PDV system principle diagram

设激光器发出光的频率为  $f$ ,参考光和传感光的频率分别为  $f_1$  和  $f_2$ 。参考光的频率不发生变化,  $f_1 = f$ 。由于物体的运动传感光产生的多普勒频移,即其频率为

$$f_2(t) = f + 2u(t)/\lambda, \quad (1)$$

式中  $u(t)$  是物体的运动速度,  $\lambda$  是激光器发出光的波长。这样,参考光和传感光的差频为

$$f_{\text{beat}} = f_2 - f_1 = 2u(t)/\lambda, \quad (2)$$

可见只要测量出差频信号,即可根据(2)式计算出被测物体的运动速度。

利用探测器的平方检测特性,可得探测器中的光强  $I$  为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[2\pi \int_0^t f_{\text{beat}}(t) dt + \varphi_{20} - \varphi_{10}\right], \quad (3)$$

式中  $I_1$  和  $I_2$  分别为参考光和传感光的光强,  $\varphi_{10}$  和  $\varphi_{20}$  分别为参考光和传感光的初相。

考虑到系统大多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

$$V(t) = 2R \sqrt{I_1 I_2} \cos\left[2\pi \int_0^t f_{\text{beat}}(t) dt + \Delta\varphi_0\right], \quad (4)$$

式中  $R$  为探测器的电压灵敏度,  $\Delta\varphi_0 = \varphi_{20} - \varphi_{10}$ 。

根据(4)式,示波器上显示的信号频率为差频频率  $f_{\text{beat}}$ ,  $f_{\text{beat}}$  确定后就得到物体的运动速度。但是  $f_{\text{beat}}$  却不容易获得,因为示波器记录的电压信号  $V(t)$  中含有大量的噪声。这些噪声有示波器本身和探测器电源引入的电子噪声,还有激光器功率的不稳定。特别是靶面运动时,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,使得进入探头传感光的强度发生变化,从而使  $V(t)$  的幅度也不断发生变化而引入噪声。以下3种方法可以从含有大量噪声的测量数据中获得差频频率  $f_{\text{beat}}$ 。

## 3 数据处理方法

### 3.1 条纹法

通常,示波器显示的差频信号是一个变周期的信号,它的每一个周期对应一个干涉条纹。找到信号的相邻极大值(或极小值)所对应的时间后,其时间差  $T_{\text{beat}}(t)$  为差频的周期,从而得到差频频率  $f_{\text{beat}} = 1/T_{\text{beat}}(t)$ 。所以物体的运动速度为

$$u(t) = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{T_{\text{beat}}(t)}, \quad (5)$$

(5)式是通过干涉条纹的周期求速度的,故这种求速度的方法称为条纹法。条纹法的关键是要精确求出每个信号极值点所对应的时间。由于高频噪声的存在,确定极值的位置是很难的,可先使用傅里叶变换的方法去掉高频噪声,但此方法不能去掉处于干涉频率附近的噪声,为此再使用二次曲线对每个极值点附近的数据进行拟合,最后求出每个极值点所对应的时间。

### 3.2 短时傅里叶变换

短时傅立叶变换的基本思想是通过选取一个固定宽度的滑动窗口,将非平稳信号  $V(t)$  截取为一段近似平稳的信号,然后分别对截得的信号进行傅里叶变换,得到每段中的频谱。在得到的频谱中,除了信号的频谱外,也包含噪声的频谱。为了消除噪声,可通过求频谱模极大值的方法得到每个时间段中的  $f_{\text{beat}}$ ,再利用(2)式得到速度。短时傅里叶变换的基本定义式为

$$\text{STFT}(t, f) = \int V(\tau)h(\tau - t)\exp(-j2\pi f\tau)d\tau, \quad (6)$$

式中  $h(\tau - t)$  为窗口函数。由于时间分辨率  $\Delta t$  和频率分辨率  $\Delta f$  满足

$$\Delta f \Delta t \geq \frac{1}{4\pi}, \quad (7)$$

所以不能同时提高时间分辨率和频率分辨率,即只能牺牲时间分辨率以换取更高的频率分辨率,或者反过来用频率分辨率的降低来换取时间分辨率。因此,当信号变化剧烈时,时间周期相对变小,时间窗口应该变窄一些,当信号变化平稳时,时间周期相对较大,时间窗口应该变宽一些。但短时傅里叶变换使用的是固定窗口宽度,对变化剧烈信号和平稳信号都得不到最优分辨率,只能取一个合适的窗口宽度兼顾上述两种情况。

对于离散的信号,当采样频率为  $f_s$ ,窗口宽度为  $N$  时,短时傅里叶变换的频率分辨率为<sup>[4]</sup>

$$\Delta f = \frac{f_s/2}{N/2 - 1}. \quad (8)$$

### 3.3 小波变换

小波变换是近年发展起来的一种新型时频分析方法,它在时域和频域都是局域化的。小波变换在低频时使用较宽的窗口,在高频时使用较窄的窗口,因而在时域和频域上都有较好的分辨率,能很好地分析非平稳信号  $V(t)$  的时频特性。小波变换定义式为

$$W_V(a, b) = \langle V, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} V(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)d\tau, \quad (9)$$

式中  $\frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  为小波函数,  $a$  为尺度因子,表示与频率相关的伸缩,  $b$  为时间平移因子。

虽然小波变换能够很好解决短时傅里叶变换中的分辨率问题,但是选取合适的小波基不是一件容易的事情。

选取小波基时要考虑信号的具体情况。对于激光冲击强化中靶自由表面速度的实验数据,采用了以下的方法选取小波基。首先通过短时傅里叶变换估算信号速度峰值的范围,再进一步计算小波基的中心频率及带宽。然后根据短时傅里叶变换的时频图,选择不同相似的小波基进行尝试,从小波基的一般性原则:正交性、紧支撑、对称性和平滑性出发选择最优小波基。

用最优小波基对差频干涉信号进行小波变换后,为了消除各种噪声,要找到小波脊线,即不同时刻的差频频率  $f_{\text{beat}}$ ,才能求出靶面运动的速度。在小波脊线提取的时候,由于信号功率的不稳定,会出现信号微弱和噪声引起的断点。为此首先应找到时频谱的模极大值,作为可靠的小波脊线的时间起点  $t_i$  和差频频率起点  $f_{\text{beat},i}$ ,再根据加速度的变化范围,设置一个差频频率的搜寻范围,则时刻  $t_{i+1}$  和  $t_{i-1}$  的差频频率  $f_{\text{beat},i+1}$  和  $f_{\text{beat},i-1}$  为搜寻范围内的局部极大值,以此类推,最后找到所考虑时间范围内各时刻的差频频率,从而实现小波脊线的提取。在局部范围内搜索小波脊线的方法,能够很好地抑制噪声,克服小波脊线上的断点,提高小波变换的适用性。

## 4 不同数据处理方法的比较

激光冲击强化是国际上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。在激光冲击强化试验中,使用的激光器是一个功率密度约为  $10^9 \text{ W/cm}^2$ 、脉宽为  $20 \sim 40 \text{ ns}$  的高性能脉冲激光器,靶是一个厚度约为  $1 \text{ mm}$  的铝片。整个试验在室内进行,不需要特殊条件(如真空)。当脉冲激光作用在靶的前表面上时,激光产生的高强度冲击波在靶中传播。靶的背面没有受到限制,是一个自由表面,通过测量这一表面的速度,可以研究冲击波在靶中的传播特性。

为了比较激光冲击强化时不同方法处理靶自由表面运动实验数据的优缺点,对 PDV 系统获得的靶面运动原始干涉信号的实验数据(如图 2 所示)进行了处理。

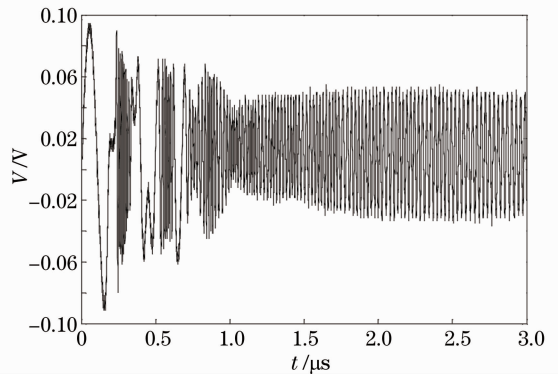


图 2 PDV 系统测得的原始干涉信号  
Fig. 2 Raw interference signal measured using PDV system

通过条纹法对上述数据处理后得到的速度曲线如图 3 所示。条纹法实际上是通过差频周期求速度,干涉信号的周期与靶面运动速度有关,周期不同,速度和时间分辨率也不同。如在速度峰值附近,周期最小,时间分辨率最高,约为 6.5 ns,速度为 119.2 m/s,速度分辨率约为 7.28 m/s;而在起始处

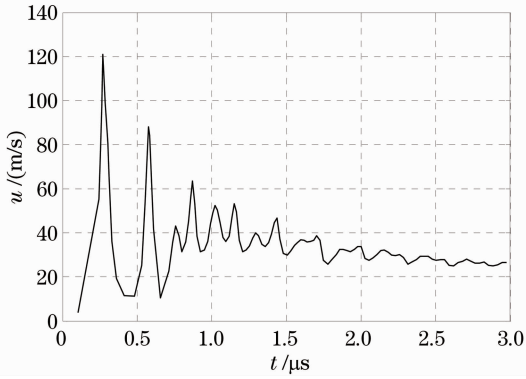


图 3 用条纹法得到的速度曲线

Fig. 3 Velocity curve obtained using the fringe method

速度最小,周期最大,时间分辨率最低,约为 50 ns,速度为 15.6 m/s,速度分辨率约为 0.12 m/s。

使用短时傅里叶变换得到的时频谱和速度曲线如图 4(a)和 4(b)所示。短时傅里叶变换的时间和空间分辨率是固定的。在图 2 所示的原始数据中,采样频率  $f_s = 5$  GHz,当设置时间窗口宽度  $N = 512$ ,即时间分辨率为 102.4 ns 时,根据(8)式得频率分辨率为 9.8 MHz,相应的速度分辨率为 7.57 m/s,此分辨率在速度较高时是很好的,但在速度较低时对测量的结果影响很大。

使用小波变换法得到的时频谱和速度曲线如图 5(a)和 5(b)所示。这里选择 cmor1-1 作为小波基,经过滤波后,利用 Matlab 中的函数 cwt 进行连续小波变换,由于时窗可变,在 130 m/s 高速时速度分辨率为 20.7 m/s,时间分辨率为 2.99 ns,在 20 m/s 低速时,速度分辨率为 3.2 m/s,时间分辨率为 19.5 ns。因此此方法能够很好地分析速度的瞬变过程,且在低速和高速时相对速度分辨率相同。

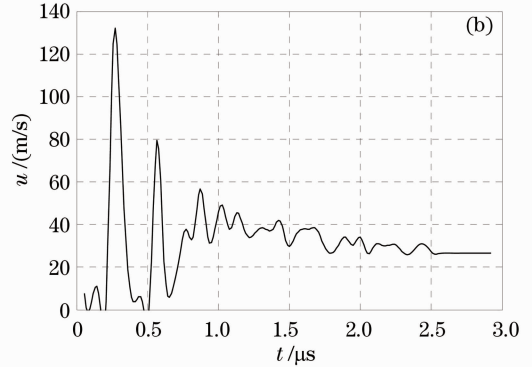
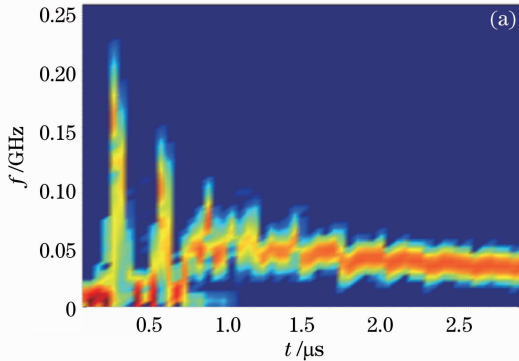


图 4 用短时傅里叶变换法得到的时频谱(a)和速度曲线(b)

Fig. 4 (a) Time-frequency spectrum and (b) velocity curve obtained using short-time Fourier transform

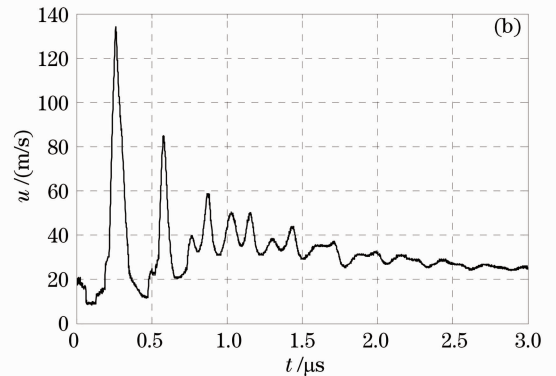
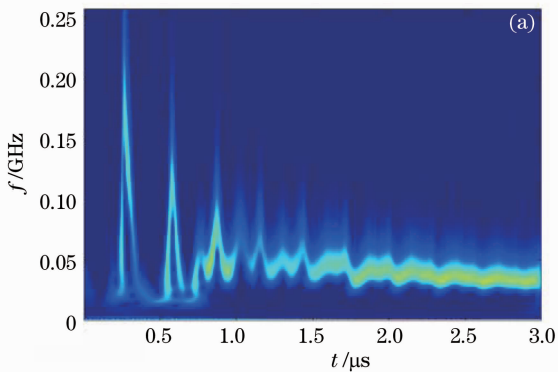


图 5 用小波变换得到的时频谱(a)和速度曲线(b)

Fig. 5 (a) Time-frequency spectrum and (b) velocity curve obtained using wavelet transform

比较图 3、图 4(b)和图 5(b)可以看出:3 种方法给出的速度曲线相似,都给出了靶自由表面的运动具有类周期性。这种类周期性是冲击波在靶的前后

表面之间往返传播,且能量逐渐衰减造成的,和文献 [12]中给出的结果是一致的。尽管 3 种方法得到的速度曲线基本相似,但细节上是有差别的,如速度的

第一个极大值点, 3 种方法得到的结果分别是 121.2、132.7 和 133.1 m/s, 在速度的初始阶段, 如  $t=0.1 \mu\text{s}$  时, 3 种方法得到的结果分别是 5.7、1.7 和 8.2 m/s。这些差别主要是 3 种处理方法的速度分辨率不同造成的, 虽然在速度的初始阶段差别显得比较大, 但没有超出速度分辨率差别的范围。

从以上分析可以看出: 由于条纹法是从 PDV 测速的基本原理出发的, 它的速度分辨率高, 可靠性较强。但由于受光功率稳定性的影响, 它的后期处理繁琐, 处理数据所化的时间最多, 普适性差。因此可以将条纹法作为参考。短时傅里叶变换的时间分辨率和速度分辨率都是固定值, 对于时间短、速度变化范围大的激光冲击强化中靶面运动的数据处理不太适用, 但这种方法的处理速度最快。小波变换利用可变的时频窗, 能够很好地适应靶面的瞬变, 且实时性和普适性都比较好, 小波变换更适合激光冲击强化实验 PDV 数据的处理。

## 5 结 论

用 3 种方法对激光冲击强化中靶自由表面信号运动的 PDV 数据进行了处理, 提取了靶面的瞬时速度。分析比较发现: 条纹法原理简单, 可靠性高, 但处理繁琐, 算法普适性差, 短时傅里叶变换速度快, 时间和速度分辨率有限, 而小波变换的时间和速度分辨率比较好, 且普适性强, 程序的运算速度也比较快。此外针对条纹法中的噪声消除、小波变换中的小波基选择和小波脊线的提取也提出了一些自己

的方法。

## 参 考 文 献

- 1 O. T. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez *et al.*. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(8): 083108
- 2 D. H. Dlan, S. C. Jones. Push-pull analysis of photonic Doppler velocimetry measurements [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(7): 076102
- 3 Scott Levinson, Sikhanda Satapathy. High-resolution projectile velocity and acceleration measurement using photonic Doppler velocimetry[C]. *AIP Conf. Proc.*, 2009, **1195**(1): 585~588
- 4 A. R. Valenzuela, G. Rodriguez, S. A. Clarke *et al.*. Photonic Doppler velocimetry of laser-ablated ultrathin metals [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(1): 013101
- 5 D. H. Dolan. Accuracy and precision in photonic Doppler velocimetry [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, **81**(5): 053905
- 6 Liu Shouxian, Wang Detian, Li Tao *et al.*. Analysis of photonic Doppler velocimetry data based on the continuous wavelet transform [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2011, **82**(2): 023103
- 7 P. Mercier, J. Benier, A. Azzolina *et al.*. Photonic Doppler velocimetry in shock physics experiments [J]. *J. de Physique IV (Proceedings)*, 2006, **134**(1): 805~812
- 8 P. Mercier, J. Benier, P. A. Frugier *et al.*. Heterodyne velocimetry and detonics experiments [C]. *SPIE*, 2009, **7126**: 71261O
- 9 Weng Jidong, Tan Hua, Wang Xiang *et al.*. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(11): 111101
- 10 D. Motes, M. Crawford, J. Ellzey *et al.*. An investigation of internal gas dynamics for an electrothermal launcher [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2011, **39**(2): 802~808
- 11 T. Ao, D. H. Dolan. Effect of window reflections on photonic Doppler velocimetry measurements [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2011, **82**(2): 023907
- 12 L. Berthe, R. Fabbro, P. Peyre *et al.*. Shock waves from a water-confined laser-generated plasma [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(6): 2826~2832

栏目编辑: 何卓铭