

# 基于裸光纤探头的双点光子多普勒测速系统

毕重连 王 健 项红亮 吴重庆

(北京交通大学光信息科学与技术研究所发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要** 全光纤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物体的速度测量。多点测量可以获得靶面不同位置的速度,以测量靶面的形变。为提高测量的空间分辨率,提出使用裸光纤束为 PDV 系统的探头,并在实验上实现了空间分辨率为  $375\ \mu\text{m}$  的双点速度测量。裸光纤探头的间距较小,一个探头的测量结果可能受到另一个探头反射光的干扰。理论和实验的研究结果表明,当靶面各点速度相同时,测量结果不受干扰光的影响;当各点速度不同时,其测速误差不但与两被测点的速度差有关,还与传感光和干扰光的光强和相位有关。

**关键词** 测量;光纤传感;双点光子多普勒速度测量;裸光纤探头;空间分辨率

中图分类号 TH744.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0812005

## Two-Point Photonic Doppler Velocimetry System Based on Bare Fiber Probe

Bi Chonglian Wang Jian Xiang Hongliang 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 moving objects. The velocities of different points of the target can be obtained using the multi-point measurement so as to find out the deformation of the target surface. It is proposed to use bare fiber bundle as probe of PDV system to improve the spatial resolution of measurement. Two-point velocity measurement with spatial resolution of  $375\ \mu\text{m}$  is experimentally realized. Because of smaller probe spacing, the measuring results obtained from a probe could be influenced by the reflected light from another probe. Theoretical and experimental results show that the measuring results are not affected by the stray light when the points on the target surface have the same velocity, and the measuring errors are related not only with the velocity difference of two points but also with the intensities and phases of sensing and stray light when the points on the target surface have different velocities.

**Key words** measurement; optical fiber sensor; two-point photonic Doppler velocimetry; bare fiber probe; spatial resolution

**OCIS codes** 120.7250; 060.2370; 060.2310

## 1 引 言

随着激光技术的发展,激光测速技术已被广泛应用于各种速度测量领域<sup>[1~3]</sup>。全光纤光子多普勒速度测量(PDV)技术是一种新型的激光测速技术,

由 Strand 等<sup>[4]</sup>于 2004 年提出。PDV 系统具有测量速度范围大、不需要额外器件来解决跳纹问题、结构小巧紧凑、易于操作且价格低等优点<sup>[5~7]</sup>,近年来在冲击波、爆轰波以及其他短时高速运动测量中获

收稿日期: 2012-02-05; 收到修改稿日期: 2012-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61077048,60907027)和北京市自然科学基金(4112042)资助课题。

作者简介: 毕重连(1986—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 10121899@bjtu.edu.cn

导师简介: 王 健(1963—),男,副教授,主要从事光波导理论、光纤传感和全光信号处理等方面的研究。

E-mail: jwang@bjtu.edu.cn(通信联系人,中国光学学会会员号:2009168)

得了广泛应用<sup>[8,9]</sup>。经过几年的发展,其在测量精度、测速范围和多点测量等方面都有了长足的进步<sup>[5,6,10~13]</sup>。然而,当对靶面进行多点测量时,目前配有自聚焦透镜的探头,其间距比较大,限制了测量空间分辨率的提高。为此,本文提出用多根裸光纤构成探头,这种探头的间距比目前 PDV 系统中的小得多,可以极大地提高测速系统的空间分辨率。虽然裸光纤探头不如自聚焦透镜接收光的能力强,信号信噪比不如自聚焦透镜的高,但基本不会影响差频信号极值点的确定,所以使用裸光纤探头测速时也基本不影响测量精度。此外,考虑到裸光纤探头间距较小,一个探头的测量结果可能受到另一个探头反射光的干扰,采用基于裸光纤探头的双点 PDV 测速系统对此问题进行了理论和实验研究,分析影响测速结果的主要因素,找出避免干扰光影响测速结果的有效方法。

## 2 双点 PDV 系统测速原理

图 1 是双点 PDV 测速系统的原理图。根据 PDV 测速原理,探测器 1 输出的交流电压信号为

$$V(t) = 2R \sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t u_1 dt + \Delta\varphi_{12}\right), \quad (1)$$

式中  $R$  为探测器的电压响应度,  $I_1$  和  $I_2$  分别为参考光和传感光的光强,  $u_1(t)$  为探头 1 对应靶面的速度,  $\Delta\varphi_{12}$  为传感光与参考光的初相差。

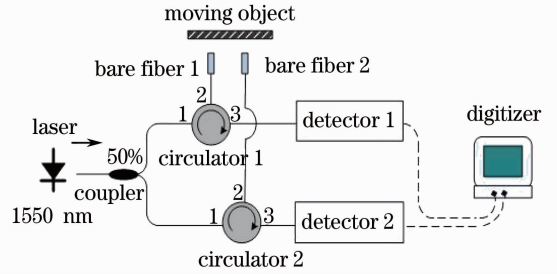


图 1 双点 PDV 测速系统原理图

Fig. 1 Two-point PDV system principle

当两个探头间距较近且探头到靶面的距离较大时,在探头 1 中除了参考光和传感光之外,还会有由探头 2 发出经靶面反射后进入探头 1 的干扰光。此时探测器 1 输出的交流电压信号为

$$V = A(t) \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t u_1 dt + \varphi'(t)\right] + 2R \sqrt{I_2 I_3} \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t (u_2 - u_1) dt + \Delta\varphi_{23}\right], \quad (2)$$

(2)式中的振幅  $A(t)$ 和相位  $\varphi'(t)$ 分别为

$$A(t) = 2R \sqrt{I_1 \left\{ I_2 + I_3 + 2 \sqrt{I_2 I_3} \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t (u_2 - u_1) dt + \Delta\varphi_{23}\right] \right\}}, \quad (3)$$

$$\varphi'(t) = \arctan\left\{ \frac{\sqrt{I_2} \sin(\Delta\varphi_{12}) + \sqrt{I_3} \sin\left[\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t (u_2 - u_1) dt + \Delta\varphi_{13}\right]}{\sqrt{I_2} \cos(\Delta\varphi_{12}) + \sqrt{I_3} \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t (u_2 - u_1) dt + \Delta\varphi_{13}\right]} \right\}, \quad (4)$$

其中  $I_3$  为干扰光的光强,  $u_2$  为探头 2 所对靶面的速度,  $\Delta\varphi_{13}$  和  $\Delta\varphi_{23}$  分别为干扰光与参考光、干扰光与传感光的初相差。

当靶面整体运动的速度一致时,即  $u_1 = u_2$ , 略去常数项后,(2)式可简化为

$$V = A \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t u_1 dt + \varphi'\right), \quad (5)$$

其中  $A = 2R \sqrt{I_1 [I_2 + I_3 + 2 \sqrt{I_2 I_3} \cos(\Delta\varphi_{23})]}$ ,

$\varphi' = \arctan\left[\frac{\sqrt{I_2} \sin(\Delta\varphi_{12}) + \sqrt{I_3} \sin(\Delta\varphi_{13})}{\sqrt{I_2} \cos(\Delta\varphi_{12}) + \sqrt{I_3} \cos(\Delta\varphi_{13})}\right]$ 。易见,

(5) 式中振幅  $A$  和相位  $\varphi'$  为常数,因此根据(5) 式求出的速度与根据(1) 式求出的速度是相同的,即无论

光强  $I_3$  多大,都不会影响探头 1 的测速结果。

当  $u_1$  和  $u_2$  存在差别时,由于两个探头相距很近,  $u_1$  和  $u_2$  的差别不大,因此在用条纹法测速时可以不考虑(2) 式中右边第一项振幅  $A(t)$  和右边第二项的影响,而由(4) 式确定的相位  $\varphi'(t)$  对测速结果的影响必须要考虑,故(2)式对应的速度为

$$u = u_1 + \frac{\lambda}{4\pi} \frac{d\varphi'}{dt} = u_1 + \frac{\cos \alpha + \sqrt{I_3/I_2}}{1 + \sqrt{I_3/I_2} (\sqrt{I_3/I_2} + 2\cos \alpha)} \sqrt{\frac{I_3}{I_2}} (u_2 - u_1), \quad (6)$$

式中  $\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t (u_2 - u_1) dt + \Delta\varphi_{23}$ 。

从(6)式可以看出,因干扰光引起的测速误差为式中右边的第二项,这一项的大小不但与光强  $I_2$ 、 $I_3$  及初相差  $\Delta\varphi_{23}$  有关,还与两个被测点的速度差  $u_2 - u_1$  有关。在  $I_3 \ll I_2$  时,它的大小与  $\sqrt{I_3/I_2}$  成正比,即由探头 2 进入探头 1 中的光越多,测速的误差越大;在  $I_3 \gg I_2$  时,它的大小为  $u_2 - u_1$ ,这时探头 1 测量的速度为探头 2 对应靶面的运动速度  $u_2(t)$ ;当  $I_3 = I_2$  时,它的大小为  $(u_2 - u_1)/2$ ,这时探头 1 测量的速度为  $u_1$  和  $u_2$  的平均值。

在其他情况下,干扰光的影响可通过数值计算得到。计算时应考虑被测物体的实际运动情况,对本文中的被测物体,其速度可近似假设为  $u_1 = 6.25t$ ,  $u_2 = 5.625t$ ,相应的曲线如图 2 中的实线和虚线所示。若  $\sqrt{I_3/I_2} = 0.2$ ,测得的速度  $u$  在  $u_1$  附近振荡,如图 2 中的点线所示;若  $\sqrt{I_3/I_2} = 5$ , $u$  在  $u_2$  附近振荡,如图 2 中的点划线所示。在计算过程中还发现,初相差  $\Delta\varphi_{23}$  对测量结果虽有影响但影响并不大。

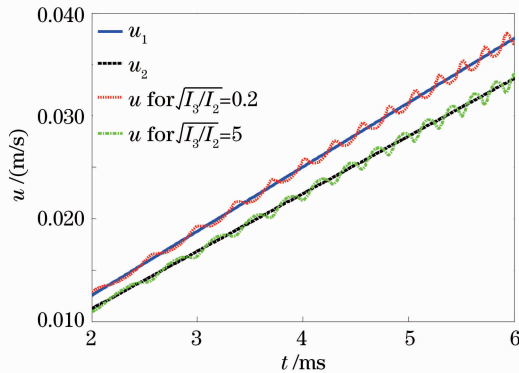


图 2 干扰光对测量结果的影响

Fig. 2 Effect of the stray light on measuring results

从上面的讨论可以看出,若要减小测速误差,应尽量减小  $I_3/I_2$  的值。因为探头到靶面的距离变小时,传感光  $I_2$  变大,而干扰光  $I_3$  变小,所以在不影响物体运动的前提下,尽量让探头靠近靶面,就可达到提高测速精度的目的。

### 3 实验结果与讨论

在图 1 所示的实际测量系统中,为了模拟相距很近的两点具有不同的运动速度,使用的运动物体是条形铝箔纸,它的一端固定在激振器的顶杆上,另一端自由放置。当激振器振动时,铝箔纸也跟着振动,但由于它是柔性的运动物体,纸上的不同点会以不同的速度运动。虽然铝箔纸的运动速度不高,但由它得出的结论对高速运动物体速度的测量也是适用的,这是因为高速运动物体上相距很近的两点速度

差别是很明显的。系统中半导体激光器输出光的波长为 1553.29 nm,线宽为 0.2096 MHz,输出功率可达 100 mW。光探测器为普通的 PIN 管,其放大电路是本实验室自行研制的,电压响应度约为  $10^4$  V/W。实验结果采用 5 GHz 带宽的 LeCroy 公司示波器记录。实验中使用一排 10 根裸光纤紧密排列的裸光纤探头,记录第 1、4、7、10 根裸光纤探头的结果,它们的横向间距  $\Delta$  分别为 375、750、1125  $\mu\text{m}$ 。裸光纤探头由普通单模光纤(G652)制成,光纤的端面没有镀膜,只是经过了抛光处理。

#### 3.1 双点速度的测量

对于两个探头间距不同(分别为 375、750、1125  $\mu\text{m}$ )、探头到靶面的距离不同(分别为 1.5、3、5 mm 等)、铝箔纸振动幅度约为 0.2 mm 的实验条件,记录两个探头的信号,经数据处理可得到两个探头测得的速度曲线。

如探头到铝箔纸的距离为 1.5 mm,探头间距为 375  $\mu\text{m}$  时,两个探头测量到的原始差频信号如图 3 所示,图中上下信号分别是探头 1 和探头 2 测得的。对两信号进行数据处理,得到两被测点的速

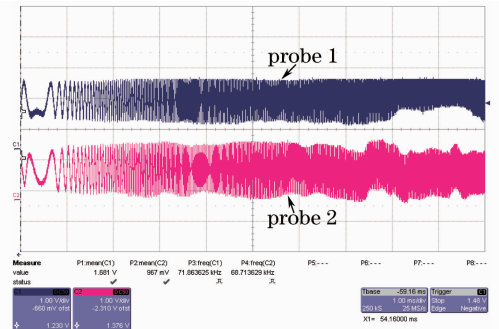


图 3 探头间距为 375  $\mu\text{m}$  时的原始差频信号

Fig. 3 Raw signal when the spacing between two probes is 375  $\mu\text{m}$

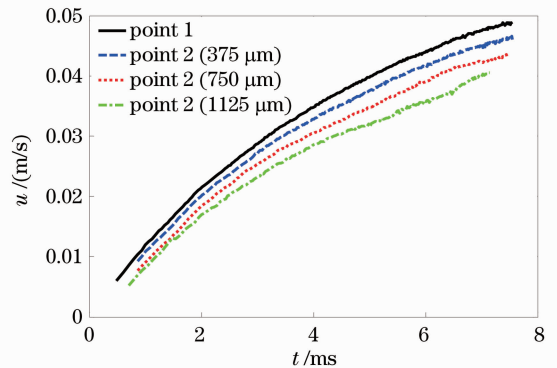


图 4 探头间距不同时两个被测点的速度

Fig. 4 Velocities of the two measured points when the spacing between two probes is different

度,如图 4 中的实线和虚线所示。改变探头 2,使探头间距分别增大到  $750\ \mu\text{m}$  和  $1125\ \mu\text{m}$ ,探头 2 测得的速度如图 4 中的点线和点划线所示。显然探头间距越大,两个被测点的速度差也越大。此实验说明用本文设计的裸光纤探头,可实现空间最小间距  $375\ \mu\text{m}$  的双点速度测量。

### 3.2 双点测量对测速结果的影响

双点测量时,一个探头发出的光有可能通过靶面的反射进入另一个探头,从而使后者的测速结果受到影响。

#### 3.2.1 激振器顶杆平面运动(速度相同的靶面)的双点测量

在研究探头 2 反射光对探头 1 测量结果的影响前,先测量激振器顶杆平面运动的重复性精度。为此用探头 1 单独对同一个振动过程进行 3 次测量,再求出后两次测量与第一次测量的速度差,结果如图 5 所示。从图 5 可见,实验的重复性误差在  $10^{-4}\ \text{m/s}$  的量级。

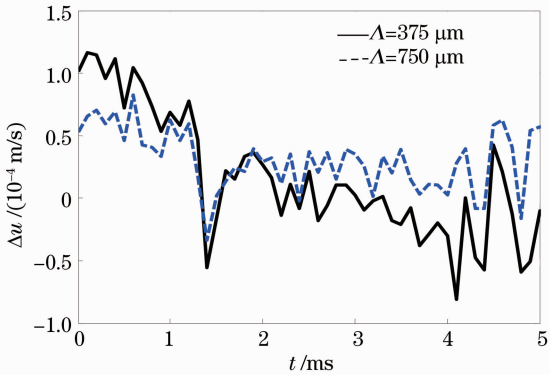


图 5 靶面各点速度相同时多次测量的速度差

Fig. 5 Velocity differences of multiple measurements when all points on the target surface have the same velocity

在此基础上,让探头到顶杆的距离为  $1.5\ \text{mm}$ ,先用探头 1 单独测量,然后保持探头 1 不动,接上间距为  $375\ \mu\text{m}$ (或  $750\ \mu\text{m}$ )的探头 2 再进行双探头测量。探头 1 在单双探头分别测量时的速度差如图 6 所示,其中实线和虚线分别表示探头间距为  $375\ \mu\text{m}$  和  $750\ \mu\text{m}$  时的情况。从图 6 可以看出,单双探头测量的速度差与图 5 中的重复性误差一样,也在  $10^{-4}\ \text{m/s}$  的量级。反复改变探头到顶杆的距离,重复上面的测量步骤,得到单双探头测量的速度差还是同样量级。说明两被测点速度相同时,探头 2 的反射光不会对探头 1 的测量结果产生影响。

#### 3.2.2 铝箔纸运动(速度不同的靶面)的双点测量

同测量激振器顶杆时一样,也对铝箔纸运动进

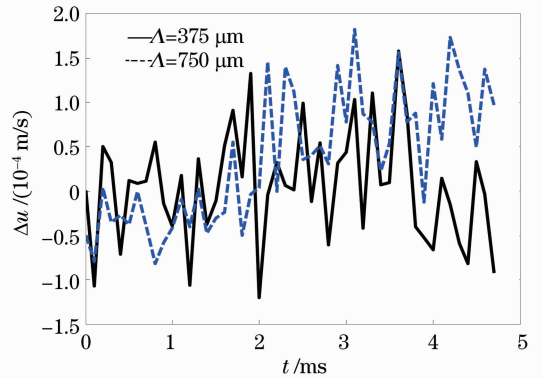


图 6 靶面各点速度相同时单双探头测量的测速差  
Fig. 6 Velocity differences obtained using single and double probe measurements when all points of the target surface have the same velocity

行了类似的测量。单点多次测量的速度差如图 7 所示,表明重复性误差比激振器顶杆略大,但也在  $10^{-4}\ \text{m/s}$  量级。在单双点分别测量时,若探头到铝箔纸的距离小于  $2\ \text{mm}$ ,探头 1 的测速结果不会受到探头 2 的影响;若探头到铝箔纸的距离分别为  $3\ \text{mm}$  和  $5\ \text{mm}$ ,探头 1 在单双探头测量时的速度差分别如图 8 和图 9 所示,其中实线、虚线和点划线分别表示双探头间距为  $375$ 、 $750$ 、 $1125\ \mu\text{m}$  时的情况。从图 8 和图 9 可见,两探头间距为  $375\ \mu\text{m}$  所对应的曲线,在开始阶段单双探头测量的速度差比较小,在  $10^{-4}\ \text{m/s}$  量级,但到后面,速度差逐渐增大到  $10^{-3}\ \text{m/s}$  量级,显然这是由探头 2 发出通过铝箔纸反射进入探头 1 中的光引起的。而两探头间距较大时( $750\ \mu\text{m}$  和  $1125\ \mu\text{m}$ )的测速差和图 7 中的误差在同一个水平,说明这两种情况下探头 2 的光没有进入探头 1,对探头 1 的测速结果没有影响。

从上面的实验结果可以看出,当靶面各点速度

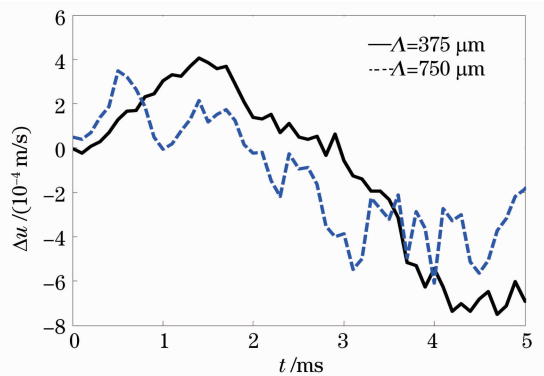


图 7 靶面各点速度不同时多次测量的速度差

Fig. 7 Velocity differences of multiple measurements when the velocities of points on the target surface are different

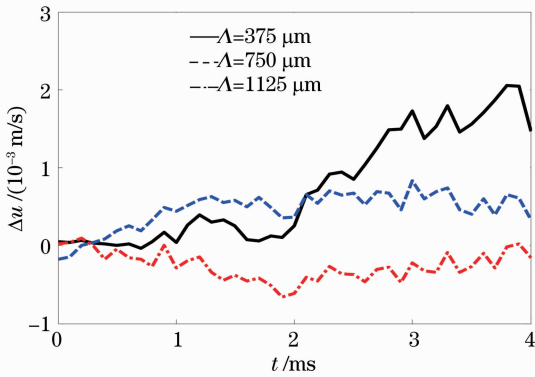


图 8 探头距靶面 3 mm 时单双探头测量的测速差

Fig.8 Velocity differences obtained using single and double probe measurements when the distance between probe and the target surface is 3 mm

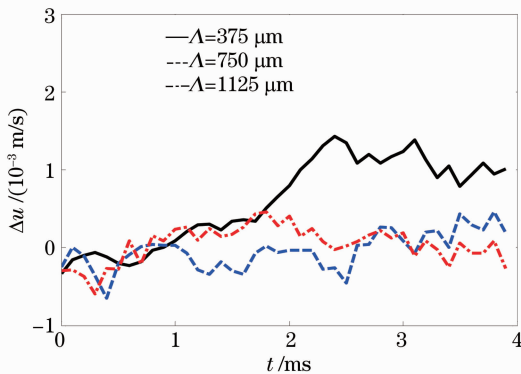


图 9 探头距靶面 5 mm 时单双探头测量的测速差

Fig.9 Velocity differences obtained using single and double probe measurements when the distance between probe and the target surface is 5 mm

不同且探头的间距较小时,一个探头的测量结果的确有受到另一个探头反射光干扰的可能。为了消除干扰,在测量时让探头到靶面的距离尽量小,即可避免干扰光的进入。

## 4 结 论

提出了基于裸光纤探头的双点 PDV 系统,实现了双点相距分别为 375、750、1125 μm 的速度测量。对于一个探头发出的光对另一个探头测速结果的影响进行了理论和实验研究。结果表明,当被测两点的速度一致时,干扰光不会影响测量结果;当被测两点的速度不同时,由干扰光引起的测速误差与两被测点的速度差、传感光和干扰光的大小及

初相差等因素有关。为了消除干扰光对测速结果的影响,要避免干扰光的进入,因此在实际测量时应让探头到靶面的距离尽量小些。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Guanghua, Liu Shouxian, Liu Qiao *et al.*. Fabry-Perot interferometry for high-speed flyer velocities measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(11): 111201  
陈光华, 刘寿先, 刘 乔 等. 用于高速飞片测量的法布里-珀罗干涉测速技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(11): 111201
- 2 Zhou Jian, Long Xingwu. Laser Doppler velocimeter for vehicle inertial navigation system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1316~1321  
周 健, 龙兴武. 用于车载自主惯导系统的激光多普勒测速仪[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5):1316~1321
- 3 Chen Shijia, Han Daofu, Ma Li. Autocorrelation-based velocity measurement of self-mixing speckle in fiber ring laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(3): 030601  
陈世佳, 韩道福, 马 力. 环形光纤激光器自混合散斑自相关测速的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(3): 030601
- 4 O. T. Strand, L. V. Birzins, D. R. Goosman *et al.*. Velocimetry Using Heterodyne Technique [R]. UCRL-CONF-206034, 2004
- 5 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
- 6 D. H. Dlan, S. C. Jones. Push-pull analysis of photonic Doppler velocimetry measurements [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(7): 076102
- 7 Wang Xitao, Liu Bingyi, Wu Songhua *et al.*. 1.55 μm all-fiber laser heterodyne detection and data analysis with high measurement accuracy of velocity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(6): 060301  
王希涛, 刘秉义, 吴松华 等. 高精度 1.55 μm 全光纤激光相干测速实验及数据分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(6): 060301
- 8 S. Levinson, S. Satapathy, M. Elert *et al.*. High-resolution projectile velocity and acceleration measurement using photonic Doppler velocimetry [C]. AIP Conference Proceedings, 2009, **1195**(1): 585~588
- 9 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
- 10 P. Mercier, J. Bénier, P. A. Frugier *et al.*. Heterodyne velocimetry and detonics experiments[C]. *SPIE*, 2009, **7126**: 712610
- 11 Jian Wang, Chongqing Wu, Hongwei Song *et al.*. Measurement of the velocities in the transient acceleration process using all-fiber photonic Doppler velocimetry[C]. *SPIE*, 2011, **7753**: 77536F
- 12 Jidong Weng, Hua Tan, Xiang Wang *et al.*. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(11): 111101
- 13 B. J. Jensen, D. B. Holtkamp, P. A. Rigg *et al.*. Accuracy limits and window corrections for photon Doppler velocimetry[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(1): 013523

栏目编辑: 何卓铭