

超高时间分辨空间相移面成像任意反射面速度干涉仪

刘寿先 陈光华 彭其先 雷江波 袁树云 刘俊 邓向阳 李泽仁

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 针对分幅面成像任意反射面速度干涉仪(VISAR)时间分辨和速度分辨的不足,研制了一套超高时间分辨空间相移面成像 VISAR。用双 VISAR 干涉腔光路解决超短脉冲相干性问题,实现超高时间分辨;用沃拉斯顿棱镜代替传统点 VISAR 中的偏振分束棱镜分光实现简洁的空间相移光路;以梳状干涉条纹作为信号载体实现空间分辨;用空间变换方法实现相移条纹的像素匹配;再由四路推挽式信号处理方法获得相位,进而获得全场速度分布。该套面成像 VISAR 具有 150 ps 时间分辨和 6 m/s 速度分辨。用其测量了激光驱动铝膜飞片的速度场,给出了全场速度分布。实验结果验证了超高时间分辨空间相移面成像 VISAR 的可行性。

关键词 测量; 全场速度; 干涉仪; 空间相移; 激光驱动飞片; 干涉条纹

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s108002

Phase-Shifting Plane Imaging VISAR with High Temporal Resolution

Liu Shouxian Chen Guanghua Peng Qixian Lei Jiangbo Yuan Shuyun Liu Jun

Deng Xiangyang Li Zeren

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In order to overcome the deficiencies of framing plane imaging velocity interferometer system for any reflector (VISAR), a simultaneous phase-shifting plane imaging VISAR with high temporal resolution is developed. With the double interferometers arrangement, fringes can be produced in VISAR with an ultrashort laser pulse. As a substitute for polarizing beamsplitters, Wollaston prisms are used to produce four spatial phase shift interferograms. Then, geometric correction of interferograms is done using space transformation. At last, a push-pull signal processing method is used to obtain the phase and velocities. Full-field velocity map is provided with a temporal resolution of 150 ps and a velocity sensitivity of 6 m/s. The technique is employed to measure a two-dimensional spatial velocity field of Al foils flyer driven by a pulse laser. These experimental results demonstrate the feasibility of the new imaging VISAR.

Key words measurement; full field velocity; interferometer; spatial phase shifting; laser-driven flyer; interference fringe

OCIS codes 120.7250; 120.2650; 120.3180

1 引言

速度是冲击波物理和爆轰波物理中非常重要的物理量。超高速度的测量技术从单点测量^[1-2]发展到离散多点^[3-4],到靶面一条线上各点^[5-6],再到靶整个二维表面各点^[7-8]的速度测量。特别是基于成像原理线成像任意反射面速度干涉仪(VISAR)^[5-6]和分幅面成像任意反射面速度干涉仪^[8],是传统点 VISAR 技术的发展,用梳状干涉条纹取代“牛眼”状

环纹,用扫描相机或者分幅相机记录一维或者二维梳状干涉条纹随时间的变化过程。因记录像面与靶面具有物像关系,能够实现空间分辨。线成像 VISAR 能够测量样品表面一条线上各点速度随时间变化的过程;分幅面成像 VISAR 能够测量多个时刻二维样品表面各点的绝对速度分布或者相对速度分布。这些技术极大地推动了冲击波物理、爆轰波物理、高能量密度物理等领域的实验诊断技术的发展。

收稿日期: 2013-09-01; **收到修改稿日期**: 2013-10-01

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ130019)、国家自然科学基金(11075145,11272297)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2011B0401007)、流体物理研究所发展基金(SFZ20110301)

作者简介: 刘寿先(1979-),男,硕士,副研究员,主要从事瞬态过程的光电测试技术方面的研究。E-mail: pion55@163.com

目前分幅面成像 VISAR 技术^[8]采用连续激光照明,超高速光电分幅相机记录二维空间分辨的干涉条纹,受到分幅相机曝光时间限制,速度测量时间分辨通常为 1~5 ns,仅能满足爆轰波物理和冲击波物理部分慢过程的诊断需求,却难以满足激光驱动及各种碰撞试验的超快过程中材料的相变、层裂诊断所需的亚纳秒甚至皮秒时间分辨要求。另外分幅面成像 VISAR 技术每一个时刻只记录一幅干涉条纹图像,需采用傅里叶变换方法对整幅图像进行相位分析^[9],经验上相位恢复精度只有一个条纹的 1/20,相应的速度分辨对应于条纹常数 1/20。且由于傅里叶变化方法是对整幅图像而不是每个像素进行分析,因此对于诊断超高速过程中所出现的条纹错位、分裂等情况,是无能为力的。

为了解决时间分辨、速度分辨和条纹错位分裂等问题,本文研制了一种新的超高时间分辨空间相移面成像 VISAR,并用于激光驱动飞片速度场测量以进行原理性验证。

2 原理及装置

2.1 超高时间分辨面成像 VISAR 原理

超高时间分辨面成像 VISAR 是采用超短脉冲激光照明,利用脉冲的开关特性实现超高时间分辨。通常超短脉冲的脉冲宽度在 10~150 ps 之间,而 VISAR 干涉腔中标准具引入的两臂延迟时间差通

常介于 51~2570 ps 之间(条纹常数对应于 5000~100 m/(s·fringe)。很显然直接用超短脉冲照明靶面,则从靶面返回的漫反射光是无法在 VISAR 干涉腔中形成干涉的。

采用一种“双 VISAR 干涉腔”结构解决超短脉冲时间相干性问题,如图 1 所示。它具有两个相同 VISAR 干涉腔,干涉腔延迟时间 Δt 相同。脉冲激光器发出的超短脉冲光先经过输入干涉腔,变成间隔时间为 Δt 的两个脉冲光,依次照射到靶面,从靶面返回的两个脉冲光再经过输出干涉腔,最终产生 4 个脉冲光,中间两个脉冲光在时间轴上基本重合,满足时间相干性要求,能够形成干涉,另外两个脉冲光与其他任意一个脉冲光都不满足时间相干性要求,只是作为本底存在于干涉图像中。最终用 CCD 相机记录干涉条纹。它的时间分辨本领不是由 CCD 相机的曝光时间决定,而是依靠脉冲光源本身的开关性质,实现超高时间分辨。光源脉冲宽度能够做到百皮秒以下,甚至十皮秒以下。

2.2 空间相移面成像 VISAR 原理

图 1 的光路只产生一幅干涉条纹图像,采用傅里叶变换方法对干涉条纹进行处理得到相位,其相位恢复精度最高约为条纹的 1/20,对应速度分辨为条纹常数的 1/20。为提高相位恢复精度,需采用相移光路结构。由于涉及到瞬态过程的测量,不能采用时间相移技术,只能采用空间相移技术^[10]。

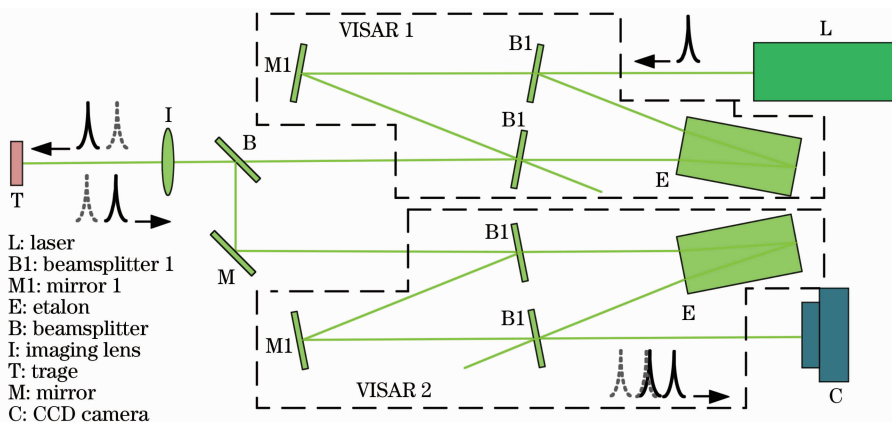


图 1 超高时间分辨面成像 VISAR 光路图

Fig. 1 Sketch of the high temporal resolution VISAR

传统点 VISAR 利用波片和偏振分束棱镜产生四路位相差为 $\pi/2$ 的“牛眼”状干涉信号,分出的光束在两对正交方向上^[11],在此基础上发展出一种线成像 VISAR,用光纤传像束将偏振棱镜分开的四路相移干涉信号导入扫描相机狭缝。借鉴这样的结构实现空间相移面成像 VISAR,则需要用到 4 根细

芯径大束径光纤传像束和 1 个大感光面积且高像元数的 CCD 相机,系统复杂、调节困难、成本昂贵。也可以用 4 个相同 CCD 相机分别记录四路位相差为 $\pi/2$ 的相移信号,但这也会大大增加系统成本。巧妙地用沃拉斯顿棱镜取代偏振分束棱镜,实现 p 光和 s 光在同一方向上以一定夹角分开,使得仅用一

个 CCD 相机就可以记录两路相移信号,两个 CCD 相机就可以记录四路相移信号。避免使用 4 个 CCD 相机或者 4 根光纤传像束和大感光面积且高像元数的 CCD 相机结构,简化系统,方便调节,同时降低成本。用相移算法对四路空间相移的干涉条纹进行处理,就可以实现 1/50 条纹的相位恢复,进而提高速度分辨率。

2.3 超高时间分辨空间相移面成像 VISAR

将图 1 和图 2 两个光路组合在一起实现超高时间分辨空间相移面成像 VISAR,其光路如图 3 所示。与分幅面成像 VISAR 类似,超高时间分辨空间相移面成像 VISAR 仍旧以梳状干涉条纹作为速度信息的载体,实现空间分辨。而其速度与条纹相位的关系为^[8]

$$\phi(x, y, t) = 2\pi \cdot F \cdot \bar{V}(x, y, t - \tau/2), \quad (1)$$

式中 $\phi(x, y, t)$ 为 t 时刻点 (x, y) 处条纹相位, $\bar{V}(x, y, t - \tau/2)$ 为 $t - \tau \sim t$ 时间段内的平均速度, F 为干涉腔条纹常数。

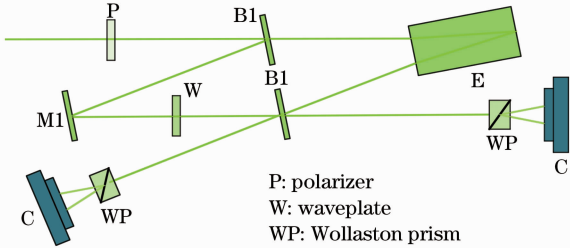


图 2 空间相移面成像 VISAR 光路图

Fig. 2 Sketch of phase shifting imaging VISAR

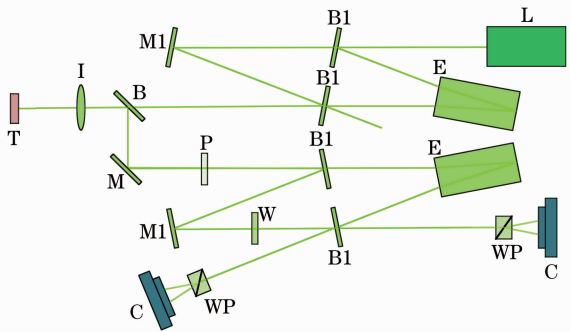


图 3 超高时间分辨空间相移面成像 VISAR 光路图

Fig. 3 Sketch of phase shifting imaging VISAR with high temporal resolution

因此,可以做一个类比,VISAR 干涉腔的延迟时间可以定义为干涉腔的响应时间,它会对输入信号产生一个卷积输出,其类似于示波器概念中带宽所对应的响应时间。而激光脉冲所实现的时间分辨,则类似于示波器中的采样间隔,通常脉冲宽度要求小于干涉腔响应时间的 1/4,比较合理。

搭建的测试装置中,照明激光脉冲宽度约为 150 ps;成像视场约为 $\phi 1.5 \text{ mm}$,靶面空间分辨约 $4 \mu\text{m}$;干涉仪条纹常数为 $300 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{fringe})$,响应时间为 860 ps,速度分辨约 6 m/s。对于绝大多数过程,150 ps 的时间分辨已经足够。如有需要,也可以采用 10 ps 脉冲宽度的激光器。

3 数据处理方法

3.1 预处理

空间相移面成像 VISAR 用沃拉斯顿棱镜进行分光成像,在像面上所分出来的两幅图像并不完全一致,最明显的差异是一幅图像相对于另外一幅图像在水平方向(分离平面)上存在拉伸,拉伸比例与分离角有关,本装置约为 1.05。而相移算法必须要求各相移条纹间像素严格匹配、对应。为此需采用基于映射的双线性空间变换算法来实现图像校正^[12]。双线性空间变换其约束条件是输入四边形的 4 个顶点映射成输出四边形的 4 个顶点,据此获得双线性变换的 8 个系数,进而依次完成整个图像的变换。实际应用中先以标准分辨率板作为参照物,各边基线中点作为 4 个约束条件点,获得双线性变换的系数,再用于静态、动态干涉条纹空间变换和图像校正。

3.2 条纹相位恢复

条纹相位恢复通常可以采用四步相移算法来实现,其方程为

$$\phi = \arctan\left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 - I_3}\right). \quad (2)$$

四步相移需要各步相移严格为 $\pi/2$,但这一点实际上较难实现^[13]。为此借鉴传统单点 VISAR 的四路推挽式信号处理方法^[14],将每幅干涉条纹每一行强度曲线首尾相连,获得 4 路信号,然后按推挽式信号处理方法进行参数拟合,确定相移量和振幅比,再依次对每一个像素点进行处理,就能够更加准确地还原出相位信息。经验上,此算法相位恢复精度约为 $2\pi/50$,相应的速度分辨约为条纹常数的 1/50。因此,采用相移结构的面成像 VISAR,能得到更高的速度分辨,也就能更好地体现出面成像 VISAR 技术的优势。

4 实验及结果

为了验证所搭建面成像 VISAR 装置,用其测量脉冲激光驱动的飞片速度场。驱动飞片装置与文献^[8]基本相同,唯一改变是驱动激光器,其波长为

532 nm, 能量最大约为 70 mJ, 脉冲宽度约为 10 ns, 光束直径为 8 mm, 用 $f=200$ mm 单透镜将光斑压缩到直径 2 mm 左右。由于激光器能量的限制, 驱动的铝膜厚度比较薄, 约为 $10\mu\text{m}$ 。飞片采用炮膛进行约束和加速, 炮膛直径为 1.5 mm, 长度为

1 mm。靶结构及驱动后的铝膜样品如图 4 所示, 驱动的重复性相对较好, 由于炮膛的作用, 铝膜切口有明显的卷边和毛刺。

超高时间分辨空间相移面成像 VISAR 装置中用两个 CCD 相机记录得到的干涉条纹如图 37 所示, CCD 相机的曝光时刻距离飞片启动零时刻约为 100 ns。图像中条纹有部分缺失, 是由于类似于图 4 (b) 中铝膜卷边所产生的。两个 CCD 相机记录到的干涉条纹是左右翻转的, 图 5(a) 右侧相比左侧在水平方向上有明显压缩, 图 5(b) 左侧比右侧在水平方向上也有明显压缩。将分辨率板作为参照物, 获得空间变换的系数, 然后对图像进行空间变换以实现像素间的匹配、对应。校正后的相移干涉条纹如图 6 所示, 表观上图像基本重合, 其像素匹配误差在 1~2 个像素。

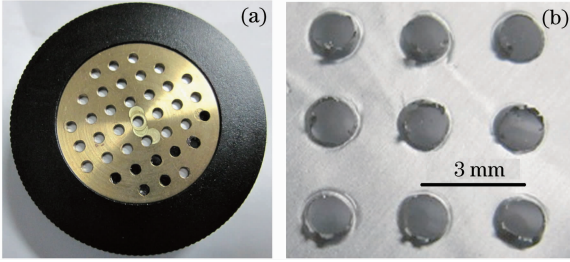


图 4 激光驱动靶。(a) 靶结构; (b) 驱动后靶样品
Fig. 4 Laser driven target. (a) Target configuration; (b) target after being driven

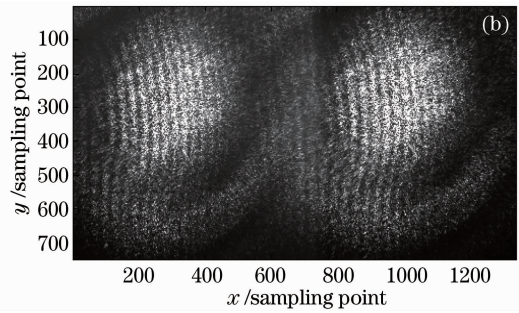
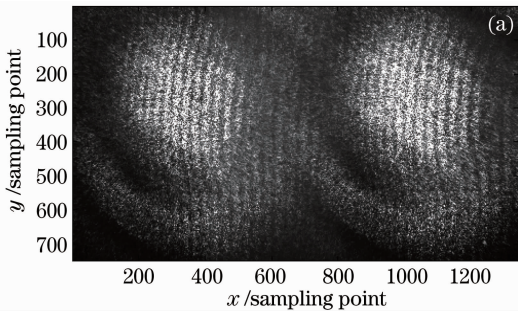


图 5 CCD 相机记录的原始动态干涉条纹。(a) 相机 1; (b) 相机 2

Fig. 5 Original phase shifting interferograms by CCD camera. (a) Camera 1; (b) camera 2

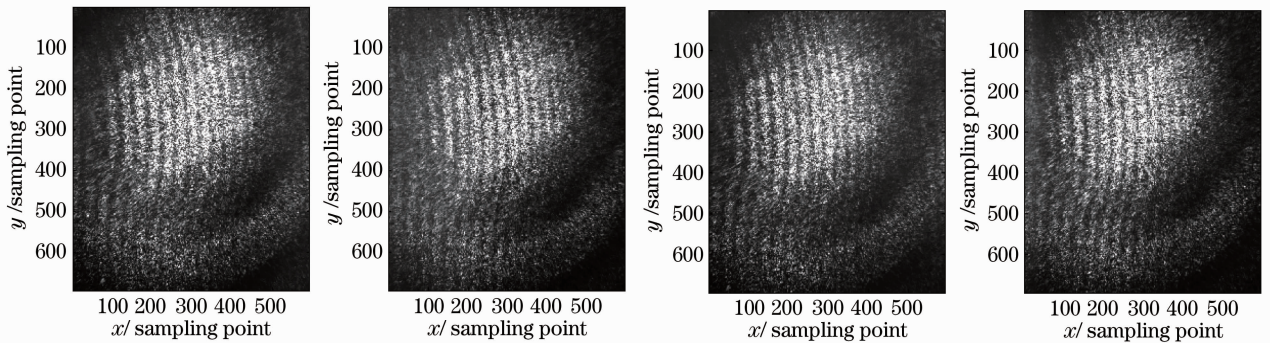


图 6 空间变换校正后相移干涉条纹

Fig. 6 Phase shifting interferograms after geometric correction

采用前述算法对相移干涉条纹图像进行处理得到相位, 进而由速度与相位的关系得到全场速度, 速度场二维、三维显示如图 7 所示。从图中可以看出, 速度分布呈现明显的“锅盖”状, 但锅盖不是完全轴对称分布的, 并且在顶部稍有起伏。速度分布的形状与激光光斑的高斯分布是吻合的。速度场最大速度约为 680 m/s, 边缘处速度约为 450 m/s。将空间

相移处理结果与单独用傅里叶变换方法对第二幅相移图像处理结果进行比较, 如图 8 所示, 会发现在速度顶部, 两者吻合比较好, 相对误差不超过 6 m/s, 只是傅里叶变换单独处理的速度起伏更大, 相移方法更加平滑。因此, 相移结构的引入, 能够提高面成像 VISAR 的速度分辨能力。

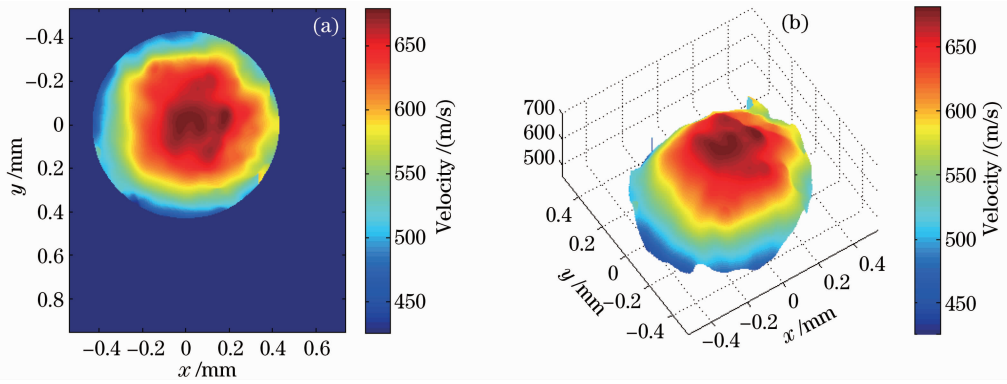


图 7 全场速度分布图。(a) 二维；(b) 三维

Fig. 7 Spatial resolved velocity field. (a) 2D; (b) 3D

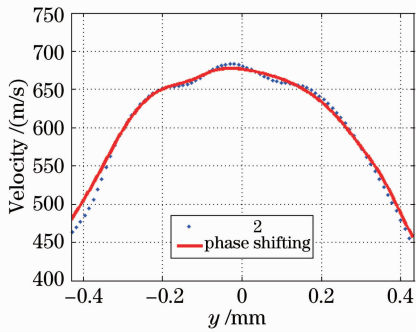


图 8 空间相移结果与单幅傅里叶变换结果比较

Fig. 8 Comparison between phase shifting result and Fourier transform

5 结 论

建立了一套超高时间分辨空间相移面成像 VISAR, 实现 150ps 的时间分辨和 6 m/s 的速度分辨, 极大提高了面成像 VISAR 的性能, 使之可以满足超快过程亚纳秒时间分辨和超高速度分辨测量要求。激光驱动飞片全场速度测量实验结果也验证了该技术的可行性。超高时间分辨空间相移面成像 VISAR 的建立进一步丰富了高时空分辨激光干涉测速技术的种类, 其中的空间相移光路也可以供线成像 VISAR 和分幅面成像 VISAR 借鉴, 以提高后两者的速度分辨能力。

参 考 文 献

- Barker L M, Hollenbach R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface[J]. J Appl Phys, 1972, 43(11): 4669-4675.
- Strand O T, Goozman D R, Martinez C, *et al.*. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques[J]. Rev Sci Instrum, 2006, 77(8): 083108.
- Z Li, R Ma, G Chen, *et al.*. Multipoint velocity interferometer system for any reflector[J]. Rev Sci Instrum, 1999, 70(10): 3872-3876.

- Kevin J F, Theresa A B. Shock Analysis Using the Multi Point Velocimeter (VISAR) [M]. Albuquerque; Sandia National Laboratories, 2003. SAND2003-3759[5].
- Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, *et al.*. Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility [J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75(11): 4976-4929.
- T J Vogler, W M Trott, W D Reinhart, *et al.*. Using the line-VISAR to study multi-dimensional and mesoscale impact phenomena[J]. Int J Impact Eng, 2008, 35(12): 1844-1852.
- P M Celliers, D J Erskine, C M Sorce, *et al.*. A high-resolution two-dimensional imaging velocimeter[J]. Rev Sci Instrum, 2010, 81(3): 035101.
- Liu Shouxian, Wen Weifeng, Yuan Shuyun, *et al.*. Full field velocity measurement of laser-driven foil using framing-imaging VISAR[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912007. 刘寿先, 温伟峰, 袁树云, 等. 分幅面成像任意反射面速度干涉仪诊断激光驱动飞片全场速度[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912007.
- Takeda M, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. J Opt Soc Am, 1982, 72(1): 156-160.
- Wang Lijuan, Liu Liren, Luan Zhu, *et al.*. Phase shifting jamin shearing interferometer based on polarization combination [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0608002. 王利娟, 刘立人, 栾竹, 等. 基于偏振合束的相移雅满剪切干涉仪[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0608002.
- W F Hemsing. Velocity sensing interferometer (VISAR) modification[J]. Rev Sci Instrum, 1979, 50(1): 73-78.
- Kenneth R Castleman. Digital Image Processing [M]. Zhu Zhigang, Lin Xueyang, Shi Dingji, *et al.* Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2002. 101-102. 卡斯尔曼. 数字图像处理[M]. 朱志刚, 林学闯, 石定机, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 101-102.
- Zhu Ronggang, Zhu Rihong, Li Jianxin. Application of virtual grating phase-shifting fringe method for three-dimensional shape measurement[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s108003. 朱荣刚, 朱日宏, 李建欣. 一种虚条纹相移算法在结构光三维测量中的应用[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s108003.
- Chen Guanghua, Li Zeren, Liu Yuankun. VISAR data reduction method and program[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(4): 315-320. 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.

栏目编辑: 韩峰