

基于大错位方棱镜的三维载频电子散斑干涉技术

孙 平 范香菊 王兴海

(山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014)

摘要 提出了一种利用载频电子散斑干涉测量三维位移场的新技术。首先,设计了一种新型的大错位方棱镜,利用该方棱镜可实现大错位电子散斑干涉。其次,被测物和参考物由布置在水平和竖直位置上的 3 个激光光源分别照明,三维电子散斑干涉系统由 3 个激光器、大错位方棱镜、CCD 和参考物面组成。参考物面的一次偏转可同时引入 3 个干涉场的载波条纹。分别采集 3 个激光器照明下物体形变前后及参考物面偏转后的散斑干涉图样,图像相减后得到不同照明条件下的载波条纹和受形变调制的载波条纹。结合傅里叶变换方法,可解调出形变场的相位,进一步计算得到 3 个位移分量。利用该三维测量系统对三点弯曲梁进行了典型实验,实验结果表明,该系统可以有效的同时测量形变场的 3 个位移分量。具有光路简单,操作相对简单的优点,为电子散斑干涉三维测量提供了新的途径。

关键词 测量;电子散斑干涉;三维位移;载频调制;大错位方棱镜

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0412012

Three-Dimensional Electronic Speckle Pattern Interferometry with Carrier Modulation by Using Large-Shearing Block Prism

Sun Ping Fan Xiangju Wang Xinghai

(College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract A technique with carrier modulation for three-dimensional displacement measurement by using electronic speckle pattern interferometry (ESPI) is presented. Firstly, a new block prism, named large-shearing block prism, is designed. A large-shearing electronic speckle pattern interferometer can be constituted when large-shearing block prism is used. Secondly, the test object and reference object are illuminated separately by three lasers which are fixed on horizontal and perpendicular position. A new three-dimensional (3D) ESPI system is constructed by three lasers, a large-shearing block prism and a CCD camera as well as a reference object. The carrier fringes in three interference fields can be introduced by rotating the reference object with a small angle. Interference speckle patterns before and after deformation, and interference speckle patterns after rotation of reference surface are collected when three lasers are used respectively. After the images are subtracted, three carrier fringe patterns and three modulated carrier fringe patterns under different illumination are obtained. Finally, three phase maps can be demodulated by using Fourier transform. Further phase calculation is needed to separate three displacement components. A typical three-point-bending-beam experiment is completed by the 3D system presented. Experimental results are offered, which show that three displacement components can be determined effectively. The 3D system has simple optical setup and has an easy way to operate, therefore it provides a new approach to three-dimensional deformation measurement.

Key words measurement; electronic speckle pattern interferometry (ESPI); 3D displacement; carrier-frequency modulation; large-shearing block prism

OCIS codes 120.0120;120.6160; 120.6165

1 引 言

在光力学测量中,电子散斑干涉测量技术可以精确测量物体的形变场,具有精度高、非接触和对隔

震要求低等优点,在物体的静、动态测量中得到广泛应用^[1]。由于物体的形变是三维的,常常需要测量物体的三维形变分量。典型的电子散斑干涉技术只

收稿日期: 2010-09-01; 收到修改稿日期: 2010-11-02

基金项目: 山东省科技攻关项目(2007GG20004002)资助课题。

作者简介: 孙 平(1964—),男,博士,教授,主要从事散斑干涉、云纹干涉光测量技术等方面的研究。

E-mail: sunpingmail@sohu.com

能测量物体的一维形变,为了测量物体的三维位移,研究人员在光路设置及图像处理等方面做了大量研究。参考型电子散斑干涉光路可以直接测量物体的离面位移,而双光束型电子散斑干涉光路可以直接测量物体的面内位移分量,将二者结合起来可以测量物体的三维位移场^[2~5],该方法的优点是无需计算,直接得到位移场,缺点是光路设置复杂,需要一套参考型光路和二套双光束型干涉光路系统。复杂的光路设置对测量精度影响很大,为使得光路设置简单些,采用双光束型干涉光路系统附加参考光系统,再结合图像分离的方法测量三维位移^[6,7]。这些三维位移测量方法基本上是对形变分量分别进行测量的。

剪切电子散斑干涉技术^[8]测量的是位移导数,而大剪切(大错位)电子散斑干涉^[9,10]测量的是位移场。大剪切电子散斑干涉的核心元件是实现图像错位干涉的大剪切晶体(渥拉斯顿棱镜)。利用大剪切渥拉斯顿棱镜可以实现多个激光器的同时测量,进而实现三维位移场测量^[10~12],其优点是无需参考光束,光路简单,所需激光器的相干长度相对减小,对测量环境的隔震要求大大降低,可一次性实现对三个位移分量的测量。采用大剪切渥拉斯顿棱镜的电子散斑干涉也有缺点:渥拉斯顿棱镜由方解石晶体制成,利用光的双折射特性,结合使用偏振片来实现图像的错位成像,而方解石晶体价格昂贵。另外,当渥拉斯顿棱镜的分束角度大于 5° 时很难实现电子散斑干涉^[13]。对于这样小的分束角度,测量时要求物体和参考物远距离成像,这大大降低了面内位移的测量灵敏度。

传统的方棱镜用来在两个垂直方向上分光,本文设计了新型的方棱镜,采用普通光学玻璃取代了现有技术中昂贵的方解石晶体,通过对普通光学玻璃制成的方棱镜进行磨制并镀膜,使之在同一个方向上大角

度分光,运用到电子散斑干涉上,可以实现三维散斑干涉。该棱镜结构简单,成本低廉;由于是基于光的反射实现分光,因此能够很好的控制分束角,极大提高了面内位移的测量灵敏度。同时不需要偏振片,更容易实现干涉,获得较高质量的干涉条纹。

时间相移和载频调制是两种有效的相位定量测量技术。与相移技术^[2,3,6,7,10~12]相比,干涉条纹空间调制技术^[4,5,9,13]不需要精密的相移设备,对测量的环境要求更低,同时具有适合动态测量的优点,因而在实际应用中有重要价值。在已有的电子散斑载频调制位移测量的研究中,应用三个测量光路分别载频调制的电子散斑干涉方法已有报道^[4,5],该调制方法是对3个位移分量和调制分别解调,光路复杂,且本质上还是一维载频调制。对3个位移分量一次性同时调制的电子散斑方法还未见报道。本文采用大错位方棱镜实现三维电子散斑干涉,3个干涉场的载波条纹通过参考物面的一次偏转引入,结合傅里叶变换法,一次性测量得到物体形变的三维位移分量。

2 大错位方棱镜设计

普通方棱镜是由2块光学玻璃磨制的直角三角棱镜组成,其中一个直角三角棱镜的斜面上镀有半透半反膜,用光学胶将2个直角三角棱镜沿斜面粘合在一起形成,如图1所示。大错位方棱镜也是由2个普通光学玻璃磨制的三角棱镜组成,其中一个为直角三角棱镜,其斜面上也镀有半透半反膜,而另外一个不是直角三角棱镜,该方棱镜的一个反射面是磨去一个楔角 α 的斜面。2块三角棱镜沿斜面用光学胶粘合在一起形成大错位方棱镜,方棱镜的入射光所在的面和出射光所在的面镀有增透膜,两个反射面均镀有全反射膜。

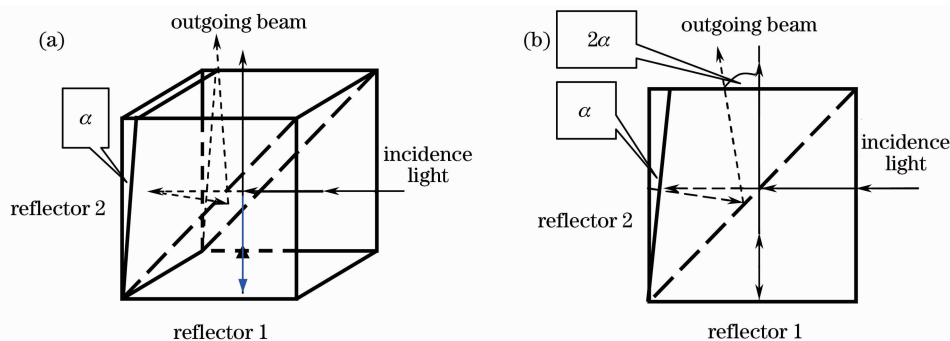


图1 大错位方棱镜的结构。(a)立体结构图,(b)正面视图

Fig. 1 Schematic diagram of large-shearing block prism. (a) three-dimensional structure of block prism, (b) front view of the block prism

简单的讲,上述方案就是将普通方棱镜的一个反射面由原来的直面磨去一个楔角 α 后变为斜面,这样入射的光线经过非直角反射,出射的2束光线就分开了。方棱镜的大小尺寸可根据成像透镜的口径来定。如果方棱镜反射面磨去的角度是 α ,则棱镜的分束角是 2α 。根据成像的距离和试件的大小尺寸, α 的大小可选择在 $1^\circ\sim 10^\circ$ 之间。

3 三维载频电子散斑干涉原理

3.1 基于大错位方棱镜的载频电子散斑干涉

如图2所示,在被测物一侧固定放置一大小相等的参考物。被测物中心和参考物中心到大错位方棱镜中心的连线的夹角与大错位方棱镜的分束角相等。用一激光束同时照明被测物和参考物,根据光路可逆原理,来自被测物的物光和来自参考物的参考光经过大错位方棱镜以后会在 CCD 靶面上叠加成像,这样构成了一个大错位电子散斑干涉系统。参考物用来提供参考光场,其表面反射率应与被测物面反射率近似相等,以保证干涉效果。另外,参考物面的大小应比被测物面稍大,以保证二者在像面上完全叠加。

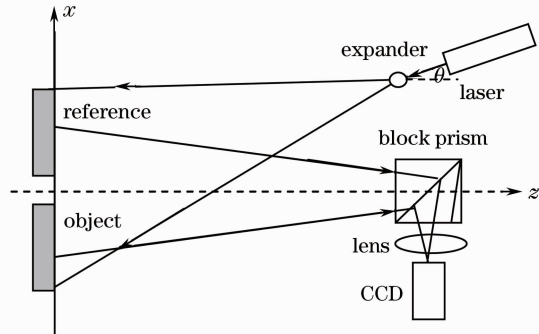


图2 大错位方棱镜的电子散斑干涉系统

Fig.2 Setup of ESPI system by using large-shearing block prism

图2是典型的单光束照明的电子散斑干涉系统,测量得到的是物体形变的混合场。照明光入射角是 θ 时,被测物体表面形变引起的相位变化 $\Delta\phi(x,y)$ 可表示为^[14]

$$\Delta\phi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda} [w(x,y)(1 + \cos\theta) + u(x,y)\sin\theta], \quad (1)$$

式中 $w(x,y)$ 为物体的离面位移, $u(x,y)$ 为物体的面内位移水平分量, λ 是所用激光的波长。

干涉条纹场经线性调制后,变成密集的、含有形变信息的载波条纹。受调制的载波条纹可表述为^[1]

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[\Delta\phi(x,y) + 2\pi f_0 x], \quad (2)$$

式中 $a(x,y)$ 为背景光强, $b(x,y)$ 为条纹幅值, $\Delta\phi(x,y)$ 为物体形变引起的相位变化,即待求相位。 f_0 是物体偏转引入的沿 x 轴方向的空间频率^[15]:

$$f_0 = \frac{\Delta\alpha(1 + \cos\theta)}{\lambda}, \quad (3)$$

式中 λ 是所用激光的波长, θ 是照明光与被测物体表面法线的夹角, $\Delta\alpha$ 为物体转动的微小角度。(2)式可表示为

$$I(x,y) = a(x,y) + c(x,y)\exp(j2\pi f_0 x) + c^*(x,y)\exp(-j2\pi f_0 x), \quad (4)$$

式中 $c(x,y) = b(x,y)\exp[j\Delta\phi(x,y)]/2$, j 代表虚部单位,*表示复数的共轭。在 x 轴方向对光强 $I(x,y)$ 进行傅里叶变换可以得到

$$H(f_x,y) = A(f_x,y) + C(f_x - f_0,y) + C^*(f_x + f_0,y), \quad (5)$$

式中 $A(f_x,y)$ 是由背景光强和低频噪声变换得到的。用适当的滤波器将 $A(f_x,y)$ 和 $C^*(f_x + f_0,y)$ 滤掉,得到 $C(f_x - f_0,y)$ 后将其移到原点变为 $C(f_x,y)$,再做傅里叶逆变换得到 $c(x,y)$,可得到物体形变的相位分布

$$\Delta\phi(x,y) = \arctan \frac{\text{Im}[c(x,y)]}{\text{Re}[c(x,y)]}, \quad (6)$$

式中 Re 和 Im 表示取复数的实部和虚部。由(6)式得到的是主值在 $[-\pi, \pi]$ 内的变化的包络相位,需要解包络运算才能将其连续化。

3.2 三维载频电子散斑干涉

三维电子散斑干涉系统如图3所示。3个激光器分别布置在 x 轴方向和 y 轴方向,分别以 θ_A, θ_B 和 θ_C 角度照明被测物和参考物。大错位方棱镜放置在物面的法线方向(z 轴)上。物光和参考光经大错位方棱镜反射后在 CCD 靶面叠加产生干涉。由于每一个照明光束都形成了独立的大错位干涉系统,因

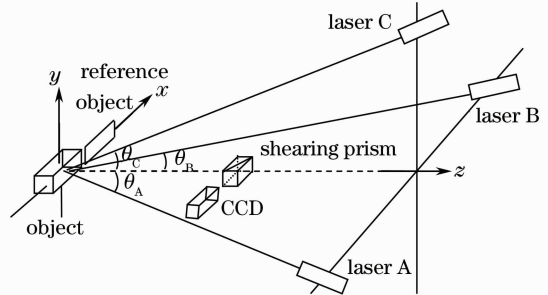


图3 三维载频调制电子散斑干涉系统

Fig.3 Setup of 3-D ESPI system with carrier-frequency modulation

此三维测量可化简为三个一维的载频调制测量。当激光器 A 和激光器 B 照射被测物时,其形变前后的相位变化可以表示为

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda}[\omega(1 + \cos \theta_A) + u \sin \theta_A], \quad (7)$$

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda}[\omega(1 + \cos \theta_B) + u \sin \theta_B], \quad (8)$$

激光器 C 在 y 轴方向上,对应照射被测物时,其相位变化关系式为^[16]

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda}[\omega(1 + \cos \theta_C) + v \sin \theta_C], \quad (9)$$

式中 u, v, ω 分别为被测物体在 x, y, z 方向上的形变分量。 θ_A, θ_B 和 θ_C 分别是三个激光器照射物体的入射角度,3 个角度的大小可通过扩束镜的坐标计算得到。联立(7)~(9)式,可得到被测物体的三维形变分量,可知,形变分量 u, v, ω 的测量灵敏度与其系数有关。离面位移 ω 的测量灵敏度最高,而面内位移 u, v 的测量灵敏度仅与照射角度的正弦值有关。所以为了提高面内位移在测量中的灵敏度,测量中应选取大于 45° 的照明角度。

4 典型实验

根据图 3 所示的三维载频电子散斑干涉系统进行实验,激光器 A, B 和 C 为 He-Ne 激光器,波长为 32.8 nm,三光源光强基本相等。被测物为有机玻璃制成的简支梁,长 150.0 mm,高 19.5 mm,厚 18.5 mm。加载的跨距为 70.0 mm。在参考物、简支梁表面涂水性涂料以增强其反射率。参考物比被测物稍大,临近放置在被测物旁边。选取被测物的中心轴线(表面法线)为 z 轴,建立三维坐标系。参考物面由步进电机驱动,可在 $x-z$ 面内绕 y 轴做微小偏转。将激光器 A 前的扩束镜和激光器 B 前的扩束镜布置于 x 轴上,且分布于 z 轴两侧;激光器 C 前面的扩束镜则布置于 y 轴正半轴上,并使三个扩束镜近似共面。激光器 A, B 和 C 发出的激光束与 z 轴(被测物体表面法线)分别成 θ_A, θ_B 和 θ_C 。在被测物正前方的 z 轴上,放置有大错位方棱镜,用于接收物光和参考光。大错位方棱镜大小为 50 mm × 50 mm,分束角为 10° 。物光和参考光经过大错位方棱镜后由 CCD 摄像机接收。物光和参考光在 CCD 靶面叠加产生散斑干涉,干涉图像经 CCD 接入计算机,通过数字图像处理系统进行数据处理。该实验系统实物装置如图 4 所示。

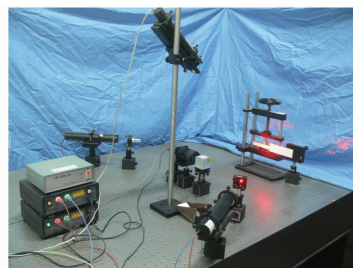


图 4 三维载频调制电子散斑干涉系统实物照片

Fig. 4 Picture of 3-D ESPI system with carrier-frequency modulation

激光器 A, B 和 C 分别从水平和竖直三个不同的方向照射被测物和参考物,三个激光器和成像系统分别形成大错位电子散斑干涉系统。被测物形变前,分别采集散斑干涉图像,得到对应激光器 A, B 和 C 照明的三幅原始的被测物面的散斑干涉图像;参考物面偏转后,再分别采集三幅散斑干涉图像。对应同一激光器的散斑干涉图像相减,得到三幅载波条纹图。图 5 为激光器 A 照射时的载波条纹图,图 6 为激光器 B 照射时的载波条纹图,图 7 为激光器 C 照射时的载波条纹图。

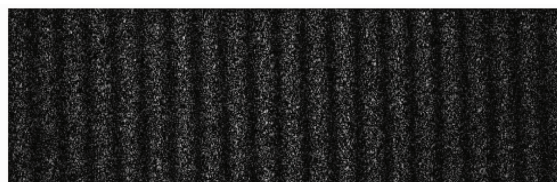


图 5 激光器 A 照射时试件变形前载波条纹

Fig. 5 Carrier fringe pattern before deformation when the object is illuminated by laser A

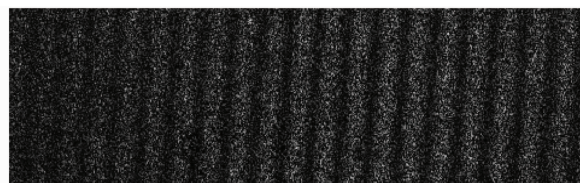


图 6 激光器 B 照射时试件变形前载波条纹

Fig. 6 Carrier fringe pattern before deformation when the object is illuminated by laser B

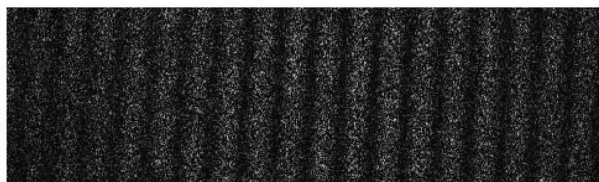


图 7 激光器 C 照射时试件变形前载波条纹

Fig. 7 Carrier fringe pattern before deformation when the object is illuminated by laser C

被测物发生形变后,再分别采集 3 幅散斑干涉图像,该 3 幅图像与对应同一照射激光器的原始物面散斑干涉图像相减,得到 3 幅受调制的载波条纹图。载波条纹受物体形变的调制而发生弯曲。图 8 所示为激光器 A 照射时的受调制的载波条纹,图 9 为激光器 B 照射时的受调制的载波条纹,图 10 为激光器 C 照射时的受调制的载波条纹。

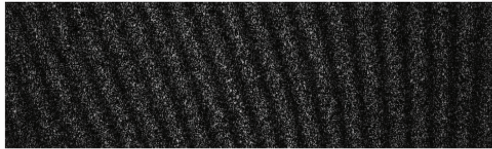


图 8 激光器 A 照射试件变形后受调制载波条纹
Fig. 8 Modulated carrier fringe after deformation when the object is illuminated by laser A



图 9 激光器 B 照射试件变形后受调制载波条纹
Fig. 9 Modulated carrier fringe after deformation when the object is illuminated by laser B



图 10 激光器 C 照射试件变形后受调制载波条纹
Fig. 10 Modulated carrier fringe after deformation when the object is illuminated by laser C

对应每一照明激光器,有二幅条纹图:物体形变前的载波条纹图和物体形变后的受调制的载波条纹图。利用傅里叶变换法解调,得到含离面位移和面内位移分量信息的包络相位图。3 个激光器照射,对应得到三幅包络相位图。图 11 为激光器 A 照射时的物体形变包络相位图,图 12 为激光器 B 照射时的物体形变包络相位图,图 13 为激光器 C 照射时的物体形变包络相位图。图 11~13 为物体混合形变场,经相位解包络并联合(7)~(9)式,可分离得到 x, y, z 3 个坐标轴方向上的形变分量的相位分布,即位移分量 u, v, w 的相位场。为了方便对照,将分离出的相位场重建成条纹图的形式。面内位移 u 场的条纹图如图 14 所示,面内位移 v 场的条纹图如图 15 所示,离面位移 w 场条纹图如图 16 所示。对比文献[10],可知 u, v, w 场符合简支梁位移场的

条纹分布,说明该三维系统可以有效的进行三维形变测量。



图 11 激光器 A 照射物体变形包络相位图
Fig. 11 Wrapped phase distribution of deformation when the object is illuminated by laser A

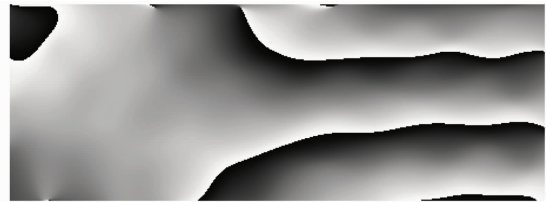


图 12 激光器 B 照射物体变形包络相位图
Fig. 12 Wrapped phase distribution of deformation when the object is illuminated by laser B

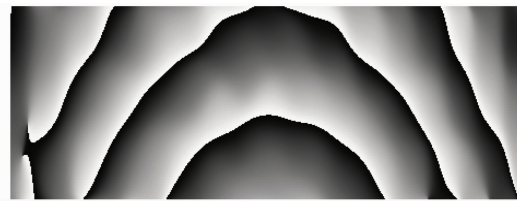


图 13 激光器 C 照射物体变形包络相位图
Fig. 13 Wrapped phase distribution of deformation when the object is illuminated by laser C



图 14 面内位移水平分量(u 场)条纹图
Fig. 14 In-plane displacement fringe of field u in horizontal direction



图 15 面内位移垂直分量(v 场)的条纹图
Fig. 15 In-plane displacement fringe of field v in vertical direction

图 16 离面位移分量(w 场)的条纹图Fig. 16 Out-of-plane displacement fringe of field w

5 结 论

采用大错位方棱镜实现了大错位(大剪切)电子散斑干涉。大错位方棱镜的分束角度比沃拉斯顿棱镜的分束角要大的多,可较近距离测量被测物,提高了面内位移测量灵敏度。同时,采用大错位方棱镜可以实现 3 个激光器的同时测量。3 个干涉场的载波条纹可以通过参考物面的一次偏转引入。结合傅里叶变换方法,实现了形变场 3 个位移分量的同时测量。由于需要依次记录 3 个激光器照明下的散斑场,该系统更适进行合形变试件的静态测量。系统具有光路简单,操作相对简单的优点,为电子散斑干涉三维测量提供了新的途径。

参 考 文 献

- P. K. Rastogi. Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2001
- Tong Jingwei. Automatic analysis of three-dimensional displacement field using ESPI[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 1997, **26**(6): 515~529
- Amalia Martínez, Juan A. Rayas, Ramón Rodríguez-Vera *et al.*. Three-dimensional deformation measurement from the combination of in-plane and out-of-plane electronic speckle pattern interferometers[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(24): 4652~4658
- Sun Ping, Han Qing, Wang Xiaofeng *et al.*. The technique of 3D carrier modulation in ESPI and its application in displacement measurement of diesel engine[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1326~1330
孙平, 韩青, 王晓风等. 三维电子散斑干涉载频调制及其在柴油机上的应用[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1326~1330
- Eric B. Flynn, Lori C. Bassman, Timothy P. Smith *et al.*. Three-wavelength electronic speckle pattern interferometry with the Fourier-transform method for simultaneous measurement of microstructure-scale deformations in three dimensions[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(14): 3218~3225
- Sun Ping, Zhang Hongming, Lu Peng *et al.*. Study on isolation of displacement fields in 3D phase-shifting ESPI [J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2004, **15**(2): 199~201
孙平, 张虹明, 陆鹏等. 三维相移电子散斑干涉中的位移场分离研究[J]. *光电子激光*, 2004, **15**(2): 199~201
- Sun Ping, Li Aihua, Zhang Li *et al.*. Three dimensional displacement measurement in ESPI by using reversed phase calculation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 193~196
孙平, 李爱华, 张丽等. 在电子散斑干涉中利用反相位法进行三维形变测量[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 193~196
- Y. Y. Hung, C. Y. Liang. Image-shearing camera for direct measurement of surface strains[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(7): 1046~1051
- Sun Ping, Li Aihua, Tao Chunxian *et al.*. Carrier modulation for large-shearing electronic speckle patterns and displacement measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 447~451
孙平, 李爱华, 陶春先等. 大剪切电子散斑干涉的载频调制与位移场测量[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 447~451
- Sun Ping, Zhang Xi, Wang Haifeng. Study on combined method based on 3D ESPI [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **B11**(3): 189~192
- Zhang Xi, Sun Ping, Wang Haifeng. 3D-ESPI with phase-shifting and its application in diesel engine research [J]. *J. Experimental Mechanics*, 2002, **17**(4): 393~397
张熹, 孙平, 王海锋. 三维相移电子散斑干涉法在柴油机机身中的应用[J]. *实验力学*, 2002, **17**(4): 393~397
- Sun Ping, Wang Haifeng, Zhang Xi *et al.*. Study on three-dimensional ESPI and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 840~844
孙平, 王海锋, 张熹等. 三维电子散斑干涉技术及其应用研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 840~844
- Sun Ping. The separation of out-of-plane displacement from in-plane components by fringe carrier method based on large image-shearing ESPI[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **275**(2): 305~310
- J. N. Petzing, J. R. Tyrer. Recent development and applications in electronic speckle pattern interferometry [J]. *J. Strain Analysis*, 1998, **33**(2): 153~169
- Sun Ping, Tao Chunxian, Zhang Li *et al.*. Spatial modulation and demodulation for electronic speckle patterns [J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2005, **16**(9): 1093~1096
孙平, 陶春先, 张丽等. 电子散斑干涉场的空间调制与解调技术[J]. *光电子激光*, 2005, **16**(9): 1093~1096
- Thorsten Siebert, Karsten Splitthof, Andreas Etemeyer. A practical approach to the problem of the absolute phase in speckle interferometry [J]. *J. Holography and Speckle*, 2004, **1**(1): 32~38