

文章编号:1004-4213(2011)03-0393-4

剪切电子散斑平移棱镜相移方法研究

孙平, 刘斌, 王晓凤, 韩青

(山东师范大学 物理与电子科学学院, 济南 250014)

摘 要:在剪切电子散斑干涉中,由于错位的二物光束同向传播,很难将二物光分开引入附加相位的方法来实现相移.平移棱镜相移法可以在二束物光不分开的情况下实现相移.本文对平移棱镜相移法进行了理论分析,证明平移棱镜可以引入稳定、线性的附加相位,给出了附加位移与附加相位之间的关系式.利用周边固定、中心加载的圆盘进行实验,给出了实验结果,证明平移棱镜相移法可以有效地从干涉条纹中定量提取位移导数信息.

关键词:物理光学;剪切电子散斑;相移;沃拉斯顿棱镜

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114003.0393

0 引言

剪切电子散斑干涉术是在电子散斑干涉术的基础上发展起来的,可以测量位移导数的一种测量方法^[1-2],具有全场测量,光路简单,调节方便,对环境要求较低等特点,广泛用于无损检测等领域^[3-4].在电子散斑干涉中应用相移技术^[5-6]或载频调制技术^[7],可以定量测量位移,且使测量准确度大为提高.在剪切散斑干涉技术中,通常采用沃拉斯顿(Wollaston)棱镜作为图像错位元件.沃拉斯顿棱镜的结构固定,难以将出射的二物光分开.在二光束不分开的情况下实现相移,有偏转平镜法^[8-9]、偏转物体法^[10]以及平移棱镜相移法^[11]等.平移棱镜法是将棱镜固定在平台上,利用相移器平移棱镜引入附加相位.相移过程可分为定步和等步两种,其算法根据相移次数的不同,有三步、四步、五步等算法.本文采用等四步相移算法,着重对平移棱镜法进行理论分析.分析表明,平移棱镜法可以引入稳定、线性的附加相位,给出了附加位移与附加相位之间的关系式.利用周边固定、中心加载的圆盘进行典型实验,给出了实验结果.

1 剪切电子散斑干涉术的原理

如图 1,用扩束光照明物体后由 CCD 摄像机成像.在 CCD 前放置一个沃拉斯顿棱镜,则物光通过沃拉斯顿棱镜时将产生双折射,在透镜的焦平面上产生两个错位的像.由于两个错位像的偏振方向相互垂直,需在沃拉斯顿棱镜后放置一偏振片,偏振片

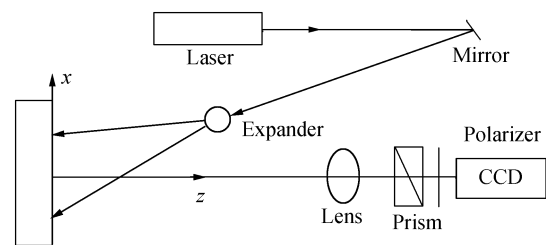


图 1 剪切电子散斑干涉光路图

Fig. 1 Schematic diagram of electric speckle-shearing interferometer

的透光方向与错位像的偏振方向成 45° 角,则二物光经过偏振片后互相干涉形成散斑干涉图像.采集物体变形前后的散斑干涉图并实时相减,可得到干涉条纹图像.当照明角度很小或者垂直照明,观察方向沿着物面的法线方向时,由物体变形引起的位相差可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \delta x \quad (1)$$

式中, λ 为所用激光的波长, w 为物体变形的离面位移分量, δx 为剪切棱镜在物面 x 轴方向上产生的图像错位量(剪切量).由式(1)可知,通过位相变化,可以求出剪切方向上的位移导数.根据相移四步算法^[5],将待求的相位依次增加一个附加相位 $\delta\varphi$,分别为 0 、 $\pi/2$ 、 π 和 $3\pi/2$,式(1)中的位相差可表示为

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (2)$$

如果将沃拉斯顿棱镜沿楔角方向移动一段微小距离,则会产生另一幅散斑图像,对应的条纹图也发生变化.同一物体的两种不同状态下的散斑条纹图像,反映出附加相位的变化,从而可实现相移.

基金项目:山东省自然科学基金(No. Y2008G18)资助

第一作者:孙平(1964-),男,教授,主要研究方向为散斑干涉、云纹干涉光测量技术等. Email: sunpingmail@sohu.com

收稿日期:2010-09-10;修回日期:2010-11-19

2 沃拉斯顿棱镜的剪切机理

在剪切电子散斑干涉中,常用使用沃拉斯顿棱镜作为实现图像错位成像的光学元件.沃拉斯顿棱镜是用双折射材料制成的两块光轴互相垂直的直角棱镜粘合而成.如图2,光线进入第一块棱镜时o光和e光是不分开的,但具有不同的折射率,其速度也是不同的.在进入第二块棱镜后,由于其光轴方向与第一块的光轴方向垂直,o光变为e光,e光变为o光,两束光在第二块棱镜中分开,并在离开棱镜时再次折射而形成分开一定角度的偏振光,振动方向互相垂直,它们之间的夹角近似为 $\varphi = 2\sin^{-1}[(n_o - n_e)\tan\beta]$.由沃拉斯顿棱镜射出的是两束互相错位的物体反射光波,互为参考光和物光,其振动方向互相垂直,所以需在其后加一偏振片,使其振动方向相同而干涉.由几何关系可知,沃拉斯顿棱镜在CCD靶面上的剪切量为 $\delta x = 2D_0 \tan(\varphi/2)$,其中 D_0 为沃拉斯顿棱镜到CCD靶面的距离.

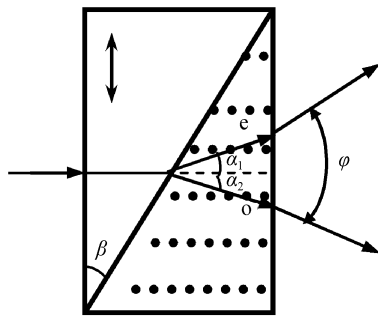


图2 沃拉斯顿剪切棱镜
Fig. 2 Wollaston shearing prism

3 平移棱镜实现相移理论分析

如图3,任意光束垂直入射沃拉斯顿棱镜,假设棱镜的厚度为 d .入射光束在晶体内分成e光和o光,到两晶体分界面的A(x, z)点后分开,偏离原传

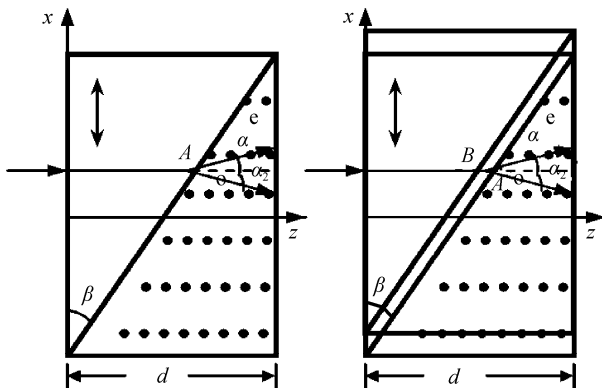


图3 沃拉斯顿棱镜及其沿x方向的平移
Fig. 3 Wollaston prism and the translation of the prism in x direction

播方向的角度分别为 α_1 和 α_2 .第一块棱镜中的o光

进入第二块棱镜后变为e光,则其光程为

$$\delta_1 = \left(n_o - \frac{n_e}{\cos \alpha_1} \right) z + \frac{n_e d}{\cos \alpha_1} \quad (3)$$

第一块棱镜中的e光进入第二块棱镜后变为o光,则其光程为

$$\delta_2 = \left(n_e - \frac{n_o}{\cos \alpha_2} \right) z + \frac{n_o d}{\cos \alpha_2} \quad (4)$$

当沃拉斯顿棱镜在x轴方向平移一微小量 Δx ,光束入射在晶体分界面的B($x, z - \Delta z$)点,则对于第一块棱镜中的o光和e光,平移后的光程分别为

$$\delta'_1 = \left(n_o - \frac{n_e}{\cos \alpha_1} \right) (z - \Delta z) + \frac{n_e d}{\cos \alpha_1} \quad (5)$$

$$\delta'_2 = \left(n_e - \frac{n_o}{\cos \alpha_2} \right) (z - \Delta z) + \frac{n_o d}{\cos \alpha_2} \quad (6)$$

由式(3)和式(5)解得平移前后o光的光程差为

$$\Delta \delta_1 = \delta'_1 - \delta_1 = - \left(n_o - \frac{n_e}{\cos \alpha_1} \right) \Delta z \quad (7)$$

同理,由式(4)和式(6)可得平移前后e光的光程差

$$\Delta \delta_2 = - \left(n_e - \frac{n_o}{\cos \alpha_2} \right) \Delta z \quad (8)$$

由于剪切棱镜的平移,两出射光束的光程变化为 $\Delta \delta$,由式(7)和(8)可得出

$$\Delta \delta = \Delta \delta_2 - \Delta \delta_1 = \left(n_o - n_e + \frac{n_o}{\cos \alpha_2} - \frac{n_e}{\cos \alpha_1} \right) \Delta z \quad (9)$$

与式(9)对应的附加相位差为

$$\delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n_o - n_e + \frac{n_o}{\cos \alpha_2} - \frac{n_e}{\cos \alpha_1} \right) \tan \beta \Delta x \quad (10)$$

同理,当沃拉斯顿棱镜沿z轴方向平移一微小量 Δz 时,两出射光束的附加相位差为

$$\delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n_o - n_e + \frac{n_o}{\cos \alpha_2} - \frac{n_e}{\cos \alpha_1} \right) \Delta z \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可见,将沃拉斯顿棱镜沿x轴方向平移,以及沿z轴方向平移,均可以使干涉图样引入线性的附加相位差,实现相移.

4 实验系统及结果

实验系统如图1,激光源为He-Ne激光器,波长为632.8 nm.采用周边固定的圆盘进行实验,直径60 mm,厚度2 mm.用千分尺在圆盘中心加载.被测物体由扩束光照明后,物光通过剪切镜成两个错位像,再经偏振化方向为 45° 放置的偏振片,两像在CCD靶面上叠加产生干涉.CCD与计算机上的图像卡用数据线相连,采集到的图像送入计算机处理.采集到的图像为256灰度,像素为 512×512 .在进行 w 场(离面)位移梯度测量中,相移由步进电机及其驱动器来实现,其优点是没有误差积累.步进电机由其驱动系统控制,其转速、停止的位置取决于脉冲信号

的频率和脉冲数,可将电脉冲信号转化为角位移或线位移.驱动器采用二维运动控制器,为32细分,对应电机每转动一圈6400个脉冲,引入附加位移0.50 mm.实验中,每次输出200个脉冲.棱镜的剪切方向为 x 方向,沿 x 轴方向平移,采用等步相移法,每次引入相同的位移量,输出3次,每次都采集干涉条纹图样.图像的错位量 δx 约为2 mm.四幅剪切散斑条纹图样如图4.

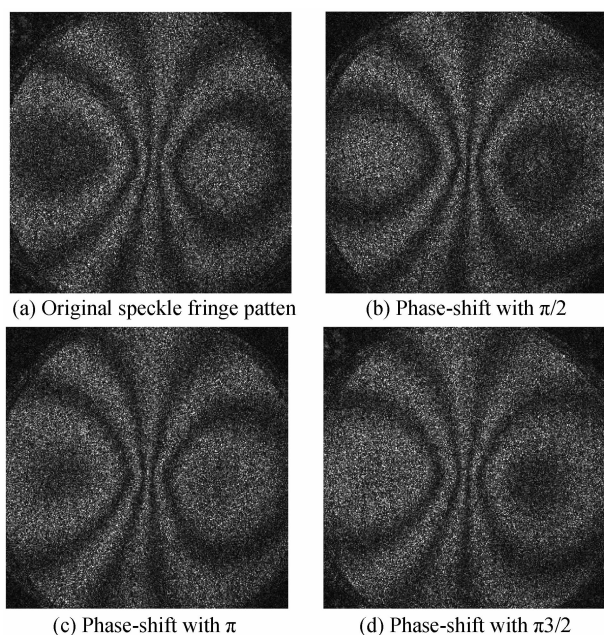


图4 四步相移条纹图样

Fig. 4 Four speckle fringe patterns with phase-shift increment of $i\pi/2$ ($i=0,1,2,3,4$)

按照式(2)对图4进行相移计算和解包络相位处理,可得其相位图.图5为包络相位图和解包络相位图.取图4的中心亮条纹位置为零位移导数点,按照式(1)可将连续变化的相位值转换为位移导数值.图6为离面位移导数的三维网格图和轮廓图.可见,平移棱镜相移法可以获得全场的离面位移导数.

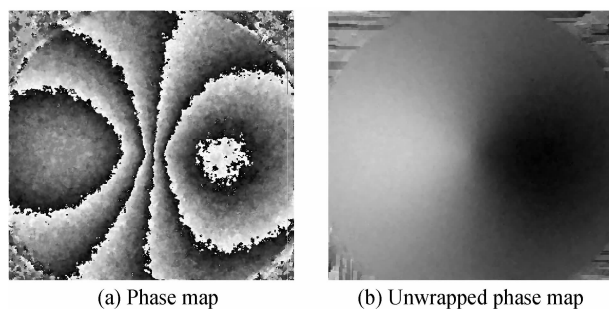


图5 干涉条纹的包络相位图和解包络后的相位图

Fig. 5 The phase map and the unwrapped phase map of the fringes

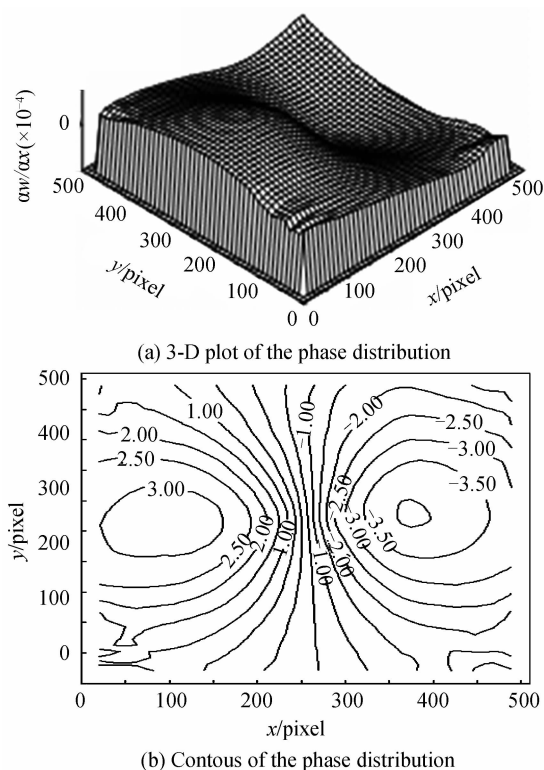


图6 离面位移导数的三维网格图和轮廓图

Fig. 6 Three-dimensional plot of the phase distribution and its contours

5 结论

本文对平移棱镜相移法在剪切电子散斑中的应用做了理论分析,证明平移棱镜相移法可以引进线性的附加相位,给出了附加位移和附加相位的关系式.理论分析和典型实验均表明,平移棱镜相移法可以有效地从干涉条纹中定量提取位移导数信息.

参考文献

- [1] YANG Lian-xiang, CHEN F, STEINCHEN W, *et al.* Digital shearography for nondestructive testing: potentials, limitations, and applications[J]. *Journal of Holography and Speckle*, 2004, **1**(2): 69-79.
- [2] HONG Yong-ren, HE Pao-pei, HE Xiao-yuan. Shearography: all optical measurement technique applications [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2006, **21**(6): 667-688.
洪友仁, 何浩培, 何小元. 剪切散斑: 一种光学测量技术及其应用[J]. *实验力学*, 2006, **21**(6): 667-688.
- [3] HUNG Y Y, SHANG H M, YANG Lian-xiang. Unified approach for holography and shearography in surface deformation measurement and nondestructive testing [J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(5): 1197-1207.
- [4] ZOU Guang-ping, LU Jie, WANG Wei-wei. Application of electronic shearography speckle pattern interferometry to nondestructive testing of wood material[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009, **30**(4): 357-361.

- 邹广平, 芦颖, 王微微. 电子剪切散斑技术在木材无损检测中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, **30**(4):357-361.
- [5] ZHOU Can-lin, LI Fang, WANG Yun-shan. Large displacement measurement using ESPI [J]. *Journal of Optoelectronics*, 2005, **16**(12): 1472-1475.
周灿林, 李方, 王蕴珊. 大剪切电子散斑干涉法[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(12): 1472-1475.
- [6] SUN Ping, ZHANG Xi. Study on phase-shifting techniques in ESPI[J]. *Journal of Optoelectronics Lasers*, 2001, **12**(11): 1174-1176.
孙平, 张熹. 电子散斑干涉中相移技术研究[J]. 光电子激光, 2001, **12**(11):1174-1176.
- [7] LIU Cheng, YAN Chang-chun, GAO Shu-mei. Improved carrier-wave electric speckle interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 214-217.
刘诚, 阎长春, 高淑梅. 一种改进的载波电子散斑干涉处理方法[J]. 光子学报, 2005, **34**(2):214-217.
- [8] HE Y M, TAY C J, SHANG H M. A new method for generating and analyzing digital speckle shearing correlation fringe patterns[J]. *Optics Laser Technology*, 1998, **30**(1): 27-31.
- [9] CHEN Ji-yong. Shearing electron-scattered speckle interference phase-shift system study for deflection reflecting mirror manner of automatic control [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 742-744.
陈基勇. 自动控制的偏转反射镜式剪切电子散斑干涉相移系统研[J]. 光子学报, 2003, **32**(6):742-744.
- [10] SUN Ping, ZHANG Xi. Study on rotating stage phase-shifting technique in electronic speckle-shearing interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 558-562.
孙平, 张熹. 偏转平台剪切电子散斑干涉相移技术研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(4):558-562.
- [11] HUNG Y Y, WANG J Q. Dual-beam phase shift shearography for measurement of in-phase strains[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1996, **24**(5): 403-413.

Phase-shifting Method of Translating Wollaston Prism in Electronic Speckle-shearing Interferometry

SUN Ping, LIU Bin, WANG Xiao-feng, HAN Qing

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

Abstract: In electronic speckle-shearing interferometry, it is difficult to realize phase-shifting by separating two birefracting beams. The phase-shifting method of the translating Wollaston prism can introduce additional phase changes without separating the two beams. The principle of the phase changes introduced by translating Wollaston prism was discussed. The relationship between the magnitude of translation and the additional phase was offered. A typical experiment about the method presented was completed by using a centrally loaded clamped circular plate. The obtained results show that the translating Wollaston prism method of phase-shift can effectively obtain displacement derivative field from fringe patterns of a test object.

Key words: Physical optics; Electronic Speckle-Shearing Interferometry (ESSPI); Phase-shifting; Wollaston prism