

文章编号: 0253-2239(2006)03-0447-5

大剪切电子散斑干涉的载频调制与位移场测量*

孙 平¹ 李爱华² 陶春先¹ 张 丽¹ 王晓凤¹ 韩 青¹

(¹ 山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014)
(² 山东警察学院侦察系, 济南 250014)

摘要: 将电子散斑干涉场的载波调制引入到大剪切电子散斑干涉中,通过对参考物的微小偏转引入载波条纹;利用傅里叶变换法,解调出了变形场的相位,从而实现了物体变形场的精确测量。讨论了大剪切载频的调制机理,理论分析表明,调制条纹的空间频率与参考面偏转的角度成正比;因此,控制参考面的偏转角度可实现不同位移量系统的调制。利用中心加载周边固定圆盘进行了典型实验,实验结果证明在大剪切电子散斑干涉技术中可以通过参考面的旋转高质量地实现电子散斑干涉条纹的调制,求解位移场。该系统具有系统简单,不需要专门引入参考光,条纹质量好等优点。该技术可扩展电子散斑干涉的应用范围,有一定的实际应用价值。

关键词: 物理光学; 位移测量; 电子散斑干涉; 调制; 大剪切

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Carrier Modulation for Large-Shearing Electronic Speckle Patterns Interferometry and Displacement Measurement

Sun Ping¹ Li Aihua² Tao Chunxian¹ Zhang Li¹ Wang Xiaofeng¹ Han Qing¹

(¹ College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014)
(² Department of Scout, Shandong Police Institute, Jinan 250014)

Abstract: The digital speckle fringe pattern is modulated by spatial carrier in large-shearing electronic speckle pattern interferometry (ESPI). The carrier is introduced by rotating the reference plane a small angle. When Fourier transform is used to demodulate the modulated fringe pattern, the phase of deformation is calculated and furthermore the deformation is measured accurately. The principle of carrier modulation in large-shearing ESPI is discussed. The theoretical analysis shows that the frequency of carrier used for modulation is proportional to the rotational angles of reference plane. Therefore, the fringe patterns with different displacements can be modulated easily by rotating reference plane different angles. A typical experiment using a centrally loaded clamped circular plate is completed. The experimental results prove that the carrier introduced by rotating the reference plane in large-shearing ESPI can modulate speckle pattern very well and the displacement fields can be obtained effectively. The optical modulation system has some advantages: the system is simple and has no special reference beam for interference. And the carrier pattern has higher fringe visibility. This technique presented here would extend the application range of ESPI and have some applications in practices.

Key words: physical optics; displacement measurement; electronic speckle pattern interferometry; modulation; large shearing

1 引 言

与相位测量的相移方法^[1]相比,干涉条纹空间调制方法不需要精密的相移设备,对测量的环境要

求低,适合动态测量,在实际应用中有重要价值。由于光干涉计量都是基于干涉条纹来进行位移场测量的,干涉条纹的质量对测量结果的影响很大,特别是

* 山东省教育厅科技计划(01901)资助课题。

作者简介: 孙 平(1964~),男,山东青岛市人,博士,副教授,主要从事散斑、云纹等光干涉计量技术、光学系统设计以及图像处理等方面的研究。E-mail: sunpingmail@sohu.com

收稿日期: 2005-04-04; 收到修改稿日期: 2005-07-04

干涉条纹空间调制更需要高衬比度条纹。由于全息干涉术和云纹干涉得到的干涉条纹衬比度比较高,干涉条纹空间调制方法在全息术及云纹干涉中应用较多^[2~5],该方法也被引入到电子散斑干涉中^[6],但是散斑条纹的高噪声,限制了该技术在电子散斑干涉中的发展。近年来,随着电子散斑干涉图像处理技术的发展,该方法又引起了人们的重视^[7,8]。利用大错位晶体棱镜(沃拉斯顿棱镜)或液晶,可以实现散斑干涉^[9~12],具有系统简单、不需要专门引入参考光、条纹质量好等优点。本文将干涉条纹的空间调制技术引入大剪切电子散斑干涉中,通过对参考物体的偏转实现了条纹调制,得到了高质量的调制条纹,并进行了条纹分析;利用傅里叶变换方法对调制条纹进行解调,得到了位移场。

2 大剪切电子散斑干涉空间调制原理

2.1 大错位电子散斑干涉原理

正入射的光束进入沃拉斯顿棱镜,棱镜产生两个错位的像^[9]。将沃拉斯顿棱镜和偏振片置于 CCD 摄像机镜头前面(见图 1),若沃拉斯顿棱镜的错位角很大,则物体自身由于错位而在 CCD 靶面形成的两个像完全分离,而与参考物的一个像相叠加。当入射光同时照射在被测物体和参考物体上,用大错位棱镜可以使 CCD 摄像机同时接受物光和参考光的信息,但物光和参考光的偏振方向相互垂直,为使这两束振动方向不同的偏振光干涉,在错位棱镜后还要放一偏振片,其偏振方向与错位棱镜的两光轴成 45°。这样使物光和参考光信息在 CCD 摄像机的靶面上实现同轴偏振相干,而且光强几乎相等,从而有好的干涉结果。

2.2 干涉调制条纹分析

如图 1 所示的系统中,计算机产生脉冲信号控

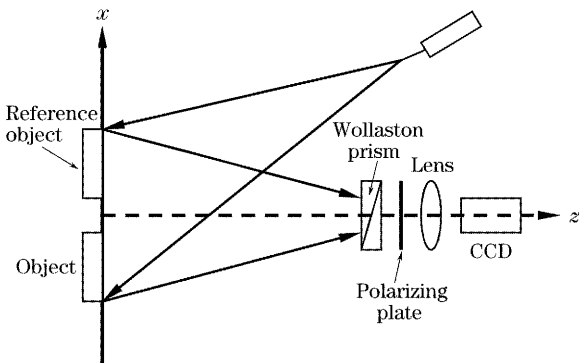


图 1 大剪切电子散斑干涉系统

Fig. 1 Schematic diagram of large-shearing ESPI system

制步进电机,在步进电机驱动下参考物可精密旋转。被测物的散斑图像由 CCD 摄像机采集。首先在物体变形前采集一幅散斑图像并将图像存入计算机中,随后连续采集物体散斑图像,并将每一幅图像与第一幅图像相减,相减后的结果实时地显示在监视器上。参考物体偏转可引入载波条纹,当物体有变形时,载波条纹受物体变形的调制而发生弯曲。通过加载前后的条纹,利用傅里叶变换法可以解调出物体变形的相位。

如图 2 所示,假定物面与参考面经过系统成像后重合于 AB, $P_1(x, y, z)$ 点为物表面上一点, $S(x_s, y_s, z_s)$ 点为光源位置,激光束扩束后与被测物面法向成 θ 角入射, $O(x_o, y_o, z_o)$ 为观察点位置。物体可绕 Q 点转动。当参考物转动一微小角度 $\Delta\alpha$ 后,参考面上的对应物面点 $P_1(x, y, z)$ 点移动到 $P_2(x + \Delta x, y, z + \Delta z)$ 。由于参考物偏转而引起物面与参考面位置间的变化为

$$\begin{aligned} \Delta x &= r \Delta\alpha \cos \alpha = z \Delta\alpha, \\ \Delta z &= -r \Delta\alpha \sin \alpha = -x \Delta\alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 r 为物面 $P_1(x, y, z)$ 点的位置矢量。

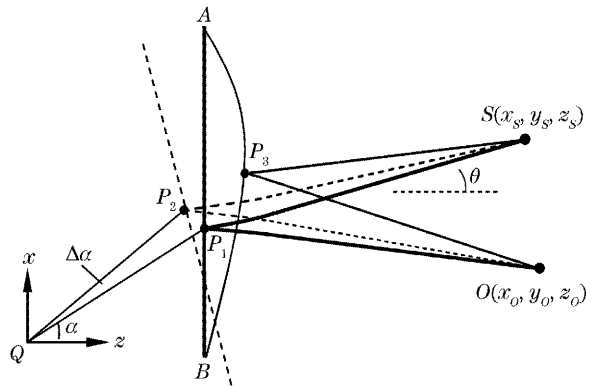


图 2 载频调制的光程差分析

Fig. 2 Schematic diagram for analysis of optical path difference in carrier modulation

物体加载前,参考物偏转 $\Delta\alpha$, 参考面上 $P_1(x, y, z)$ 的对应点移动到 $P_2(x + \Delta x, y, z + \Delta z)$; 物体加载变形后,物面上 $P_1(x, y, z)$ 点有位移 (u, v, w) 移动到了 $P_3(x + u, y + v, z + w)$, 此时物面上 P_3 点与其参考面上相关点 P_2 之间的光程差为

$$\Delta l = (SP_3 + P_3O) - (SP_2 + P_2O), \quad (2)$$

其中,

$$SP_3 = [(x - x_s + u)^2 + (y - y_s + v)^2 + (z - z_s + w)^2]^{1/2},$$

$$P_3O = [(x - x_o + u)^2 + (y - y_o + v)^2 + (z - z_o + w)^2]^{1/2},$$

$$SP_2 = [(x - x_s + \Delta x)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s + \Delta z)^2]^{1/2},$$

$$P_2O = [(x - x_0 + \Delta x)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0 + \Delta z)^2]^{1/2},$$

忽略高次项, (2)式可以简化为

$$\Delta l(x, y, z) = \left(\frac{x - x_0}{R_0} + \frac{x - x_s}{R_s} \right) (u - \Delta x) + \left(\frac{y - y_0}{R_0} + \frac{y - y_s}{R_s} \right) v + \left(\frac{z - z_0}{R_0} + \frac{z - z_s}{R_s} \right) (w - \Delta z), \quad (3)$$

其中 $R_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$, $R_s = \sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2}$.

由于在物面上 $y = y(x, z)$, 有 $P(x, y, z) = P(x, z)$, 且光源 S 、观察点 O 一般位于 xoz 平面, 观察方向沿 z 轴, 有 $x_0 = y_0 = y_s = 0$; $R_0 = z_0$. 又因为参考物与 z_0, R_s 相比很小, (3) 式可化简为

$$\Delta l = -(u - \Delta x) \sin \theta - (w - \Delta z) (l + \cos \theta), \quad (4)$$

将(1)代入(4)式得

$$\Delta l = z \sin \theta \Delta \alpha - x (l + \cos \theta) \Delta \alpha - u \sin \theta - w (1 + \cos \theta). \quad (5)$$

则由于物体变形和参考面偏转而引起的总相位变化为

$$\Delta \phi' = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = \frac{2\pi}{\lambda} [z \sin \theta \Delta \alpha - x (1 + \cos \theta) \Delta \alpha - u \sin \theta - w (1 + \cos \theta)].$$

由于物面和参考面在开始时是重合的, 实验中可令参考面的转动中心位于参考物面上, 则(5)式中 $z = 0$. 由于物体变形引入的相位为^[1]

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} [\sin \theta \cdot u + (1 + \cos \theta)w], \quad (6)$$

则调制以后的条纹分布为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Delta \phi'(x, y)] = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Delta \phi(x, y) + 2\pi f_0 x], \quad (7)$$

其中 $f_0 = \Delta \alpha (1 + \cos \theta) / \lambda$, $\Delta \alpha$ 的正负决定了空间频率的“方向”。

对(7)式进行傅里叶变换, 可以求出变形场的相位 $\Delta \phi$, 进而根据(6)式求出物体的变形场。当光束垂直照明物体时, 由(6)式可知

$$\Delta \phi = \frac{4\pi}{\lambda} w, \quad (8)$$

此时测量的只是离面位移场。故当光束入射角 θ 较小(一般小于 5°), 且物体的变形主要是离面变形时, 可直接获得离面位移场。

3 傅里叶变换法解调

干涉条纹场经空间线性调制后, 变成密集的、含有变形信息的载波条纹。由(7)式可知, 受调制的干涉条纹的相移量不随时间变化, 仅随空间变化。定义

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[j\Delta \phi(x, y)], \quad (9)$$

则(7)式变为

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(j2\pi f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-j2\pi f_0 x), \quad (10)$$

其中 j 代表虚部单位, $*$ 表示复共轭。(10)式为载波条纹在 x 方向上的光强表达式。在 x 方向对光强 $I(x, y)$ 进行傅里叶变换可以得到

$$H(f_x, y) = A(f_x, y) + C(f_x - f_0, y) + C^*(f_x + f_0, y), \quad (11)$$

其中 $A(f_x, y)$ 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 $c(x, y)$, 用(12)式即可得到相位分布:

$$\Delta \phi(x, y) = \arctan \frac{\text{Im}[c(x, y)]}{\text{Re}[c(x, y)]}, \quad (12)$$

其中 Re 和 Im 表示取复数的实部和虚部。当条纹图在 x 和 y 方向均有载波调制时, 则需要做二维傅里叶变换^[13,14]。由于 $\Delta \phi(x, y) \in [0, \pi/2]$, 可通过相位解包络算法^[1]将其扩展到 $0 \sim 2\pi$ 的区间上。

4 实验分析

利用图1所示的大剪切电子散斑干涉系统进行测试, 激光光源为 He-Ne 激光器, 光源波长为 $0.633 \mu\text{m}$ 。试件为周边固定, 中心加载的铝制圆盘。圆盘厚 2 mm , 直径为 60 mm , 中心用千分尺加载, 加载量约 0.002 mm 。参考物为漫散射物面, 可在步进电机的驱动下作微小偏转。被测物与参考物由入射角度 $\theta < 5^\circ$ 的扩束光照明, 物面和参考面产生的散斑场经大剪切棱镜和偏振片在 CCD 靶面上干涉叠加。首先旋转参考面引入载波条纹, 然后物体加载, 载波条纹受物体变形的调制而发生弯曲。图3和图4分别为加载前的载波条纹及加载后受调制的载波条纹。分别对图3和图4进行傅里叶变换, 由图3的频谱图可以准确定出一级频谱在图像中的位置, 而图4的一级谱则含有物体变形的信息(如图5所示)。选取合适的滤波窗口, 将其他频谱点滤掉, 保留图5中的一级谱, 并将其移至零频处, 对其做傅

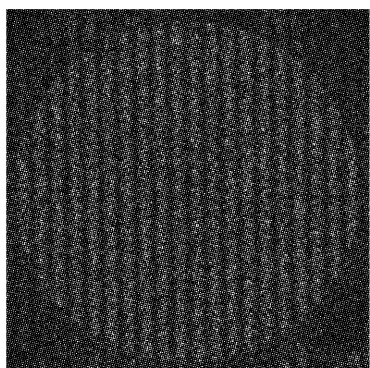


图 3 加载前的载波条纹

Fig. 3 The carrier fringe pattern before object is loaded

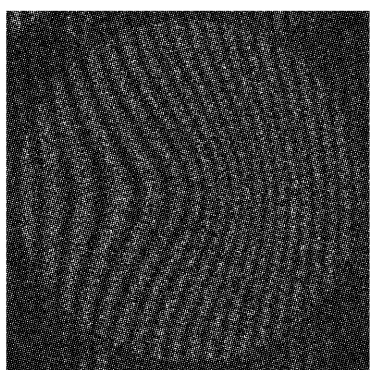


图 4 加载后受调制的载波条纹

Fig. 4 The modulated carrier fringe pattern after object is deformed

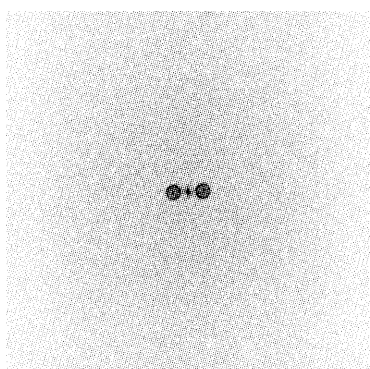


图 5 图 4 所示受调制载波条纹的频谱

Fig. 5 Spectra of the modulated carrier fringe pattern shown in Fig. 4

里叶逆变换后利用(12)式可求出物体变形相位 $\Delta\phi$ 。图 6 为解调出的包络相位图。由图 6 可见,此时得到的是有相位突变的相位图,经相位解包络可将其连续化。图 7 为解包络后的相位图。由于圆盘的边缘为零位移点,选取零位移点并根据(8)式,有 $w = \frac{\lambda}{4\pi}\Delta\phi$,可将相位的连续分布转换为位移分布,其中 λ 为激光波长。物体变形的等位移线如图 8 所示,其

中横坐标与纵坐标的范围均为 512 pixel,对应的测量范围为 63 mm。

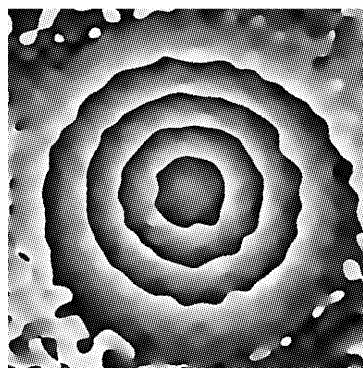


图 6 利用傅里叶变换解调出的包络相位图

Fig. 6 Wrapped phase map obtained by Fourier transform method

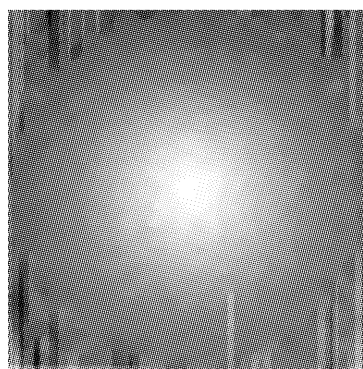


图 7 解包络相位图

Fig. 7 Unwrapped phase map

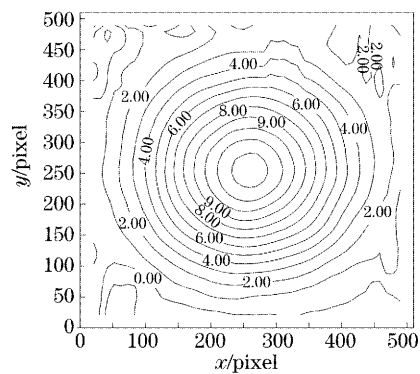


图 8 圆盘离面位移等位移线图(单位: $10^{-1} \mu\text{m}$)

Fig. 8 Contour of out-of-plane displacement field (unit: $10^{-1} \mu\text{m}$)

5 结 论

在大剪切电子散斑干涉技术中通过参考面的旋转实现了电子散斑干涉条纹的调制,系统简单,条纹质量好。结合傅里叶变换,实现了电子散斑干涉

移场的测量。由于调制条纹的空间频率与参考面偏转的角度成正比,因此,控制参考面的偏转角度可实现不同位移量条纹的调制。该技术可扩展电子散斑干涉的应用范围,有一定的实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 P. K. Rastogi. *Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques* [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2001
- 2 Paul D. Plotkowski, Yau Y. Hung, Joseph D. Hovanessian *et al.*. Improved fringe carrier technique for unambiguous determination of holographically recorded displacements[J]. *Opt. Engng.*, 1985, **24**(5): 754~756
- 3 D. R. Matthys, J. A. Gilbert, T. D. Dudderar *et al.*. A windowing technique for the automated analysis of holo-interferograms[J]. *Opt. Laser Engng.*, 1988, **8**(2): 123~136
- 4 Thomas R. Judge, Chenggen Quan, Peter J. Bryanston-Cross. Holographic deformation measurements by Fourier transform technique with automatic phase unwrapping[J]. *Opt. Engng.*, 1992, **31**(3): 533~543
- 5 B. Han, D. Post. The tilted-plate method for introducing carrier fringes of extension in moire interferometry[J]. *Exp. Technol.*, 1989, **13**(7): 25~29
- 6 A. Davila, D. Kerr, G. H. Kaufmann. Fast electro-optical system for pulsed ESPI carrier fringe generation [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **123**(2): 457~464
- 7 Yu Fu, Cho Jui Tay, Chenggen Quan *et al.*. Wavelet analysis of speckle patterns with a temporal carrier[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(6): 959~965
- 8 Sun Ping, Tao Chunxian, Zhang Li *et al.*. Spatial modulation for electronic speckle patterns and its demodulation [J]. *Optoelectronics Lett.*, 2005, **1**(2): 141~143
- 9 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 (in Chinese)
张 熹,孙 平,王海锋. 三维相移电子散斑干涉法在柴油机机身上的应用[J]. *实验力学*, 2002, **17**(4): 393~397
- 10 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 (in Chinese)
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
- 11 Chen Jinlong, Hung Youren. Large-shear digital speckle interferometry based on liquid crystal phase modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1292~1296 (in Chinese)
陈金龙,洪友仁. 基于液晶体的大错位量散斑相移技术研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1292~1296
- 12 Sun Ping, Zhang Xi, Wang Haifeng. Study on combined method based on 3-D ESPI[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **B11**(3): 189~192
- 13 William W. Macy, Jr. Two-dimensional fringe-pattern analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(23): 3898~3901
- 14 Donald J. Bone, H. A. Bachor, R. John Sandeman. Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(10): 1653~1660