

文章编号:1002-2082(2006)05-0380-05

# 载频调制大剪切电子散斑干涉系统

孙 平, 韩 青, 王晓凤

(山东师范大学 物理与电子科学学院, 济南 250014)

**摘要:** 大剪切电子散斑干涉技术不需要引入参考光, 具有条纹质量好等特点。提出将干涉场的载频调制技术引入到大剪切电子散斑干涉中, 可形成具有载频调制功能的新的电子散斑干涉系统。该系统具有对测量环境的隔振振动要求低, 能方便定量求解物体的变形场等优点。首先讨论大剪切载频的调制机理, 然后利用中心加载、周边固定的圆盘进行典型实验, 设计了可用计算机控制且可对参考物进行精确偏转的步进电机系统, 进而实现了对电子散斑干涉场的自动控制调制。最后, 利用傅里叶变换法对调制条纹进行解调, 解调出变形场的相位, 并通过相位与位移的转换计算, 得到精确的物体变形场。实验结果证明, 该系统能够调制电子散斑干涉场, 求解物体的位移场。

**关键词:** 电子散斑干涉; 载频调制; 傅里叶变换; 位移测量; 大剪切

中图分类号:O348

文献标志码:A

## Large-shearing electronic speckle pattern interference system with carrier-frequency modulation technique

SUN Ping, HAN Qing, WANG Xiao-feng

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

**Abstract:** Large-shearing electronic speckle pattern interferometry (LSESPI) offers many advantages such as good fringe quality and no reference beam needed. The fringe pattern obtained by the LSESPI is easy to be observed. The new electronic speckle pattern interferometer is formed by introducing carrier-frequency modulation for interference fields to LSESPI. The new system does not have strict requirement for environment on isolating vibration. The displacement fields could be quantitatively measured with the system. The principle of carrier-frequency modulation of LSESPI is discussed. A typical experiment is implemented with a central-loaded and peripheral-clamped plate. And a step motor system controlled by a computer is designed. With the step motor system the reference object can be rotated accurately so that the electronic speckle pattern can be modulated automatically. At last, Fourier transform is used to demodulate the modulated fringes and obtain the phase of deformed field, then acquire the precision deformation of the object by the transformation calculation of the phase and displacement. The experimental results indicate that the interference field of the speckle pattern can be modulated and the displacement of the object can be measured accurately by this system.

**Key words:** electronic speckle pattern interferometry (ESPI); carrier-frequency modulation; Fourier transform; displacement measurement; large shearing

## 引言

剪切电子散斑干涉术<sup>[1-2]</sup>具有光路简单、自动化程度高、防震要求低、可直接测量位移的导数场等优点,广泛应用于无损检测领域<sup>[3-4]</sup>。利用大错位晶体棱镜(Wollaston 棱镜)的剪切电子散斑干涉技术可以实现散斑干涉的位移测量<sup>[5-6]</sup>,该技术具有系统简单、不需要引入参考光,条纹质量好等优点。为精确分析变形场的干涉条纹,常用相移法和载波法测量变形场的位相<sup>[2]</sup>。与相移法相比,干涉条纹空间调制的方法不需要精密的相移设备,且对测量环境要求低,适合动态测量。在以前的研究中,对干涉场的载频调制技术多应用于全息术及云纹干涉<sup>[7-10]</sup>,在电子散斑干涉中也有应用<sup>[11]</sup>,但是散斑条纹的高噪声和干涉条纹质量差等缺点限制了该技术的发展。近年来,随着数字图像处理技术的发展,该方法又引起了人们的重视<sup>[12]</sup>。本文将干涉条纹的空间调制技术引入到大剪切电子散斑干涉中,通过对参考物的偏转实现干涉场调制,具有系统简单,调制条纹质量高等特点。我们还设计了可用计算机控制的步进电机系统,实现了参考物的精确偏转。最后利用傅里叶变换方法对调制条纹进行解调,得到了位移场。

## 1 大剪切电子散斑干涉空间调制原理

### 1.1 大错位电子散斑干涉系统

将 Wollaston 棱镜和偏振片置于 CCD 摄像机镜头前面,如图 1 所示,正入射的光束进入 Wollaston 棱镜,棱镜产生 2 个错位的像<sup>[5-6]</sup>。若 Wollaston 棱镜的错位角很大,则物体在 CCD 靶面形成的 2 个像可完全分离,并与放在物体旁边的参

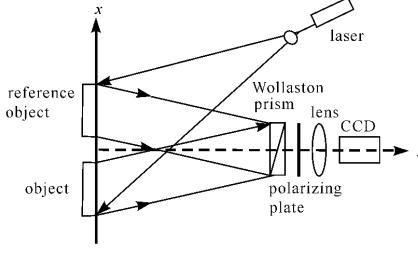


图 1 大剪切电子散斑干涉系统

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时,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 2 束振动方向不同的偏振光产生干涉,在错位棱镜后方还要布置一个偏振片,其偏振方向与错位棱镜的 2 光轴成 45°。这样,物光和参考光信息在 CCD 摄像机的靶面上可实现同轴偏振相干,并且光强几乎相等,因此干涉结果较好。

### 1.2 物体变形场调制与解调原理

将参考物面偏转用于实现变形场的调制。如图 1 所示,假定物面与参考面经过系统成像后重合于 AB,  $P_1(x, y, z)$  点为物面上任一点,  $S(x_s, y_s, z_s)$

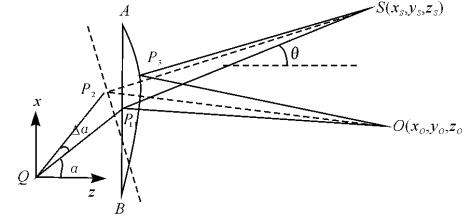


图 2 载频调制光程差分析

Fig. 2 Optical path difference analysis of carrier-frequency modulation

点为光源位置,激光束扩束后与被测物面法向成  $\theta$  角入射,  $O(x_o, y_o, z_o)$  为观察点位置。物体可绕 Q 点转动。当参考物转动一个微小角度  $\Delta\alpha$  后,与物面点  $P_1(x, y, z)$  对应的参考面上的相关点也移动到  $P_2(x + \Delta x, y, z + \Delta z)$ 。参考物偏转引起物面与参考面位置间的变化为

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

式中,  $r$  为物面  $P_1(x, y, z)$  点的位置矢量。物体加载前参考物偏转为  $\Delta\alpha$ , 参考面上与  $P_1(x, y, z)$  相关的点移动到  $P_2(x + \Delta x, y, z + \Delta z)$ ; 物体加载变形后, 物面上  $P_1(x, y, z)$  点的位移为  $(u, v, w)$ , 它由  $P_1(x, y, z)$  移动到了  $P_3(x + u, y + v, z + w)$ , 此时物面上  $P_3$  点与参考面上相关点  $P_2$  之间的光程差为

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

其中,

$$SP_3 = \sqrt{(x - x_s + u)^2 + (y - y_s + v)^2 + (z - z_s + w)^2}$$

$$P_3O = \sqrt{(x - x_o + u)^2 + (y - y_o + v)^2 + (z - z_o + w)^2}$$

$$SP_2 = \sqrt{(x - x_s + \Delta x)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s + \Delta z)^2}$$

$$P_2O = \sqrt{(x - x_o + \Delta x)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o + \Delta z)^2}$$

由于在物面上  $y = y(x, z)$ , 有  $P(x, y, z) = P(x, z)$ , 且一般地, 光源  $S$ 、观察点  $O$  位于  $xoz$  平面, 观察方向沿  $z$  轴有  $x_o = y_o = y_s = 0$ ,  $R_o = z_o$ 。又因为参考物与  $z_o$  和  $R_s$  相比很小, 在忽略高次项后, (2)式可以简化为

$$\Delta l = -(u - \Delta x) \sin \theta - (w - \Delta z)(1 + \cos \theta) \quad (3)$$

将(1)式代入(3)式得

$$\Delta l = z \sin \theta \Delta \alpha - x(1 + \cos \theta) \Delta \alpha - u \sin \theta - w(1 + \cos \theta) \quad (4)$$

物体变形和参考面偏转引起的总位相变化为

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

由于物面和参考面在开始时重合, 所以实验中令参考面的转动中心位于参考物面上, 则(4)式中  $z = 0$ 。物体变形引入的位相为<sup>[2]</sup>

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [u \sin \theta + w(1 + \cos \theta)] \quad (5)$$

调制以后的条纹分布为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Delta \varphi(x, y)] = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Delta \varphi(x, y) + 2\pi f_0 x] \quad (6)$$

式中,  $f_0 = \frac{\Delta \alpha(1 + \cos \theta)}{\lambda}$ ,  $\Delta \alpha$  的正负决定了空间频率的“方向”。由上述分析可见, 当光路布置确定后, 可通过调节参考面偏转的角度  $\Delta \alpha$  实现对物体变形场的线性调制。这时, 受调制的干涉条纹的相移量不随时间变化, 而随空间变化。使用欧拉公式将(6)式变为

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(j2\pi f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-j2\pi f_0 x) \quad (7)$$

其中,  $j$  代表虚部单位;  $*$  表示复数的共轭;

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

在  $x$  轴方向对光强  $I(x, y)$  进行傅里叶变换后得到

$$H(f_x, y) = A(f_x, y) + C(f_x - f_0, y) + C^*(f_x + f_0, y) \quad (8)$$

式中,  $A(f_x, y)$  由背景光强和低频噪声变换得到。用适当的滤波器将  $A(f_x, y)$  和  $C^*(f_x + f_0, y)$  滤掉后得到  $C(f_x - f_0, y)$ , 将其移到原点变为  $C(f_x, y)$ , 再做傅里叶逆变换得到  $c(x, y)$ , 则相位分布为

$$\Delta \varphi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[c(x, y)]}{\text{Re}[c(x, y)]} \quad (9)$$

其中,  $\text{Re}[\cdot]$  和  $\text{Im}[\cdot]$  表示复数的实部和虚部。根据(5)式可求出物体的变形场。当光束入射角  $\theta$  较小 ( $\theta < 5^\circ$ ), 且物体的变形主要是离面变形时, 可直接获得离面位移场。

### 1.3 干涉场调制控制系统

参考物在步进电机驱动下可精密旋转产生空间调制条纹, 实现物体变形场的载频调制。控制部分由以下 4 部分组成: 计算机、功放输出、细分器和电机电源, 如图 3 所示。

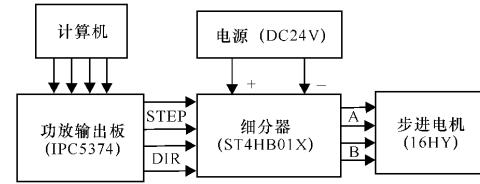


图 3 步进电机控制示意图

Fig. 3 Schematic diagram for step motor controlling

功放输出(IPC5374)是一种带光电耦合器件的开关量输出板, 它作为PC总线板插架系统的一部分直接插在计算机上, 可以在5~8 V电压下工作。采用四相混合式步进电机, 当控制一个电机时, 选用其中的2个口地址(154 H和155 H), 其中一个用于控制转动方向(DIR端口), 另一个用于产生脉冲(STEP端口)。通过软件对2个端口进行编程就可以产生方波脉冲, 进而控制电机的旋转。细分器(ST4HB01X)具有64细分模式, 即可将1个脉冲细分为64个。步进电机经过细分之后转动非常流畅。

通过计算机编程产生脉冲信号, 用于控制步进电机的转动方向和转动角度。由于步进电机只能转动, 要将转动转化成可以前后方向移动的位移还需要机械传动装置, 通过机械传动装置可使参考物偏转。在传动装置中使用M6×0.25 mm螺纹进行位移传动。

## 2 典型试验

整个系统安置在防震台上, 实验光路如图1所示。测试件为周边固定、中心加载的铝制圆盘, 圆盘厚2 mm, 直径为60 mm, 其中心用千分尺加载。参考物为漫散射物面, 可在步进电机驱动下作微小偏转。被测物与参考物由入射角度θ( $\theta < 5^\circ$ )很小的扩束光照明, 并且被测物与参考物通过剪切镜以后各

自形成 2 个错位像,通过调节光路,使被测物和参考物各自的一个像叠加,然后经偏振方向为 45°的偏振片在 CCD 靶面上产生干涉。CCD 与计算机上的图像卡用数据线相连,使用实时相减法采集加载前与加载后的图样并送入计算机进行处理。首先,在物体加载前,计算机输出 256 个脉冲,经过细分器和机械传动装置,使参考面旋转,再引入附加干涉条纹(载波条纹),如图 4 所示;然后,对物体加载,载波条纹受物体变形的调制而发生弯曲,加载后受调制的载波条纹如图 5 所示。根据(8)式对图 5 进行傅里叶变换,可得到其频谱图,对图 4 进行傅里叶变换可得出载波条纹的空间频率。对图 5 中频谱图滤波并取其正一级频谱,然后将其一级频谱移到原点后作傅里叶逆变换。根据(9)式可求解物体变形的包络相位图,如图 6 所示。包络相位图须经

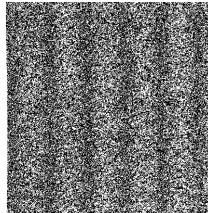


图 4 加载前的载波条纹

Fig. 4 The carrier fringe pattern before object is deformed

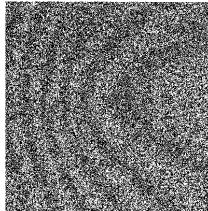


图 5 加载后受调制的载波条纹

Fig. 5 The modulated carrier fringe pattern after object is deformed

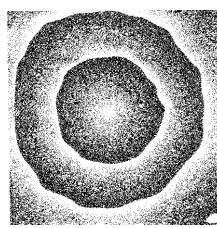


图 6 利用傅里叶变换解调出的包络位相图

Fig. 6 Wrapped phase map obtained by Fourier transform method

位相解包络及位移转化计算<sup>[2]</sup>,并选圆盘周围固定点为零位移参考点,方可计算出物体变形的离面位移。图 7 为离面位移等值线图(单位为  $\mu\text{m}$ )。由图 4 和图 5 可见,该技术可以实现电子散斑干涉条纹的调制,条纹对比度高,调制质量好,并通过输入不同脉冲量实现对物体不同变形量条纹的调制。

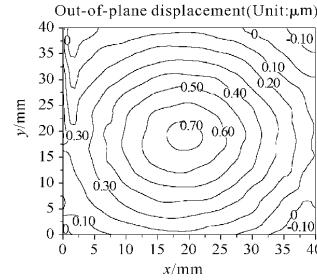


图 7 离面位移等值线图(单位:  $\mu\text{m}$ )

Fig. 7 Contour of out-of plane displacement(Unit:  $\mu\text{m}$ )

### 3 结论

大剪切电子散斑干涉系统通过参考面的旋转可以实现电子散斑干涉条纹的调制,具有系统简单、条纹质量好等优点。结合傅里叶变换法可实现位移场的精确测量。由于调制条纹的空间频率与参考面偏转的角度成正比,因此系统可通过控制参考面的偏转角度来实现对不同位移量条纹的调制。

### 参考文献:

- [1] SIROHI R S. Speckle Metrology [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1993.
  - [2] RASTOGI P K. Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
  - [3] HUNG Y Y. Shearography for non-destructive evaluation of composite structures [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1996, 24(2/3):161-182.
  - [4] SIROHI R S, TAY C J, SHANG H M, et al. Non-destructive, assessment of thinning of plates using digital shearography [J]. Optical Engineering, 1999, 38(9):1582-1585.
  - [5] 张熹, 孙平, 王海峰. 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.
- ZHANG Xi, SUN Ping, WANG Hai-feng. 3D-ESPI with phase-shifting and its application in diesel engine research [J]. Journal of Experimental

Mechanics, 2002, 17(4): 393-397. (in Chinese)

- [6] 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, WANG Hai-feng, ZHANG Xi, et al. Study on three-dimensional ESPI and its application [J]. Acta Optica sinica, 2003, 23(7): 840-844. (in Chinese)
- [7] PLOTKOWSKI P D, HUNG Y Y, HOVANESIAN J D, et al. Improved fringe carrier technique for unambiguous determination of holographically recorded displacements [J]. Optical Engineering, 1985, 24(5): 754-756.
- [8] MATTHYS D R, GILBERT J A, DUDDERAR T D, et al. A windowing technique for the automated analysis of holo-interferograms [J]. Optical and Lasers in Engineering, 1988, 8(2): 123-136.

[9] JUDGE T R, QUAN Cheng-gen, BRYANSTON-CROSS P J. Holographic deformation measurements by Fourier transform technique with automatic phase unwrapping [J]. Optical Engineering, 1992, 31(3): 533-543.

- [10] HAN B, POST D. The tilted-plate method for introducing carrier fringes of extension in moiré interferometry [J]. Experimental Technology, 1989, 13(7): 25-29.
- [11] DAVILA A, KERR D, KAUFMANN G H. Fast electro-optical system for pulsed ESPI carrier fringe generation[J]. Optics Communications, 1996, 123 (3): 457-464.
- [12] FU Yu, TAY C J, QUAN Cheng-gen, et al. Wavelet analysis of speckle patterns with a temporal carrier[J]. Applied Optics. 2005, 44 (6): 959-965.

## Liekki 公司推出 Yb1200-20/125DC-PM 偏振保持掺镱光纤

Liekki 公司新近推出了针对高能量脉冲光纤放大使用的偏振保持掺镱光纤 Yb1200-20/125DC-PM, 从而进一步拓宽了该公司在高掺杂, 大模式面积掺镱光纤的产品线。该光纤是应用于  $1.0 \mu\text{m}$  波段脉冲光纤放大的理想光纤。典型的应用包括: 用于材料加工(切割, 打标, 钻孔等)的光纤激光器, 激光雷达, 远程化学监测, 以及从红外到深紫外的非线性频率转换的光纤激光器等。这些应用领域需要 mJ 量级的高能量脉冲放大器输出, 并且需要有接近衍射极限的输出光束质量, 目前的光纤激光器还不能达到这些指标, 最大的限制来自于光纤本身。这样的激光器需要开发一种大模式面积, 应用长度短的光纤来降低光纤激光器(放大器)的非线性效应。Liekki 公司的产品经理 Mr. Mikko Soderlund 说: Yb1200-20/125DC-PM 光纤将克服光纤非线性效应的影响, 将大幅度提高光纤激光器在更多应用领域的潜力。

Liekki 公司同时提供和 Yb1200-20/125DC-PM 相匹配的非掺杂光纤, 用来和掺镱光纤配合使用, 确保高光束质量的输出, 方便用户采用一体化的全光纤光纤激光器(放大器)结构。另外, Liekki 公司也可以提供各种全光纤合束器(combiner), 例如: 6+1 \* 1 结构等, 进一步为用户提供更加完整的解决方案。

Liekki 公司是世界领先的高掺杂光纤的生产商和开发商, 拥有专利的纳米粒子直接掺杂(Direct Nanoparticle Deposition, DND)技术, 产业界最高水平的高浓度掺铒光纤(highly doped Er fiber), 掺镱光纤(highly doped Yb fiber), 同时提供功能强大的光纤激光器/光纤放大器模拟软件(LAD)和光纤激光器模块(optical engines)等产品。上海瀚宇是 Liekki 公司在中国的指定代理商。需要了解以上产品的详细信息, 请浏览公司网站: [www.shconnet.com.cn](http://www.shconnet.com.cn)