

偏转平台剪切电子散斑干涉相移技术研究

孙 平^{1,2} 张 熹²

(¹ 山东师范大学物理系, 济南, 250014
² 上海船用柴油机研究所, 上海 200090)

摘要: 在沃拉斯顿棱镜作为剪切器件的传统剪切散斑干涉术中, 由于错位的二物光束同光路传播, 很难通过将它们分开来引入附加相位的方法实现相移。本文提出的偏转平台法是利用平台上物体的偏转来引入附加相位的, 从而可以实现剪切电子散斑干涉的相移。理论分析证明, 物体的偏转可以引入稳定、线性的附加相位, 并给出了物体偏转角度与附加相位之间的关系式; 利用周边固定、中心加载圆盘进行了典型实验, 给出了实验结果, 证明偏转平台相移技术能够有效地从干涉条纹中提取位移导数信息。

关键词: 物理光学; 剪切电子散斑干涉; 相移; 偏转平台相移法

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Study on Rotating Stage Phase-Shifting Technique in Electronic Speckle-Shearing Interferometry

Sun Ping^{1,2} Zhang Xi²

(¹ Department of Physics, Shandong Normal University, Jinan 250014
² Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

(Received 6 January 2003; revised 7 March 2003)

Abstract: Because two shearing object beams travel in the same direction when Wollaston prism is used as image-shearing device in traditional speckle shearing interferometry. It is difficult to realize phase-shifting technique by separating the two beams for introducing some additional phase changes between the two beams. Rotating stage phase-shifting method (RSPSM) presented in this paper could introduce additional phase changes by rotating the test object a small angle, which is fixed on a rotating stage. Theoretical analysis shows that RSPSM can introduce a stable and linear additional phase changes. The relationship between rotating angle and additional phase is offered. A typical experiment about RSPSM is carried out by using a centrally loaded clamped circular plate. The experimental results are offered. It shows that rotating stage phase-shifting technique could effectively obtain displacement derivative field from fringe patterns of test object.

Key words: physical optics; electronic speckle-shearing interferometry; phase-shifting; rotating stage phase-shifting method

1 引 言

剪切电子散斑干涉术^[1,2]具有光路简单、自动化程度高、防震的要求低、可直接测量位移的导数场等优点, 广泛地应用于无损检测领域^[3]。但直接观测到的

是干涉条纹图样。如何将位移导数场的信息从干涉条纹图案中提取出来, 一直是人们关心的问题^[4-6]。

沃拉斯顿(Wollaston)棱镜作为剪切器件的传统剪切电子散斑干涉术, 由于参与干涉的二光束同光路, 很难通过将它们分开来引入附加相位的方法实现相移技术。偏转平台法^[7]是将被测物固定在一可旋转的平台上, 通过计算机控制的步进电机及精密机械装置来驱动该平台, 实现了可精确控制的旋

E-mail: sunpingmail@sohu.com

收稿日期: 2003-01-06; 收到修改稿日期: 2003-03-07

转系统。理论分析表明,在剪切电子散斑干涉中,物体的微偏转可以引入稳定、线性的附加相位。本文推导出了物体偏转角度与附加相位之间的关系式;并利用周边固定、中心加载圆盘进行了典型实验,给出了实验结果。

2 剪切电子散斑干涉的典型光路布置

剪切电子散斑干涉的典型光路布置如图 1 所示。物体被扩束光照明后,由 CCD 摄像机成像,然后通过图像卡将图像传送给计算机并在计算机中进行图像的处理。在 CCD 摄像机前使用沃拉斯顿棱镜

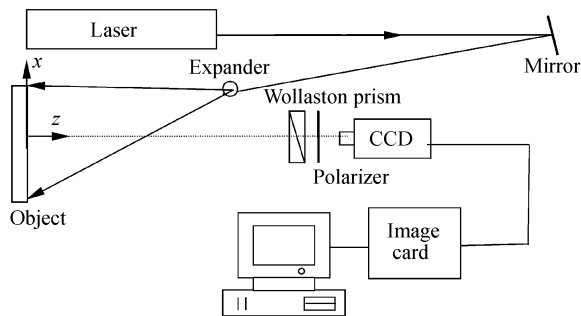


Fig. 1 Typical schematic of electronic speckle-shearing interferometer using Wollaston prism as image-shearing device

镜作为剪切元件,它产生的两个错位像的光场均匀。物光束通过棱镜后,出来的是两束互相错位的物光波,这两束光互为参考光和物光而干涉。但其振动方向互相垂直,所以需要在棱镜后加一块偏振片,其偏振轴和从沃拉斯顿棱镜输出的两束偏振光成 45° ,从而可使这两束偏振光在偏振片的偏振轴方向上相干涉。该光路的优点在于布置简单,两束相干光波强度基本相等。但由于二光束共光路,故要使用将两束物光波分开以引入附加相位的方法来实现相移是困难的。

一般地,由图 1 得到的散斑条纹图经低通滤波后,其光强 $I(x, y)$ 有如下的表达形式:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos \Delta\phi(x, y), \quad (1)$$

式中 $a(x, y)$ 为背景光强, $b(x, y)$ 为条纹幅值, $\Delta\phi(x, y)$ 为由于物体变形而引入的物理量,为待求的量。但三个都是未知的,故仅从(1)式难以求出全场的相位值 $\Delta\phi(x, y)$ 。相移技术是在条纹相位上附加一个已知相移量来增加方程数,使方程数大于或等于未知量数来解出相位值。根据方程数和相移量的大小,可以有不同的相移算法。凯利(Carre)相移算法^[8]是常用的相移方法,该方法相移四次,每次改变相同的任意相位 $\delta\phi$,四幅图像的光强分别为 $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 、 $I_3(x, y)$ 和 $I_4(x, y)$,可以推导出点 (x, y) 处的相位计算公式为

$$\Delta\phi(x, y) = \arctan \frac{\sqrt{[(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)] \cdot [3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)]}}{|(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)|}, \quad (2)$$

其中 $\Delta\phi(x, y) \in [0, \pi/2]$ 可通过相位解包络将其扩展到 $0 \sim 2\pi$ 的区间上。由于凯利法不需要精确知道每一次相移角度,只需要每一次相移角度相同,所以只要相移器的线性曲线好,标定误差就可以不考虑。

在图 1 中,若激光束照明角度很小,观察方向沿着物面的法线方向。在 x 方向上剪切,剪切量为 δx 。由光矢量的传播方向及变形前后的相位关系,容易推导出物体离面变形 w 与其引入的相位差 $\Delta\phi$ 之间的关系式

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \delta x. \quad (3)$$

由相移技术得到干涉条纹场的相位后,再由式(3)可以求出剪切方向上的全场离面位移导数值。

3 偏转平台剪切电子散斑干涉相移技术

3.1 干涉系统及典型实验

采用图 2 所示的剪切散斑干涉光路,将被测物置于一可由计算机控制的旋转平台上,旋转平台由

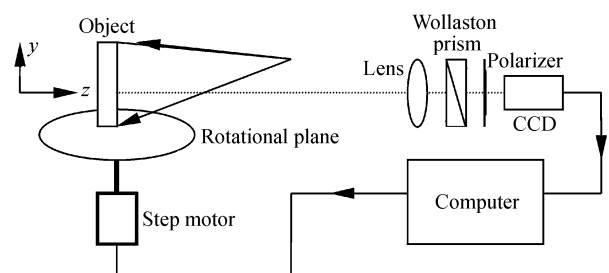


Fig. 2 Rotating state phase-shift system in digital speckle shearing interferometry

步进电机通过精密机械装置来驱动。步进电机的一步为 1.8° ，计算机可以将其细分成 64 份，即步进电机可每步旋转 0.028° 。再经精密机械装置进一步提高其灵敏度，使旋转平台每次旋转 5×10^{-7} rad 弧度。激光束在 xoy 平面内经扩束后照射到物体上，沃拉斯顿棱镜的放置使物体的像在 x 方向剪切。相移由物体随平台的偏转引入，计算机每次输出相同数量的脉冲，平台每次偏转相同的角度，从而引入相同的相移量。根据四步相移算法公(2)式，可以计算出剪切条纹图的相位。再根据(3)式，计算出 x 方向的位移导数。

采用周边固定、中心加载的圆盘进行实验。圆

盘固定在旋转平台上，直径为 60 mm，厚 2 mm。圆盘加载前后采集图像，将图像进行实时相减后得到剪切电子散斑干涉图样并显示在计算机的监视器上。然后计算机输出脉冲控制平台旋转，从而引入相移，平台每次转动都采集干涉图样。图 3 所示为计算机每次输出 25 个脉冲(对应旋转平台的转动角度为 1.25×10^{-5} rad)时采集的四幅散斑剪切相移条纹图。图 4 为其包络相位图和解包络相位图，图 5 所示对应的三维灰度显示和轮廓图。

由图 4 和图 5 可见，由旋转平台带动被测物的精密旋转，实现了剪切电子散斑的相移技术，从而获得全场的离面位移导数值。

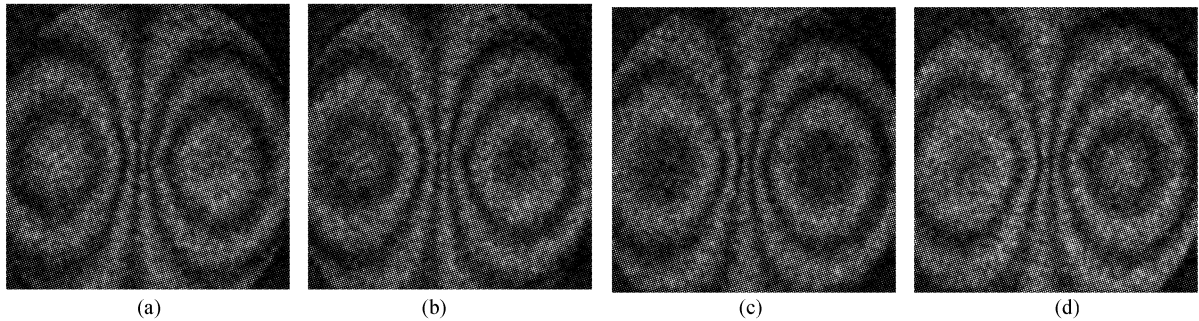


Fig. 3 Fringe patterns depicting the deformation of a centrally loaded clamped circular plate: derivative of deflection with respect to x . Sequence of fringe patterns obtained after every 25 pulses produced by computer

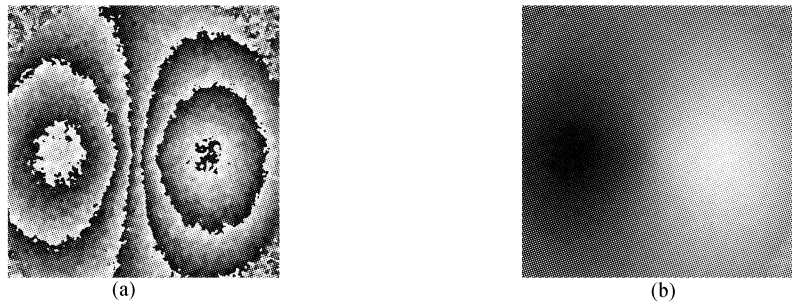


Fig. 4 The phase map (a) of the fringe patterns shown in Fig. 3 and the unwrapped phase map (b) of the fringes shown in Fig. 4(a)

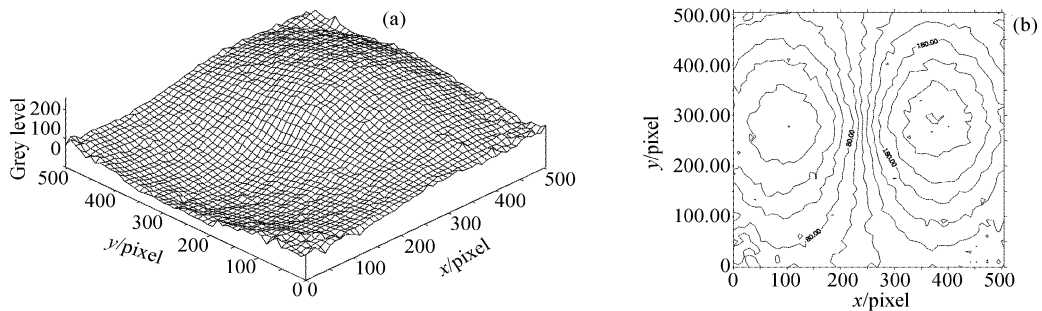


Fig. 5 Three-dimensional plot of the phase distribution (a) depicting derivative of deflection with respect to x and the contours (b) of it on xoy plane shown in Fig. 2

3.2 偏转平台相移法的理论解释

被测物变形前后各采集一幅散斑图, 这两幅散斑图相减可以得到剪切散斑干涉条纹。如何产生稳定的附加相位, 使剪切散斑干涉条纹有规律的变化, 是成功实施相移技术的关键。本研究采用偏转平台的方法引入附加相位, 该方法容易操作, 产生的相移条纹稳定。下面探讨物体偏转角度与其所产生的附加相位之间的关系。

在剪切散斑干涉中, 相位的变化是两个剪切点之间的相位之差。如图 6 所示, $S(x_s, y_s, z_s)$ 点为光源位置, 光线入射角度为 θ , $P_1(x, y, z)$ 点为物体表面上一点, $P_2(x + \delta x, y, z + \delta z)$ 点为物体表面上与 P_1 点相邻的一点。假定剪切量为 δx , 则物面上的 P_1 点和 P_2 点经剪切装置后在像面的 CCD 靶面上会聚一点 $O(x_o, y_o, z_o)$ 并产生干涉。物体可绕 Q 点转动, 当物体转动一微小角度 $\Delta\alpha$ 后, 点 $P_1(x, y, z)$ 移动到点 $P'_1(x + \Delta x, y, z + \Delta z)$, 点 $P_2(x + \delta x, y, z + \delta z)$ 移动到 $P'_2[x + \delta x + (z + \delta z)\Delta\alpha, y, z + \delta z - (x + \delta x)\Delta\alpha]$, 其中 $\Delta x, \Delta z$ 与偏转角度 $\Delta\alpha$ 有如下关系:

$\delta z)$ 移动到 $P'_2[x + \delta x + (z + \delta z)\Delta\alpha, y, z + \delta z - (x + \delta x)\Delta\alpha]$, 其中 $\Delta x, \Delta z$ 与偏转角度 $\Delta\alpha$ 有如下关系:

$$\begin{cases} \Delta x = r\Delta\alpha\cos\alpha = z\Delta\alpha, \\ \Delta z = -r\Delta\alpha\sin\alpha = -x\Delta\alpha, \end{cases} \quad (4)$$

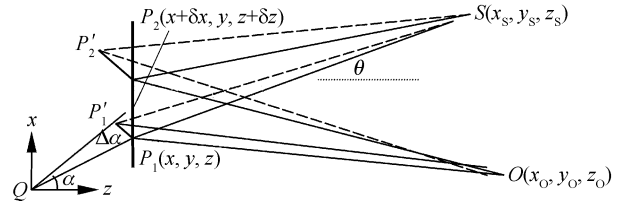


Fig. 6 Schematic for analyzing optical path difference in rotating state phase-shift method

1) 物体偏转前, 物面上 $P_1(x, y, z)$ 点和其相邻点 $P_2(x + \delta x, y, z + \delta z)$ 之间的光程差

$$\Delta l_1 = (SP_2 + P_2O) - (SP_1 + P_1O), \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} SP_1 = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2}, \\ SP_2 = \sqrt{(x - x_s + \delta x)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s + \delta z)^2}, \\ P_1O = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o)^2}, \\ P_2O = \sqrt{(x - x_o + \delta x)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o + \delta z)^2}, \end{cases} \quad (6)$$

2) 物体偏转后, 物面上 $P_1(x, y, z)$ 和 $P_2(x + \delta x, y, z + \delta z)$ 点分别转动到 $P'_1(x + \Delta x, y, z + \Delta z)$ 点和 $P'_2[x + \delta x + (z + \delta z)\Delta\alpha, y, z + \delta z - (x + \delta x)\Delta\alpha]$, P'_1 点和 P'_2 之间的光程差

$$\Delta l_2 = (SP'_2 + P'_2O) - (SP'_1 + P'_1O), \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} SP'_1 = \sqrt{(x - x_s + z \cdot \Delta\alpha)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s - x \cdot \Delta\alpha)^2}, \\ SP'_2 = \sqrt{[x - x_s + \delta x + (z + \delta z)\Delta\alpha]^2 + (y - y_s)^2 + [z - z_s + \delta z - (x + \delta x)\Delta\alpha]^2}, \\ P'_1O = \sqrt{(x - x_o + z \cdot \Delta\alpha)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o - x \cdot \Delta\alpha)^2}, \\ P'_2O = \sqrt{[x - x_o + \delta x + (z + \delta z)\Delta\alpha]^2 + (y - y_o)^2 + [z - z_o + \delta z - (x + \delta x)\Delta\alpha]^2}, \end{cases} \quad (8)$$

3) 物体偏转前后, 像面上 O 点的光程变化为

$$\begin{aligned} \Delta l = \Delta l_2 - \Delta l_1 = & [(SP'_2 + P'_2O) - (SP'_1 + P'_1O)] - [(SP_2 + P_2O) - (SP_1 + P_1O)] = \\ & [(SP'_2 + P'_2O) - (SP_2 + P_2O)] - [(SP'_1 + P'_1O) - (SP_1 + P_1O)], \end{aligned} \quad (9)$$

将(5)式~(8)式代入(9)式, 忽略高次项, 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 位于 xoz 平面, 观察方向沿 z 轴, 有 $x_o = y_o = y_s = 0; R_o = z_o$. 又因为物体与 z_o, R_s 相比很小, 式(9)可以简化为

$$\Delta l = [-\sin\theta \cdot \delta z + (1 + \cos\theta) \cdot \delta x]\Delta\alpha, \quad (10)$$

在通常情况下, 被测物是平面物体, 且在平面的法线

方向上对物体的变形进行观察。有 $\delta z = 0$, 则

$$\Delta l = (1 + \cos\theta)\Delta\alpha \cdot \delta x, \quad (11)$$

对应的相位变化

$$\delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda}(1 + \cos\theta) \cdot \Delta\alpha \cdot \delta x, \quad (12)$$

(12)式说明随着物体的偏转, 二剪切像之间有稳定的相位差, 且与物体的偏转角度成线性关系。

结论 本文提出了可实现相移的偏转平台相移剪切电子散斑干涉技术。文中对平台偏转而引入附加相位的原理进行了探讨,给出了物体偏转角度与附加相位之间的关系式。理论分析和典型实验都证明,偏转平台法剪切电子散斑干涉相移技术能够方便可靠地处理剪切电子散斑干涉条纹,提取位移导数的信息。

参 考 文 献

- 1 Hung Y Y, Liang C Y. Image-shearing camera for direct measurement of surface strains. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(7):1046~1051
- 2 Hung Y Y. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(3):391~395
- 3 Hung Y Y. Recent development in practical optical nondestructive testing. *Proc. SPIE*, 1991, **1554B**:29~45
- 4 Dai Jiabin, Wang Jinqi, Qin Yuwen. A study of phase-shifting technique on electronic shearing speckle image processing. *J. Experimental Mechanics* (实验力学), 1992, **7**(2):153~158 (in Chinese)
- 5 He Yuming. The foring and analysing of the digital shearing speckle correlation fringe pattern. *J. Experimental Mechanics* (实验力学), 1995, **10**(1):17~24 (in Chinese)
- 6 Gu Jie, Wang Kaifu, Shen Yongzhao. Phase shift and carrier techniques of shearbeam ESPI for static and dynamic in-plane displacement measurement. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(2):200~205 (in Chinese)
- 7 Sun Ping, Zhang Xi, Wang Haifeng. The research of techniques on incoherent structured illumination based on central algorithm. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2001, **30**(12):1481~1485 (in Chinese)
- 8 Carre P. Installation et utilisation du comparateur photoelectrique et interferentiel du burean international des poids et mesures, *Metrologia*, 1966, **2**(1):13~23

《光学学报》三级学科名称

本刊要求所写的4~6个关键词中,头一个为该文的三级学科名称。现在本刊推荐使用下列三级学科名称。由于有些课题可能可以归入这个或那个学科,故选用时请注意着重文章的内容,使之课题与三级学科尽量切合。

Applied Optics	应用光学
Applied Optoelectronics	应用光电子学
Atmosphere Optics	大气光学
Biological Optics	生物光学
Film Optics	薄膜光学
Geometrical Optics (Imaging Optics)	几何光学(成像光学)
Guided Wave Optics (Fiber and Integrated Optics)	导波光学(光纤,集成光学)
Information Optics	信息光学
Laser Physics	激光物理
Laser Techniques	激光技术
Lasers	激光器
Luminescence	发光学
Nonlinear Optics	非线性光学
Ocean Optics	海洋光学
Optical Fiber Communication Technology	光纤通信技术
Optical Materials	光学材料
Optical Measurement	光学测量
Photochemistry	光化学
Physical Optics	物理光学
Plasma Physics	等离子体物理学
Quantum Optics	量子光学
Spectroscopy	光谱学
X-Ray Optics	X射线光学