

相位调制数字散斑干涉术

刘 诚 姜锦虎 肖金标 沈永昭
(苏州大学物理系, 苏州 215006)

摘 要 提出一种可绕 Z 轴转动的粗糙平板(参考物体)实现相位调制, 该方法在不改变电子散斑干涉术(ESPI)或数字散斑干涉术(DSPI)系统装置的情况下, 可用于微小离面位移场(例如最大离面位移为 λ) 的测量, 以及复杂形变的离面位移场的自动测量。

关键词 位相调制, 数字散斑干涉, 电子散斑干涉。

1 引 言

电子散斑干涉术和数字散斑干涉术在位移、轮廓及振动振幅的测量方面已获广泛应用^[1-4]。两者的光学原理基本相同, 不同处在于电子散斑干涉术中需对模拟信号进行滤波、整流处理, 在数字散斑干涉术中用计算机代替模拟信号处理器。它们的出现使对位移场和振动图像的测量成为实时化、实用化。然而由于用它们所得到的条纹场受到散斑场的严重调制而更适合全场定性分析。相移技术^[5]的引入使电子散斑干涉术和数字散斑干涉术能适应定量检测的要求, 但相移技术需要精确的相位调节装置, 其系统的复杂性及对检测环境的要求比一般的电子散斑干涉术和数字散斑干涉术要高得多。

本文提出一种可绕 Z 轴转动的粗糙平板(参考物体)实现相位调制, 该方法在不改变电子散斑干涉术(或数字散斑干涉术)系统装置的情况下, 可用于微小离面位移场(例如最大离面位移为 λ) 的测量, 以及复杂形变的离面位移场的自动测量。

2 基本原理

图 1 为用于测量离面位移场的数字散斑干涉术实验装置示意图。CCD 靶面上接受到的图像是被测物体和参考物体的两个像面散斑场的相干叠加, 在物体变形前后各摄取一幅图像, 其光强分布分别为 $I_1(x, y)$ 和 $I_2(x, y)$, 对其进行 $(I_1 - I_2)^2$ 运算, 在理想情况下, 显示器上的亮度分布正比于

$$\beta = \eta I_0 I_r \sin^2(\phi_0 - \phi + \Delta\phi/2)(1 - \cos \Delta\phi) \quad (1)$$

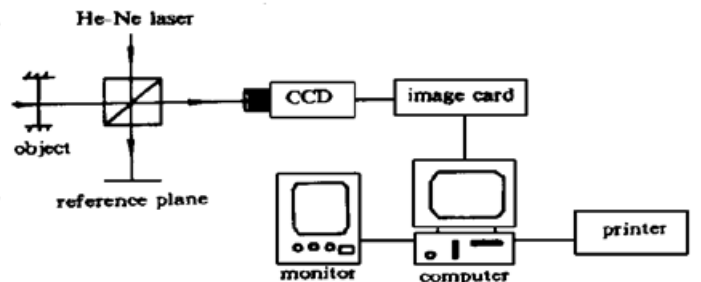


Fig. 1 Schematic of the experimental setup of DSPI

式中 η 为与装置有关的常数, I_0 、 I_r 分别为物像和参考物像光强, $\Phi_0(x, y)$ 和 $\Phi_r(x, y)$ 分别为物光波和参考光波的相位函数, 这四个量都是随机量。 $I_0 I_r \sin^2(\Phi_0 - \Phi_r + \Delta\Phi/2)$ 为散斑结构, $1 - \cos \Delta\Phi$ 为条纹函数。而

$$\Delta\Phi(x, y) = 4\pi w(x, y)/\lambda \quad (2)$$

条纹为离面位移场 $w(x, y)$ 的等值线。相邻两条暗条纹(或亮条纹)中心的离面位移差值为 $\lambda/2$ 。如果物上最大离面位移很小, 例如物上仅出现两条暗条纹, 则无法给出物体的离面位移场。

为测量微小的离面位移场, 本文提出了相位调制数字散斑干涉术。它是在像面参考光的复振幅中引入位相变化 $2\pi f_0 x$ 。其实现方法是将参考物体——粗糙平板——绕 Z 轴转动小角度 θ , f_0 和 θ 的关系为

$$f_0 = 2\theta/\lambda \quad (3)$$

相位调制数字散斑干涉术的实验方法和测量原理如下:

摄取特定的三幅图像, CCD 将光信号转换为电信号, 通过 A/D 转换, 将模拟电信号转换为灰度数字信号存储在图像卡中。第一幅图像在物体不变形、参考体不转动时摄取, 其光强分布为

$$I_1(x, y) = a_0^2 + a_r^2 + 2a_0 a_r \cos(\Phi_0 - \Phi_r) \quad (4)$$

式中 a_0 、 a_r 分别为物光波和参考光波复振幅的振幅。

第二幅图像摄取条件为, 物体不发生变形, 参考体绕 Z 轴转过小角度 θ , 其光强分布为

$$I_2(x, y) = a_0^2 + a_r^2 + 2a_0 a_r \cos(\Phi_0 - \Phi_r + 2\pi f_0 x) \quad (5)$$

第三幅图像在物体发生变形, 同时参考体绕 Z 轴转过小角度 θ 时采集, 其光强分布为

$$I_3(x, y) = a_0^2 + a_r^2 + 2a_0 a_r \cos(\Phi_0 - \Phi_r + \Delta\Phi + 2\pi f_0 x) \quad (6)$$

$\Delta\Phi(x, y)$ 为由于物体发生离面位移 $w_0(x, y)$ 引入的物光波位相变化。

计算机对 I_2 和 I_3 进行 $(I_2 - I_3)^2$ 运算, 显示器上亮度正比于

$$\beta_1 = \eta I_0 I_r \sin^2(\Phi_0 - \Phi_r + \Delta\Phi/2 + 2\pi f_0 x)(1 - \cos \Delta\Phi) \quad (7)$$

它给出物体实际离面位移 $w_0(x, y)$ 条纹图

$$w_0(x, y) = \lambda \Delta\Phi(x, y)/4\pi \quad (8)$$

对 I_1 和 I_2 进行 $(I_1 - I_2)^2$ 运算, 显示器上亮度正比于

$$\beta_2 = \eta I_0 I_r \sin^2(\Phi_0 - \Phi_r + \pi f_0 x)(1 - \cos 2\pi f_0 x) \quad (9)$$

由该式表示散斑场被等间距直条纹调制, 其空间周期为 $p = 1/f_0$, 它可由条纹图经滤波和细化自动测得。(9) 式给出了参考体的离面位移分布

$$w_r(x, y) = \lambda f_0 x/2 = \lambda x/2p \quad (10)$$

它又可看作为物体的虚离面位移场。对 I_1 和 I_3 进行 $(I_1 - I_3)^2$ 运算, 显示器上亮度正比于

$$\beta_3 = \eta I_0 I_r \sin^2[\Phi_0 - \Phi_r + (\Delta\Phi + 2\pi f_0 x)/2][1 - \cos(\Delta\Phi + 2\pi f_0 x)] \quad (11)$$

它为位相调制后的条纹图, 条纹图所代表的离面位移为

$$w(x, y) = \lambda(\Delta\Phi + 2\pi f_0 x)/(4\pi) = w_0(x, y) + w_r(x, y) \quad (12)$$

$w(x, y)$ 可视作物体的真实离面位移 $w_0(x, y)$ 和虚离面位移 $w_r(x, y)$ 之和。因此物体的真实离面位移 $w_0(x, y)$ 可由 $w_r(x, y)$ 和 $w(x, y)$ 精确地测量。对于微小离面位移场, $w_0(x, y)$ 的测量精度, 取决于 $w_r(x, y)$ 的测量精度。(9) 式所代表的条纹场, 其条纹数量越多, $w_r(x,$

y) 的精度越高。根据由(9)式和(1)式所表征的条纹图, 还可用下法测量离面位移。 β_3 所表示的条纹场实际是 β_2 条纹场的一个变形, 它是 β_2 的条纹发生位移而得到的, 移动距离为:

$$\Delta x = x - x' = \Delta\Phi / (2\pi f_0), \quad \Delta\Phi = 2\pi f_0 \Delta x = 2\pi \Delta x / p \quad (13)$$

(13)式表示被测物体各点位相变化 $\Delta\Phi$, 由 Δx 和(9)式条纹的空间周期 P 确定。而 Δx 可以由(9)式和(11)式的条纹经滤波和细化得到, 根据 $\Delta\Phi = 4\pi w_0(x, y) / \lambda$ 得

$$w_0(x, y) = \lambda \Delta x / 2p \quad (14)$$

因此, 微小离面位移场 $w_0(x, y)$ 可以高精度、自动化地测得。

3 典型实验

对典型试件——周边固定中心受集中载荷的园板进行了实测。板材为铝, 厚 1 mm、直径为 60 mm。图 2(a) 为物体实际离面位移 $w_0(x, y)$ 等值条纹图。由图可见, 用于条纹数量少, 不仅不能据此给出任一剖面的离面位移曲线, 甚至连中心点的离面位移也不能求出。图 2(b) 对应于(9)式的调制场, 即 $w_r(x, y)$ 的等值条纹图, 在数字散斑干涉术中一般可获得十几条清晰的暗条纹(或亮条纹)。图 2(c) 为由(11)式表征的相位调制后的离面位移场 $w(x, y) = w_0(x, y) + w_r(x, y)$ 。图 2(d)、图 2(e)、图 2(f) 分别对应于较大载荷下的 $w_0(x, y)$ 、 $w_r(x, y)$ 和 $w(x, y)$ 的条纹图。

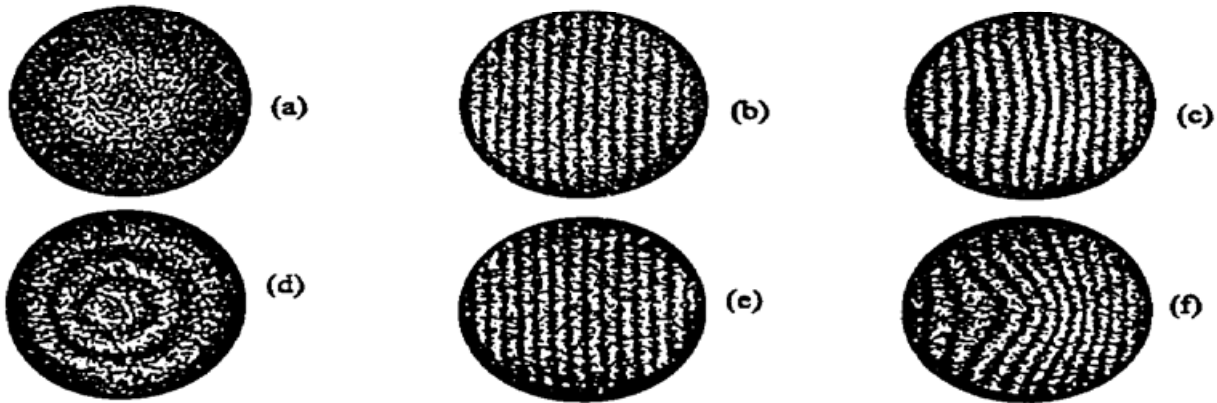


Fig. 2 Contour of the out-plane displacement

图 2(b)、图 2(c) 经滤波处理后, 通过圆心的剖面的灰度曲线示于图 3, 粗线和细线分别跟图 2(b)、图 2(c) 对应。峰点(或谷点)坐标代表表面剖面与亮条纹(或暗条纹)中心的交点。(9)式和(11)式为暗条纹的条件分别为

$$\left. \begin{aligned} 2\pi f_0 x &= 2n\pi, & (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \\ \Delta\Phi + 2\pi f_0 x &= 2m\pi, & (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

它们对应的 w_r 和 w 分别为

$$w_r(x, y) = n\lambda/2, \quad w(x, y) = m\lambda/2 \quad (16)$$

对图 2(b) 和图 2(c) 经滤波、细化后, 可给出任一剖面的 $w_r(x, y_0)$ 和 $w(x, y_0)$ 。图 4 的曲线 1 和 2 分别对应 $w_r(x, 0)$ 和 $w(x, 0)$ 的曲线。计算机可根据 $w(x, 0) - w_r(x, 0) = w_0(x, 0)$ 给出实际离面位移 $w_0(x, 0)$, 也可根据(14)式直接给出 $w_0(x, 0)$ 。图 4 曲线 3 为理论值, 曲线 3 上的点为放大五倍的 $w_0(x)$ 。由图可见两者相当吻合。误差主要由集中载荷偏离中心引起。由该方法实测最大离面位移(中心处)为 $0.215 \mu\text{m}$ 。如果以 $w_{0\text{max}}$ 的 $1/7$ 作为该方法的测

量精度, 则精度优于 $\lambda/20$ 。

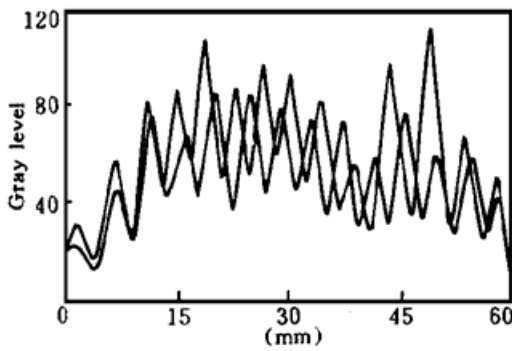


Fig. 3 Grey levels curves

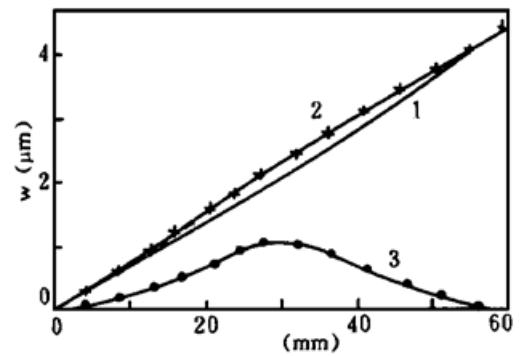


Fig. 4 Out-plane displacement curves

讨 论 本文所用相位数字散斑干涉术, 除实时、自动化优点外, 还具两个显著优点: 1) 适于微小离面位移场 $w_0(x, y)$ 的测量; 2) 对于复杂形变测量, 常规的数字散斑干涉术对零条纹难以自动判定, 因此难以给出离面位移场。而本方法是根据 $w_r(x, y)$ 和 $w(x, y)$ 给出 w_0 , 或由调制后条纹相对于调制直条纹的偏移量测得, 所用不存在对 $w_0(x, y)$ 条纹图的定级问题, 因此适于复杂形变场的自动测量。相位调制也可通过转动被测物体来实现。

参 考 文 献

- [1] J. T. Malmø, O. J. Lokberg, G. A. Slettemoen, Interferometric testing at very high temperatures by TV Holography (ESPI). *Experimental Mechanics*, 1988, **28**(3) : 315~ 321
- [2] 何世平, 汪柳生, 伍小平, 测量表面形状的 ESPI 技术. *量子电子学报*, 1991, **8**(2) : 254~ 262
- [3] M. M. Ratnam, W. T. Evans, Measurement of thermal expansion of a riston using holographic and electronic speckle pattern interferometry. *Appl. Opt.*, 1992, **29**(1) : 61~ 69
- [4] A. R. Ganesan, C. Joenathan, R. S. Sirohi, Real-time comparative digital specklepattern interferometry. *Opt. Comm.*, 1987, **64**(6) : 501~ 506
- [5] Guanchang Jin, Electronic speckle pattern interferometer with a polarization phase-shift technique. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(4) : 857~ 860

Phase Modulation Technique of Digital Speckle Pattern Interferometry

Liu Cheng Jiang Jinhua Xiao Jinbiao Sheng Yongzhao

(Department of Physics, Suzhou University, Suzhou 215006)

(Received 27 June 1996; revised 3 October 1996)

Abstract The phase modulation of digital speckle pattern interferometry (DSPI) is discussed theoretically. The experiments for demonstrating its viability in actual measurements are performed. This method can be used for the measurement of out-plane displacement field of tiny and complex deformation.

Key words phase modulation, DSPI, ESPI.