

正交光栅散斑剪切干涉术

朱益清 凌德洪 王 策
(苏州大学物理系)

提 要

本文提出了一种新的散斑剪切干涉系统,在该系统中,用正交光栅作为剪切元件以得到四个被测物的剪切散斑像,这样,在物体形变前后进行二次曝光就能同时记录物面的形变位移在四个不同方向上的导数,除此之外,该系统还具有光路简单,光能利用率高等特点,最后,我们用这种散斑剪切干涉系统对薄板的弯曲进行了测量,同时还给出了此方法在无损伤检测中的应用例子。

一、引 言

散斑剪切干涉术是一种能够直接获得位移的方向导数在全场分布的光学测量技术,故而在应力分析中,该技术较全息干涉术更为吸引人,因为,这样可以免去从位移量求数值微分的大量繁琐工作,进而消除了由于这种计算所引入的误差,同时也消除了试件的整体移动对测量结果的影响,除此之外,与全息干涉术相比,它对环境稳定性以及照明光源的相干长度的要求比较低,这些特点对于工作应用都是非常有益的。自一九七三年 Leendertz、Butters^[1] 和 Hung、Taylor^[2] 分别提出这种技术以来,人们已设计了许多不同的散斑剪切干涉系统^[3~9]。

Hung 等人^[4] 提出的四孔径离焦成像法可以产生四个剪切像的双曝光剪切散斑干涉图,这种方法使用了小孔光阑,光能利用率极低,因此记录时所需的曝光时间较长,这给实际应用带来了不便,另外,因为离焦量很难精确测量,致使各剪切像之间的剪切量也不能精确确定,这样,测量结果就会存在较大的误差。

本文描述用正交光栅作剪切元件的散斑剪切干涉系统,它既能在一张双曝光的散斑剪切干涉图上同时记录位移在四个方向上的导数,又不存在四孔径离焦成像法的缺点,而且光路也十分简单。最后,还给出了此方法的应用例子。

二、方法及原理

1. 正交光栅的制作

光栅是用全息法通过记录二平面波的干涉条纹来制得,其中一束光垂直于记录干板入射,而另一束光则与其成较大夹角入射,如图1所示。为了得到正交光栅,第一次曝光之后将全息干板转过 90° 再次进行曝光,曝光后的干板经过显影、定影和漂白处理就形成一块位相型正交光栅,这种具有体效应的正交光栅将入射光分成四束,如图2所示。我们拍摄光栅

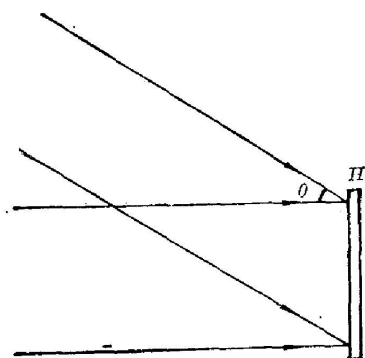


图1 光栅的拍摄

Fig. 1 Schematic of the grating-production setup

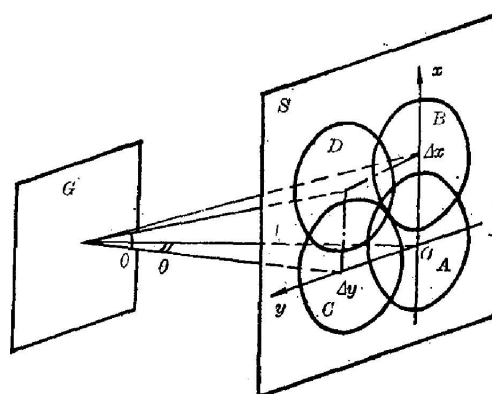


图2 正交光栅产生四个剪切像

Fig. 2 Four sheared images produced by a normal grating

所用的光源是 He-Ne 激光,记录干板是天津 I 型全息干板,二相干光束之间的夹角 $\theta_0=30^\circ$,全息干板曝光处理后,由于乳胶的收缩,衍射角增大为 $\theta=34^\circ$ 。

2. 记录光路

本文提出的散斑剪切干涉记录装置是在简单的成像系统中加入一块具有体效应的位相型正交光栅 G ,如图 3 所示,被测物体用相干光照明,透镜 L 将其成像在 S 面上,光栅 G 置在像平面前 Δz 处,这样由于光栅的衍射作用,最后在像面 S 上就会形成四个相互错开的像 A 、 B 、 C 、 D ,如图 2 所示,因为照明光是相干光,这四个剪切的散斑像重叠在一起将发生干涉,结果在散斑粒子中形成了四组条纹取向不同的高频光栅。将感光板放在像平面 S 上,在物体发生形变前后,二次曝光记录其散斑剪切干涉图。

3. 条纹形成的理论分析

设 U_A 、 U_B 、 U_C 、 U_D 分别是像 A 、 B 、 C 、 D 的复振幅,它们在像面上相干叠加后的总强度

$$\begin{aligned} I_S &= |U_A + U_B + U_C + U_D|^2 \\ &= |U_A|^2 + |U_B|^2 + |U_C|^2 + |U_D|^2 + (U_A^* U_B + U_B^* U_A) + (U_A^* U_C + U_C^* U_A) \\ &\quad + (U_A^* U_D + U_D^* U_A) + (U_B^* U_C + U_C^* U_B) + (U_B^* U_D + U_D^* U_B) + (U_C^* U_D + U_D^* U_C), \end{aligned} \quad (1)$$

(1) 式中前四项之和代表平均光强,后面的所有项实际上是六个干涉项相加,它们分别对应于每一对剪切像相干叠加时产生的干涉项,由此可见,可以逐对来考虑剪切像之间的干涉。

首先讨论像 A 和 B 的相干叠加,由图 3 可知,这两个像在 x 方向的剪切量与 Δz 及衍射角 θ 有关,为

$$\Delta x' = \Delta z \cdot \operatorname{tg} \theta. \quad (2)$$

对应于物平面上的剪切量为

$$\Delta x = (\Delta x' / M) = (\Delta z \operatorname{tg} \theta / M), \quad (3)$$

式中 M 是成像系统的放大率。由于这两个剪切像错位重叠,所以像面上 $p(x', y')$ 处的散斑是由物体表面上 $p(x, y)$ 点与相邻点 $p(x + \Delta x, y)$ 处散射的光相干形成的,从图 3 可见, $p(x + \Delta x, y)$ 处的散射光经光栅衍射后以夹角 θ 与 $p(x, y)$ 处的散射光相干,于是在散斑粒子中形成了条纹沿 y 轴取向的光栅,物体形变之前,散斑干涉图的强度可表示为

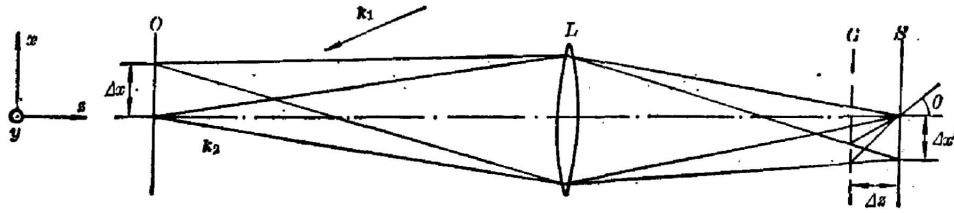


图3 散斑剪切干涉的记录光路

Fig. 3 Schematic of the speckle-shearing interferometer

$$I_1(x', y') = I_0(x', y') [1 + \cos(2\pi x'/d)], \quad (4)$$

式中 $I_0(x', y')$ 是散斑的强度分布, $d = [\lambda/2 \sin(\theta/2)]$ 为光栅常数。当物体发生运动时, 由于物体表面的位移使得光程发生了改变, 则 $p(x, y)$ 处的散射光的相位改变量^[3] 为

$$\delta(x, y) = (2\pi/\lambda) (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{L}(x, y), \quad (5)$$

式中 $\mathbf{L}(x, y)$ 是 $p(x, y)$ 处物面的形变位移矢量, \mathbf{k}_1 、 \mathbf{k}_2 分别是照明方向和观察方向的单位矢量。同样, 如果 $p(x + \Delta x, y)$ 处的位移矢量是 $\mathbf{L}(x + \Delta x, y)$, 那么该处散射光的位相改变量

$$\delta(x + \Delta x, y) = (2\pi/\lambda) (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{L}(x + \Delta x, y), \quad (6)$$

这样, 形变后的散斑干涉图的强度是

$$I_2(x', y') = I_0(x', y') \{1 + \cos[(2\pi x'/d) + \delta_x]\}, \quad (7)$$

式中 δ_x 是 $p(x, y)$ 和 $p(x + \Delta x, y)$ 处散射光的位相的相对改变量

$$\delta_x = \delta(x + \Delta x, y) - \delta(x, y)$$

$$= (2\pi/\lambda) (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot [\mathbf{L}(x + \Delta x, y) - \mathbf{L}(x, y)] = (2\pi/\lambda) (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \frac{\Delta \mathbf{L}}{\Delta x} \Delta x。$$

如果剪切量 Δx 很小, $(\Delta \mathbf{L}/\Delta x)$ 近似于偏导数 $(\partial \mathbf{L}/\partial x)$, 于是上式可近似为

$$\delta_x = (2\pi/\lambda) (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x} \Delta x。 \quad (8)$$

在物体形变前后进行二次曝光, 干板上所记录到的总光强为

$$\begin{aligned} I(x', y') &= I_1(x', y') + I_2(x', y') \\ &= 2I_0(x', y') \{1 + \cos[(2\pi x'/d) + (\delta_x/2)] \cos(\delta_x/2)\}, \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式表示散斑中的载频光栅 $\cos[(2\pi x'/d) + (\delta_x/2)]$ 的幅度受到低频因子 $\cos(\delta_x/2)$ 的调制。

当 $\delta_x = 2n\pi, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots,$ (10)
光栅的幅度最大。

当 $\delta_x = (2n+1)\pi, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots,$ (11)
散斑中的光栅结构则完全消失, (10)式和 (11) 式分别决定了散斑干涉图中载频光栅幅度为最大和零的条纹, 然而, 因为光栅极细, 这种条纹不能直接观察到。

对其它各对剪切像进行类似的推导可以得到如下一些结论: 像 C 和 D 相干叠加的结果与前面相同; 像 A 和 C 以及 B 和 D 的相干叠加都将形成条纹沿 x 轴取向的载频光栅, 其光栅幅度由 $\cos(\delta_y/2)$ 决定

$$\delta_y = (2\pi/\lambda) (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial y} \Delta y。 \quad (12)$$

剪切像在 y 方向的剪切量为

$$\Delta y = \Delta z \operatorname{tg} \theta / M. \quad (13)$$

像 A 和 D 形成的载频光栅条纹取向与 x 轴夹角为 $(3\pi/4)$, 像 C 和 B 形成的载频光栅条纹取向与 x 轴夹角为 $(\pi/4)$, 它们的光栅幅度分别由 $\cos(\delta_{AD}/2)$ 和 $\cos(\delta_{BC}/2)$ 决定, 其中

$$\delta_{AD} = (2\pi/\lambda) (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot (\partial \mathbf{L} / \partial l) |_{\pi/4} \Delta l, \quad (14)$$

$$\delta_{BC} = (2\pi/\lambda) (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot (\partial \mathbf{L} / \partial l) |_{-\pi/4} \Delta l, \quad (15)$$

式中: $(\partial \mathbf{L} / \partial l) |_{\pi/4}$ 和 $(\partial \mathbf{L} / \partial l) |_{-\pi/4}$ 是位移矢量沿方位角 $(\pi/4)$ 和 $(-\pi/4)$ 的方向导数, Δl 为剪切量

$$\Delta l = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = \sqrt{2} \Delta z \operatorname{tg} \theta / M. \quad (16)$$

上述四组光栅叠合在双曝光剪切干涉图的散斑粒子中, 各组光栅分别载有位移沿四个不同方向导数的信息, 它们可以用光学滤波法分别转变为可见的明暗条纹图。

4. 滤波法

处理后的双曝光记录干板, 放在图 4 所示的光路系统中进行光学滤波, 图中: P 是滤波孔, 透镜 L 将 H 上的剪切干涉散斑图成像在 S 面上, 如果光束在 $x-z$ 面内以入射角 θ 照射干板 H , 那么, H 所记录的散斑图上有沿 y 轴取向的光栅的区域就会产生垂直于 H 传播的衍射光, 于是在像面 S 上的对应处形成亮条纹; 反之, 若散斑中没有这样的光栅, 像面上的对应点就是暗条纹。根据上一节的讨论, 亮纹由 (10) 式决定; 暗纹由 (11) 式决定, 由 (8) 式进一步可知, 这样的条纹为 $(\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot (\partial \mathbf{L} / \partial x)$ 的等值线。同样, 如果改变光的照射方向, 使得散斑中其它方向的光栅产生垂直于 H 的衍射光, 就可以得到位移沿别的方向导数的等值条纹图。

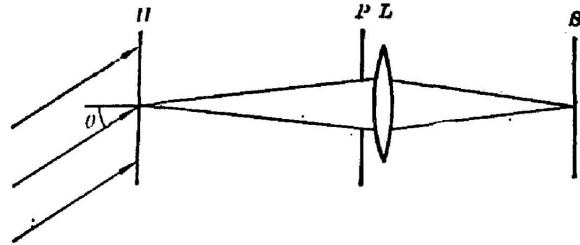


图 4 滤波系统
Fig. 4 Filtering system

由 (10) 式决定; 暗纹由 (11) 式决定, 由 (8) 式进一步可知, 这样的条纹为 $(\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot (\partial \mathbf{L} / \partial x)$ 的等值线。同样, 如果改变光的照射方向, 使得散斑中其它方向的光栅产生垂直于 H 的衍射光, 就可以得到位移沿别的方向导数的等值条纹图。

三、实 验

1. 薄板弯曲的测量

实验中, 以 He-Ne 激光准直地照明试件, 照明方向和观察方向分别是 $\mathbf{k}_1 = (\cos 80^\circ, 0, \cos 10^\circ)$ 、 $\mathbf{k}_2 = (0, 0, 1)$ 透镜的直径为 3.0 cm, 焦距为 30 cm, 成像系统的放大率 $M = 0.60$, 正交光栅与记录干板间的距离 $\Delta z = 0.73$ mm, 这样各剪切量为 $\Delta x = \Delta y = 0.82$ mm, $\Delta l \approx 1.2$ mm。记录材料是天津 I 型全息干板。

图 5 是中心受载的固支圆板的实验结果, 试件是直径为 4.0 cm、厚度为 0.5 mm 的圆形铝板, 中心位移是 0.04 mm, 该试件的形变只有法向位移 $w(x, y)$, 从 (16) 式可知, Δl 是 Δx 、 Δy 的 $\sqrt{2}$ 倍, 因而 $(\partial w / \partial l) |_{\pi/4}$ 条纹图的灵敏度是 $(\partial w / \partial x)$ 、 $(\partial w / \partial y)$ 条纹图的灵敏度的 $\sqrt{2}$ 倍, 比较图 5(a)、(b) 和图 5(c) 证实了这一点, 图 6 和图 7 为理论解和实验结果的比较^[10]。

图 8 为中心受载的四边简支矩形板的实验结果, 试件所用材料与前相同, 板的边长分别

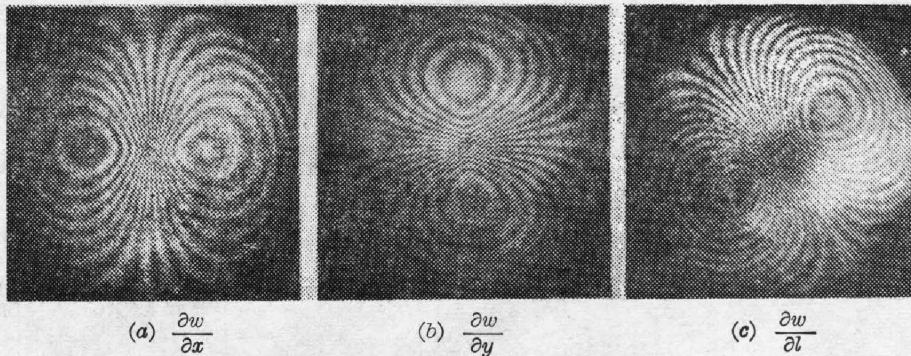


图 5 中心受载的固支圆板的实验结果条纹图

Fig. 5 Experimental results for a centrally-loaded clamped circular plate, with fringe patterns shown

是 3.0 cm 和 4.0 cm, 中心点位移是 0.04 mm, 图 9 和图 10 给出了理论结果和实验结果的比较^[10]。

2. 无损检测中的应用

用散斑剪切干涉术得到的条纹图给出了物体形变的全场分布, 显然它可在无损检测中得到应用, 如果试件的某处存在裂纹等缺陷, 则适当加载后, 该处的形变就会产生局部扰动, 从而引起条纹反常。

图 11 所示是一块有裂纹的铝板所产生的条纹花样, 图 11(a) 中条纹的不连续处清晰地显示了裂纹的位置和大致长度。图 12 的两张条纹图是四边固支的矩形铝板形成的, 图 12(a) 中条纹在下面两个角上显示出反常, 因此, 可以断定这两个地方铝板与边框间存在空隙*。

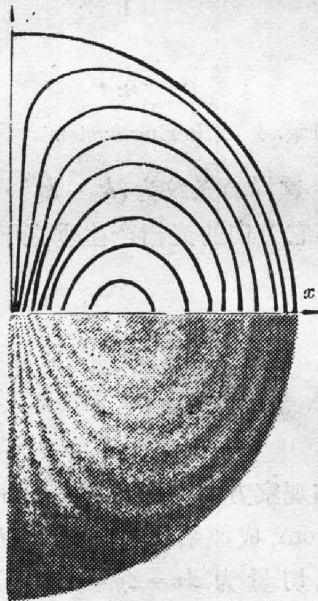


图 6 条纹图与理论等值线图的比较

Fig. 6 Comparison of theoretical contours with an experimental fringe pattern

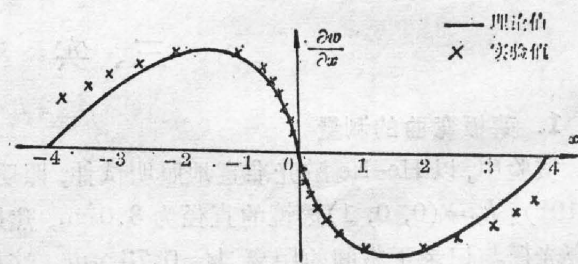


图 7 实验值与理论曲线之比较

Fig. 7 Comparison of theoretical solution with experimental data

以上无损检测的例子还表明: 试件的缺陷并不一定在位移沿任何方向导数的条纹图中都能显示出来, 从图 11(b) 和图 12(b) 中就无法确定试件存在缺陷, 本文的散斑剪切干涉系

* 在上述两个试件的检测中, 加载方式均为中心加载, 所用光路同前。

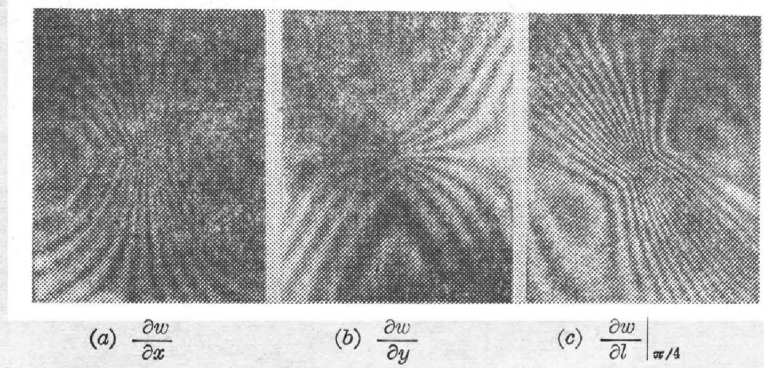


图 8 中心受载的四边简支矩形板的实验结果条纹图

Fig. 8 Experimental results for a centrally-loaded simply-supported rectangular plate, with fringe patterns shown

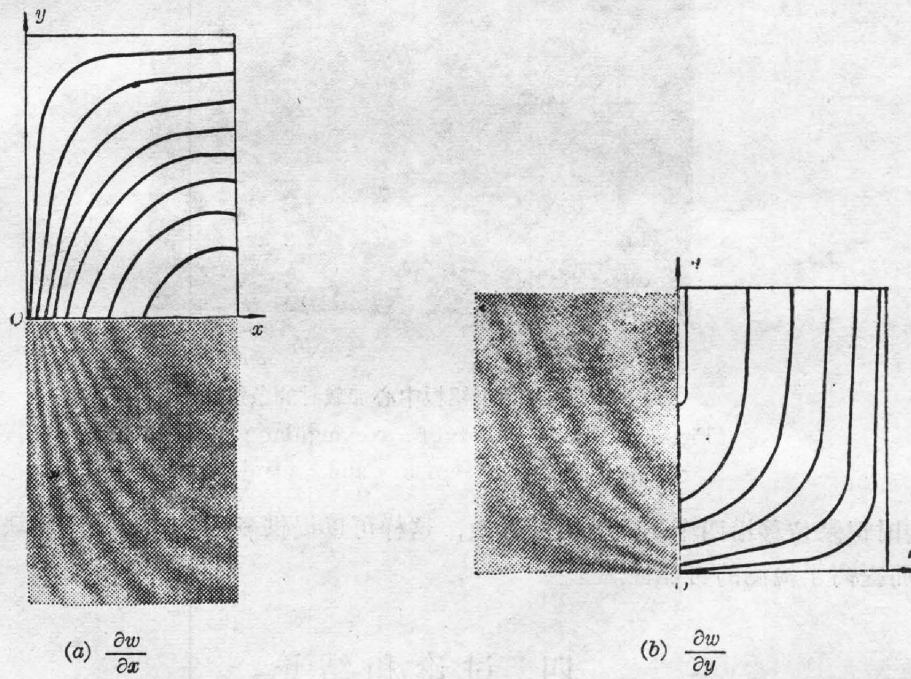


图 9 实验得到的条纹图与理论等值线图的比较

Fig. 9 Comparison of theoretical contours to an experimental fringe pattern

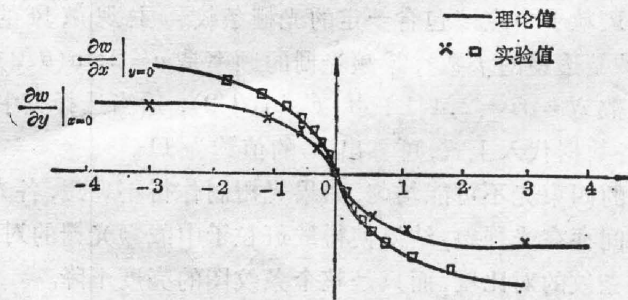
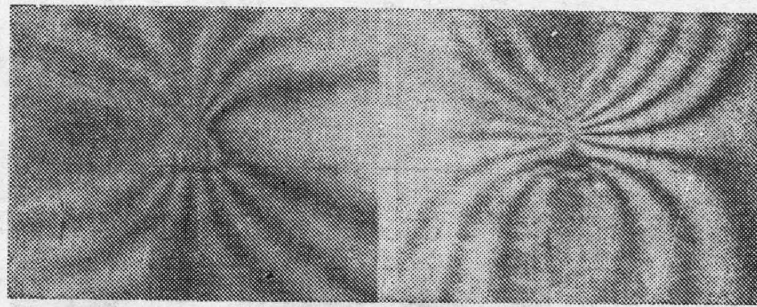


图 10 $(\partial w/\partial x)|_{y=0}$ 和 $(\partial w/\partial y)|_{x=0}$ 的理论值与实验值之比较

Fig. 10 Comparison of theoretical solution with experimental data

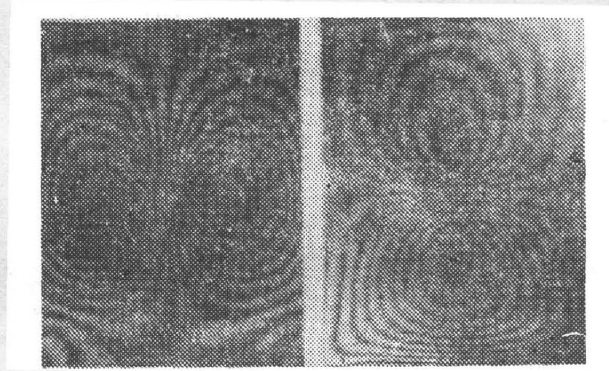


$$(a) \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$(b) \frac{\partial w}{\partial y}$$

图 11 铝板中心加载时, 裂纹附近的条纹花样

Fig. 11 Fringe pattern in the crack area of a centrally-loaded plate



$$(a) \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$(b) \frac{\partial w}{\partial y}$$

图 12 固支矩形铝板中心加载时的条纹图

Fig. 12 Fringe pattern of a rectangular plate both clamped along the boundary and centrally loaded

统能同时记录位移沿四个不同方向的导数, 这样可以提供多张条纹图来判断缺陷的存在与否, 从而提高了检测的可靠性。

四、讨论和结论

本文描述的散斑剪切干涉系统是以散斑粒子中的光栅作为载频来记录位移导数的信息, 因此, 每一个散斑粒子中应该包含一定的光栅条纹。主观散斑的粒子平均大小为 $\sigma = 1.2(1+M)\lambda F$ (F 是透镜的 f 数), 载频光栅的频率是 $\nu = 2 \sin(\theta/2)/\lambda$ 。这样, 每个散斑粒子中所包含的条纹数 $N = \sigma\nu = 2.4(1+M)F \sin(\theta/2)$, 适当选择其中各参数, 可使 N 足够大, 将本实验中的各数据代入上式, 可算出 N 的值约为 11。

由正交光栅分出的四束光不可能均匀, 如果光栅制作得不理想, 各光束的能量差别甚至很大, 因此, 剪切像之间存在光强差, 结果使得散斑粒子中载频光栅的对比度下降, 但这并不会降低滤波后得到的条纹的对比度, 而只是整个条纹图的亮度下降。

由(8)式可见, 散斑剪切干涉术得到的条纹图表示了位移分量的导数, 对于一般的三维形变, 可改变照明方向拍摄三张独立的二次曝光散斑剪切干涉图, 然后, 从三张条纹图联立

解出离面及面内位移的方向导数^[9]。

正交光栅作为剪切元件的散斑剪切干涉系统具有光路简单、光能利用率高、能同时记录位移沿四个不同方向的导数等特点,所有这些都给实际应用带来了较大的方便。它不仅用来测量物体的形变,而且还能应用于无损检测,确实可望在工程中得到广泛应用。

参 考 文 献

- [1] J. A. Leendertz, J. N. Butter; *J. Phys. (E)*, 1973, **E6**, No. 11 (Nov), 1107.
- [2] Y. Y. Hung, C. E. Taylor; *Exp. Mech.*, 1974, **14**, No. 2 (Jul), 281.
- [3] P. Hariharan; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. 11 (Nov), 2563.
- [4] Y. Y. Hung, R. E. Rowlands *et al.*; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. 3 (Mar), 618.
- [5] R. Krishna Murthy, R. S. Sirohi *et al.*; *Appl. Opt.*, 1982, **21**, No. 16 (Aug), 2865.
- [6] Y. Y. Hung; *Opt. Eng.*, 1982, **21**, No. 3 (May), 391.
- [7] M. A. Sutton, Y. J. Chao *et al.*; *Exp. Mech.*, 1983, **23**, No. 4 (Dec), 370.
- [8] Yoshihisa Iwahashi, Koichi Iwata *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 2 (Jan), 247.
- [9] C. M. Vest; *Holographic Interferometry*, (John Wiley and Sons, New York, 1979), 423.
- [10] 徐芝纶;《弹性力学(下册)》, (人民教育出版社,北京,1979), 21.

Speckle shearing interferometry with a normal grating

ZHU YIQING LING DEHONG AND WANG CE

(Department of Physics, Suzhou University)

(Received 25 April 1985)

Abstract

The paper proposes a new method of speckle shearing interferometry which uses a normal grating as the shearing component. Advantages of this method include simplicity of setup, low losses of light, and simultaneous determination of derivatives of surface displacements of a structure with respect to four different directions. Experimental results for strain measurements and nondestructive tests are presented.