

旋转剪切散斑干涉法的研究

陈炳泉 姜锦虎
(苏州大学 物理系)

提 要

本文提出一种新的动态散斑照相法——旋转剪切散斑干涉法。文中给出了理论分析和初步的实验结果。该方法不仅能在一张剪切散斑图上记录物体动态变形的全过程,而且在全场滤波分析时能方便地给出任一瞬时物体的变形信息,得到清晰的、高衬比的干涉条纹图。该方法设备简单,用途广泛。
关键词: 旋转剪切散斑照相, 旋转剪切镜。

一、引 言

动态散斑照相法为研究动态问题提供了新的方法^[1,2],但在实际使用中,因离焦量很难精确测量^[3],这给测量结果带来较大的误差。

本文提出的旋转剪切散斑干涉法是一种新的动态散斑照相法,它通过位于剪切散斑照相机前的孔径剪切镜匀速旋转进行剪切散斑照相可以得到被测物体在各个不同方向上的剪切散斑像。这样,在物体变形前和变形过程中进行两次曝光,就能在一张双曝光的旋转剪切散斑干涉图上记录物体动态变形全过程的信息,且能直接获得任一瞬时的全场信息,具有较高质量的全场条纹。

二、理 论 分 析

1. 一维孔径剪切散斑干涉法

图1为剪切散斑干涉照相系统的示意图,在成像透镜前放置如图2所示的孔径剪切镜。该剪切镜是用单臂剪切镜将其中一部分用黑纸遮盖(图中为阴影部分),只留下沿剪切方向

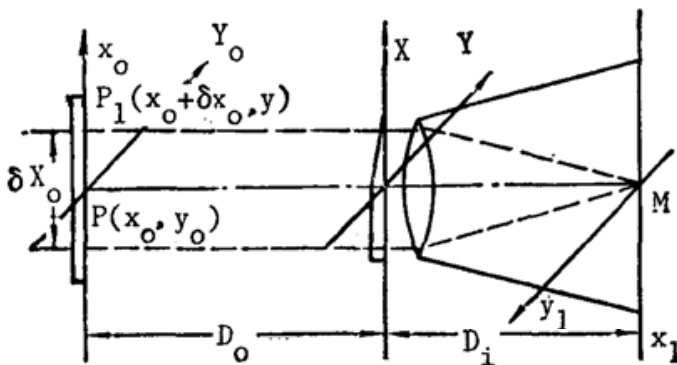


Fig. 1 Aperture-shearing lens

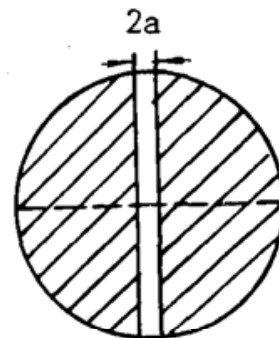


Fig. 2 Schematic of the speckle-shearing interferometer

成对称分布的窄矩形孔径,这样就构成一维孔径剪切散斑干涉系统。

由于光楔的作用,不难得到物平面上的剪切量为

$$\left. \begin{aligned} \delta_{x_0} &= D_0(\mu - 1)\alpha, \\ \delta_{x_0} &= \frac{f}{1 - (f/D_i)} (\mu - 1)\alpha, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 D_0 为物到光楔的距离(近似为物距), D_i 为光楔到像面的距离(像距), f 为记录透镜的焦距, μ 为光楔的折射率, α 为光楔的楔角。

若使孔径剪切镜不旋转进行剪切散斑干涉记录。物体在变形前曝光一次, P 、 P_1 两点光波在像面 M 点上相若叠加,则复振幅和光强分别为^[4]

$$\left. \begin{aligned} U_1(x_1, y_1) &= u_g(x_1, y_1) \exp[i\theta(x_1, y_1)], \\ dI_1(x_1, y_1) &= |U_1(x_1, y_1)|^2 = I_g(x_1, y_1) [1 + \cos \varphi(x_1, y_1)], \\ I_g(x_1, y_1) &= 2|u_g(x_1, y_1)|^2, \\ \varphi(x_1, y_1) &= \theta(x_1 + \delta x_1, y_1) - \theta(x_1, y_1), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $U_1(x_1, y_1)$ 为一个随机量。物体发生变形后,进行第二次曝光(时间与第一次相同),则 M 点的复振幅和光强分别为

$$\left. \begin{aligned} U_2(x_1, y_1) &= u_g(x_1, y_1) \exp\{i[\theta(x_1, y_1) + \Delta\theta(x_1, y_1)]\}, \\ dI_2(x_1, y_1) &= |U_2(x_1, y_1)|^2 = I_g(x_1, y_1) \{1 + \cos [\varphi(x_1, y_1) + \Delta\varphi(x_1, y_1)]\}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

则 M 点的总光强为

$$dI(x_1, y_1) = dI_1 + dI_2 = 2I_g + I_g [\cos(\varphi + \Delta\varphi) + \cos \varphi], \quad (4)$$

在线性处理的情况下,剪切散斑图的振幅透射率为

$$dt(x_1, y_1) = t_0 + k dI(x_1, y_1) = t_0 + k' I_g + k I_g [\cos(\varphi + \Delta\varphi) + \cos \varphi], \quad (5)$$

将剪切散斑图置于图 3 所示的滤波系统的输入平面(X_1, Y_1),则频谱面上的频谱分布为:

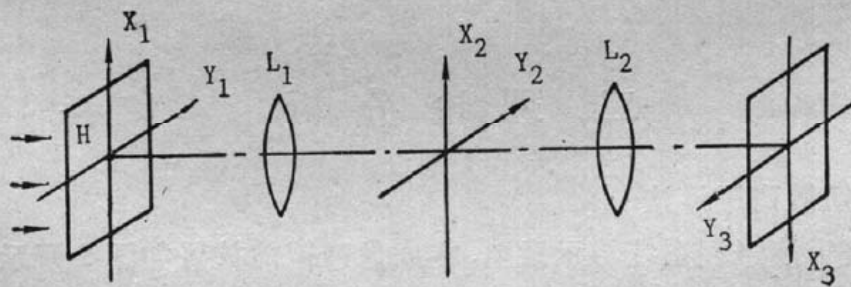


Fig. 3 Whole-field filtering system

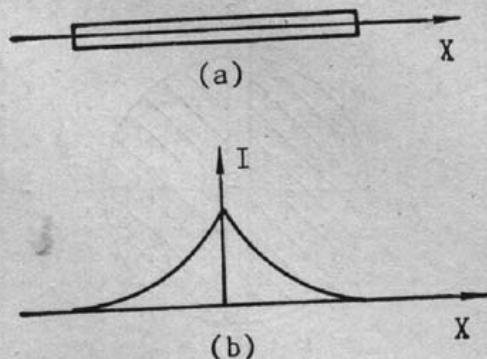


Fig. 4

- (a) Diffraction halo
- (b) Light intensity distribution of diffraction halo

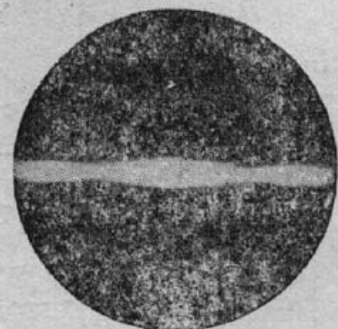


Fig. 5 Diffraction halo of one dimensional two-fan aperture

$$I_f(x_2, y_2) = \mathcal{F}[dt(x_1, y_1)], \quad (6)$$

如果孔径的长度方向位于 X 轴上, 其衍射晕如图 4 所示。图 4(a) 为衍射晕的分布区域, 图 4(b) 为晕的强度分布曲线。图 5 为一维双扇形孔径剪切镜所得到的剪切散斑图衍射晕的照片。

将滤波孔位于衍射晕上的适当范围的位置时, 在像平面就会得到明暗相间的高质量等值全场条纹图。

2. 旋转剪切散斑干涉法

为了得到物体全过程的动态信息, 我们将一维孔径剪切散斑干涉法进行推广。在物体动态变形过程中进行连续曝光, 且同时使孔径剪切镜作匀速旋转 180° , 这样就能得到一张旋转剪切散斑图。该散斑图的光强为

$$I(r, \theta) = \int_0^T [dI(r, \theta)] dt = \int_0^T I_g [2 + \cos(\varphi + \Delta\varphi) + \cos\varphi] dt, \quad (7)$$

式中 T 为曝光时间。旋转剪切散斑图的振幅透射率为

$$t = \int_0^T [dt(r, \theta)] dt = \int_0^T \{t_0 + k'I_g + kI_g [\cos(\varphi + \Delta\varphi) + \cos\varphi]\}, \quad (8)$$

(8) 式的旋转剪切散斑图可看作无数瞬态剪切散斑图线性叠加的结果, 而各瞬态剪切散斑图又分布在某一特定的方向上, 因此滤波分析时, 就可将各个瞬态剪切散斑图分离出来。当滤波孔取在某一方位上, 就相当于该一方位所对应的瞬时物体的变形信息。

旋转剪切散斑干涉图的频谱强度是各瞬态频谱强度的线性叠加, 所得到的衍射晕是沿圆周等强度分布的。

在记录剪切散斑图时, 设孔径在 (r, θ) 平面上的某一位置时, 对应于物体动态过程中的某一瞬时 t_p , 而由此孔径记录的剪切散斑图的衍射晕中心在谱面上有一确定的位置。可见衍射晕上某点不仅含有对应于瞬时 t_p 时物上的变形信息, 而且还含有 $t_p - \frac{a}{R\omega}$ 到 $t_p + \frac{a}{R\omega}$ (R 为半径, ω 为剪切镜的旋转角速度, $\frac{a}{R\omega}$ 为半个孔径旋转时所需的时间) 时的物上的变形信息, 所以像面上的等值条纹反映了 $t_p - \frac{a}{R\omega}$ 到 $t_p + \frac{a}{R\omega}$ 时间内物上各点的平均变形信

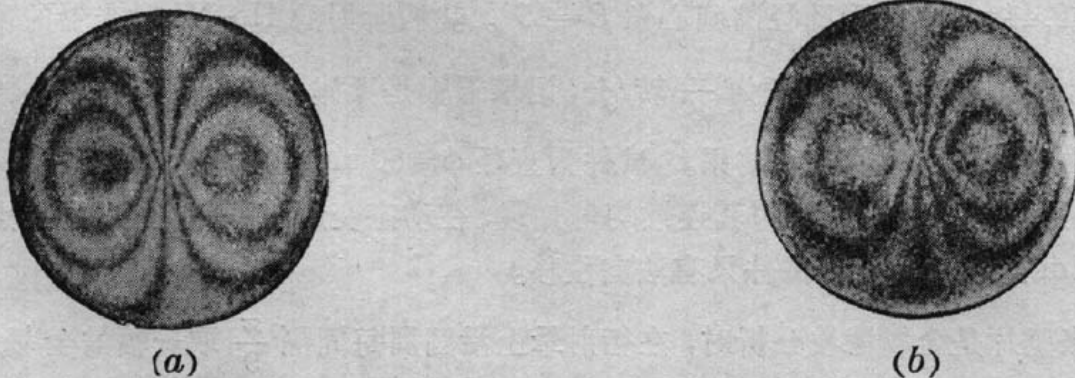


Fig. 6

(a) Static specklegram; (b) Dynamic specklegram

* 因剪切镜旋转使得剪切量 $\delta x_0 = \delta y_0$, 为简单起见, 采用极坐标。

息。

因记录时孔径的宽度较小,且在全场滤波分析时取小圆孔径,又考虑到物体动态变化过程中的速度变化率较小,即物体在 $t_p - \frac{a}{R\omega}$ 到 $t_p + \frac{a}{R\omega}$ 时间内的变形量较小,所以通过滤波小孔所提取的全场条纹信息的平均效果并不明显。

图 6(a)、6(b)分别为一圆盘四周固支,中心加载过程中某一瞬时的剪切散斑条纹图的对比。图 6(a)是静态的;图 6(b)是动态的,两者基本相一致。

三、实验装置和方法

若用图 2 所示的矩形孔径剪切镜,所得到的衍射晕的光能分布不太合理,为了提高高频部分的光强分布,提高条纹的反衬度,我们在实验中采用了双扇形孔径的旋转剪切镜。如图 7 所示。该剪切镜由转动装置带动作匀速旋转。

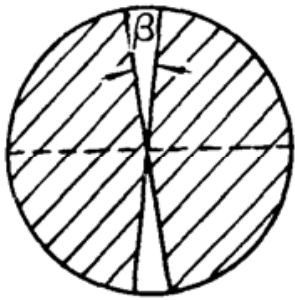


Fig. 7 Rotating-shearing lens of two-fan aperture

在记录散斑图时,物体在变形前和动态变形过程中分别曝光一次,每次曝光时均让旋转剪切镜旋转 180° ,这样,孔径的位置与物体动态变形过程有着——相对应的关系。当孔径中心处于某一位置时,记录了物体某一动态的剪切散斑图和变形前的剪切散斑图。剪切镜旋转 180° ,将动态全过程的信息分布在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的范围内,而 $180^\circ \sim 360^\circ$ 范围内的信息是重复相同的。

在全场滤波分析时,滤波孔位于衍射晕上 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的任一位置时,可得到与物体相对应的瞬时动态信息。若将滤波孔匀速旋转,可得到物体动态全过程的连续变化信息。

四、实验结果

实验中的光路如图 1 所示。 $D_0 = 550 \text{ mm}$, $D_1 = 430 \text{ mm}$, 剪切镜的楔角 $\alpha = 0.5^\circ$, 剪切量 $\delta_{x_0} = \delta_{y_0} = 1.44 \text{ mm}$, 扇形孔径的圆心角 $\beta = 15^\circ$ 。我们所用的 He-Ne 激光器的输出功率约为 20 mW , 剪切镜的旋转速度为 $\frac{1}{8}$ 转/分,记录干板是天津 I 型全息干板。

图 8 是中心加载圆板的实验结果。试件为直径 $\phi = 60 \text{ mm}$, 厚 $d = 2 \text{ mm}$ 的铝圆板,周界固支,中心通过一套机械装置对其连续均匀加载,在动态变形过程曝光时,中心点的位移量为 $0 \sim 30 \mu\text{m}$ 连续变化。该试件只有法向位移。

图中 9 张照片是全场滤波分析时,在衍射晕上沿圆周每间隔 $\frac{\pi}{9}$ 取一幅的全场条纹照片。由图可见,随着 θ 的连续变化,可以看到散斑条纹也连续变化,图中全场条纹反映了与 θ 相对应的试件瞬时状态的信息。所以旋转剪切散斑干涉法能把物体动态的全过程连续地再现出来。

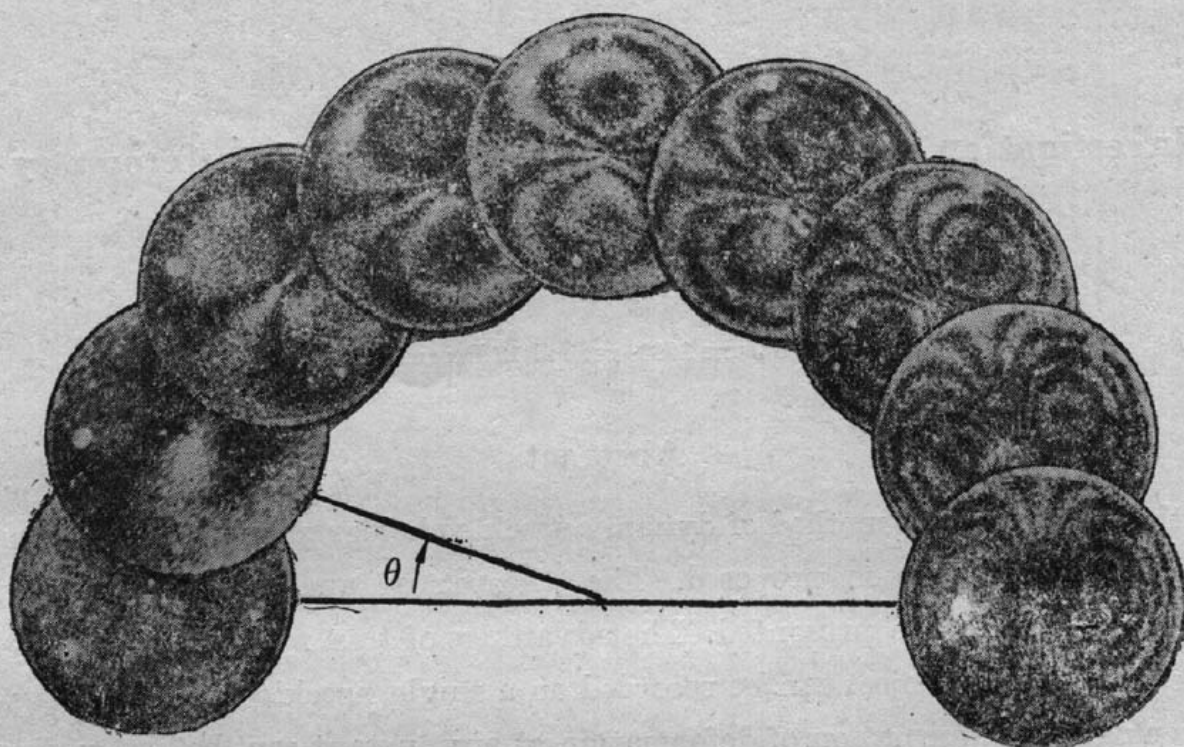


Fig. 8 Experimental results for a centrally-loaded aluminium disc, with fringe patterns shown

五、讨 论

由理论分析和实验证明, 旋转剪切散斑干涉法用于动态散斑照相的研究是一种有效的方法。它具有如下优点:

(1) 能将物体动态的全过程记录在一张散斑图上, 并能连续地再现出来, 散斑图的信息量丰富;

(2) 采用扇形孔径剪切镜, 使衍射晕的光能分布较为合理, 将光能主要集中于沿孔径中心轴方向, 这样可得到该方向上应变信息的高衬比的全场条纹;

(3) 改变孔径的形状, 只改变衍射晕的分布区域, 不影响全场条纹的分布;

(4) 设备简单, 易于实现。

此外, 需要指出的是要合理设计记录系统中的扇形孔径, 圆心角 β 一般取在 $\frac{\pi}{12}$ 以内为好, 平均效果不明显, 若取大了, 则平均效果变大, 且条纹的衬度下降。

旋转剪切散斑干涉法还可应用到其它动态问题的研究, 具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 陈炳泉等;《光学学报》, 1988, 8, No. 11 (Nov), 1018~1023.
- [2] 顾杰等;《光学学报》, 1987, 7, No. 5 (May), 394~399.
- [3] 朱益清等;《光学学报》, 1985, 5, No. 11 (Nov), 1018~1025.
- [4] J. W. Goodman;《激光散斑及有关现象》, (J. C. Dainty 主编, 科学出版社, 北京, 1981), 第二章.
- [5] Y. Y. Hung, A. J. Durelli; *J. of Strain Analysis*, 1979, 14, No. 3, 81~88.
- [6] Y. Y. Hung, C. Y. Liang; *Appl. Opt.*, 1979, 18, No. 7 (Apr), 1046~1050.

Investigation of the rotating speckle-shearing interferometry

CHEN BINGQUAN AND JIANG JINHU

(Department of Physics, Suzhou University)

(Received 8 June 1988; revised 12 December 1988)

Abstract

In this paper, a new method of dynamic speckle photography—rotating speckle-shearing interferometry is proposed. The theoretical analysis and preliminary experimental results are presented. The advantage of this method is that a whole dynamic process of an object can be recorded on a single specklegram. In the whole-field filtering, the information of deformation at any instant can be easily obtained, and images obtained are quite clear.

Key words: rotating a speckle-shearing lens; rotating-shearing lens.