

孔径径向扫描散斑照相法

陈炳泉 姜锦虎 程传福
(苏州大学物理系)

提 要

本文提出了一种新的散斑照相法——孔径径向扫描散斑照相法, 以及初步的实验结果。该方法的优点是能在一张散斑图上记录物体动态变形的全过程, 在全场滤波分析时, 能以等值条纹的形式给出任一瞬时物体在 x 轴、 y 轴和 45° 方向上的变形信息。

关键词: 散斑照相; 孔径径向扫描; 孔径扫描器。

一、引 言

本文所提出的孔径径向扫描法是在孔径散斑照相法^[1~3]的基础上提出来的, 通过作者设计的机械装置的孔径扫描器, 使位于散斑照相机物镜前的双孔、三孔或四孔, 沿径向按一定的规律进行扫描运动。采用四孔径向扫描散斑照相, 可获得分别沿 x 轴、 y 轴和 45° 方向任一动态过程的信息, 且 x 和 y 方向上对于同一状态具有相同的测量灵敏度。

二、孔径径向扫描器

孔径径向扫描器按扫描孔径数量分双孔、三孔、四孔等径向扫描器。现以四孔径向扫描器为例, 说明其基本结构和工作原理。其主要部分是两片开有一定槽形的圆板, 其中一片固定不动, 上面开有如图 1(a) 所示的正交窄长形孔, 称为定片; 另一片开有如图 1(b) 所示的槽形($\rho = \rho(\theta)$), 由转动机构带动, 作匀角速转动, 称为动片。如将两片叠合, 如图 1(c) 所示, 旋转动片, 则可实现四孔径向扫描。

为获得孔径沿径向匀速扫描, 动片的槽形应设计成阿基米德螺线, 即: $\rho = \rho_0 + c\theta$, 其中 ρ_0 、 c 均为常数, 设计 ρ_0 是考虑到散斑照相时, 如果孔距过小, 则测量灵敏度很低, 对实际测

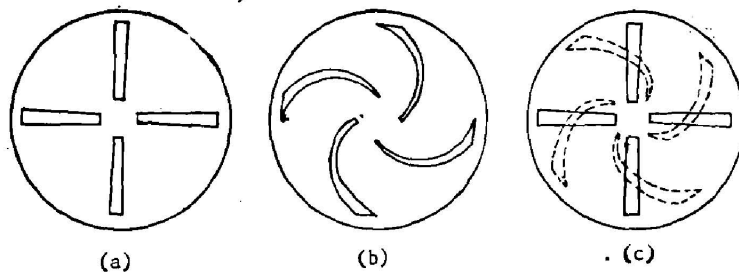


Fig. 1

量意义不大。

孔径沿径向扫描速度为 $v = \frac{d\rho}{dt} = c \frac{d\theta}{dt} = c\omega$, 当改变槽形的函数形式 $\rho(\theta)$ 时, 就可使孔径按所要求的规律沿径向扫描。以下讨论均以匀速扫描为例。

图 2 为双孔径向扫描器的定片和动片图。

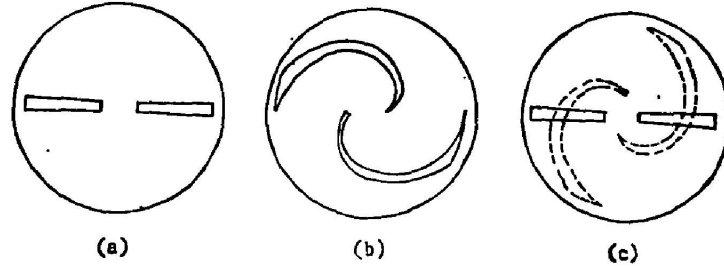


Fig. 2

三、原 理

图 3 为双孔径向扫描散斑照相法的记录系统。下面分别讨论该方法的衍射晕分布和各种动态的信息提取。

1. 衍射晕

考虑如图 4(a) 所示双孔分别沿 x 轴正方向和负方向作匀速扫描, 则孔的瞬时位置分别为

$$b = b_0 + v_n t, \tag{1}$$

$$-b = -b_0 - v_n t, \tag{2}$$

式中 v_n 为孔径扫描速度。当孔径由 b_0 扫描到 $b_0 + v_n T$ 时(即曝光时间从 $0 \rightarrow T$), 干板的曝光量为: $E = \int_0^T I_{11} dt$, 散斑图的复振幅透射率为

$$t = t_0 + K E = t_0 + K \int_0^T I_{11} dt. \tag{3}$$

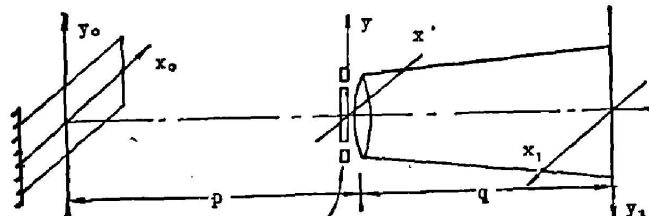


Fig. 3

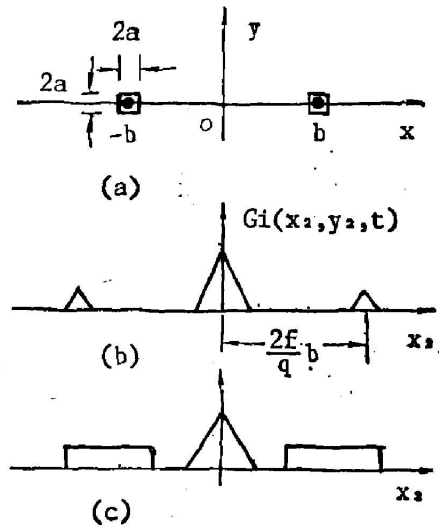


Fig. 4

将散斑图放在 $4f$ 系统的输入平面 (x_1, y_1) 时, 则谱面 (x_2, y_2) 上光波复振幅 (忽略 t_0 和 K) 为

$$U_f = F \int_0^T I_{1i} dt = \int_0^T F[I_{1i}(x_1, y_1, t)] dt. \quad (4)$$

$F[I_{1i}(x_1, y_1, t)]$ 为孔宽 a 、中心相距 $2b$ 的双孔径, 对应瞬时 t 所记录的散斑图的频谱。根据文献[4]:

$$G_i(x_2, y_2, t) = F[I_{1i}(x_1, y_1, t)] = F_i(x', y', t) * F_i^*(x', y', t). \quad (5)$$

而

$$F_i(x', y', t) = c_2 A_2 \left(-\frac{d\delta}{f} x', -\frac{d\delta}{f} y', t \right) = \begin{cases} c_2 & \frac{f(b-a)}{q} \leq |x'| \leq \frac{f(b+a)}{q} \text{ 和 } |y'| \leq \frac{fa}{q} \\ 0 & \text{其它。} \end{cases} \quad (6)$$

$G_i(x_2, y_2, t)$ 为 $F_i(x', y', t)$ 的自相关函数, 如图 4(b) 所示。因孔径沿径向扫描, 孔径中心处于 $(b-a)$ 到 $(b+a)$ 内任一位置时的 G_i , 都对 $x_2 = \frac{2f}{q} b$ 处的光扰动有贡献, 所以该处的复振幅 $G(x_2, y_2)$ 数值上等于图 4(b) 所示三角形面积, 又因扫描孔径处于任一位置时的三角形面积相等。因此,

$$I_f = |G|^2 = \text{const} t_0. \quad (7)$$

即沿径向的衍射晕是等强度的。如图 4(c) 所示。同理, 可算出四孔径向扫描时, 沿 x_2 和 y_2 方向、沿 45° 和 135° 方向的衍射晕也是等强度的, 且后者为前者的 4 倍。四孔径向扫描散斑图的衍射晕, 参见图 7、8 右上角所示。

2. 散斑图的记录

物体在变形前和动态变形时, 分别曝光一次, 每次曝光时均让孔径沿径向扫描一次。这样, 孔径的位置与物体动态变形过程有着——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散斑图和变形前的散斑图, 在像平面上的光强分别以 $I'_{1i}(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, t)$ 和 $I_{1i}(x_1, y_1, t)$ 表示。 t 时刻的瞬态曝光量为 $(I_{1i} + I'_{1i}) dt$, 其散斑图的复振幅透射效可简写成:

$$t = \int_0^T (I_{1i} + I'_{1i}) dt. \quad (8)$$

T 为每次曝光时间, 设 $t_i = I_{1i} + I'_{1i}$, t_i 可理解为瞬态双曝光散斑图。于是(8)式代表的散斑图为无数瞬态双曝光散斑图的线性叠加。

3. 全场分析

将散斑图置于图 5 所示的系统中, 进行全场滤波分析, 则频谱面上的光场:

$$U_2(x_2, y_2) = Ft = \int_0^T F[I_{1i}(x_1, y_1, t) + I'_{1i}(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, t)] dt, \quad (9)$$

该式表示谱面上的光场, 为各瞬态双曝光散斑图频谱的线性叠加。由前面分析知道, 对应于动态过程的某一瞬时 t_p , 孔径中心在 (x, y) 平面上的某一位置时, 所记录的散斑图的衍射晕中心, 在谱面上有一确定的位置。综上所述, 可见衍射晕上某点, 不仅含有对应于瞬时 t_p 时物体各点的变形信息, 而且含有 $t_p - \frac{a}{v_h}$ 到 $t_p + \frac{a}{v_h}$ 时, 每一状态下物体各点的变形信息, 所

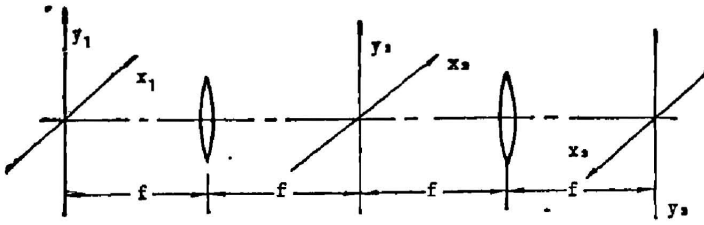


Fig. 5

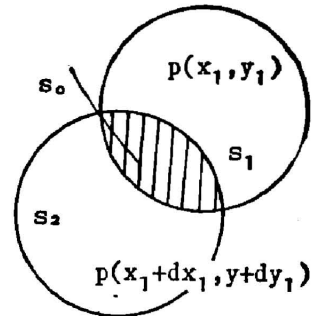


Fig. 6

以像平面上的等值条纹图,反映 $t_p - \frac{a}{v_h}$ 到 $t_p + \frac{a}{v_h}$ 时间内,物体各点的平均变形信息。

设将滤波孔中心放在 $(x_{20}, 0)$ 处,此时就选取 $t_p - \frac{a}{v_h}$ 到 $t_p + \frac{a}{v_h}$ 内各瞬态双曝光散斑图,则散斑图的复振幅透射率可简写为

$$T_p = \int_{t_p - \frac{a}{v_h}}^{t_p + \frac{a}{v_h}} [I_{1i}(x_1, y_1, t) + I'_{1i}(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, t)] dt \quad (10)$$

此式与文献[5]的(4)式具有相同的形式,并可得像平面上光强分布的平均值,近似地为

$$\begin{aligned} \langle I(x_3, y_3) \rangle = & 2c \left[(s_0 + s_1) + (s_0 + s_2) \sin^2 c \left(\frac{\pi}{\lambda f} x_{20} v_{xp} \Delta \right) \right] \\ & + 2s_0 \sin c \left(\frac{\pi}{\lambda f} x_{20} v_{xp} \Delta \right) \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda f} x_{20} d_{xp} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $\Delta = \frac{2a}{v_h}$, 在 t_p 瞬时, v_{xp} 为物点 (x, y) 位移速度的 x 分量, d_{xp} 为像点 (x_3, y_3) 的共轭物点的位移在 x 方向的分量, c 为常数。讨论中假设记录系统的放大率 $M=1$ 。对 t_p 时刻瞬态双曝光散斑图滤波时,像平面上坐标 (x_3, y_3) 处光波复振幅是以变形前物点 (x_1, y_1) 为中心的埃里斑 s_1 , 和瞬时 t_p 动态变形物点 $(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1)$ 为中心的埃里斑 s_2 所贡献, s_0 为这两个埃里斑的相关面积(如图 6 所示)。

(11)式代表了位移在 x 方向分量的等值条纹图。亮条纹对应的位移分量为^[6]

$$d_{xp} = N\lambda f / x_{20}, \quad (N=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (12)$$

如果用四孔径向扫描,在 x_2 轴、 y_2 轴和 45° 方向上滤波,得亮条纹对应的位移分量,具有和(12)式相同的形式。

本文的讨论同样适用于散焦散斑照相法。

四、实 验

1. 悬臂板面内弯曲的测量

实验中的光路如图 3 所示, $p=720 \text{ mm}$, $q=360 \text{ mm}$ 。以 He-Ne 激光照明试件,试件为一 $80 \text{ mm} \times 49 \text{ mm}$ 的悬臂有机玻璃板,板的一端固支,另一端以 $0 \sim 80 \mu\text{m}$ 连续加载。实验中采用四孔径向扫描。

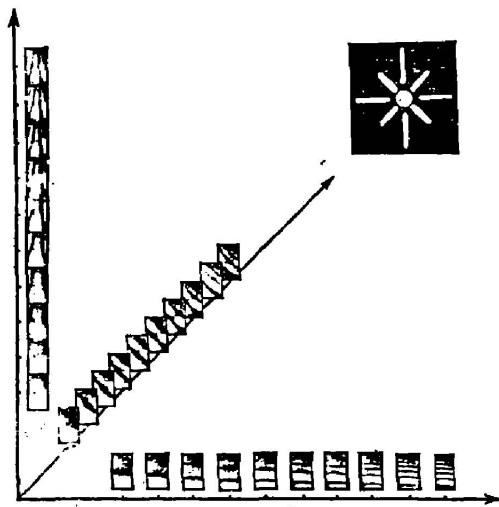


Fig. 7

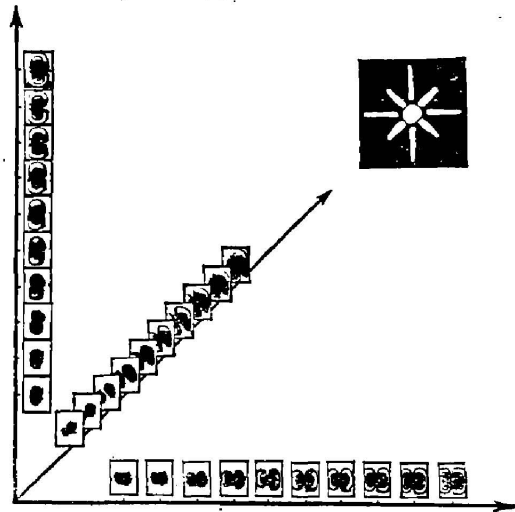


Fig. 8

图7是上述试件作面内弯曲动态实验衍射晕和散斑条纹组合照片。 x 方向的全场照片是在 x 方向的衍射晕上滤波得到的(滤波孔在衍射晕上每隔3mm取一幅全场条纹),即得悬臂板弯曲动态过程中的10张散斑照片; y 方向和 45° 方向的全场照片分别在 y 和 45° 方向的衍射晕上滤波得到的。如果滤波孔沿衍射晕连续扫描,则可观察到条纹连续变化的结果。

2. 矩形薄板离面弯曲的测量

图8为中心受载的四边固支矩形薄板的实验结果。试件材料与前相同,板的边长分别是80mm和60mm,中心点位移量为 $0\sim 0.059$ mm连续变化,实验中散焦量取为10mm。图中分别表示沿 x , y , 45° 方向在10种状态下一一对应的散斑照片。

五、讨 论

理论和实验证明,采用孔径径向扫描散斑照相法能将非快变化、非周期动态变形物体全过程的信息记录在一张散斑图上,进行全场滤波分析时,又可把各种状态的信息以等值条纹图的形式显示出来。

采用四孔径向扫描,可同时得到动态过程任一瞬时沿 x 、 y 和 45° 方向的动态变形信息,且在 x 和 y 方向上的测量灵敏度相同,这使计算应变场 ε_x , ε_y 和 ν_{xy} 更为方便。

该方法同样适用于研究周期性面内振动和离面振动问题。研究振动问题需要扫描器动片的转动频率与物体振动的频率同步。采用双孔径向扫描只能适用中心对称振动试件;采用四孔径向扫描既适用于研究中心对称振动,又适用于研究非中心对称振动。

该方法的不足之处是不同瞬时的测量灵敏度不同。

实验中得到徐裕林同志的帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Y. Y. Hung, R.E. Rowlands *et al.*; *Appl. Opt.*, 1975, 14, No. 3 (Mar), 618.
- [2] J. C. Dainty; 《激光斑纹及有关现象》, (中译本, 科学出版社, 北京, 1981) 193~195.
- [3] 顾杰等; 《光学学报》, 1987, 7, No. 5 (May) 394~399.
- [4] F. P. Chiang and B. P. Khafen, *Appl. Opt.*, 1979, Vol. 18.
- [5] 姜锦虎等; 《光学学报》, 待发表.
- [6] J. B. Chen and F. P. Chiang, *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1984, 1, No. 8, 845~849.

Speckle photography with radially scanning aperture

CHEN BINGQUEN, JIANG JINHU AND CHENG CHUENFU

(Department of Physics, Suzhou University)

(Received 19 June 1987; revised 14 December 1987)

Abstract

In this paper, a new method of speckle photography—radially scanning aperture method is proposed, and theoretical analysis and experimental results are presented. This method has the advantage of recording the whole dynamic process of an object on one speckle photogram. The information of deformation in the direction of x and y axis and of 45° at any moment can be obtained in the form of isothetic fringes by whole field filtering.

Key words: speckle photography; radially scanning aperture; aperture-scanner.