

偏振扫描相机测量二维动态热形变场

王开福

(扬州大学工学院力学室 扬州 225009)

提要 提出了利用偏振扫描相机进行激光散斑照相, 研测了物体的二维热形变场。全部动态过程的信息可记录在同一张散斑图上, 且在全场滤波时可连续再现热形变物体的二维变形信息。

关键词 散斑照相, 偏振扫描相机, 动态热形变场

1 引 言

F. P. Chiang 等提出了多孔径散斑照相方法^[1,2]。多孔径记录与单孔径记录相比, 能使衍射晕能量向高频方向移动, 这不但提高了测量灵敏度, 而且提高了条纹清晰度。然而 F. P. Chiang 所提出的多孔径记录方法对研究连续动态变形问题就显得很不方便, 比如 F. P. Chiang 等采用多孔径记录测量了动态热形变场^[3], 得到了热形变场分布的全场信息。但缺点是需要拍摄多张散斑图才能确定热形变场的变化规律。

顾杰、沈永昭等基于多孔径记录法, 提出了多孔径扫描法^[4]。该法对研究连续动态变形问题特别有效。本文在多孔径扫描法的基础上, 提出了偏振扫描相机。利用该相机进行激光散斑照相, 研测动态热形变场, 仅需拍摄一张散斑图即可确定动态热形变场的分布规律及其变化规律。

2 实验装置和实验方法

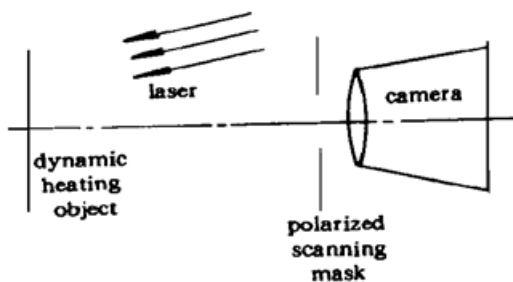


图 1 记录系统

Fig. 1 Recording system

图 1 是偏振扫描相机测量动态热形变场的记录系统。激光经扩束准直后照射动态热形变物体, 相机对物面聚焦成像, 拍摄散斑图时在相机镜头前面放置偏振扫描装置。

偏振扫描装置如图 2 所示。它由两块不透明板叠合而成, 在其中一块不动板上两相互垂直的方向开四条长形孔, 并在四条长形孔上放置透光方向垂直于径向的偏振片。放置偏振片的目的是消除占据大部分能量的 $\pi/4$ 方向的衍射晕, 从而使能量集中到水平和竖直两个方向

* 江苏省自然科学基金资助项目。

的衍射晕上。在另外一块可绕中心转动的板上开四条阿基米德螺旋线形长孔。两板叠合后,当可动板顺时针匀速时,四个孔将沿半径向外匀速移动,移动速度为

$$v = b\omega \tag{1}$$

式中 b 为常数, ω 为可动板的角速度。

在物体发生动态热形变的过程中,让可动板匀速旋转 $\pi/2$,在可动板旋转过程中拍摄散斑图;然后在物体处于温度不变的状态下,再让可动板旋转 $\pi/2$,同时再进行曝光。此双曝光散斑图含有物体在整个动态热形变过程中的全部动态变形信息。

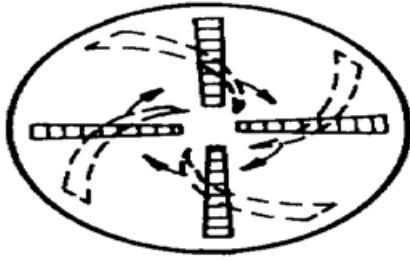


图 2 偏振扫描屏

Fig. 2 Polarized scanning mask

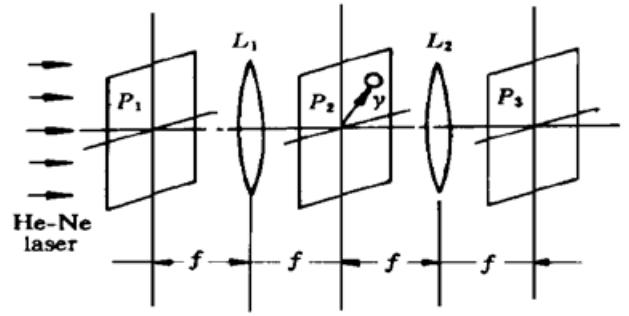


图 3 滤波系统

Fig. 3 Filtering system

图 3 是全场滤波分析系统。 P_1 为物平面, L_1 为变换透镜, P_2 为频谱面, L_2 为成像透镜, P_3 为像平面。把散斑图放入该相干光处理系统中,在与物体某一状态相对应的衍射晕上滤波,可得物体在该状态下的瞬态热形变场的信息。随着滤波孔位置的连续改变,可连续再现物体在整个动态变形过程中热形变场的全部动态信息。

3 理论分析

记录系统如图 1 所示。在物体温度保持不变的状态下,可动板以角速度 ω 匀速旋转 $\pi/2$ 后的曝光量为

$$E_1(x_0, y_0) = \int_0^{\pi/2\omega} I(x_0, y_0; t) dt \tag{2}$$

式中 $I(x_0, y_0; t)$ 为散斑图在 t 时刻记录到的光强分布。然后在物体发生热形变的过程中再让可动板以相同的角速度匀速旋转 $\pi/2$, 此时曝光量为

$$E_2(x_0, y_0) = \int_0^{\pi/2\omega} I(x_0 + dx, y_0 + dy; t) dt \tag{3}$$

式中 dx 和 dy 为物点在记录面上的面内位移分量,可表示为

$$dx = dx(x_0, y_0; t), \quad dy = dy(x_0, y_0; t) \tag{4}$$

由(1)和(2)式得总曝光量为

$$E(x_0, y_0) = E_1(x_0, y_0) + E_2(x_0, y_0) = \int_0^{\pi/2\omega} [I(x_0, y_0; t) + I(x_0 + dx, y_0 + dy; t)] dt \tag{5}$$

显然上式可看作无数瞬态双曝光散斑照相的线性叠加。

把散斑图置于图 3 分析系统的输入面上,设经处理后的散斑图具有线性特性,则其振幅透射率与总曝光量成正比,取比例系数为单位 1,可得散斑图的振幅透射率为

$$t(x_0, y_0) = E(x_0, y_0) = \int_0^{\pi/2\omega} [I(x_0, y_0; t) + I(x_0 + dx, y_0 + dy; t)] dt \tag{6}$$

用单位振幅的单色平面波垂直照射散斑图, 则频谱面上光场分布为

$$U(x_f, y_f) = \mathcal{A}[t(x_0, y_0)] = \int_b^{\pi/2\omega} \mathcal{A}[I(x_0, y_0; t) + I(x_0 + dx, y_0 + dy; t)] dt \quad (7)$$

为提取某一时刻的热形变场的信息, 需要在频谱面上与该时刻相对应的衍射晕上开一个合适的滤波孔, 则散斑图的复振幅透过率为

$$U(x_f, y_f)|_{t=t_p} = \int_p^{\frac{\varphi}{2r\omega} + \frac{d}{2k\omega}}^{\frac{\varphi}{2r\omega} - \frac{d}{2k\omega}} \mathcal{A}[I(x_0, y_0; t) + I(x_0 + dx, y_0 + dy; t)] dt \quad (8)$$

式中 d 和 k 分别为四个记录孔径的线度及其到光轴的距离, φ 和 r 分别为滤波孔的线度及其到光轴的距离。经过计算, 不难得到分析系统像面平均光强分布为^[5]

$$\begin{aligned} I(x_i, y_i) = & 2c \left[(S_0 + S_1) + (S_0 + S_2) \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{\pi}{\mathcal{N}} (x_f v_{xp} + y_f v_{yp}) \left| \frac{\varphi}{r\omega} + \frac{d}{k\omega} \right| \right] + \right. \\ & \left. 2S_0 \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi}{\mathcal{N}} (x_f v_{xp} + y_f v_{yp}) \left| \frac{\varphi}{r\omega} + \frac{d}{k\omega} \right| \right] \times \cos \left[\frac{2\pi}{\mathcal{N}} (x_f d_{xp} + y_f d_{yp}) \right] \right] \quad (9) \end{aligned}$$

若在 $(x_f, 0)$ 处滤波, 则有

$$d_{xp} = \begin{cases} N\mathcal{N}/x_f & (\text{亮纹}) \\ \left[N + \frac{1}{2} \right] \mathcal{N}/x_f & (\text{暗纹}) \end{cases} \quad (10)$$

同理在 $(0, y_f)$ 处滤波, 有

$$d_{yp} = \begin{cases} N\mathcal{N}/y_f & (\text{亮纹}) \\ \left[N + \frac{1}{2} \right] \mathcal{N}/y_f & (\text{暗纹}) \end{cases} \quad (11)$$

4 实验结果

取直径为 45 mm 的铝盘试件, 将其加热到 150°C, 然后把它放到垫有隔热层的 V 型槽中自然冷却。当温度降至 120°C 时铝盘温度已趋于均匀, 此时开始记录散斑图。用 1 m He-Ne 激光器作照明光源, 记录介质用天津全息 T 型干版, 相机用焦距为 360 mm 的镜头。

图 4 和图 5 是实验结果。图 4 是衍射晕分布图; 图 5 是在 x 方向进行全场滤波而得的 5 幅等值条纹图。考虑到实验的轴对称性, 在 y 方向的滤波结果同 x 方向一样。

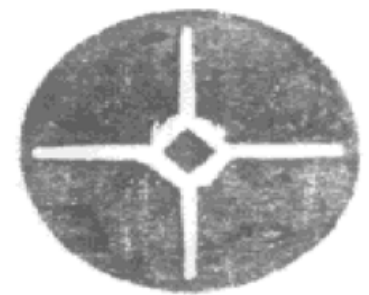


图 4 衍射晕分布图

Fig. 4 Halo distribution

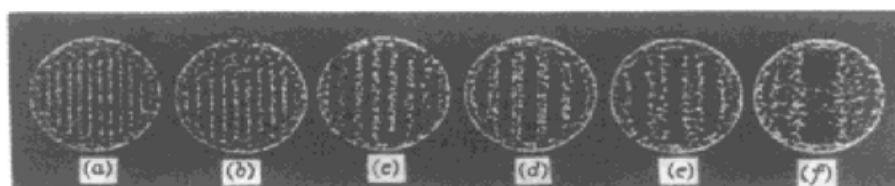


图 5 实验结果

Fig. 5 Experimental results

参 考 文 献

- 1 F. P. Chiang, R. P. Khetan. Strain analysis by one-beam laser speckle interferometry. 2: multiaperture method. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(13) : 2175~ 2186
- 2 Dai Fulong *et al.*. Modern Photomechanics. Beijing : Science Press, 1990, 283~ 290 (in Chinese)
- 3 F. P. Chiang, R. Anastasi, J. Beatty *et al.*. Thermal strain measurement by one-beam laser speckle interferometry. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(16) : 2701~ 2704
- 4 Gu Jie, Shen Yongzhao, Yang Chengchen *et al.*. Rotating aperture method of speckle photography of dynamic problem. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1987, **7**(5) : 394~ 399; **7**(12) : 1069~ 1075 (in Chinese)
- 5 Jiang Jinhua, Chen Bingquan. Stroboscopic speckle photographic method. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1988, **8**(7) : 612~ 618 (in Chinese)

Dynamic Measurement of 2-D Thermal Deformation Fields with a Polarized Scanning Camera

Wang Kaifu

(Mechanics Division, Yangzhou University Institute of Technology, Yangzhou 225009)

Abstract A polarized scanning camera used for dynamic measurement of thermal deformation fields is proposed. The whole dynamic thermal deformation information of an object can be recorded simultaneously on a specklegram in one step, and reappeared continuously during whole-field filtering.

Key words speckle photography, polarized scanning camera, dynamic thermal deformation field