

文章编号: 0258-7025(2007)01-0078-04

# 旋转孔径频闪散斑干涉法用于缺陷检测

陈炳泉

(苏州大学物理系, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 介绍了一种利用旋转孔径频闪散斑干涉法检测缺陷的新方法。该方法是一种非接触式的检测方法, 不受缺陷形状和位置的影响, 能够准确地检测出缺陷的大小和形状。分析了旋转孔径频闪散斑干涉法的基本原理, 给出了散斑图全场滤波分析的平均光强解析式和实验结果。结果表明, 该方法在一张散斑图上能记录物体动态变形的全过程, 并能连续地再现出来, 散斑图的信息量丰富; 在实时滤波分析观察时, 将滤波孔连续进行旋转, 可观察到物体动态变形的全过程, 散斑图的条纹在变化而缺陷的位置不变。

**关键词** 激光技术; 缺陷检测; 孔径旋转频闪散斑干涉; 脉冲激光

**中图分类号** O 438; TN 247 **文献标识码** A

## Defect Measurement Based on Rotating Aperture-Stroboscopic Speckle Interferometry

CHEN Bing-quan

(Department of Physics, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract** A new method of the defect measurement is proposed by use of rotating aperture-stroboscopic speckle interferometry. The advantage of this method is that it is a non-contact measurement, not affected by form or place of the defect, and can accurately measure the size and form of the defect. Principle of rotating aperture-stroboscopic speckle interferometry and its application in defect detect and measurement are proposed. By using the method, defect and its size can be easily detected and measured in spite of the shape and position. The analytic formulas of average intensity of light and experimental result are given. Both theoretical analysis and experimental result show that a single specklegram can accommodate adequate information to replay the whole dynamic process of an object. During the process of replaying dynamic object, the position of defect doesnot change with the strip of speckle photograph by use of rotating filter aperture.

**Key words** laser technique; defect measurement; rotating aperture-stroboscopic speckle interference; pulse laser

## 1 引言

利用散斑干涉技术可对物体的动态过程和振动进行研究, 由于测量的精度、灵敏度都较高, 因而获得了较广泛的应用。Van Haasteren 等<sup>[1]</sup> 提出利用偏振相移技术进行动态变形测量的散斑干涉系统, 但系统结构较复杂; 李鸿琦等<sup>[2]</sup> 提出利用瞬态光学图像采集技术, 实现电子散斑干涉法用于动态过程的测量。但如要对物体的振动进行研究, 对系统就会提出很高同步精度的要求, 而系统的结构就更加

复杂, 这对实际的应用研究带来一定的困难。

本文利用比较简单的旋转孔径和频闪散斑干涉法进行散斑照相, 可对物体进行非接触式缺陷检测的研究。在实验方面, 系统中由于采用了孔径动态扫描器和频闪光调制器<sup>[3]</sup>, 使系统结构较为简单, 而且具有较高的同步精度。该方法将周期性振动问题简化为准静态问题进行研究, 所获得的光强分布被给定相位下面内位移(或离面位移方向导数)的余弦函数所调制, 所以全场分析条纹的可见度好, 且图像的质量较高, 是一种实用可行的方法。

收稿日期: 2006-03-27; 收到修改稿日期: 2006-07-19

作者简介: 陈炳泉(1949—), 男, 江苏苏州市人, 副教授, 主要从事光信息处理与光电检测方面的研究。

E-mail: cbq49@yahoo.com.cn

## 2 实验方法和原理

旋转孔径频闪散斑照相系统的记录光路如图 1 所示。它是在一般的散斑照相的基础上,在照相机前放置一架动态散斑照相扫描器,孔径扫描器采用如图 2 所示的双扇形孔径,  $\beta$  为圆心角。另外在激光器出射的光路中放置了“LSV-1 型激光频闪振动控制测量仪”的频闪光调制器<sup>[3]</sup>。仪器工作时,输出电振荡信号传送给激振器(或扬声器),由激振器(或扬声器)驱动物体按所要求的频率进行振动;同时频闪光调制器将连续激光调制成与物体振动同步的脉冲激光,以该脉冲激光照明振动物体。

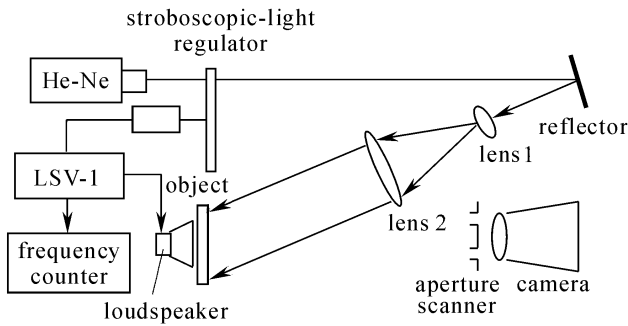


图 1 旋转孔径频闪散斑照相系统的实验光路  
Fig. 1 Experimental setup of rotating aperture-stroboscopic speckle photographic system

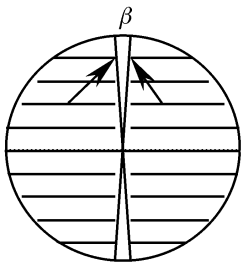


图 2 双扇形旋转孔径  
Fig. 2 Rotating lens of two-fan aperture

### 2.1 频闪散斑图的记录

在记录散斑图时,调节 LSV-1 型激光频闪振动控制测量仪,使激振频率由低到高进行连续变化,同时使照相机前的动态散斑照相扫描器(即双扇形孔径)匀速旋转半圈(180°)。这样,孔径的位置与物体振动的某一频率一一对应。如采用图 3 所示的同步曝光方法,在每个振动周期中,振动物体两次受脉冲激光照射,两次相差 1/2 周期,即对振动物体的某两个瞬态进行长时间的曝光。由于脉冲激光所持续的时间相对于振动周期来讲非常小,这样就可将动态问题简化为准静态问题来讨论。

在旋转孔径频闪散斑照相系统中,设  $(x_0, y_0)$

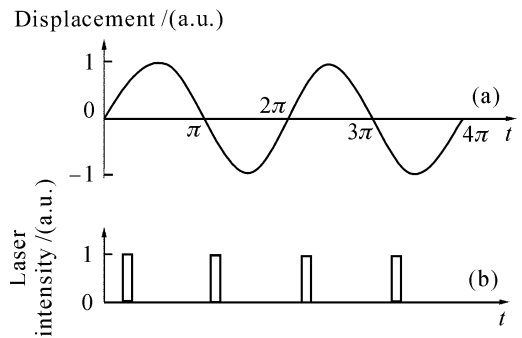


图 3 同步曝光方法  
(a) 振动信号; (b) 激光照明脉冲信号  
Fig. 3 Synchronous exposure method  
(a) vibration signal; (b) laser pulse signal

和  $(x_1, y_1)$  分别为物平面和像平面的坐标。为了讨论简单,设成像系统的放大率  $M = 1$ 。在散斑图记录时,当动态散斑照相扫描器的双扇形孔径的中心位于某一位置时,就记录了振动物体在某一频率的两个相位下的散斑图,像平面  $(x_1, y_1)$  上两个散斑图的光强分别以  $I_{1i}(x_1, y_1, t)$  和  $I_{2i}(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, t)$  表示。孔径旋转半圈所得到的散斑图复振幅透射率可表示为

$$t(x_1, y_1) = \int_0^T [I_{1i}(x_1, y_1, t) + I_{2i}(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, t)] dt, \quad (1)$$

式中  $T$  为孔径旋转半圈曝光的时间,  $dx_1$  和  $dy_1$  为记录平面上相对于物点的像点的位移在  $x$  和  $y$  上的两个分量。设  $t_i = I_{1i}(x_1, y_1, t) + I_{2i}(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, t)$ , 则  $t_i$  可理解为瞬态双曝光散斑图。于是(1)式所代表的散斑图为一系列瞬态双曝光散斑图的线性叠加。

### 2.2 全场滤波分析

记录的散斑图底片经处理后,置于  $4f$  系统中进行全场滤波分析,散斑图置于输入平面  $(x_1, y_1)$ , 在相干光的照明下,散斑图的空间频谱,略去常数因子可用其振幅透射率的傅里叶变换表示,则频谱面  $(x_f, y_f)$  上的光场为

$$U_f(x_f, y_f) = F\{t(x_1, y_1)\} = \int_0^T F\{I_{1i}(x_1, y_1, t) + I_{2i}(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, t)\} dt, \quad (2)$$

式中  $F\{\}$  为傅里叶变换算符。(2) 式为各瞬态双曝光散斑图频谱的线性叠加。

将滤波孔中心放在频谱面  $(x_f, y_f)$  处,此时就

选取  $t_p - \frac{\Delta}{2}$  到  $t_p + \frac{\Delta}{2}$  ( $t_p$  为脉冲激光中央对应的时刻,  $\Delta$  为每次脉冲激光曝光的时间) 内各瞬态散斑图, 则散斑图的复振幅透射率为

$$T_p = \int_{t_p - \frac{\Delta}{2}}^{t_p + \frac{\Delta}{2}} [I_{1i}(x_1, y_1, t) + I_{2i}(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, t)] dt, \quad (3)$$

如物体作面内简谐振动, 采用图 3 的同步曝光方式, 可得像平面上光强分布的平均值<sup>[4,5]</sup>, 可近似表示为

$$\langle I(x_3, y_3) \rangle = 2K \text{sinc}^2 \left[ \frac{2\pi^2}{\lambda f} (x_{f0} dx + y_{f0} dy) \Delta \cos\theta \right] \times \left\{ 2s_0 \left[ 1 + \cos \frac{4\pi}{\lambda f} (x_{f0} dx + y_{f0} dy) \right] + s_1 + s_2 \right\}, \quad (4)$$

式中  $K$  为常数,  $\lambda$  为光波波长,  $f$  为透镜焦距,  $\theta$  为所研究振动体的振动相位,  $x_{f0}, y_{f0}$  为滤波孔的坐标,  $dx, dy$  分别为像  $(x_3, y_3)$  的共轭物点位移的  $x, y$  分量,  $\Delta$  为脉冲白光所持续的时间, 通常  $\Delta$  很小, 而  $\text{sinc}$  函数是慢变化函数,  $\cos$  函数是快变化函数, 可见像平面  $(x_3, y_3)$  上的条纹显示了振动物体在给定相位下的位移(面内振动)分布。由(4)式可见, 对  $t_p$  时刻瞬态频闪散斑图滤波时, 像平面坐标  $(x_3, y_3)$  处的平均光强是以振动物体两个相位下的物点  $(x_1, y_1)$  为中心的艾里斑  $S_1$  和物点  $(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1)$  为中心的艾里斑  $S_2$  的贡献,  $S_0$  为这两个艾里斑的相关面积。

如物体作离面振动, 这时照相机聚焦在物体前方一定距离的平面上, 该平面称为散焦面。这样, 物体作离面振动问题就化为散焦面内散斑振动的问题。如物体作离面的简谐振动, 且按图 3 方式曝光, 则像平面上的平均光强分布为

$$\langle I(x_3, y_3) \rangle = 2K \text{sinc}^2 \left[ \frac{4\pi^2 A}{\lambda f} \left( x_{f0} \frac{\partial W}{\partial x} + y_{f0} \frac{\partial W}{\partial y} \right) \Delta \cos\theta \right] \times \left\{ 2s_0 \left[ 1 + \cos \frac{8\pi A}{\lambda f} \left( x_{f0} \frac{\partial W}{\partial x} + y_{f0} \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] + s_1 + s_2 \right\}, \quad (5)$$

式中  $A$  为散焦量。当滤波孔取在  $x_f$  (或  $y_f$ ) 轴上时, 可获得给定相位下的位移方向导数  $\partial W/\partial x$  (或  $\partial W/\partial y$ ) 在  $x$  (或  $y$ ) 方向分量的等值线。此时亮条纹对应的分量有

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \theta_x = \frac{N\lambda f}{2Ax_f}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \theta_y = \frac{N\lambda f}{2Ay_f}, \quad (7)$$

式中  $N$  为亮条纹的序数。两条亮条纹  $\partial W/\partial x$  相差  $\lambda f/2Ax_f$ , 即为灵敏度。由此可见, 物体作离面振动时, 其测量灵敏度不仅与滤波孔的位置  $(x_f, y_f)$  有关, 而且还与散焦量  $A$  有关, 当散焦量  $A$  增大时, 测量灵敏度就相应提高。

### 3 实验结果

实验中的记录光路如图 1 所示。以 He-Ne 激光照明试件, 激光功率为 40 mW, 同步脉冲激光的占空比为 1/20。双扇形孔径的圆心角  $\beta = 15^\circ$ , 旋转速度约为 0.25 r/min, 照相机的焦距为 360 mm。

试件为直径  $D = 60$  mm, 厚度  $h = 0.45$  mm 的铝圆盘, 通过人工的方法在近中心处制造了一条长大约 14 mm 的肉眼看不见的裂纹。圆盘的周界固定, 用扬声器作为激振器, 置于圆盘的背面进行非接触式激振。激振频率 1000 Hz, 调节 LSV-1 型激光频闪振动控制测量仪的输出激振信号的强度连续变化, 拍摄旋转孔径频闪散斑图进行全场滤波分析。图 4 为该圆盘的实验结果, 8 张照片是在衍射晕上选择了 8 个不同位置所得到的全场条纹图。由图可见, 随着滤波孔沿圆周的连续变化, 由于激振信号的强度的连续变化, 可以看到散斑条纹的数量也连续变化, 全场条纹图反映了与其相对应的试件瞬时状态的信息, 条纹的不连续处清楚地显示了裂纹的位置、方向和长度。如在现场进行实时观察, 可观察到动态变化的过程, 条纹在变化而裂纹的位置不变。中间几张照片中的裂纹的方向与等值条纹接近垂直, 清楚地显示了裂纹的位置、方向和长度。而左、右四张照片, 由于裂纹的方向与等值条纹近似平行, 则裂纹显示不清楚。

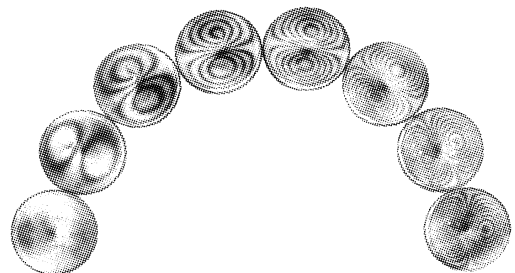


图 4 铝圆盘缺陷检测的实验结果  
Fig. 4 Experimental result for defect measurement of aluminium disc

## 4 结 论

由理论分析和实验结果表明,旋转孔径频闪散斑干涉法用于非接触式缺陷检测的研究是一种有效的方法。它具有如下优点:

1) 该方法能将物体动态全过程的缺陷信息变化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,使衍射晕的光能分布较为合理,这样能得到高衬比的等值条纹图。

此外,如果要合理设计记录系统中的扇形孔径,圆心角在  $15^\circ$  以内,平均效果不明显,若取大了,则平均效果变大,条纹的衬度下降。旋转孔径频闪散斑干涉法在无损检测领域或其他动态检测方面具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 A. J. P. Van Haasteren, H. J. Frankena. Real-time displacement measurement using a multicamera phasestepping speckle interferometer [J]. *J. Appl. Opt.*, 1994, **33**(19):4137~4142
- 2 Li Hongqi, Tong Jingwei, Wang Shibin *et al.*. Several measuring methods for dynamic photomechanics and their development [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1996, **11**(4):422~428  
李鸿琦,佟景伟,王世斌等. 动态光力学多种测试方法研究及其进展[J]. *实验力学*, 1996, **11**(4):422~428
- 3 Chen Bingquan, Jiang Jinhua. The application of model LSV-1 laser-stroboscopic vibration controlling and measuring instrument [J]. *Appl. Laser*, 1989, **9**(1):21~24  
陈炳泉,姜锦虎. LSV-1 型激光频闪振动控制测量仪[J]. *应用激光*, 1989, **9**(1):21~24
- 4 Chen Bingquan, Cheng Chuanfu. Investigation on the rotating aperture methods of white-light speckle photography [J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, **8**(3):281~283  
陈炳泉,程传福. 旋转孔径白光散斑照相法的研究[J]. *光学学报*, 1988, **8**(3):281~283
- 5 Jiang Jinhua, Chen Bingquan. Stroboscopic speckle photographic method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, **8**(7):612~617  
姜锦虎,陈炳泉. 频闪散斑照相法[J]. *光学学报*, 1988, **8**(7):612~617