

文章编号: 0253-2239(2004)11-1566-5

# 频闪剪切散斑干涉术的研究

陈炳泉

(苏州大学物理系, 苏州 215006)

**摘要:** 提出了一种用于振动研究的方法——频闪剪切散斑干涉照相法。该方法由于采用了剪切镜,能得到较为精确的散斑剪切图,提高了测量的精度,是一种用于振动研究较为理想的散斑照相的新方法。讨论了频闪剪切散斑干涉术的基本原理,给出了频闪剪切散斑图的全场分析的平均光强分析的解析式,并给出了实验结果。理论和实验都表明频闪剪切散斑干涉照相法要优于时间平均剪切散斑干涉照相法。该方法在全场滤波分析时,能给出任一瞬时物体振动信息,得到清晰的、高衬比的全场干涉条纹图,是一种实用可行的方法。

**关键词:** 物理光学; 频闪; 剪切散斑干涉术; 脉冲激光

中图分类号: O483 文献标识码: A

## Study of Stroboscopic Shearing Speckle Interferometry

Chen Bingquan

(Department of Physics, Suzhou University, Suzhou 215006)

(Received 9 September 2003; revised 9 May 2004)

**Abstract:** Stroboscopic shearing speckle interferometry — a method for investigation of vibrations is proposed. While the shearing lens is used, the speckle shearing picture is performed, to improve the precision of measuring. The fundamental principle of stroboscopic shearing speckle interferometry is discussed. For a specklegram of stroboscopic shearing in whole field analysis, the analytic formula of the distribution of the mean intensity of light and experimental result are given. Both theory and experiments show that stroboscopic shearing speckle interferometry is obviously superior to time-average method. In the whole field filtering, the information of vibration at any moment can be easily obtained, and images obtained are quite clear.

**Key words:** physical optics; stroboscopic; shearing speckle interferometry; 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测量,由于测量的精度、灵敏度都较高,因而获得了较广泛的应用。文献[1,2]分别提出过利用偏振相移技术进行动态变形测量的散斑干涉系统和剪切散斑干涉系统,但系统结构较复杂;文献[3]提出过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。对于物体振动的研究,对系统提出了很高的同步精度的要求,以上各系统的结构就更加复杂,传统的是采用时间平均散斑照相法,由

于时间平均散斑照相法不能得到在给定相位下的位移(面内振动)和位移方向导数(离面振动)的振幅分布,而且得到的等值条纹图的可见度较差,这给实际应用带来一定的困难。文献[4,5]介绍了离焦成像的频闪散斑照相法,为振动研究提供了一种新方法,但在实际应用中,因离焦量很难精确测量<sup>[6]</sup>,致使各剪切像之间的剪切量也不能精确地确定,这样,测量结果就会存在较大的误差。

本文利用比较简单的频闪剪切散斑干涉照相系统,对物体进行振动的研究。实验方面,系统中由于采用了剪切镜元件和频闪光调制器<sup>[7]</sup>,使系统结构较为简单,具有很高的同步精度的要求,且能得到较为精确的剪切量,避免了离焦成像法的测量误差,是一种用于振动研究较为理想的散斑照相的新方法。该

E-mail: cbq49@yahoo.com.cn

收稿日期:2003-09-09;收到修改稿日期:2004-05-09

方法将周期性振动问题简化为准静态问题进行研究, 所获得的物像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, 全场分析条纹的可见度要优于时间平均剪切散斑照相法, 且还可以得到不同相位下的振幅分布。频闪剪切散斑干涉法用于振动的研究, 能得到全场的条纹图, 且图像的质量较高, 测量误差小, 是一种实用可行的方法。

## 2 实验方法和原理

图 1 为频闪剪切散斑干涉法照相系统的拍摄光

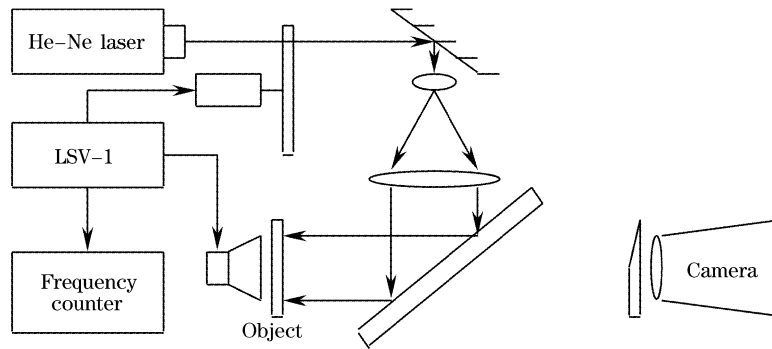


Fig. 1 The experimental system for stroboscopic shearing speckle interferometry

### 2.1 频闪剪切散斑图的记录

图 2 为频闪剪切散斑干涉照相的示意图。

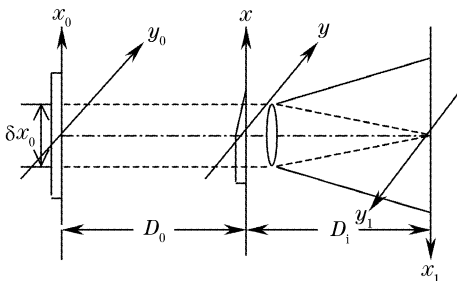


Fig. 2 Imaging optical set-up of stroboscopic shearing specklegram

由于光楔的作用, 不难得到物平面上的剪切量为

$$\delta x_0 = D_0(\mu - 1)\alpha, \quad (1)$$

式中  $D_0$  为物到光楔的距离(近似为物距),  $\mu$  为光楔的折射率,  $\alpha$  为光楔的楔角。在拍摄散斑图时, 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, 观察物体振动的振幅, 先调到固有频率附近, 且使激振信号适中。如果采用图 3 所示的同步曝光方法, 其中图 3(a) 为激振信号曲线, 图 3(b) 为激光照明的脉冲波型, 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, 即对振动物体的两个瞬态进行曝光。由于脉冲激光所持续的时间相对于振动周期来讲非常小

路。它是在一般的剪切散斑干涉照相系统的基础上, 在激光射出的光路中增加了一台“LSV-1 型激光频闪振动控制测量仪”的频闪光调制器<sup>[7]</sup>。仪器工作时, 输出激振信号传送给激振器, 由激振器驱动物体按所要求的频率进行振动; 同时, 该仪器的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, 以该脉冲激光照明物体进行频闪剪切散斑照相。另外, 频闪光调制器还可调节脉冲激光锁定在所要求振动信号的任一相位上, 相位可在  $0 \sim 360^\circ$  范围内连续可调。

(实验中取  $T_0/20, T_0$  为振动周期), 这样就可将动态问题简化为准静态问题来讨论。

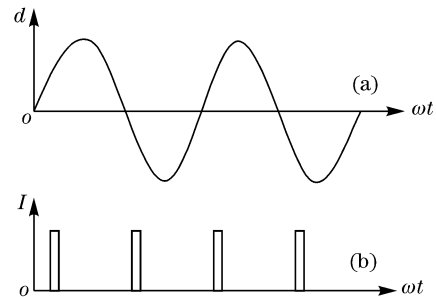


Fig. 3 (a) Vibration signal, (b) laser pulse signal

为了讨论简单, 设成像系统的放大率  $M=1$ 。在频闪剪切散斑图的记录时, 对振动物体在某一特定频率的两个相位下进行曝光, 每次曝光时间均为  $\Delta$  ( $\Delta = T_0/20$ ), 于是得到散斑图的复振幅透射率为

$$t(x_1, y_1) = \int_{t_p - \Delta/2}^{t_p + \Delta/2} [f(x_1, y_1) + f(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1)] dt, \quad (2)$$

式中  $\Delta$  为单个脉冲激光持续时间,  $t_p$  为脉冲激光中央所对应的时刻。设

$$t_i = f(x_1, y_1) + f(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1),$$

其物理意义为瞬态双曝光散斑图。因此(2)式可视为一系列瞬态双曝光散斑图函数  $t_i$  的线性叠加, 全

场滤波为对一系列瞬态双曝光散斑图进行滤波。

## 2.2 全场滤波分析

频闪剪切散斑图的全场滤波分析,是将记录的散斑图底片经处理后,置于图 4 所示的  $4f$  系统中进行全场滤波分析。散斑图置于物平面  $(x_1, y_1)$  上,在相干光照明之下,散斑图空间频谱,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

$$U_f(x_f, y_f) = \mathcal{F}\{t(x_1, y_1)\}, \quad (3)$$

式中  $\mathcal{F}\{\}$  为傅里叶变换算符。在滤波分析系统中,由傅里叶光学成像的物-像关系可知,光学系统所成像函数为光学系统的脉冲响应函数(或点扩展函

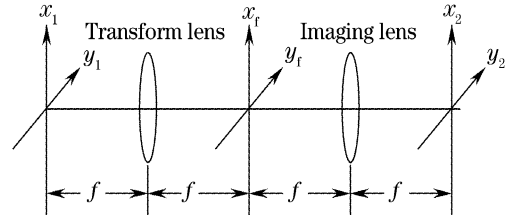


Fig. 4  $4f$  optical filtering system

数)与几何光学所预言像的卷积。设滤波孔为双孔的圆孔径,对于瞬态双曝光散斑图,像平面  $(x_2, y_2)$  处的光波复振幅为<sup>[8]</sup>

$$U_i(x_2, y_2) = U_1(x_2, y_2) + U_2(x_2, y_2), \quad (4)$$

其中

$$U_1(x_2, y_2) = \left[ b(x_1, y_1) + b(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \delta\right) \right] \otimes h_{f1}(x_1, y_1),$$

$$U_2(x_2, y_2) = U_1^*(x_2, y_2)$$

式中  $\otimes$  表示卷积运算,上标  $*$  表示复共轭。 $(x_1, y_1)$  与  $(x_2, y_2)$  互为共轭点,而脉冲响应为圆域函数,因而卷积为方括号中函数在艾里斑内积分。如果把  $(x_1, y_1)$  及  $(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1)$  为中心的艾里圆之间重叠面积记作  $s_0$ ,而以  $(x_1, y_1)$  为中心的艾里圆剩余面积记作  $s_1$ ,以  $(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1)$  为中心的艾里圆剩余面积记作  $s_2$ ,则上述卷积可改写为<sup>[8]</sup>

$$U_1(x_2, y_2) = U_{10}(x_2, y_2) + U_{11}(x_2, y_2) + U_{12}(x_2, y_2), \quad (5)$$

其中

$$U_{10}(x_2, y_2) = \left\{ 1 + \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\delta - \frac{x_{f0}}{f} dx_1\right)\right] \right\} \iint_{s_0} b(x_1, y_1) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda f} x_1 x_{f0}\right) dx_1 dy_1$$

$$U_{11}(x_2, y_2) = \iint_{s_1} b(x_1, y_1) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda f} x_1 x_{f0}\right) dx_1 dy_1,$$

$$U_{12}(x_2, y_2) = \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\delta - \frac{x_{f0}}{f} dx_1\right)\right] \iint_{s_2} b(x_1, y_1) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda f} x_1 x_{f0}\right) dx_1 dy_1,$$

上式中  $\delta$  为相对相位差,  $x_{f0}$  为滤波孔沿剪切方向( $x$  方向)的参量,对于频闪剪切散斑图,像平面上总光场分布为

$$U(x_2, y_2) = \int_{t_p - \Delta/2}^{t_p + \Delta/2} U_i(x_2, y_2) dt = \int_{t_p - \Delta/2}^{t_p + \Delta/2} [U_1(x_2, y_2) + U_2(x_2, y_2)] dt, \quad (6)$$

若对  $dx, dy$  取一级近似。

$$\begin{cases} dx(x_1, y_1, t) = dx_p(x_1, y_1, t_p) + \frac{\partial dx}{\partial t} \Big|_{t=t_p} (t - t_p) = dx_p + v_{xp}(t - t_p), \\ dy(x_1, y_1, t) = dy_p + v_{yp}(t - t_p). \end{cases} \quad (7)$$

在频闪剪切散斑照相法中,通常占空比  $K = \Delta/T_0$  较小,即  $\Delta$  很小,所以可近似地把  $U_{i0}, U_{i1}$  和  $U_{i2}$  当作与时间无关,分别记为  $U_{00}, U_{01}$  和  $U_{02}$ 。经计算可得到像平面  $(x_2, y_2)$  上总光场分布为

$$U(x_2, y_2) = U_0(x_2, y_2) \Delta \left\{ 1 + \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\delta - \frac{x_{f0}}{f} dx_1\right)\right] \operatorname{sinc}\left[\frac{\pi}{\lambda} \left(\delta - \frac{x_{f0}}{f} v_{xp}\right) \Delta\right] \right\} + U_1(x_2, y_2) \Delta + U_2(x_2, y_2) \Delta \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\delta - \frac{x_{f0}}{f} dx_1\right)\right] \operatorname{sinc}\left[\frac{\pi}{\lambda} \left(\delta - \frac{x_{f0}}{f} v_{xp}\right) \Delta\right], \quad (8)$$

利用统计平均计算可得到像平面上的平均光强分布为

$$\langle I(x_2, y_2) \rangle = \langle |U(x_2, y_2)|^2 \rangle, \tag{9}$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 表示统计平均,进一步计算可得

$$\begin{aligned} \langle I(x_2, y_2) \rangle = & 2c \left\{ (s_0 + s_1) + (s_0 + s_2) \operatorname{sinc}^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} \left( \delta - \frac{x_{f_0}}{f} \nu_{xp} \right) \Delta \right] + \right. \\ & \left. 2s_0 \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi}{\lambda} \left( \delta - \frac{x_{f_0}}{f} \nu_{xp} \right) \Delta \right] \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \left( \delta - \frac{x_{f_0}}{f} dx_1 \right) \right] \right\}, \end{aligned} \tag{10}$$

(10)式中  $c$  为常数,通常  $\Delta$  很小, sinc 函数是慢变化函数, cos 函数是快变化函数,可见像平面上条纹显示了振动物体在给定相位下的位移(面内振动)或位移方向导数(离面振动)的分布。由上式可见,对  $t_p$  时刻的瞬态双曝光散斑图进行滤波时,像平面坐标  $(x_2, y_2)$  处的平均光强是以变形前物点  $(x_1, y_1)$  为中心的艾里圆剩余面积  $s_1$  和  $t_p$  瞬时动态变形后物点  $(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1)$  为中心的艾里圆剩余面积  $s_2$  的贡献,  $s_0$  为这两个艾里圆的相关面积。

条纹的可见度为

$$\kappa = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2 \left| \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi}{\lambda} \left( \delta - \frac{x_{f_0}}{f} \nu_{xp} \right) \Delta \right] \right| s_0}{s_0 + s_1 + (s_0 + s_2) \operatorname{sinc}^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} \left( \delta - \frac{x_{f_0}}{f} \nu_{xp} \right) \right]}. \tag{11}$$

如果脉冲激光宽度无限窄,即  $\Delta \rightarrow 0$  时,则(10)式和(11)式可简化为下面的简单形式:

$$\begin{aligned} \langle I(x_2, y_2) \rangle = & 2c \left[ 2s_0 + s_1 + s_2 + 2s_0 \cos \frac{2\pi}{\lambda} \left( \delta - \frac{x_{f_0}}{f} dx_1 \right) \right] = \\ & 2c \left\{ s_1 + s_2 + 2s_0 \left[ 1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} \left( \delta - \frac{x_{f_0}}{f} dx_1 \right) \right] \right\} = \\ & 4cs \left\{ 1 + \frac{s_0}{s} \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \left( \delta - \frac{x_{f_0}}{f} dx_1 \right) \right] \right\}, \end{aligned} \tag{12}$$

$$\kappa = \frac{2s_0}{2s_0 + s_1 + s_2} = \frac{s_0}{s}, \tag{13}$$

它与双曝光剪切散斑干涉法的全场分析具有相同的光强分布<sup>[8]</sup>。

### 3 实验结果

实验中的记录光路装置如图 1 所示。以 He-Ne 激光照明试件,激光功率为 40 mW,同步频闪光的占空比为 1/20,照相机的焦距为 360 mm。

#### 3.1 圆盘作离面振动测量不同相位下的振幅分布

试件为直径  $D=150$  mm,厚度  $t=0.45$  mm 的铝圆盘。圆盘的周界固定,实验中用扬声器作为激振器,置于圆盘的背面进行非接触式激振。适当调整激振信号的频率和强度,使圆盘处于固有振动频率附近振动,  $f_{01}=204$  Hz,拍摄频闪剪切散斑图进行全场滤波分析。图 5 为该圆盘在剪切方向( $x$  方向)上滤波的全场照片,从图 1(a)~图 1(d)振动相位依次由小到大,其它实验条件都相同。

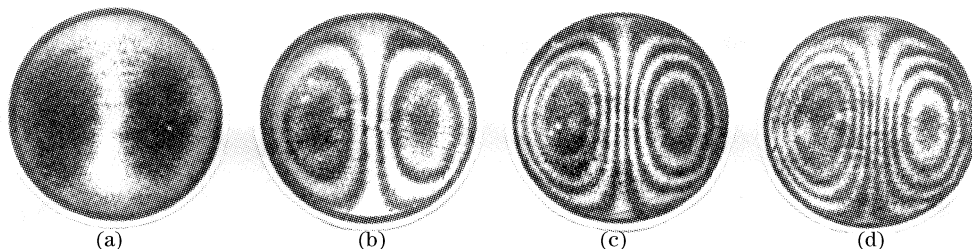


Fig. 5 Experimental results for an aluminium disc of non-contact excitation vibration by use of rotating stroboscopic shearing speckle interferometry with different phase angle

#### 3.2 圆盘作高阶振动的全场分析

图 6 是上述周界固定圆盘在不同频率下作离面振动的全场分析散斑图。图 6(a)圆盘振动的频率  $f_{01}=204$  Hz,图 6(b)振动的频率  $f_{02}=800$  Hz。由图

可见,对于不同的频率,圆盘的振幅分布是不一样的。

图 7 是该圆盘采用时间平均剪切散斑照相法所得到的全场条纹图。图 7(a)  $f_{01}=204$  Hz,图 7(b)  $f_{02}=800$  Hz。由图 7 与图 6 对比可知,时间平均剪

切散斑照相所得到散斑条纹的可见度明显较差。

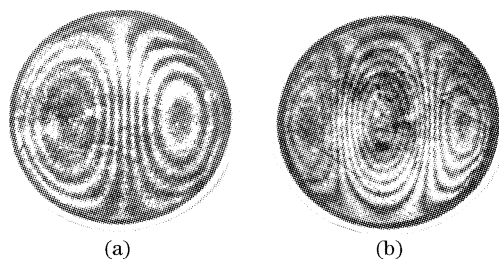


Fig. 6 Rotating stroboscopic shearing speckle interferometry.

(a)  $f=204$  Hz, (b)  $f=800$  Hz

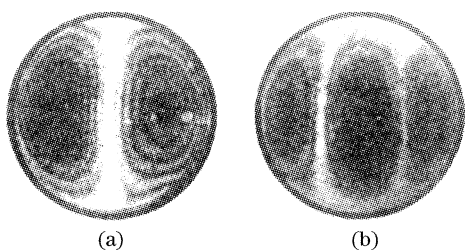


Fig. 7 Time average speckle photographic method.

(a)  $f=204$  Hz, (b)  $f=800$  Hz

**结论** 由以上的理论分析和实验证明,频闪剪切散斑干涉法的条纹可见度要优于时间平均剪切散斑干涉法的条纹可见度,且不随振幅的增加而迅速下降,因此测量范围较大。它可研究振动物体在任一相位下的各位移分量分布或离面位移方向偏导数的分布。对于大振幅的振动物体,可以改变在相位较小的情况

下进行频闪剪切散斑照相,同样能得到较满意的结果。所以频闪剪切散斑干涉法对振动物体的研究是一种实用可行的方法。

### 参 考 文 献

- 1 Van Haasteren A J P, Frankena H J. Real-time displacement measurement using a multicamera phasestepping speckle interferometer. *J. Appl. Opt.*, 1994, **33**(19): 4137~4142
- 2 Weijers A L, Van Brug H, Frankena H J. Real time deformation measurement using a transportable shearography system. *Proc. SPIE*, 1996, **2921**: 76~81
- 3 Li Hongqi, Tong Jingwei, Wang Shibin. Several measuring methods for dynamic photomechanics and their development. *J. Experimental Mechanics (实验力学)*, 1996, **11**(4): 422~428 (in Chinese)
- 4 Jiang Jinhu, Chen Bingquan. Stroboscopic speckle photographic method. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1988, **8**(7): 612~617 (in Chinese)
- 5 Chen Bingquan. Measurement of resonant frequencies of objects by rotating aperture-stroboscopic speckle photographic method. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2002, **22**(11): 1358~1361 (in Chinese)
- 6 Zhu Yiqing, Ling Dehong, Wang Ce. Speckle shearing interferometry with a normal grating. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1985, **5**(11): 1018~1025 (in Chinese)
- 7 Chen Bingquan, Jiang Jinhu. The application of model LSV-1 laser-stroboscopic vibration controlling and measuring instrument. *Applied Laser (应用激光)*, 1989, **9**(1): 21~24 (in Chinese)
- 8 Chen Jiabi, Zhou Weizheng, Pei Min. Statistical analysis of shearing speckle interferometry. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1989, **9**(4): 333~340 (in Chinese)