

# 旋转孔径散斑照相逐点分析法

顾杰 沈永昭  
(苏州大学物理系)

## 提 要

本文提出了旋转孔径散斑照相的逐点分析法,其杨氏花纹一般来说不是等距离的直条纹,而是与位移的动态过程相联系的曲线条纹。本文解释了这种条纹的意义,给出了理论分析和实验证明。

关键词: 旋转孔径法散斑照相。

## 一、引 言

通常的散斑干涉计量有逐点分析法和全场分析法。逐点分析法的精度较高,而全场分析法能简捷地反映场的性质。文献[1,2]介绍了转孔散斑的全场分析法,现在介绍转孔散斑的逐点分析法。一般的双曝光散斑图上一点只记录一个确定的位移,其杨氏条纹是等间距直条纹,由条纹的间距和取向可求出位移矢量。转孔散斑照相的散斑图上一点记录了该点动态过程的全部位移信息,其杨氏条纹就不再是直条纹,而是较为复杂的曲线条纹,如图8和10所示。

## 二、原 理

图1是转孔散斑照相的成像光路。以连续激光照明被测动态物体,将装有基本孔径的旋转装置紧靠成像透镜前。孔径匀速转动,使物体的振动和孔径的转动同步(非周期性动态问题可看作为只有一个周期的振动),拍摄物体的动态散斑图,而后在图2的系统中进行逐点分析,在接收屏上得到被杨氏条纹调制的衍射晕。为使晕中各处都有光强分布,采用图3a所示的基本孔径。若此孔径不动,所摄单曝光散斑图的晕是一很窄的亮条,如图3(b)的照片所示。若此孔径旋转半周(或半周的整数倍),所摄散斑图的晕为一圆形亮盘,如图3(c)的

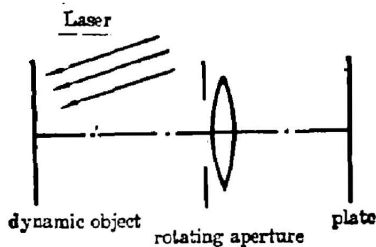


Fig. 1 Imaging system

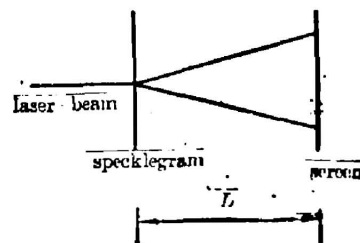


Fig. 2 Optical arrangement for point-wise analysis

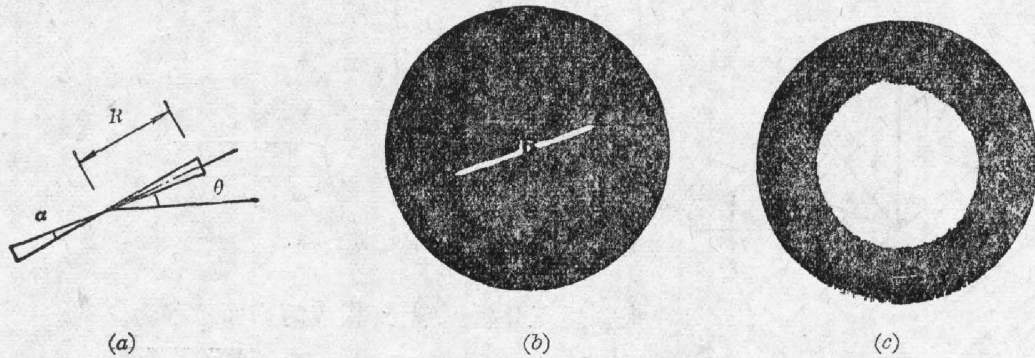


Fig. 3 (a) Two-fan aperture (b) Diffraction halo of a specklegram photographed by two-fan aperture (c) Diffraction halo of a specklegram photographed by rotating aperture

照片所示。采用与文献[1]相同的曝光过程，当孔径位于某一角度时，记录下动态过程中某一位移场的双曝光散斑图，逐点分析时在相应角度的晕中有杨氏条纹出现。孔径在各不同角度记录下动态过程中各时刻的位移场，由于位移是连续变化的，各角度的杨氏条纹的间距和方向都随角度连续变化，这些杨氏条纹编织成转孔散斑法的杨氏花纹，如图 8、图 10 所示，它们是形式多样的中心对称条纹。

图 4(a) 是根据一张杨氏花纹照片描出的图案。图中  $x_0$ 、 $y_0$  是固定坐标系， $x$ 、 $y$  是动坐标系，记录时孔径轴线和  $x$  轴重合，其角位置由  $\theta$  表示。这样摄得的散斑图称为“ $x$ -散斑图”，其逐点分析条纹称为“ $x$ -杨氏花纹”。 $x$  轴与各条纹相交，各交点的间距  $\Delta_{\theta x}$  都相等，可在图中直接测量到。类似地，用轴线与  $y$  轴重合的孔径拍摄另一张散斑图，称它为“ $y$ -散斑图”，其逐点分析条纹如图 4(b) 所示，称为“ $y$ -杨氏范纹”。 $y$  轴与各条纹相交的间隔  $\Delta_{\theta y}$  也可直接测得。

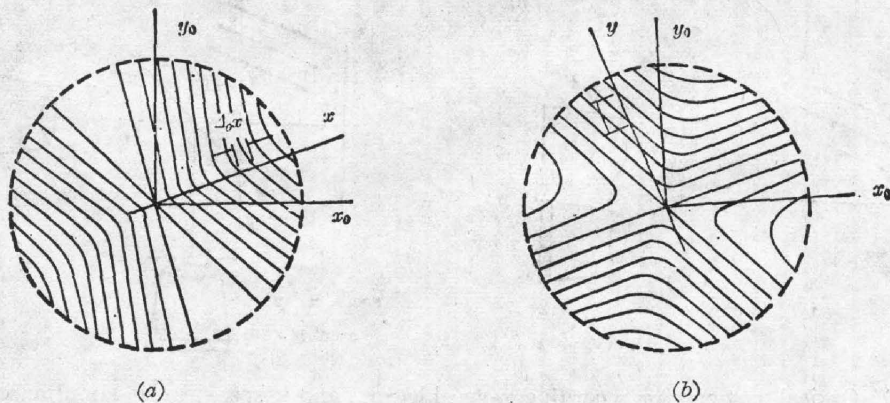


Fig. 4 (a)  $x$ -Young's pattern (b)  $y$ -Young's pattern

为了由测得的  $\Delta_{\theta x}$  和  $\Delta_{\theta y}$  求出需要的位移矢量  $d_{\theta}$ ，可以设想用通常的全孔径双曝光散斑照相法记录同一时刻的位移场，它在一同一点的杨氏条纹如图 5 中虚线图内的直条纹所示。图 5 中  $x$  和  $y$  轴上的点子表示实际存在于  $x$ -杨氏花纹和  $y$ -杨氏花纹上的条纹元素，即图 4 中  $x$  和  $y$  轴和各杨氏条纹的交点。直条纹的间距和法向角度表示为  $\Delta_{\theta}$  和  $\varphi_{\theta}$ ，由图中  $\triangle OAB$  和  $\triangle OCD$  得

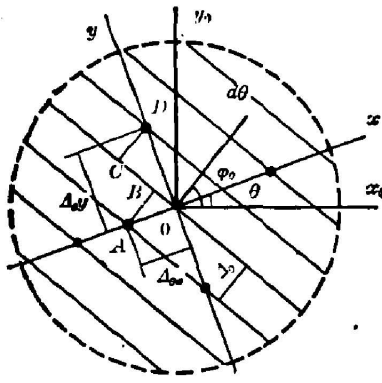


Fig. 5 Figure for principle explanation

$$\Delta_{\theta_x} \cos(\varphi_0 - \theta) = \Delta_{\theta}, \tag{1}$$

$$\Delta_{\theta_y} \sin(\varphi_0 - \theta) = \Delta_{\theta}, \tag{2}$$

由此两式可解得

$$\frac{1}{\Delta_{\theta}} = \sqrt{\frac{1}{\Delta_{\theta_x}^2} + \frac{1}{\Delta_{\theta_y}^2}}, \tag{3}$$

$$\varphi_0 = \theta + \arctg \frac{\Delta_{\theta_x}}{\Delta_{\theta_y}}. \tag{4}$$

根据逐点分析原理<sup>[3]</sup>, 相应的物面位移为

$$d_{\theta} = \frac{\lambda L}{M \Delta_{\theta}} = \frac{\lambda L}{M} \sqrt{\frac{1}{\Delta_{\theta_x}^2} + \frac{1}{\Delta_{\theta_y}^2}}, \tag{5}$$

式中  $M$  为放大率。上述(4)、(5)两式确定了位移矢量  $d_{\theta}$  的方向和大小, 它们都由  $x$  和  $y$  杨氏花纹测得的  $\Delta_{\theta_x}$  和

$\Delta_{\theta_y}$  决定。随着  $\theta$  的变化, 可以求得任意时刻(相位)的位移。

类似于文献[1], 容易导出

$$\left. \begin{aligned} d_{\theta}(x_0, y_0) &= d(x_0, y_0, n\theta + \theta_0 + m\pi) - d(x_0, y_0, nm\theta + m\theta_0), \\ m=1 \text{ 时 } \quad n &= 1, 3, 5, \dots \\ m=0 \text{ 时 } \quad n &= 2, 4, 6, \dots \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

式中  $n$  是物体振动频率与孔径转动频率之比, 非周期性动态问题中取  $n$  为 1 或 2。右端  $d$  的第三个宗量是振动的相位,  $\theta_0$  是初相。在平面问题中  $d$  是被测点的位移, 在散焦散斑中,  $d$  是象面共轭面上客观散斑的位移<sup>[4]</sup>。(4)、(5)、(6)式确定了被测点任意相位(时刻)的位移。

如果动态过程的重复性好, 可在图 1 光路中分别拍摄  $x$ -散斑图和  $y$ -散斑图。如果动态过程重复性差, 则必须同时拍摄  $x$ -散斑图和  $y$ -散斑图, 这时可用图 6(a)或图 6(b)的光路。

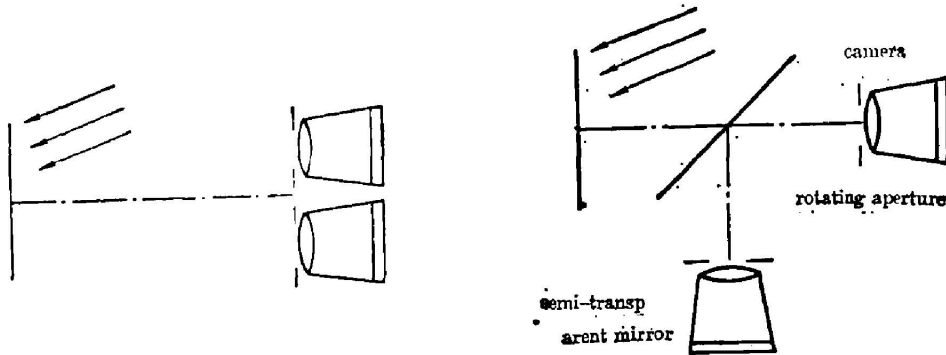


Fig. 6 Optical systems for recording  $x$ -specklegram and  $y$ -specklegram simultaneously

### 三、实 验

如图 7 所示圆盘, 使其绕中心作周期性摆动, 取  $n=1$ 。图 8 是距转动中心在 10、20、30 mm 处的  $x$ 、 $y$ -杨氏花纹。图 9 中的曲线是根据千分表测量值, 经换算后作出的位移——相位关系。“十”字是散斑分析结果, 两者的相对误差不超过 3%。

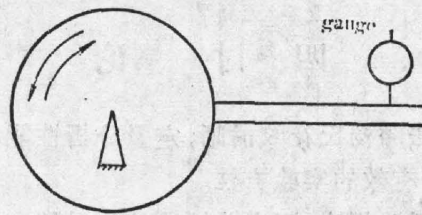


Fig. 7 Oscillating disc

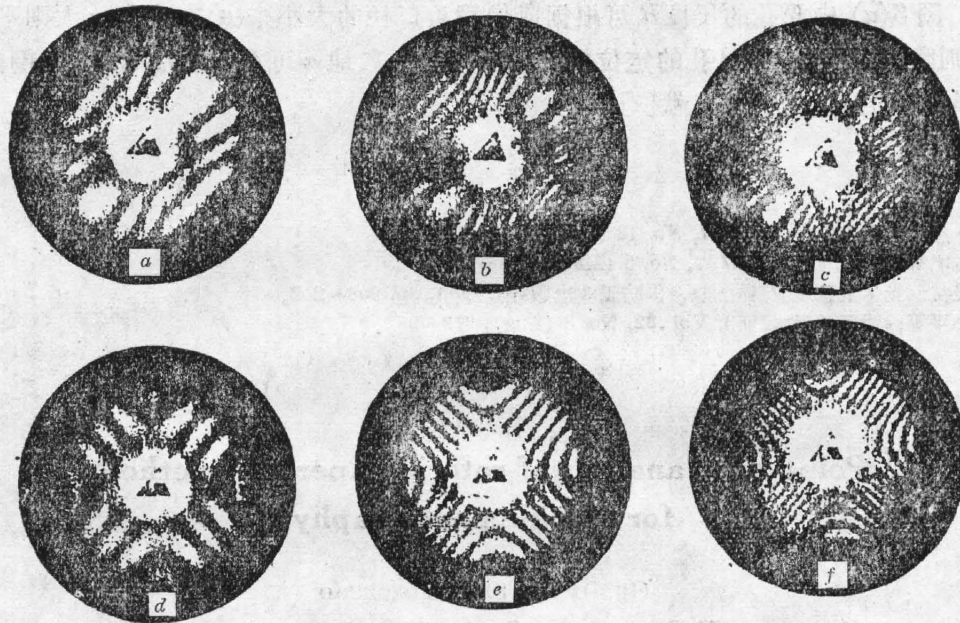


Fig. 8 Young's patterns of the oscillating disc

- a. *x*-Young's pattern (10 mm);
- b. *x*-Young's pattern (20 mm);
- c. *x*-Young's pattern (30 mm);
- d. *y*-Young's pattern (10 mm);
- e. *y*-Young's pattern (20 mm);
- f. *y*-Young's pattern (30 mm)

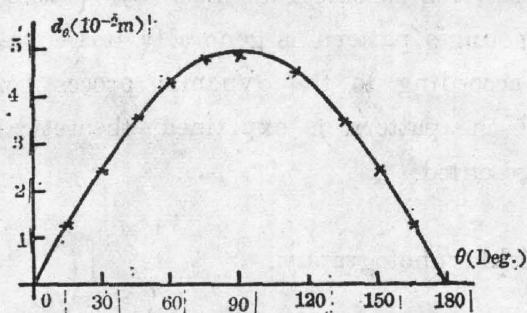


Fig. 9 Speckle analysis compared with gauge analysis speckle "+" gauge "-"

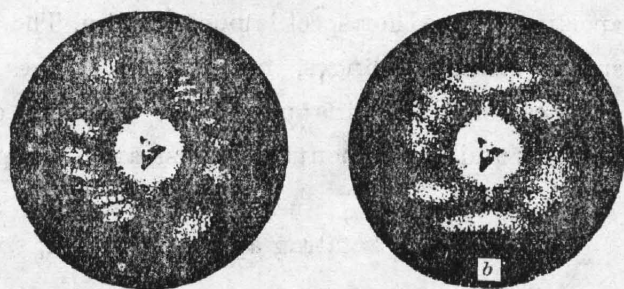


Fig. 10 Young's patterns of clamped circular plate

图 10 是另一个实验的照片。一周边固定的圆板，一侧加气压，在放气减压过程中拍摄其散焦散斑图。图 10(a)和图 10(b)分别是同一点的 *x*-杨氏花纹和 *y*-杨氏花纹。

## 四、讨 论

(1) 转孔散斑逐点分析法的杨氏花纹清晰, 定量分析性能好, 适用于各种类型的周期性和非周期性动态问题, 是一个有效的实验方法。

(2) 与转孔散斑全场分析法相比, 逐点分析法的测量精度较高, 能在二幅杨氏花纹中显示出任意点的位移变化过程, 其不便之处是必须拍摄两张散斑图, 才能给出完整的信息。

(3) 图 3(a) 中双孔的尺度  $R$  可根据成像镜头口径的大小来决定, 扇角  $\alpha$  大则平均效应大,  $\alpha$  小则曝光时间长, 并且孔的定位精度要求高。一般地  $\alpha$  可在  $\pi/50 \sim \pi/12$  范围内选用, 有关平均效应的讨论, 参考文献 [1]。

### 参 考 文 献

- [1] 顾 杰等;《光学学报》, 1987, 7, No. 12 (Dec), 1069~1075.
- [2] 顾 杰等;《光学学报》, 1987, 7, No. 5 (May), 394~399.
- [3] 于美文;《光学全息及信息处理》, (国防工业出版社), 1983, pp. 208~212.
- [4] 伍小平等;《物理学报》, 1983, Vol. 32, No. 8 (Aug), 973~981.

## Point-wise analysis of rotating aperture method for speckle photography

GU JIE AND SHEN YONGZHAO

(The Department of Physics, Suzhou University)

(Received 26 February 1987)

### Abstract

In this paper, we make a point-wise analysis of a specklegram made by rotating aperture method for speckle photography. The Young's pattern is generally not equal spaced straight fringes, but curved fringes according to the dynamic process of displacements. In this paper, the meaning of the pattern is explained, theoretical analysis and experimental demonstration are presented.

**Key words:** rotating aperture method; speckle photography.