

# 研测动态问题的旋转孔径散斑照相法 II: 矩位、平四位、直三位孔径

顾杰 沈永昭 杨臣诚

(苏州大学物理系)

周步新

(苏州市第十八中学)

## 提 要

本文提出了旋转孔径散斑照相法中三种新颖的基本孔径: 矩位孔、平四位孔和直三位孔, 进行了理论分析和实验证明。采用新孔径拍摄散斑照相, 散斑信息利用率高, 衍射晕能量分布合理, 信噪比提高, 因而散斑条纹清晰度得到改善, 相应的实验误差减小。

关键词: 散斑照相, 旋转孔径, 衍射晕, 基本孔径, 菱位孔, 矩位孔, 平四位孔, 直三位孔。

## 一、引 言

文献[1]提出了旋转孔径散斑照相法的基本原理, 介绍了四小扇孔(下称菱位孔)作为基本孔径的方法。转孔法能应用于研测动态的各种类型的周期性或非周期性问题, 是一个有力的实验工具。用菱位孔进行散斑照相时, 其衍射晕是三个晕环(和一个中央亮斑)。中圈和外圈晕都有用, 内圈晕因信息交迭而无用。然而, 进一步讨论表明, 恰恰是内圈晕的能量密度是中圈或外圈的16倍以上, 可见大部分能量分布在无用晕圈上。本文提出的矩位孔, 其衍射晕也是三圈环, 虽然也是中圈和内圈晕有用, 外圈晕无用, 但各圈晕的能量密度较为接近, 从而大大提高了有用晕环的能量。但是菱位孔和矩位孔都有一个晕环无用, 为了进一步提高散斑图信息的利用率, 提出了平四位和直三位孔, 前者有四个晕环, 后者有三个晕环, 各环能量都可充分利用。

## 二、散斑衍射晕的能量分布

转孔法散斑衍射晕的能量分布取决于基本孔径的形式。四个小圆孔开设在一个菱形的四个顶点上的菱位孔, 如图1所示。用它作为基本孔径拍摄散斑图, 衍射晕如图1(b)所示, 三个晕环和一个中央亮斑。可以导出三个晕环互不重迭的条件是

$$l_3 - d \geq l_2 - d, \quad l_2 - d \geq (\sqrt{l_2^2 + l_3^2}/2) + d. \quad (1)$$

分析时在中圈晕取一个滤波点, 在垂直方向的外圈晕上也取一个滤波点, 如图1(c)所示, 得

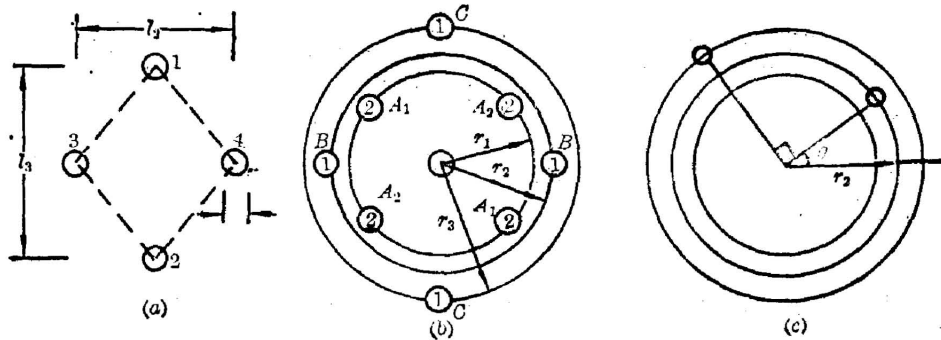


Fig. 1

两个形如文献[1]中(1)式的方程,从而可确定位移场。

用图1(a)所示的菱形孔径拍摄单曝光(孔径不动)散斑图,其晕由9个小圆晕组成,如图1(b)所示。外圈晕由C晕对旋转而得,中圈晕由B晕对旋转而得,内圈晕由A<sub>1</sub>和A<sub>2</sub>晕对旋转而得。A<sub>1</sub>晕对和A<sub>2</sub>晕对的信息在旋转后交迭混杂起来,因而内圈晕无用。经过计算我们得到转孔散斑的衍射晕能量密度的径向分布为

$$I(R) = \left( \frac{1}{R} \int_0^\pi A \star AR d\theta \right)^2, \quad (2)$$

式中  $R, \theta$  是谱面上的极坐标,  $A$  是基本孔径的孔函数,  $\star$  是自相关运算符号。  $A \star A$  即图1(a)所示四孔的自相关,结果为图1(b)中的9个小圆晕,  $C$  是1和2号孔互相关形成的,  $B$  晕是3和4号孔的互相关,  $A_1$  晕是1, 3和2, 4孔之间的互相关,可见  $A_1$  (或  $A_2$ ) 晕的复振幅分布和  $C$  晕(或  $B$  晕)的分布相比只差一个常数因子2,如图1(b)中数字所示。由(2)式外圈晕中心  $r_3$  处的能量密度为

$$I(r_3) = \frac{D_3^2}{r_3^2}, \quad D_3 = \int_{r_3} A \star AR d\theta, \quad (3)$$

式中  $D_3$  是  $C$  晕复振幅沿  $C$  晕与  $r_3$  圆交线的线积分,同理可得

$$I(r_1) = \frac{4D_1^2}{r_1^2}, \quad I(r_2) = \frac{D_2^2}{r_2^2}. \quad (4)$$

因为  $r_1, r_2$  或  $r_3$  比小圆晕的半径大很多,近似有  $D_2 \approx D_3$ ,  $D_1 \approx 2D_2$ , 于是三晕环中心处的能量密度之比为

$$I(r_1) : I(r_2) : I(r_3) = \frac{16}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2} : \frac{1}{r_3^2} = \frac{16}{[(l_2^2 + l_3^2)/4]} : \frac{1}{l_2^2} : \frac{1}{l_3^2}. \quad (5)$$

由于(1)式的限制,要求  $l_3 > l_2 > (\sqrt{l_2^2 + l_3^2}/2)$ 。故有

$$I(r_1) : I(r_2) > 16, \quad I(r_1) : I(r_3) > 16, \quad I(r_2) : I(r_3) > 1. \quad (6)$$

从上面分析可知,内圈晕中心的能量密度最大(近于16倍),但是不能作测试之用,而有用(能作测试)的晕环(中、外圈)能量密度较弱,显然,这样的能量分布不够合理,此时有用晕环上的信噪比较低,影响散斑条纹的清晰度。为了提高有用晕环的能量,使散斑条纹较为清晰,我们提出如下三种孔径。

### 三、矩位、平四位、直三位基本孔径

#### 1. 矩位孔

矩位孔四个小圆孔设在矩形的四个顶点上,如图 2(a)所示。其衍射晕为三个晕环(和中央亮斑),如图 2(b) (实验照片如图 5 所示)。三晕环互不重叠的条件是

$$\sqrt{l_1^2+l_2^2}-d \geq l_2+d, \quad l_2-d \geq l_1+d. \quad (7)$$

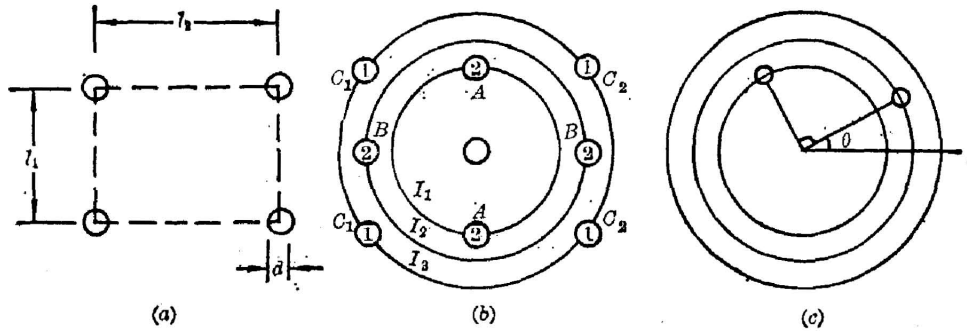


Fig. 2

由于  $C_1$  晕对和  $C_2$  晕对的信息在旋转中混杂, 外圈晕无用。类似于前面求能量密度法, 可得各圈晕中心线处的能量之比为

$$I_1:I_2:I_3 = \frac{1}{l_1^2} : \frac{1}{l_2^2} : \frac{1}{l_1^2+l_2^2}. \quad (8)$$

由于(7)式限制, 要求  $\sqrt{l_1^2+l_2^2} > l_2 > l_1$ , 故有

$$I_1:I_2 > 1, \quad I_1:I_3 > 1, \quad I_2:I_3 > 1. \quad (9)$$

(9)式表明矩位孔的有用晕环较明亮, 能量分布较合理。滤波时可在中圈及垂直方向的内圈晕上各取一个点, 即可确定任意时刻的场分布。

综上所述, 说明采用菱位孔和矩位孔的散斑照相法都有一个晕环无用, 下面两种孔径可以改进这一点。

#### 2. 平四位孔

平四位孔是四个孔设在一个平行四边形的四个顶点上(如图 3(a)所示)。其衍射晕有

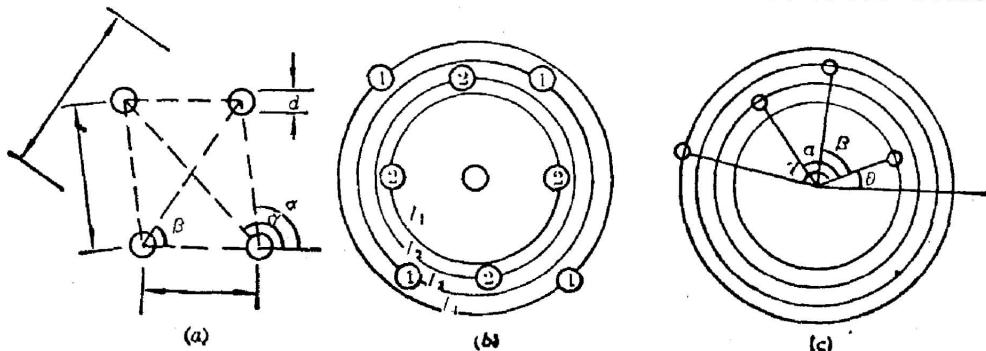


Fig. 3

四个晕环(和中央亮斑),如图 3(b) (实验照片如图 6 所示)。四晕环互不重叠的条件是

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{2l_1^2 + 2l_2^2 - l_3^2} - d &\geq l_3 + d, \\ l_3 - d &\geq l_2 + d, \quad l_2 - d \geq l_1 + d. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

此时的四圈晕都能提取信息,各晕圈中心处能量密度之比为

$$I_1 : I_2 : I_3 : I_4 = \frac{4}{l_1^2} : \frac{4}{l_2^2} : \frac{1}{l_3^2} : \frac{1}{2l_1^2 + 2l_2^2 - l_3^2} \quad (11)$$

分析时在内圈晕  $\theta$  角处取一滤波点,为了获得同一状态下其它方向的信息,应在次内圈、次外圈和外圈晕上分别取转过  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  角的滤波点,如图 3(c) 所示。同样同一状态可得四幅全场条纹,相应的有四个形如文献 [1] 中 (1) 式的方程。通常确定一个平面位移场只需两个方程,现在有两个多余方程,可用最小二乘法来提高测算精度。

平四位孔虽然提高了信息的利用率,但由于各滤波方向并不互相垂直,这给计算带来一些不便。如果采用直三位孔可以弥补这一点。

### 3. 直三位孔

直三位孔是三个小孔开设在一个直角三角形的三个顶点上,如图 4(a) 所示。其衍射晕是三个晕环(和中央亮斑),如图 4(b) (实验照片如图 7 所示)。三晕环不重叠的条件同 (7) 式,三晕环都有用。各晕环中心处的能量密度之比同 (8)、(9) 式。分析时在中圈晕上取一滤波点,并在内圈和外圈晕上取转过  $90^\circ$  和  $\varphi$  角的位置上滤波,如图 4(c) 所示,可得同一状态下三个方向的信息。

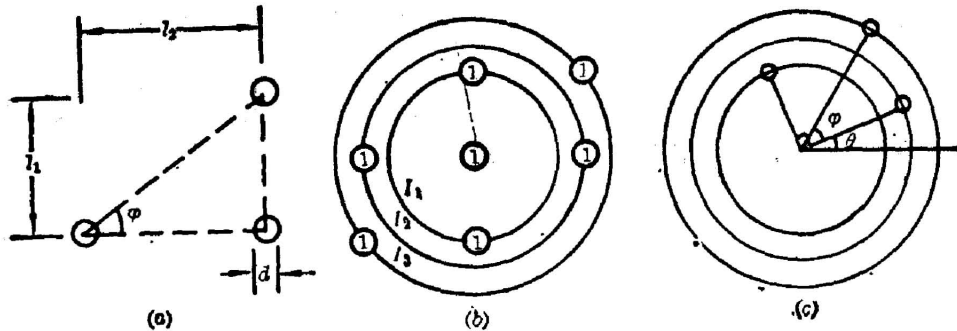


Fig. 4

## 四、实验验证

分别用前述三种孔径作为转孔散斑,研测了振动和非周期性动态问题,并与其它方法作了比较。

### 1. 矩位孔-圆盘摆动实验

见文献 [1] 图 5, 中心简支的圆盘,使其绕中心作周期性摆动,取  $n=1$ , 拍摄散斑图后作全场分析。图 5 是散斑条纹和衍射晕的组合照片。中间三亮圈是衍射晕,外圈条纹是在中圈晕上滤波得到的(在  $90^\circ$  范围内每隔  $15^\circ$  取一幅),内圈条纹是内圈晕上得到的,一方面根据条纹计算了角位移与相位的关系,另一方面用千分表测量值换算成角位移,两者比较,最大误差为 4.4%。

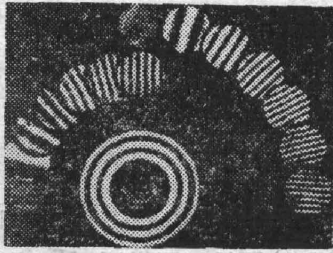


Fig. 5

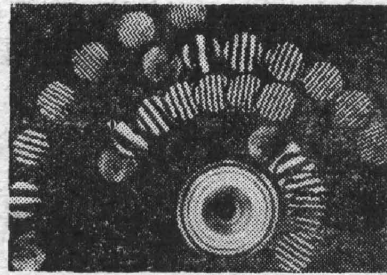


Fig. 6

### 2. 平四位-圆盘摆动实验

实验条件同前, 现在改用平四位孔。图6是衍射晕和散斑条纹照片。散斑法和千分表法比较的最大误差是3.0%。

### 3. 直三位-圆板非周期性动态实验

周边固定圆板, 其上作用气压, 在放气减压过程中拍摄圆板的散焦散斑图, 取  $n=2$ 。图7是衍射晕和散斑条纹照片, 可以看到圆板离面位移梯度场随荷载的变化情况。类似于文献[1]的实验, 做了动、静态对比, 如图8所示。

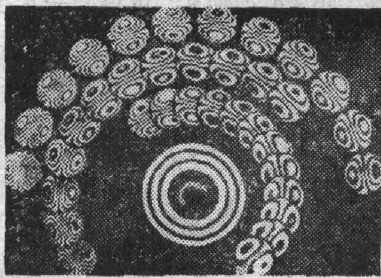
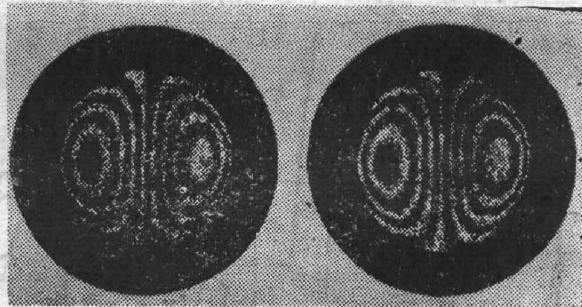


Fig. 7



(a) dynamic; (b) static

## 五、讨 论

使用了改进后的基本孔径, 衍射晕能量分布趋于合理, 大大提高了有用晕环的能量, 从而提高了信息的信噪比, 明显地提高散斑条纹清晰度, 这样就能提高条纹定位的准确度, 减小实验误差。

由于双孔、菱位孔、矩位孔及平四位孔都是轴对称的, 它们既能应用于振动问题, 也能应用于非周期性动态问题; 而直三位孔非轴对称的, 必须旋转  $360^\circ$  才能复原。故它只能用于  $n=2$  的非周期性动态问题。

### 参 考 文 献

- [1] 顾杰等;《光学学报》, 1987, 7, No. 4 (Apr).

**Rotating aperture method of speckle photography for  
dynamic problems II: Rectangle, parallelogram- and  
right-triangle-located-apertures**

GU JIE, SHEN YONGZHAO, YANG CHENGOHEN  
(*Department of Physics, Suzhou University*)

ZHOU BUXING  
(*Middle School No. 18, Suzhou*)

(Received 9 June 1986; revised 31 October 1986)

**Abstract**

In this paper, we propose three new basic apertures in rotating aperture method: rectangle-located-aperture and parallelogram-located-aperture and right-triangle-located-aperture. Theoretical analysis and experimental demonstration are presented. By using these new apertures, the utilization ratio of information of a specklegram is increased, the intensity distribution of diffraction halo becomes more reasonable and the N/S ratio is enhanced, so the speckle fringes are clearer and the experimental errors are less.

**Key Words:** speckle photography; rotating aperture; diffraction halo; basic aperture; rhom-located-aperture; rectangle-located-aperture; parallelogram-located-aperture; right-triangle-located-aperture.