

# 夹层散斑照相

金观昌 章伟宝 刘春阳  
(清华大学工程力学系)

## 提 要

本文提出一种新的散斑照相方法——夹层散斑照相，并且叙述它的简单原理及优点。这一方法类似于夹层全息照相，由二张单曝光散斑图组成，在不同的情况下拍摄散斑图，然后把其中二张放在一起并精确地复位。夹层散斑同普通双曝光散斑完全一样。

如果我们拍摄  $n$  张单曝光散斑图，我们将获得  $n(n-1)/2$  对双曝光散斑图。

众所周知，很难对瞬态过程或动态变形拍摄双曝光散斑图，但高速照相和夹层散斑照相的结合可以解决这些困难。

文章的最后给出了精度的实验比较，结果表明，夹层散斑照相和双曝光散斑照相所获得的结果是完全相同的。

无疑，夹层散斑照相将为散斑干涉的应用开辟新的途径。

## 一、引 言

散斑照相是继全息干涉术后的又一种测量变形和位移的光学方法<sup>[1]</sup>。当一束激光照射在粗糙表面时，由于表面漫反射，在空间干涉而产生无数随机分布的斑点，这些斑点随着物体的移动而移动，用照相机可以把物体像及其散斑记录下来。和全息干涉术一样，常用双曝光记录散斑，但是有一点是不同的，全息干涉是物体光波的再现，当光波迭加时可产生干涉条纹，而散斑全场分析条纹需要经过傅里叶变换光路滤波后才能观察到，因此作为全息干涉的实时观察在散斑干涉法一般是无法实现的\*。因此，从这一意义上来说发展一种夹层散斑照相(单曝光散斑照相)对于散斑照相用于位移应变测量技术具有实用意义。

## 二、夹层散斑照相

### 1. 装置

夹层散斑照相和普通散斑干涉照相一样，其装置如图1所示。除了被测物体外，在紧靠物体处放置一个附有参考坐标系的参考物体，便于作散斑图复位和对准之用。

与夹层全息照相技术相比，由于散斑照相时散斑颗粒微小[在  $5\sim 10\mu\text{m}$  ( $\sigma=1.2\lambda F$ ) ]，夹层散斑照相除了需要精密的机械复位装置外，我们又研制了一种新的利用密栅云纹的复

收稿日期：1981年9月29日，收到修改稿日期：1982年5月7日

\* Archbold and Ennos<sup>[2]</sup> 和 Stefson<sup>[3]</sup> 曾提出类似实时法，以目视散斑干涉观察振动节线。因为在振动处散斑模糊，而节线处不模糊，可以达到目视节线，并不能实时观察到散斑干涉条纹。

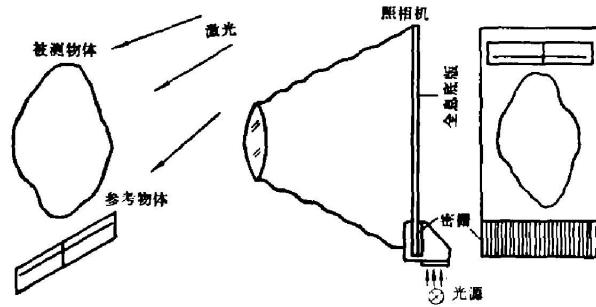


图 1 夹层散斑照相光路示意图

Fig. 1 Optical schematic diagram of the sandwich speckle photography

位装置, 并获得成功。它是在照相底板下方的干版支架上放置一云纹栅线母板, 用平行光投射使每一张夹层散斑干版都印上同一

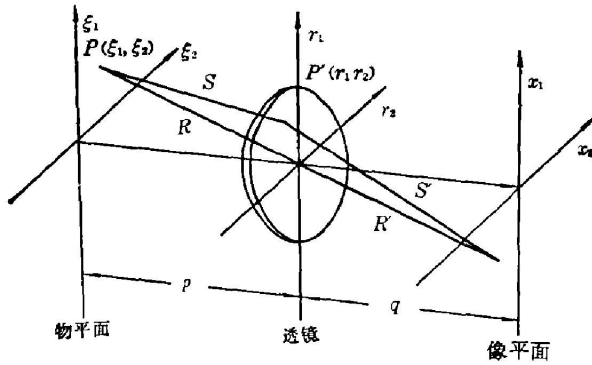


图 2 散斑照相记录

Fig. 2 Speckle photographic record

栅线, 利用栅线转动产生云纹条纹的原理来检测对准情况。对准后的散斑图最终置于傅里叶变换光路中, 检查、调准直至在附有参考坐标系的参考物体上,  $x, y$  两个方向均不出现条纹, 此时被测物体上的条纹就是变形条纹。

2. 原理

对于单次曝光的散斑图, 在像平面底片上的光波复振幅  $f(x_1, x_2)$  (见图 2)

$$f(x_1, x_2) = K \iiint h(\xi_1, \xi_2) A(r_1, r_2) \exp\{ik[r_1(\xi_1/p + x_1/q) + r_2(\xi_2/p + x_2/q)]\} d\xi_1 d\xi_2 dr_1 dr_2, \quad (1)$$

其中  $h(\xi_1, \xi_2)$  为物体表面散斑像的复振幅,  $K$  为常数,  $A(r_1, r_2)$  为透镜之透射函数,  $p$  和  $q$  分别为物体和像到透镜的距离,  $\xi_1, \xi_2, r_1, r_2, x_1$  和  $x_2$  分别代表物体、透镜、成像平面的座标。照相胶片的曝光量和处理后胶片的透射函数分别为

$$e(x_1, x_2) = |f(x_1, x_2)|^2 t, \quad g(x_1, x_2) = a - be(x_1, x_2). \quad (2)$$

当物体位移  $d = d_1 i + d_2 j$  后相应的光波复振幅, 曝光量和透射函数为

$$f(x_1 + d_1, x_2 + d_2) = K \iiint h(\xi_1, \xi_2) A(r_1, r_2) \exp\{ik[r_1(\xi_1/p + x_1 + d_1/q) + r_2(\xi_2/p + x_2 + d_2/q)]\} d\xi_1 d\xi_2 dr_1 dr_2, \quad (3)$$

$$e'(x_1, x_2) = |f(x_1 + d_1, x_2 + d_2)|^2 t, \quad g'(x_1, x_2) = a - be'(x_1, x_2). \quad (4)$$

把二张底片复位对准迭加后, 经傅里叶变换为

$$I(u_1, u_2) = \left| \iint [g(x_1, x_2) + g'(x_1, x_2) \exp[ik(x_1 u_1 + x_2 u_2)/L]] dx_1 dx_2 \right|^2, \quad (5)$$

$$I(u_1, u_2) = 4 \cos^2 K [(u_1 d_1 + u_2 d_2)/2L] I_0(u_1, u_2), \quad (6)$$

其中  $u(u_1, u_2)$  为变换平面的位置向量,  $I_0(u_1, u_2)$  为无变形时之光强分布。与双曝光散斑图

一样  $K(u_1d_1 + u_2d_2)/2L = (n+1/2)\pi$  或  $\mathbf{u} \cdot \mathbf{d} = (n+1/2)\lambda L$ , 出现黑条纹。  $\mathbf{u} \cdot \mathbf{d} = n\lambda L$ , 出现亮条纹。

### 3. 优点

(1) 可用任意组合的形式来得到不同变形状态间的位移或变形的散斑图, 从而可以以较少的底片获得更多的变形信息。

$$H = \sum_{n=1}^n (n-1)。 \quad (7)$$

例如 10 张单曝光散斑图的组合可得到 45 个变形信息, 其效率是很高的。这个方法特别对于整个变形过程不能重复循环(回到原始位置), 变化过程又很快, 且对需要测量的信息又较多的动态、冲击和塑性变形、高温蠕变等十分有用, 对变形分布差别大的变形构件需要得到在不同的变形条件下变形信息, 如当构件某处变形小, 则需要载荷变化大的两种状态间才能看出, 但在变形大的地方, 又需要载荷变化小的两种状态间才能看到, 利用夹层散斑的不同组合可以解决这种问题。

(2) 用夹层散斑图可以对位移进行转移和补偿。如果我们在精密复位二散斑图后, 再继续以某方向(左或右)微动其中一张单曝光底片, 使夹层散斑参考物上出现条纹, 夹层散斑物体上出现逐点观察杨氏条纹数目增加(条纹间距减小), 则表示这张单曝光散斑图物体移动相对于夹层的另一张散斑图状态移动方向和现在微动方向相同。如果出现条纹数目减少(间距增大), 则表示这张单曝光散斑图物体移动相对夹层的另一张散斑图状态移动方向和现在微动方向相反。

这时位移由被测物体转移到参考物体, 采用这种转移方法可以使被测物体逐点的杨氏条纹由密变稀, 从而可以增加条纹判读精度和扩大量程。

在散斑数据分析中, 除了逐点法外还有全场分析方法, 当我们在傅里叶变换光路中看到夹层散斑参考物体上没有条纹时, 并不意味着两张物体的单曝光散斑图完全重合, 因为一个刚体平移并不能在全场分析中出现条纹。对于一物体的平面刚体运动总是可以归结为一个面内的整体平移和绕轴转动(这里指的是照好了的干版), 而刚体转动会出现条纹。和逐点法相似, 当对准二散斑图后, 参考物体上将没有条纹出现, 在转动夹层散斑图后, 在参考物体上将出现条纹。这种转动出现的条纹(在整个底片平面上的平行线)和滤波孔轴相垂直, 它和被测物体原来的位移或变形条纹重新按条纹级数组合成新的条纹, 新的条纹的形成与云纹法的条纹相加类似二种条纹相交所形成四边形的对角线的连线(相同条纹级数点见图 3)。对于平行等间距直线条纹可按下式计算

$$s_3 = \frac{s_1 s_2}{\sqrt{s_1^2 + 2s_1 s_2 \cos \theta + s_2^2}}$$

当  $\theta = 0$  或  $180^\circ$  时,  $1/s_1 \pm 1/s_2 = 1/s_3$ , 式中:  $s_1$  为原条纹间距,  $s_2$  为转动的补偿条纹间距,  $s_3$  为

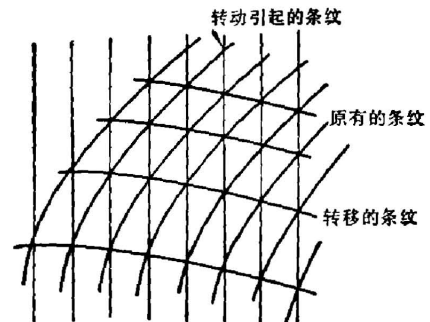


图 3 两组光栅转动产生的莫尔条纹  
Fig. 3 Moiré fringe generated by rotation of two groups of grating

重新形成的条纹间距,  $\theta$  为条纹法线向量间夹角(向量方向由低条纹级数指向高条纹级数)。

当方向相同时用加号,当方向相反时用减号。对于曲线条纹的转移是比较复杂的,可利用作图法求得。

夹层散斑照相除了以上二项主要优点外,还有其它优点,如用多张单曝光夹层散斑的逐步变形求得总变形,当其中一张损坏时并不影响总的结果(这在用双曝光迭加时,如发生一张损坏,则整个结果就会得不到)等等,这里就不再列举了。

### 三、实验验证

我们采用一转动圆盘——面内转动装置来进行验证。图 4 是该装置示意图。

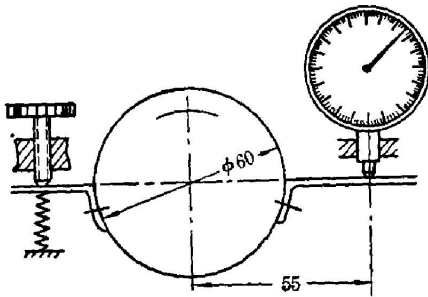


图 4 圆盘实验装置示意图

Fig. 4 Disk experimental apparatus for in-plane displacement measurement

在圆盘的一个引出端测量该点因转动而引起的位移量  $P$ , 则圆盘上各点的位移  $D$  为  $D=rP/R$ , 式中的  $r$  为圆盘中心到该点的距离,  $R$  为圆盘中心到千分表测点的距离。

用氦氖激光器照明圆盘,圆盘表面涂以白粉。在圆盘下方放一长方形参考物体,作为机械零点(参见图 1)。照相机调焦在圆盘表面,底片放在实时片架上,然后对不同位移状态分别拍摄单曝光散斑图,任取二张单曝光散斑图放回复位片架进行分析。

实验时对圆盘的四种转动状态分别进行单次曝光,四张单曝光散斑图的状态分别是:(1)初始状态  $P=0$ ; (2)  $P=100 \mu$ ; (3)  $P=150 \mu$ ; (4)  $P=200 \mu$ 。对应于周边最大位移,可组成四种不同位移状态分别为  $55 \mu$ ,  $110 \mu$ ,  $165 \mu$ ,  $220 \mu$  的夹层散斑图。分析整理得到的平均值如表 1。

表 1 对各种位移,二种测量方法的比较

Table 1 Comparison of two measuring methods for various displacement

千分表测值	55	110	165	220
夹层散斑法测值	59.4	106.8	163	223.3
偏差 %	8	2.9	1.2	1.5

从表 1 中可以看出,只要借助本文提到的复位方位,调节仔细,得到的数据误差一般均可在 5% 以内,从而使这一实验方法具有相当的实用价值。

图 5 为滤波孔在  $u_1$  轴(a)和滤波孔在  $u_2$  轴(b)的夹层散斑全场分析照片,每对右边为双曝光,左边为夹层照相的照片。图 6 表示  $x, y$  二个不同方向条纹转移的全场分析图,其中(a)滤波孔在  $u_1$  轴;(b)滤波孔在  $u_2$  轴。对条纹转移的数据处理如表 2 所示。从表 2 结果表明对转动条纹的转移应用公式  $1/s_1 \pm 1/s_2 = 1/s_3$  是符合得较好的。

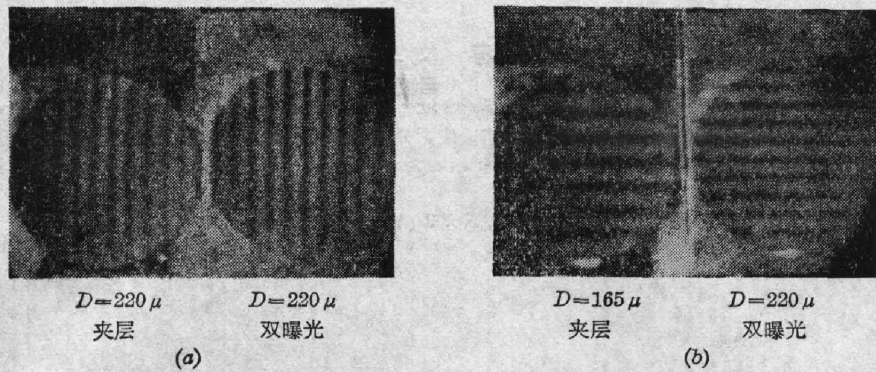


图 5 夹层散斑图的全场分析照片

Fig. 5 The full-field analysis of sandwich speckle photography

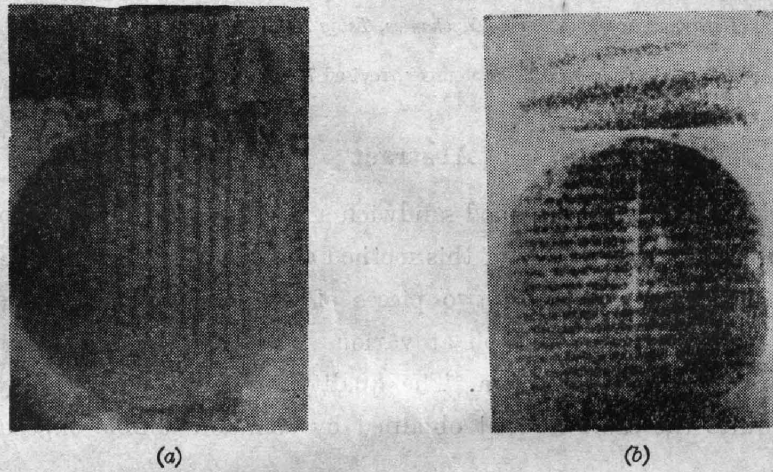


图 6 不同方向条纹转移的全场分析图

Fig. 6 The full-field analysis made by the fringe shift

表 2 条纹转移的数据处理情况表

Table 2 Data processing of fringe-transfer

圆盘位移	转移后圆盘上 条纹间距	参考物上条纹间距	原 条 纹		误 差
			间距计算值	相应位移值	
55	2.97	8.04	4.7	52.5	-4%
165	3.20	5.80	7.14	173.5	+5%
165	13.30	15.60	7.19	172.3	+4%

## 五、结 论

理论分析及实验结果表明：夹层散斑照相技术基本上达到了和双曝光散斑图一样的测量精度，但可多重组合以得到各对状态的变形，更重要的是可以和高速照相技术结合，应用在动态变形测量中。

## 参 考 文 献

- [1] F. P. Chiang; «*A New Family of 2D and 3D Experimental Analysis Techniques Using Laser Speckle*» (SM Archives, 1978) Vol. 3 «激光散斑法, 云纹法在实验应力分析中的应用», (清华大学工程力学系, 1980)
- [2] E. Archbold, A. E. Ennos *et al.*; *A Laser Speckle Interferometer for the Detection of Surface Movements and Vibration* (Proc ICO reading, 1969), Vol. 8.
- [3] K. A. Stetson; *Opt. & Laser Technol.*, 1970, 2, No. 3 (May), 179.

**Sandwich speckle photography**

JIN GUANCHANG ZHANG WEIBAO AND LIU CHUNYANG

(Department of Engineering Mechanics, Tsing Hua University, Beijing)

(Received 29 September, revised 7 May 1982)

**Abstract**

A new speckle photography method—sandwich speckle photography is proposed. The paper describes the simple principle of this method and its advantages. Similar to the sandwich holography, it makes up of two pieces of single exposure specklegram. We made each single exposure photograph at various situations, then put two of them together and precisely replaced them. The quality of fringe obtained by sandwich specklegram is quite the same as that obtained by common double exposure specklegram.

If we make  $n$  pieces of single exposure specklegram,  $n(n-1)/2$  pairs of double exposure specklegram will be obtained.

It is well-known that the double exposure specklegram is very difficult to make at temporal processes and dynamical deformation. High speed photography combined with sandwich speckle photography can overcome this difficulty.

Finally an experimental evidence is identical with the result of double exposure. Doubtlessly, the sandwich speckle photography will pave the way for the application of speckle interferometry.