

# 用数字图像技术直接对双曝光散斑图像 逐点分析\*

胡逸群 谷士文 费耀平 孙阳智 黄宗新  
(长沙铁道学院, 科学研究所, 长沙 410075)

## 提 要

本文提出一种用数字图像技术直接处理双曝光散斑图, 进行逐点分析而在视频监视器上产生杨氏条纹图, 并由此测得位移大小与方向的新方法.

**关键词** 数字图像, 散斑图, 显微物镜.

## 1 前 言

逐点法是双曝光散斑图定量分析中最有用的方法. 其过程一般是用细激光束照射散斑图的待测点, 在适当远处的衍射屏上得到一幅受衍射晕调制的杨氏条纹. 曾经有人提出用一白光点光源照明散斑图得到一幅多色的杨氏条纹图而抑制二次散斑噪声, 加一滤色片后消除彩虹效应, 以便定量分析<sup>[1]</sup>. 由光学衍射而得到的杨氏条纹图, 可用数字图像技术处理, 在这一方面, 国内处学者作了大量工作<sup>[2~6]</sup>, 而且仍然是一个引人注目的课题<sup>[7~8]</sup>. 在用电视摄像机拍摄杨氏条纹图时, 必须细心处理晕中心的亮斑, 否则会干扰测量甚至损坏光靶. 此外, 电视摄像机有限的线性响应范围和亮度可测范围, 不能同时兼顾晕中央与边缘的条纹信息.

本文提出一种数字图像技术直接逐点分析散斑图的方法. 它无须用光学衍射过程得到杨氏条纹图, 而是由计算机对散斑图逐点进行离散傅里叶变换得到条纹图. 条纹数与位移矢量有极简单的关系. 计数在计算机谱面(监视器屏幕)上  $x$  与  $y$  方向条纹数后, 位移值就测得了. 条纹图中心的“亮斑”仅仅是一个数字斑而不是物理斑丝毫不影响测量结果和损坏摄像机, 若为了显示, 可将其去掉. 从最大灰度值到最小灰度值, 条纹信息全部在数组中保留, 而且无非线性效应. 这种散斑图逐点分析仪结构紧凑、无须暗室, 因而实用方便.

## 2 原 理

### 2.1 散斑图逐点分析原理图

散斑图的数字图像逐点分析装置如图 1 所示. 用白炽灯或自然漫射光透射照明散斑图, 显微物镜将散斑图放大成像于 CCD 电视摄像机靶面上. 接收的光信号经过 A/D 转换变成数字信号并存放在帧存贮器中. 由一 IBM/PC 主计算机对帧存内的信号进行二维离散傅里叶变换,

收稿日期: 1992年9月8日; 收到修改稿日期: 1993年1月18日

\* 本文为国家自然科学基金资助项目.

通过模的平方运算和适当的数字处理. 最后经 D/A 转换得到一幅杨氏条纹图, 显示在监视器上.

## 2.2 单曝光散斑图及其频谱

设散斑图局部放大后在光靶上的有效范围为  $0 \leq x \leq w_x$ ,  $0 \leq y \leq w_y$ ,  $w_x, w_y$  也是靶面的有效尺寸. 用电视摄像机读出散斑图即是用一梳状函数对放大的散斑图抽样, 抽样间隔是靶面上一个分立探测元在  $x, y$  方向的尺度  $a_x, a_y$ . 抽样散斑图为

$$f_s(x, y) = \sigma \sum_{n_1=1}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} f(n_1 a_x, n_2 a_y) \delta(x - n_1 a_x, y - n_2 a_y). \quad (1)$$

式中  $f(x, y)$  为实际散斑图,  $\delta$  为狄拉克函数,  $\sigma =$

$a_x a_y$  为一个探测元件的面积,  $N$  为抽样点数. 对抽样函数进行傅里叶变换, 得到其频谱

$$F_s(u, v) = \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} f_{n_1, n_2} \exp[-i2\pi(n_1 a_x u + n_2 a_y v)]. \quad (2)$$

式中  $u, v$  分别表示在  $x, y$  方向的频率分量, 而

$$f_{n_1, n_2} = \sigma f(n_1 a_x, n_2 a_y) \quad (3)$$

由于  $f(x, y)$  是囿于  $w_x \cdot w_y$  的矩形范围之内, 根据频域抽样定理,  $f_s(x, y)$  的谱由抽样间距为  $U = 1/w_x, V = 1/w_y$  的诸样本值决定. 因此

$$\begin{aligned} F_s(m_1 U, m_2 V) &= \sum_{n_1=1}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} f_{n_1, n_2} \exp[-i2\pi \frac{n_1 m_1 + n_2 m_2}{N}] \\ &= DFT\{f_{n_1, n_2}\} = F_s(m_1, m_2). \quad m_1, m_2 = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $DFT\{\dots\}$  表示做离散傅里叶变换. 上式已考虑到了  $N = w/a$  这一事实.

## 2.3 双曝光散斑图及其频谱

设第一、二曝光的散斑图经放大和抽样后分别为

$$\left. \begin{aligned} f_{s1}(x, y) &= \sigma \sum_{n_1=1}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} f(n_1 a_x, n_2 a_y) \delta(x - n_1 a_x, y - n_2 a_y) \\ f_{s2}(x, y) &= \sigma \sum_{n_1=1}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} f[(n_1 - k_1) a_x, (n_2 - k_2) a_y] \delta(x - n_1 a_x, y - n_2 a_y) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中整数  $k_1, k_2$  分别表示散斑图沿  $x, y$  方向的位移为  $k_1 a_x, k_2 a_y$ . 双曝光散斑图的总抽样强度为

$$\begin{aligned} I(n_1, n_2) &= \sigma \sum_{n_1=1}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} f(n_1 a_x, n_2 a_y) \{ \delta(x - n_1 a_x, y - n_2 a_y) + \\ &\quad + \delta(x - [n_1 - k_1] a_x, y - [n_2 - k_2] a_y) \} \end{aligned} \quad (6)$$

其傅里叶谱为

$$F(m_1, m_2) = \left[ \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} f_{n_1, n_2} \exp(-i2\pi \frac{n_1 m_1 + n_2 m_2}{N}) \right] \cdot \left[ 1 + \exp(-i2\pi \frac{k_1 m_1 + k_2 m_2}{N}) \right] \quad m_1, m_2 = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

上式取模的平方后, 得到杨氏条纹

$$I(m_1, m_2) = 2 |F_s(m_1, m_2)|^2 \left[ 1 + \cos(2\pi \frac{k_1 m_1 + k_2 m_2}{N}) \right] \quad m_1, m_2 = 0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

式中  $|F_s(m_1, m_2)|^2$  即为单次曝光散斑图的功率谱或衍射晕函数. 从(8)式不难看出, 在谱面上,

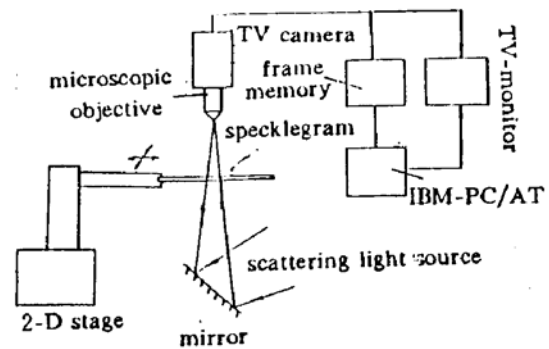


Fig. 1 The principle arrangement of direct pointwise analysis of double exposure specklegrams with digital image processing

$x$  方向有  $k_1$  个条纹, 在  $y$  方向有  $k_2$  个条纹. 换句话说, 在  $x, y$  方向的条纹间距分别为

$$\Delta_x = N/k_1; \quad \Delta_y = N/k_2. \quad (9)$$

个像素, 它们代表放大后散斑图在靶面  $x, y$  方向的位移分别为

$$d_x = k_1 a_x; \quad d_y = k_2 a_y. \quad (10)$$

位移与  $x$  轴的夹角为

$$\phi = \text{tg}^{-1} \frac{d_y}{d_x} \quad (11)$$

但与传统的逐点分析法一样, 位移矢量的指向未能确定.

#### 2.4 衍射晕函数

如同用细激光束进行逐点分析一样, 衍射晕函数  $|F_s(m_1, m_2)|^2$  也中一幅散斑图. 现在比较有趣的是它在离散变换面上的分布范围.

根据散斑理论<sup>[9]</sup>, 靶面上散斑图的截止空间频率可用散斑特征尺寸的倒数来表示, 即

$$v_x = v_y = 1/Md_s. \quad (12)$$

下标  $x, y$  表示方向,  $d_s$  为原散斑图散斑的特征尺寸,  $M$  为显微物镜的放大率,  $v_x, v_y$  决定了衍射晕在谱面上的边界. 根据 DFT 理论<sup>[10]</sup>, 谱面边界本身对应的截止频率为

$$v'_x = \frac{1}{2a_x}, \quad v'_y = \frac{1}{2a_y}. \quad (13)$$

如果  $v_x = v'_x$  和  $v_y = v'_y$ , 则衍射晕在  $x, y$  方向恰好充满谱平面. 换句话说, 散斑在靶面的特征尺寸在  $x, y$  方向等于两个感光元件的尺寸时, 衍射晕充满谱面. 不难推断, 当  $Md_s < 2a_x, Md_s < 2a_y$  时, 衍射晕不能充满谱面; 反之如果  $Md_s > 2a_x, Md_s > 2a_y$ , 衍射晕将溢出谱面, 能够看到的条纹个数减少. 图 2 示出了衍射晕分别小于, 充满及溢出谱面边界的三种典型情况.

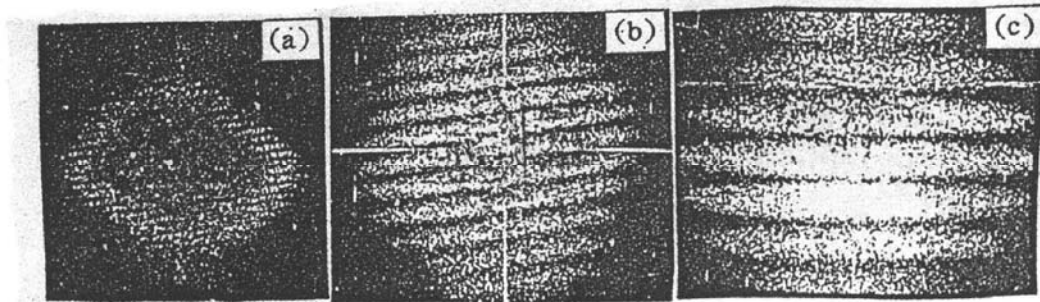


Fig. 2 The halos of computer Young's fringe patterns are (a) smaller than, (b) the same as, (c) larger than the DFT spectrum planes of the specklegrams respectively

#### 2.5 测量范围与精度

根据以上的讨论, 选用不同的放大倍数  $M$  谱面上能够排列的条纹数是不同的. 由于位移与条纹个数的关系由(10)式表示, 显然  $M$  越大, 灵敏度越高. 但另一方面,  $M$  越大, 衍射晕在谱面所占区间越小, 条纹密集, 晕外无用区间加大, 可能给计数条纹带来困难. 一般取  $Md_s$  略小于  $2a_x$  和  $2a_y$  较好, 这样也特别便于目测.

由于离散抽样, 位移在  $x, y$  方向上分别以  $a_x, a_y$  为单位被量化. 因此所测位移是离散的  $k_1 a_x, k_2 a_y (k_1, k_2 = 0, 1, 2, \dots)$ . 一般地说, 在谱面上至少应有 1 个条纹, 位移才可测, 故最小可测范围约为  $a_x$  或  $a_y$ . 最大可测范围可以用谱面上条纹间距应大于 5 个像素的原则来确定, 即最大可测

位移分别为  $N_{ax}/5$  和  $N_{ay}/5$ 。

为了得到满意的测量精度和灵敏度,必须同时有大的衍射晕和大的放大倍率  $M$ 。因而在记录散斑图时,应尽量使用大相对孔径。客观散斑法效果会更好。

### 3 实验结果与讨论

在图 1 所示装置中,散斑图经显微物镜放大后,在  $x, y$  方向上一个像素代表的实际散斑图尺寸分别为  $4.79 \mu\text{m}$  和  $3.32 \mu\text{m}$ ,这由一光栅尺标定得出。系统的有效视场为  $2.45 \times 1.7 \text{ mm}^2$ ,条纹图充满谱面。图像空间为  $512 \times 512 \times 8 \text{ bit}$ 。用配有协处理器的 IBM-PC/AT 计算机处理一个被测点大约需要 2 min。为了简便,用人工计数条纹个数。

被测物体是一中部受集中载荷而变形的简支梁,梁材为有机玻璃,尺寸  $325 \times 45 \times 15 \text{ mm}^3$ ,试件表面涂一层铝粉漆,见图 3。记录散斑图的照相机焦距为  $360 \text{ mm}$ ,F 数 5.6,成像倍率 0.5,像面散斑特征尺寸约  $6.5 \mu\text{m}$ 。用 He-Ne 激光器做散斑图记录光源。根据材料力学,梁中线上各点的理论位移为

$$d_y = \left[ 3 \frac{x}{l} - 4 \left( \frac{x}{l} \right)^3 \right] \cdot d_{\max} \quad 0 \leq x \leq \frac{l}{2} \quad (17)$$

式中  $d_y$  表示  $y$  方向位移分量,  $d_{\max} = d|_{x=l/2}$ ,  $l$  为梁长。

杨氏条纹图中每一条纹代表的物方垂直位移为  $6.64 \mu\text{m}$ 。表 1 示出了梁上各点的坐标,理论位移,条纹个数以及实测位移,相对误差等。实验结果是比较满意的,最大的位移绝对误差不超过  $3.2 \mu\text{m}$ ,即半个条纹代表的位移值。

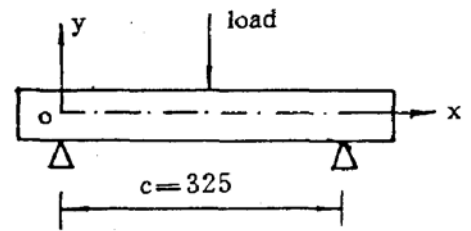


Fig. 3 The sketch figure of loading a simply supported beam

Table 1 The theoretical and experimental results

label numbers	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$x$ -coordinates (mm)	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	52.5
theoretical displacements ( $\mu\text{m}$ )	2.73	8.18	13.6	19.09	24.4	29.7	35.0	40.20	45.34	50.39	55.34
fringe numbers	0	1	2	3	4	5	5	6	7	8	8
experimental displacements ( $\mu\text{m}$ )	0	6.64	13.28	19.92	26.56	32.2	32.2	39.84	46.48	52.2	52.2
relative errors (%)	—	18.8	2.4	6.1	15.9	8.4	8.0	0.9	2.4	3.6	5.7
absolute errors ( $\mu\text{m}$ )	2.73	1.54	0.32	+0.83	2.16	2.5	2.8	0.36	1.14	1.81	3.14
label numbers	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$x$ -coordinates (mm)	57.5	62.5	67.5	72.5	77.5	82.5	87.5	92.5	97.5	102.5	107.5
theoretical displacements ( $\mu\text{m}$ )	60.19	64.92	69.53	74.0	78.33	82.5	86.51	90.34	93.98	97.43	100.68
fringe numbers	9	10	10	11	12	12	13	14	14	15	15

experimentals displa-cements ( $\mu\text{m}$ )	59.76	66.4	66.4	73.04	79.68	79.68	86.32	93.0	99.6	106.2	106.2
relative errors (%)	0.7	2.5	4.5	1.3	1.7	3.4	0.2	2.9	1.0	2.2	1.1
absolute errors ( $\mu\text{m}$ )	0.52	1.48	3.13	0.96	1.35	2.82	0.18	2.66	0.98	2.66	1.08
label numbers	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
x-coordinates	112.5	117.5	122.5	127.5	132.5	137.5	142.5	147.5	152.5	157.5	162.5
theoretical displa- cements ( $\mu\text{m}$ )	103.71	106.51	109.69	111.41	113.48	115.28	116.8	118.05	119.0	119.6	120.0
fringe numbers	16	16	17	17	17	17	18	18	18	18	18
experimental s displa-cements ( $\mu\text{m}$ )	106.2	106.2	112.8	112.8	112.8	112.8	119.52	119.52	119.52	119.52	119.52
relative errors (%)	2.4	0.3	2.8	1.2	0.6	2.2	2.3	1.2	0.4	0.0	0.4
absolute errors ( $\mu\text{m}$ )	2.49	0.31	3.11	1.39	0.68	2.48	2.7	1.47	0.52	0.008	0.48

## 4 结 论

本文直接用数字图像术对双曝光散斑图进行逐点分析,无须用光学衍射来得到杨氏条纹图,而是由计算机对散斑图进行离散傅里叶变换得到杨氏条纹图、被测点位移大小及方向.这一过程不必在暗室进行.避开了激光逐点分析过程中衍射晕中心亮斑及摄像机线性响应范围及亮度可测范围有限的问题.对条纹图的处理可以采用以往的任何方法,也可以直接计数充满谱面的条纹个数.测量灵敏可以通过选用大倍数的显微物镜及减小散斑特征尺寸来提高.由于灵敏度可调,特别适合于测量较大位移的场合.如果在记录散斑图时采用白光光源,则在散斑图的记录及分析全部过程中离开了激光器,从而使散斑照相术实用性增强.

需要指出,本文尚未解决的一个问题是,由于光靶上的探测元是分立的,因而散斑的位移场被离散量化为探测元尺寸的整数倍数使位移曲线有“台阶”效应.在这种情况下,能否用此技术测得等于非整数个探测元尺寸的位移以及如何测量,将另文叙述,但答案是肯定的.

## 参 考 文 献

- [1] P. M. Boone, L. C. Debacker, Speckle methods using photography and reconstruction in incoherent light, *Optik*, 1976, 44(3): 343~355
- [2] B. Ineichen, P. Eqlin, R. Daendliker, Hybrid optical and electronic image processing for strain measurements by speckle photography, *Appl. Opt.*, 1980, 19(13): 2191~2195
- [3] G. H. Kaufmann, Numerical processing of speckle photography data by Fourier transform, *Appl. Opt.*, 1981, 20(24): 4277~4280
- [4] C. S. Vikram, K. Vedam, Selective counting path of Young's fringes in speckle photography for eliminating diffraction halo effects, *Appl. Opt.*, 1983, 22(15): 2242~2243
- [5] S. A. Isacson, G. H. Kaufmann, Two-dimensional digital processing of speckle photography fringe, 2; diffraction halo influence for the noisy case, *Appl. Opt.*, 1985, 24(10): 1444~1447
- [6] 胡逸群, 沿圆周路径测量散斑摄影杨氏条纹, *中国激光*, 1989, 16(4): 218~220
- [7] J. M. Huntley, Speckle photography fringe analysis; effect of imaging geometry on displacement errors, *Appl. Opt.*

.., 1991, 30(32): 4602~4604

- [8] Wen Pei, Feijun Son, Automatic specklegram fringe analysis by using symmetry evaluation of the  $\theta$ -scanning function, *Appl. Opt.*, 1992, 31(5): 665~669
- [9] 刘培森, 散斑统计光学基础, 科学出版社, 1987 年第 1 版, 36
- [10] 刘培森, 应用傅里叶变换, 北京理工大学出版社, 1990 年第 1 版, 135

## Direct pointwise analysis of double exposure specklegrams with digital image processing

HU Yiqun GU Shiweng FEI Yaoping

SONG Yangzhi HUANG Zhengxing

(Research Department, Changsha Railway University, 410075)

(Received 8 September 1992; revised 18 January 1993)

### Abstract

A pointwise analysis method, which is used for obtaining Young's fringe patterns and measuring the magnitudes and directions of displacements by directly processing double exposure specklegrams with digital image technique, has been presented. In this procedure. If a proper speckle recording arrangement and a suitable magnifying power of the microscopic objective are selected, a high measuring sensitivity and accuracy can be obtained.

**Key words** digital image processing, speckle pattern, microscopic objective.