

# 连续频率散斑光栅膜测量技术的研究

姜锦虎 解安林 刘 诚\* 肖金标\*\* 沈永昭  
(苏州大学物理系, 苏州 215006)

**摘 要** 提出了一种新的连续频率散斑光栅膜测量技术, 给出了该技术的理论和方法。它可用于研究很大范围内的变形, 其灵敏度可从 0~ 600 l/mm 范围内连续选取, 或更高。

**关键词** 连续频率, 散斑光栅, 全场位移。

## 1 引 言

无论传统云纹法<sup>[1]</sup>、云纹干涉法<sup>[2]</sup>或贴片薄膜相位栅技术<sup>[3]</sup>, 由于所使用光栅常数关系, 其测量灵敏度基本固定。对不同的变形量需在试件上预制相应的不同频率光栅。

本研究给出了一种测量原理基于云纹技术的新的全场位移测量技术。传统云纹法、云纹干涉法和贴片薄膜相位光栅技术都要在试件表面预制光学传感元件, 它们分别是云纹栅、闪耀光栅和薄膜相位栅。本技术也同样需在试件表面预制上光学传感元件-连续频率散斑光栅, 但该技术具有实验装置简单、不需防震等优点, 且其测量灵敏度在大范围内连续可变(例如 0~ 600 l/mm), 这就避免了云纹法等在不同变形范围内需要选择不同空间频率光栅的麻烦。

## 2 元件描述

该技术使用的元件是连续频率散斑光栅全场位移传感膜。它有三种:

1) 一维连续频率散斑光栅膜。元件上任一小区域内所含栅频在一个方向上(例如  $x$  方向)连续, 例如 0~ 600 l/mm。

2) 二维连续频率散斑光栅膜。元件上任一小区域内含  $x$  和  $y$  方向上的光栅结构, 其空间频率连续分布, 例如 0~ 600 l/mm。

3) 应变花式连续频率散斑光栅膜。元件上任一小区域内在  $x$ 、 $y$  方向上、和分别与  $x$  轴  $y$  轴成  $45^\circ$  的方向上都具有栅结构, 且空间频率连续分布, 在  $x$ 、 $y$  方向上为 0~ 600 l/mm, 在其它方向上为 0~ 424 l/mm。

元件是一种可剥离膜, 其结构同可剥离云纹栅。在涤纶片基上有一层可剥离层, 可剥离层上面是一层厚度仅数微米的连续频率散斑光栅膜。其使用方法与可剥离云纹栅相同。

\* 现在徐州师范学院任教。

\*\* 现在南京邮电学院任教。

收稿日期: 1996年6月27日; 收到修改稿日期: 1996年10月3日

### 3 元件的物理模型简述

采用散斑调制光栅的原理, 使制作定向连续频率的栅成为可能。为讨论简单计, 以一维连续频率散斑光栅膜为例。在两个小孔前面放置毛玻璃, 准直激光垂直入射于两小孔, 在小孔后面的记录平面上形成的光场  $U_i$  和光强分布  $I_i$  分别为

$$U_i = a_1 \exp [j(2\pi f_{1x}x + \varphi_1)] + a_2 \exp [j(2\pi f_{2x}x + \varphi_2)] \quad (1)$$

$$I_i = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(2\pi f_x x + \delta\varphi) \quad (2)$$

式中  $a_1^2 + a_2^2$  为散斑结构。上式表明, 空间频率为  $f_x$  的栅被散斑调制,  $\delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  对记录平面内不同位置取不同值, 它也是随机量, 它的作用可看作使栅线发生不规则初始畸变。 $f_x$  的大小取决于两孔间距(在记录平面到孔平面距离不变的情况下)。如果在曝光期间, 采用文献[4]描述的孔径径向扫描器使两孔分别沿  $x$  轴正、负方向匀速运动, 两孔中心距离从零渐变到某一值  $2X_c$ , 则记录平面上栅结构的频率  $f_x$  由零变到  $f_{xc}$ 。于是可制造连续频率的散斑光栅。其复振幅透过率可简写为

$$t = \int_0^{f_{xc}} [a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(2\pi f_x x + \delta\varphi)] df_x \quad (3)$$

它是由无数散斑光栅叠加而成, 不同空间频率  $f_x$  的栅被不同的散斑场所调制。

### 4 测量方法

测量过程分为两步: 第一步是全场位移信息记录, 第二步是全场位移信息提取。

信息记录装置示意图如图 1 所示。O 为试件, 试件上预制了连续频率散斑光栅膜。全息干版 PH 与膜面紧贴。激光束从另一侧面通过试件对全息干版曝光。该曝光记录实际上是将试件上的连续频率散斑光栅膜的图像  $t$  复制到全息干版上。在试件受载前后各曝光一次, 将曝光后的 PH 用常规方法进行处理。处理后的全息干版置于图 2 所示的信息提取光路上, 在频谱面  $P_f$  上用小孔滤波。眼睛通过滤波孔就可观察到位移分量的全场等值条纹图。改变滤波孔的位置 ( $X_{f0}$ ) 就可改变测量灵敏度。在滤波孔后可用照相机拍摄位移分量场, 也可用 CCD 记录, 将其图像数字处理, 经计算机运算, 获得任意截面的位移曲线和应变曲线。

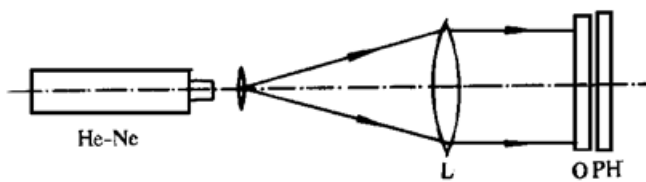


Fig. 1 Schematic of the recording setup

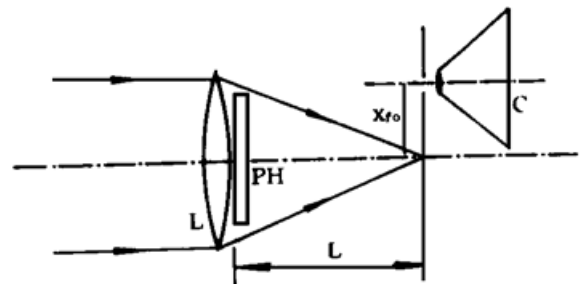


Fig. 2 Schematic of the analytical setup

### 5 基本原理

连续频率散斑光栅全场位移测量技术不同于孔径散斑照相法。为说明其原理不同, 现以单频散斑光栅膜的测量原理和孔径散斑照相法作一比较。

孔径散斑照相法中, 散斑颗粒上也调制着光栅, 物表面变形时, 像面散斑颗粒携带着栅运动, 但栅的节距和栅的取向并不发生变化。本方法中, 预制有单频散斑光栅膜的试件, 其

复振幅透过率函数为

$$t_i = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(2\pi f_x x + \delta\varphi) \quad (4)$$

当物表面发生变形时, 栅的节距和取向都可能发生变化, 因此其测试原理同云纹法。

如果将贴有单频散斑光栅膜的试件置于图 1 光路标试件位置, 全息干版 PH 进行双曝光记录。试件受载, 栅随同变形, 空间频率由  $f_x$  变为  $f'_x$ , 处理后的 PH 的复振幅透过率正比于

$$\begin{aligned} t'_i &= t_{1i} + t_{2i} \\ &= 2a_1^2 + 2a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(2\pi f_x x + \delta\varphi) + 2a_1a_2 \cos(2\pi f'_x x + \delta\varphi) \\ &= 2a_1^2 + 2a_2^2 + 4a_1a_2 \cos[\pi(f_x + f'_x)x + \delta\varphi] \cos \pi(f_x - f'_x)x \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $(f_x + f'_x)/2$  为高频量,  $(f_x - f'_x)/2$  为低频量, (5) 式表示低频条纹被高频条纹载波。肉眼是一低通滤波器, 所以观察记录干版就可观察到反映位移分量等值线的低频条纹。

也可采用滤波方法观察条纹。为此, 将(5)式改写成如下形式

$$\begin{aligned} t'_i &= 2(a_1^2 + a_2^2) + a_1a_2\{ \exp[j(2\pi f_x x + \delta\varphi)] + \exp[-j(2\pi f_x x + \delta\varphi)] \\ &\quad + \exp[j(2\pi f'_x x + \delta\varphi)] + \exp[-j(2\pi f'_x x + \delta\varphi)] \} \end{aligned} \quad (6)$$

将  $t'_i$  置于图 2 的信息提取光路中, 则在谱面上  $t_{1i}$  展开为三个谱点, 对应的空间频率分别  $-f_x$ 、 $0$ 、 $f_x$ , 同样,  $t_{2i}$  在谱面上也展开为三个谱点, 因试件各处变形量不一致, 物上各小区域的光栅频率也不一样, 但相对偏差较小, 因此在谱面上表现为三个略为展宽的谱点, 分别为  $-f'_x$ 、 $0$ 、 $f'_x$ , 谱点  $f_x$  和  $f'_x$  很接近, 滤波孔将其取出, 像平面上光场  $U_i$  和光强  $I_i$  分别为

$$U_i = a_1a_2 \exp[j(2\pi f_x x + \delta\varphi)] + a_1a_2 \exp[j(2\pi f'_x x + \delta\varphi)] \quad (7)$$

$$I_i = |U_i|^2 = a_1^2 a_2^2 [1 + \cos 2\pi(f_x - f'_x)x] \quad (8)$$

即条纹由变形前后栅的空间频率之差决定, 与云纹的解析式相同。

将贴有连续频率的散斑光栅全场位移传感膜(可剥离膜)的试件置于图 1 的试件处, 试件的复振幅透过率为

$$t' = \int_0^{f_{xc}} t_1 df_x = \int_0^{f_{xc}} [a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(2\pi f_x x + \delta\varphi)] df_x \quad (9)$$

式中  $f_{xc}$  为元件的最高频率。在试件受载前后进行双曝光, 这相当于栅复制。受载前曝光, 将各种频率的未变形栅复制在全息干版上, 试件受载, 各频率的栅随同试件变形, 曝光时, 将其也记录在全息干版上, 处理后的全息干版复振幅透过率正比于

$$\begin{aligned} t &= t_1 + t_2 = \int_0^{f_{xc}} (t_{1i} + t_{2i}) df_x \\ &= \int_0^{f_{xc}} [2(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1a_2 \cos(\pi f_x x + \delta\varphi) + 2a_1a_2 \cos(\pi f'_x x + \delta\varphi)] df_x \end{aligned} \quad (10)$$

上式也可写为如下指数形式

$$\begin{aligned} t &= \int_0^{f_{xc}} \{ 2(a_1^2 + a_2^2) + a_1a_2\{ \exp[j(2\pi f_x x + \delta\varphi)] + \exp[-j(2\pi f_x x + \delta\varphi)] \\ &\quad + \exp[j(2\pi f'_x x + \delta\varphi)] + \exp[-j(2\pi f'_x x + \delta\varphi)] \} \} df_x \end{aligned} \quad (11)$$

将其置于图 2 的光路中进行信息提取时, 谱面上光场为

$$U = F[t] \quad (12)$$

即按栅的空间频率在谱面的  $x$  轴上展开。设滤波孔中心坐标  $(x_{f0}, 0)$  孔内含有中心所对应的未变形栅的频率  $f_x$ , 孔上还含有频率  $f'_x$  为变形栅之频谱。于是, 像面上平均光强分布为

$$I = I_0 [1 + \cos 2\pi(f_x - f'_x)] \quad (13)$$

改变滤波孔的位置, 也即选取连续频率栅上相应频率的栅的 +1 级谱点。例如, 滤波孔在谱面上坐标为  $(x_{f0}, 0)$ , 则相应的栅频为

$$f_x = \sin [\text{tg}^{-1}(x_{f0}/L)] \lambda \quad (14)$$

式中  $L$  为谱面到物面的距离。注意, 空间频率  $f_x$  的公式是(14)式, 而不是  $f_x = x_{f0}/\lambda L$ , 这是因为  $f_x = x_{f0}/\lambda L$  是在旁轴近似条件下得到的, 对于本研究中的高频成分, 已不符合旁轴近似的条件。如果栅频从 0~600 l/mm, 则测量灵敏度就可在如此宽的范围内连续变化。(13)式为  $U$  位移分量等值条纹图; 根据云纹理论, 对该条纹图的亮(或暗)条纹计数就可获得试件上任一点在  $x$  方向上的位移分量  $u$ 。

$$\text{对亮条纹: } U = np = n/f_x = \frac{n\lambda}{\sin [\text{tg}^{-1}(x_{f0}/L)]}, \quad (n = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (15)$$

$n$  为亮条纹序号。

$$\text{对暗条纹: } U = (m - 1/2)P = (m - 1/2)/f_x = (2m - 1)\lambda/2 \sin [\text{tg}^{-1}(x_{f0}/L)], \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (16)$$

$m$  为暗条纹序号。

同样, 试件上栅的主方向沿  $y$  轴, 可得  $V$  位移分量场。

$$\text{对亮条纹: } V = n\lambda/\sin [\text{tg}^{-1}(y_{f0}/L)], \quad (m = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (17)$$

$$\text{对暗条纹: } V = (2m - 1)\lambda/2\sin [\text{tg}^{-1}(y_{f0}/L)], \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (18)$$

## 6 典型试件应用举例

将二维连续频率散斑光栅全场位移传感膜预制的悬臂板上。板材为有机玻璃, 厚 4 mm, 高 30 mm。板的一端夹持, 自由端上加集中载荷。在离夹持端 55.7 mm 处用千分表测量该点在  $y$  轴方向上的位移。千分表实测点位移为  $V = 51 \mu\text{m}$ 。滤波孔在  $x$  轴上取不同位置, 得一系列  $U$  场条纹图; 滤波孔在  $y$  轴上取不同位置, 得一系列  $V$  场条纹图。 $U$  场和  $V$  场条纹图如图 3

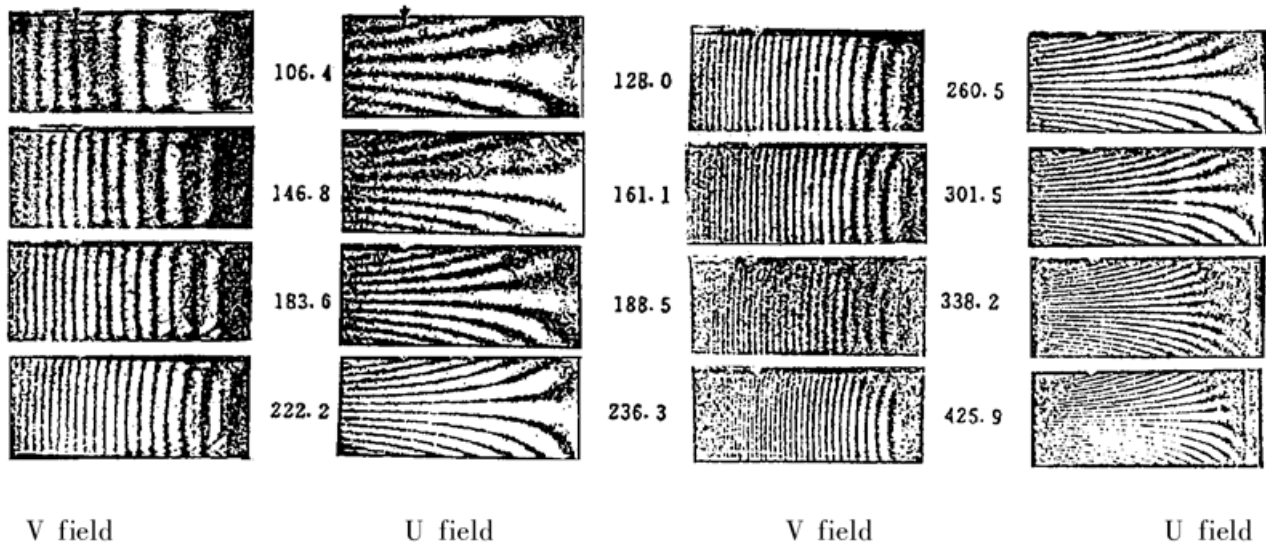


Fig. 3 In-plane displacement field

所示。条纹图上箭头所指位置是千分表测头位置，在滤取  $V$  场条纹图时，适当选取  $y_{f0}$  位置使某暗条纹正好位于千分表测头位置。根据(15)式和测头位置处暗条纹序号计算出位移分量  $V$  值，将其与千分表读数进行比较。对  $V$  场条纹列于表 1。实验表明，测量误差小于 3%。

Table 1. Measured data of  $V$  field,  $V = 51 \mu\text{m}$  at measuring point of the mater

$m$	3	6	8	10	12	14	16	18	22.7
$y_{f0}$ (mm)	9.0	19.1	26.4	33.0	40.2	47.3	55.0	62.0	79.2
$f_y$ (1/mm)	50.2	106.4	146.8	183.0	222.2	260.5	301.5	338.2	425.9
$V$ ( $\mu\text{m}$ )	49.8	51.69	51.09	51.91	51.76	51.82	51.41	52.74	52.12
(%)	- 2.4	1.4	0.2	1.8	1.5	1.6	0.8	1.5	2.2

**结 论** 连续频率散斑光栅膜测量技术是使用了作者最近研制成的连续频率散斑光栅膜元件发展起来的一种新的光测量技术。连续频率散斑光栅膜是采用不同频率的栅被不同的散斑场调制的原理制作，其位移场测量原理基于频谱分析和云纹理论。它是既不同于散斑计量，又不全同于云纹法的一种全新全场位移测量新技术。它具有装置简单、不需防震，可用于研究很大范围内变形的优点，它避免了已有方法对不同变形量需在试件上预制相应的不同频率光栅的麻烦。测量灵敏度可从 0~ 600 l/mm 范围内连续变化。元件对试件的加强效应可忽略。测量误差小于 3%。对于不透明试件，只需在试件上或元件上镀上铝反射层，元件粘贴在试件上，全息干版放在试件前方，感光层紧贴散斑光栅膜。该技术只适用于平面试件，且对平面有一定要求。

### 参 考 文 献

- [1] G. Oster, M. Wasserman, C. Zwerrling, Theorital interpretation of moire patters. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, **54**(2) : 169~ 175
- [2] D. Post, W. A. Baracat, High-sensitivity moire interferometry —— a simplified approach. *Exp. Mech.*, 1981, **21**(3) : 100~ 104
- [3] 姜锦虎, 贴片薄膜位相栅技术及应用. 第六届全国实验力学会议论文集. 北京, 北京大学出版社, 1989 : 925~ 928
- [4] 陈炳泉, 姜锦虎, 程传福, 孔径径向扫描散斑照相法. 光学学报, 1988, **8**(11) : 1018~ 1023

## Measureing Technique with Continuous Frequency Speckle-Grating Film

Jiang Jihu    Xie Anlin    Liu Cheng    Xiao Jinbiao    Sheng Yongzhao  
(Department of Physics, Suzhou University, Suzhou 215006)

(Received 27 June 1996; revised 3 October 1996)

**Abstract** A measuring technique using continuous frequency grating film is proposed, and it's methoc and priciple are given. The method can be used in wide range of deformation studies. The measuring sentivity is adjustable ranging from 0 l/mm to 600 l/mm continuously, or even higher.

**Key words** contiouse frequence, speckle grating, whole-field displacement.