

# 多曝光多孔激光散斑照相法

陈 演 平

(长江水利水电科学研究院)

**提要:** 利用激光散斑空间频率的频分多路传输技术, 能够在一张散斑图上记录物体多次变形的全场位移信息。经光学滤波, 可分别获得对应于物体各次变形的全场位移条纹。

## A multiexposure-multiaperture method of laser speckle photography

Chen Yanping

(The Yangtze River Water Conservancy and Hydroelectric Power Research Institute)

**Abstract:** A method using the frequency division multiplexing technique of the laser speckle's spatial frequency to record multiple displacement information on a single specklegram is presented. The full-field fringes corresponding to each deformation of an object can be obtained respectively by optical filtering. An example is given and the operating procedure is described briefly.

### 引 言

在双曝光激光散斑照相时, 一张散斑图上只能记录一次位移信息, 作全场分析只能获得对应于物体一次变形的全场位移条纹。

在实验力学的许多试验中, 要求在分级施加荷载的条件下研究物体的变形。由于双曝光散斑照相法仅能提供物体在某一级荷载下相对于前级荷载时的位移信息, 为得到物体在各级荷载下相对于其初始状态时的变形, 就不得不反复地对物体加载和卸载。这

不仅不方便, 而且不能用来研究具有不可复原的变形的物体。

注意到激光散斑空间频谱的特性<sup>[1]</sup>, 如在激光散斑照相时对成像光波的空间频率作适当分割, 使对应着物体每一次变形的光波信息分别调制到不同空间频率的载波, 即散斑成像光波上, 就能完成信息的频分多路传输。只要载波选择得当, 被记录在同一张散斑图上的各次变形信息能在全场分析时用光学滤波的方法完全分离开来。

在这一方法中, 同时采用了多曝光和多孔照相技术。

收稿日期: 1984年5月8日。

## 分 析

散斑照相时的光路安排见图 1。

图 1 中,  $x_i, y_i$  和  $x_s, y_s$  分别为透镜及光阑平面和底版平面上的坐标;  $p$  和  $q$  分别为物距与像距。

全场分析时的光路安排见图 2。

图 2 中  $x_f, y_f$  和  $f_x, f_y$  分别为变换平面上的距离坐标和空间频率坐标, 其间关系为:

$$f_x = \frac{x_f}{\lambda f}, \quad f_y = \frac{y_f}{\lambda f} \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为入射激光波长,  $f$  为变换透镜焦距。

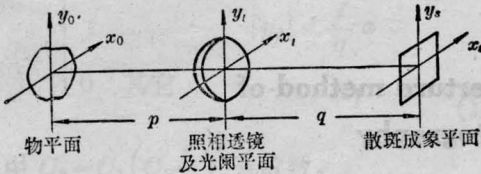


图 1

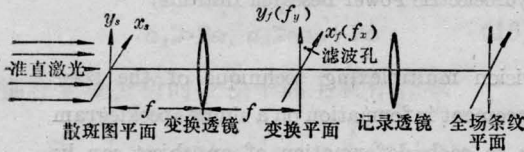


图 2

设在物体发生位移  $d_x, d_y$  前后用图 1 光路作激光双曝光散斑照相, 得到的散斑图放入图 2 光路中作全场分析。这时变换平面上的光强分布  $I'_i(x_f, y_f)$  为<sup>[2]</sup>:

$$I'_i(x_f, y_f) = 4 \cos^2 \frac{M\pi}{\lambda f} (d_x x_f + d_y y_f) I(x_f, y_f) \quad (2)$$

式中  $M$  为散斑照相时的放大倍数,  $I(x_f, y_f)$  则由下式给出:

$$\begin{aligned} I(x_f, y_f) &= C_1 |\mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\}|^2 \\ &= C_1 |\mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\} \star \mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\}|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $U(x_s, y_s)$  为物体变形前在散斑成像平面上的光波复振幅分布;  $C_1$  为常数;  $\mathcal{F}$  为傅里叶变换符;  $\star$  为自相关运算符。

由式(2)可见,  $I(x_f, y_f)$  形成变换平面上的背景光强, 其上调制着携有物体变形信息的余弦平方项。在  $I(x_f, y_f)$  不为零处(坐标中心点除外)开设滤波孔, 即可观察到全场条纹。

对于全孔径散斑照相来说, 光强分布在变换平面上占有最大面积, 但光能分散。双曝光多孔散斑照相法可以将光能集中到变换平面上的几个小区域内, 但未能充分利用变换平面。由于变换平面即光波的空间频谱面, 所以, 双曝光多孔照相法未能充分利用光波的空间频谱。

设在激光散斑照相时, 对物体的  $n$  次变形进行  $n$  次双曝光, 每次双曝光的前后两次曝光条件相同, 但各次双曝光的某些条件不同。  $2n$  次曝光记录在同一块底版上, 并使曝光量控制在底版  $E-t$  曲线的线性部分。对如此得到的散斑图作全场分析时, 变换平面上的光强分布  $I_f(x_f, y_f)$  显然应为:

$$\begin{aligned} I_f(x_f, y_f) &= \sum_{i=1}^n 4 \cos \frac{M\pi}{\lambda f} (d_{xi} x_f + d_{yi} y_f) \\ &\quad \times I_i(x_f, y_f) \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $d_{xi}, d_{yi}$  为第  $i$  次双曝光间物体的位移,  $I_i(x_f, y_f)$  为由第  $i$  次双曝光在变换平面上形成的背景光强分布。

如果在变换平面上存在  $n$  个区域  $F_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ),  $F_j$  可以由几个不连通的子域所构成的, 在  $F_j$  上满足条件:

$$\begin{cases} I_i(x_f, y_f) > 0 & i=j \text{ 时}, \\ I_i(x_f, y_f) = 0 & i \neq j \text{ 时}, \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

那么在  $F_{j=i}$  处就仅有由第  $i$  次双曝光形成的背景光强  $I_i(x_f, y_f)$ , 在该处开设滤波孔, 即可分离出第  $i$  次变形的位移信息。

为此, 考察光强分布的表达式(3)。根据相干成像理论<sup>[3]</sup>, 式(3)中的  $U(x_s, y_s)$  可以写成:

$$U(x_s, y_s) = \tilde{h}(x_s, y_s) * U_g(x_s, y_s) \quad (6)$$

式中  $\tilde{h}(x_s, y_s)$  为散斑照相时成像系统的脉冲

响应函数;  $U_0(x_s, y_s)$  为理想成像时的像面光波复振幅分布;  $*$  为卷积运算符。

对式(6)两边作傅里叶变换得:

$$\mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\} = \mathcal{F}\{\tilde{h}(x_s, y_s)\} \mathcal{F}\{U_0(x_s, y_s)\} \quad (7)$$

式中  $\mathcal{F}\{U_0(x_s, y_s)\}$  为理想成像时的散斑场空间频谱, 根据激光散斑的基本性质, 其值在一个很大的范围内接近为一个常数<sup>[1]</sup>, 设为  $C_2$ 。于是上式就成为:

$$\mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\} = C_2 \mathcal{F}\{\tilde{h}(x_s, y_s)\} \quad (8)$$

根据傅里叶光学, 脉冲响应函数  $\tilde{h}(x_s, y_s)$  的傅里叶变换等于光学系统的相干传递函数  $H(f_x, f_y)$ , 后者又与成像时的光瞳函数  $P(x_l, y_l)$  有相同的函数形式<sup>[4]</sup>, 于是有:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\} &= C_2 H(f_x, f_y) \\ &= C_2 P(-\lambda q f_x, -\lambda q f_y) \end{aligned} \quad (9)$$

这里  $f_x, f_y$  系频域坐标, 用式(1)代换成变换平面上的距离坐标后为:

$$\mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\} = C_2 P\left(-\frac{q}{f} x_f, -\frac{q}{f} y_f\right) \quad (10)$$

代入式(3), 得:

$$\begin{aligned} I(x_f, y_f) &= C_1 C_2^2 \left| P\left(-\frac{q}{f} x_f, -\frac{q}{f} y_f\right) \right. \\ &\quad \left. \star P\left(-\frac{q}{f} x_f, -\frac{q}{f} y_f\right) \right|^2 \end{aligned} \quad (11)$$

该式表明, 全场分析时变换平面上的背景光强的分布形式取决于散斑照相时的光瞳函数形式。设对物体的第  $i$  次变形所作的双曝光散斑照相采用的光瞳函数为  $P_i(x_l, y_l)$ , 如在  $x_l, y_l$  平面上存在  $n$  个区域  $L_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ),  $L_j$  可以是由几个不连通的子域所构成的, 在  $L_j$  上满足条件:

$$\begin{cases} P_i(x_l, y_l) \star P_i(x_l, y_l) > 0 \\ \quad i=j \text{ 时,} \\ P_i(x_l, y_l) \star P_i(x_l, y_l) = 0 \\ \quad i \neq j \text{ 时,} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (12)$$

则用这些光瞳函数依次曝光得到的散斑图在

作全场分析时, 变换平面上必定存在满足式(5)条件的区域  $F_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ), 因此就可以保证各次变形信息的分离。

## 计算与实验

设以图3所示多孔光阑作多曝光激光散斑照相。照相透镜直径为  $D$ ; 四个方孔边长均为  $a$ ; 孔中心距分别为  $a_1$  和  $a_2$ 。

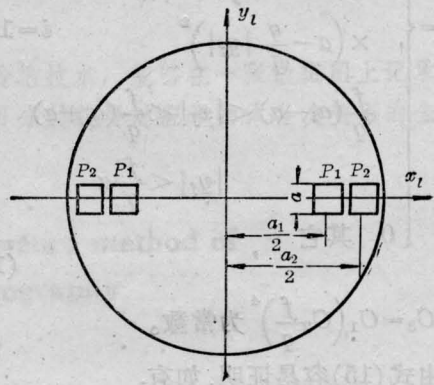


图 3

对于第  $i$  次变形, 用  $P_i$  透光进行照相。光瞳函数  $P_i(x_l, y_l)$  为:

$$P_i(x_l, y_l) = \begin{cases} 1 & \frac{1}{2}(a_i - a) < |x_l| < \frac{1}{2}(a_i + a), \\ & |y_l| < \frac{a}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad i=1, 2 \quad (13)$$

作自相关运算后得到:

$$P_i(x_l, y_l) \star P_i(x_l, y_l) = \begin{cases} 2(a - |x_l|)(a - |y_l|) & |x_l| < a, |y_l| < a \\ (a - |a_i - |x_l||)(a - |y_l|) & a_i - a < |x_l| < a_i + a, |y_l| < a \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad i=1, 2 \quad (14)$$

将上式作变量替换后代入式(11),得到变换平面上对应于第*i*次变形的背景光强分布为:

$$I_i(x_f, y_f) = \begin{cases} 4C_3 \left( a - \frac{q}{f} |x_f| \right)^2 \left( a - \frac{q}{f} |y_f| \right)^2 & |x_f| < \frac{f}{q} a, |y_f| < \frac{f}{q} a \\ C_3 \left( a - \left| a_i - \frac{q}{f} |x_f| \right| \right)^2 & \times \left( a - \frac{q}{f} |y_f| \right)^2 & i=1, 2 \\ \frac{f}{q} (a_i - a) < |x_f| < \frac{f}{q} (a_i + a) & |y_f| < \frac{f}{q} a \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

式中  $C_3 = C_1 \left( C_2 \frac{f}{q} \right)^4$  为常数。

由式(15)容易证明,如有:

$$a_1 \geq 2a, a_2 \geq a_1 + 2a \quad (16)$$

则在全场分析时变换平面上就存在域

$$F_1: \begin{cases} \frac{f}{q} (a_1 - a) < |x_f| < \frac{f}{q} (a_1 + a), \\ |y_f| < \frac{f}{q} a \end{cases}$$

和域

$$F_2: \begin{cases} \frac{f}{q} (a_2 - a) < |x_f| < \frac{f}{q} (a_2 + a), \\ |y_f| < \frac{f}{q} a, \end{cases}$$

满足式(5)的条件。在  $F_1$  和  $F_2$  处依次开滤波孔,即可分别得到对应于物体第一次和第二次变形的全场位移条纹。

用图3所示光阑对两次变形的物体作了四曝光激光散斑照相法的实验研究。照相透镜为华光牌,孔径比4.5,焦距210mm。光阑方孔边长  $a=4$  mm,孔心距为  $a_1=30$  mm,  $a_2=40$  mm。采用NH-T<sub>3</sub>型氦-氖激光器照明,实际输出功率20mW,散斑照相时的放

大倍数  $M=0.46$  倍,记录底版为天津产全息I型干版。傅里叶变换透镜用  $\phi 100$  mm 的准直镜代用。为充分利用变换透镜口径,全场分析时将散斑图靠近变换透镜放置,与图2光路略有不同。实验在GS-79型防振台上进行,曝光步骤为:

第一次曝光:物体不加荷载,掩盖  $P_2$  两孔,以  $P_1$  两孔透光进行散斑照相。

第二次曝光:物体不加荷载,掩盖  $P_1$  两孔,以  $P_2$  两孔透光进行散斑照相。

第三次曝光:加第一级荷载,掩盖  $P_2$  两孔,以  $P_1$  两孔透光进行散斑照相。

第四次曝光:加第二级荷载,掩盖  $P_1$  两孔,以  $P_2$  两孔透光进行散斑照相。

各次曝光时间相等。

经过四次曝光之后,物体的第一次变形由第一、三两次曝光记录下来,第二次变形由第二、四两次曝光记录下来。将散斑图放入全场分析光路后,变换平面上将出现位于一条直线上的五个小光晕。除中心光晕不能用于观察外,在内侧任一光晕处开滤波孔可以观察到物体第一次受载后相对于初始状态时的位移条纹;在外侧任一光晕处开滤波孔可以观察到物体第二次受载后相对于初始状态时的位移条纹。

图4即为用该法获得的全场照片。物体是一个重力坝的断面模型,模型用石膏制作以模拟原型的混凝土特性。左图是模型在受20kg模拟水荷载时的水平位移分量的全场照片,右图则是受24kg荷载时的全场照片。

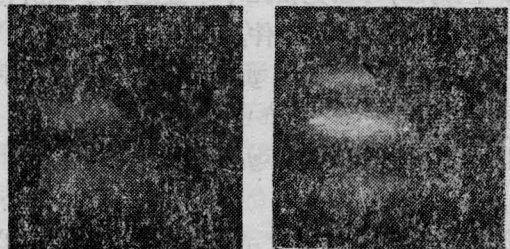


图 4

## 结 束 语

多曝光多孔激光散斑照相法可以在一张散斑图上记录多次全场位移信息并分别提取信息。这一方法不仅可用于获得物体在各级荷载作用下相对于初始状态时的变形信息,而且只要适当安排光阑和曝光顺序,还可用于获得物体各次变形间的各种组合形式的相对位移信息。这一方法特别适用于研究需要分级加载的具有不可复原变形的物体。

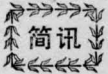
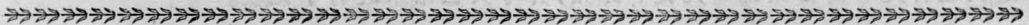
光阑孔不仅限于排列在直径方向上。只要满足前述条件,孔的排列形式可以灵活变化。为观察到几个方向上的位移,每次曝光可选用三孔、四孔等。孔越靠近外部,记录变形的灵敏度就越高。如在散斑照相时采用较

大功率的激光,孔就可以开得很小,沿透镜圆周位置可以排列许多孔,以很高的灵敏度记录多次变形信息。

多曝光多孔法是在双曝光多孔法的基础上发展起来的,两者有类似的优缺点。使用多孔法,在全场分析时可将滤波孔开在光强较集中的区域,比全孔径法优越;但如要改变观察方向和观察灵敏度,就受到局限,不如全孔径法方便。

## 参 考 文 献

- [1] J. M. Burch *et al.*; *Opt. Acta*, 1968, 15, No. 2, 104.
- [2] F. P. Chiang *et al.*; *Appl. Opt.*, 1979, 18, No. 13, 2176.
- [3] J. W. Goodman; “傅里叶光学导论”, 科学出版社, 北京, 1979年, p. 109.
- [4] 同上, pp. 125~128.



## “光纤传感器发展规划座谈会”在北京召开

国家科委新技术局于1985年1月8日至11日在北京召开了“光纤传感器发展规划座谈会”,来自全国各地近60个研究、应用单位及高等院校和有关国家机关的100多名代表参加了会议。

会上,有关专家和教授作了三十多篇学术报告,介绍了国内外光纤传感技术的发展动态,我国光纤传感技术在国防、电力、冶金、石油、化工、铁路交通、仪器仪表、控制测量、医疗生物等领域内的研究和应用情况。对光纤制造技术和光纤传感器用的元器件、

材料的研究和发展动态也作了较系统的介绍。

会议代表对“光纤传感技术七五规划(讨论稿)”进行了认真而热烈的讨论,提出了不少补充和修改意见,并建议国家科委新技术局将其整理定稿后报送有关领导部门正式列入“七五”规划。

为促进学术交流,会议建议有关学会在适当时候组织召开第一届全国光纤传感技术学术交流会。

(吉禾)