

用白光散斑的直接记录法测量曲面变形

屠美容 李敏华 韩金虎
(中国科学院力学研究所)

摘要 本文提出以物体表面精细光学结构在白光照射下辐射率随机分布函数作为散斑场,以全息软片为记录介质,采取无镜头成象技术,得到宽频域的散斑底片,并用有一定带宽的准单色光进行全场分析,测量可展曲面变形。其结果不仅具有较高的灵敏度,较大的灵敏度调节范围,而且其中的准备过程、记录过程和分析过程比现有的各种测量曲面变形的散斑法都要简单。该方法将可展曲面变形问题简单地转化为平面问题处理,保留了白光散斑直接记录法在测量平面变形时的全部优点,并能脱离暗室在工程现场中应用。

关键词 应变测量、曲面、白光散斑。

一、引 言

工程中大多数实际构件是曲面状的,因此,用散斑法对曲面变形进行测量是多年来从事光测力学的工作者甚为关注的问题。

散斑法根据其记录时所采用的方式不同,可以分为主观和客观两种(或直接记录和照相记录两种)。通过透镜用照相机记录的散斑叫主观散斑;用感光材料直接对漫反射物体表面的散斑场感光的叫做客观散斑。散斑法根据其记录时所使用的光源来分,又可以分为激光散斑和白光散斑两种。如图 1 所示,主观散斑可以用激光照明,也可以用白光照明。同理,客观散斑也可以用激光照明或白光照明。

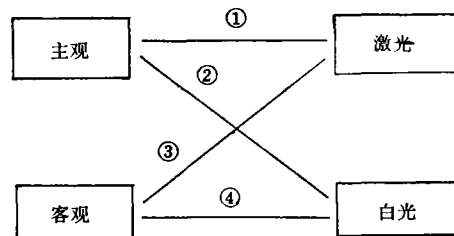


图 1 散斑的分类

在用主观激光散斑法(即方法 1)进行曲面变形测量时,不仅测量灵敏度受到照相镜头分辨率的限制,而且,由于成象系统不能对曲面上各点同时对焦,各物点具有不同程度的离焦,记录在底片上的散斑场不能简单地与物点相对应,而与照明方向、观察方向、面元的空间方位以及离焦距离有关,甚至还要考虑应变本身的影响。因此,对曲面变形的定量分析就显得相当复杂^[1-2]。

用主观白光散斑法(即方法 2)测量曲面变形时^[3],由于白光散斑是附着在曲表面上的,它和曲面变形一起运动,因而无须探讨散斑的空间运动规律,定量计算过程简化了。

但是,由于照相镜头不能对曲面上各点同时聚焦,离焦所造成的波象差将造成系统光学传递函数对频率响应的急剧下降,从而使测量灵敏度受到很大限制。

1982 年与 1983 年 F. P. Chiang 和 C. C. Kin 提出用远场客观激光散斑法测量曲面变形^[4,5](这一方法可以归纳为方法 3),他们在试件表面先涂上一层感光材料,用一束扩束激光透过毛玻璃、照射在试件表面,被毛玻璃所形成的空间散斑场便会落在试件表面,对此,作变形前后的两次曝光,物体表面的感光层便记录了变形前后的两套散斑信息。经过冲洗后,可在曲面上直接提取位移值。用这种方法测量曲面变形,其分析过程也很简单,它没有离焦问题,没有刚体位移,散斑运动的方向与照明方向、观察方向以及曲面元的方位角均无关系,从而避免了对复杂的散斑空间运动规律的探讨。但是,用这种方法只能逐点提取信息,不能进行全场分析。其次,每次测量前,都要在试件上予先涂布感光乳胶,这对于重复加载和多级载荷状态下的变形测定是不方便的。

本文提出用近场客观白光散斑法测量可展曲面变形(即方法 4)。它既避免了对复杂的散斑空间运动规律的探讨和离焦问题,又无需在试件表面涂布感光乳胶,其中的准备过程、记录过程和分析过程比以上各种方法都要简单。

二、基本原理

光学粗糙表面,在受激光照射后,由于各漫反射子波的相互干涉,在它的前方空间形成散斑场,以此可作为物体变形测量的参照物。与此同时,由于高度的相干照明对光路系统中的缺陷极其敏感,任何透镜上的微小尘粒都可能引起十分显著的衍射图样叠加在象上、造成许多额外的“散斑”,这些散斑并不是我们所需要的变形信息,而是无用的噪声,它的出现,使干涉条纹粗糙、信息模糊,影响了测量精度。

同样的光学粗糙的物体表面,在受到白光照射后,辐射光是空间不相干的,物体前方空间的散斑场消失了。但是物体本身可以看作是点辐射体的集合,辐射率随点而变化。一个成像系统,不管是有透镜成像系统还是无透镜成像系统,都把辐射率分布映射成象面上的照度函数。对于一个光学粗糙表面,这一照度函数是随机分布的,但它却表征着

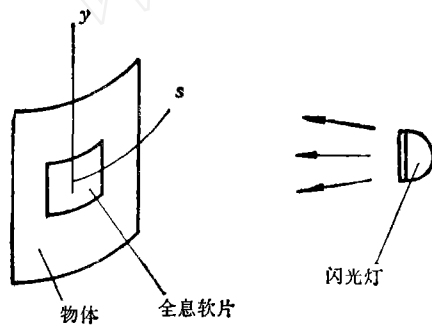
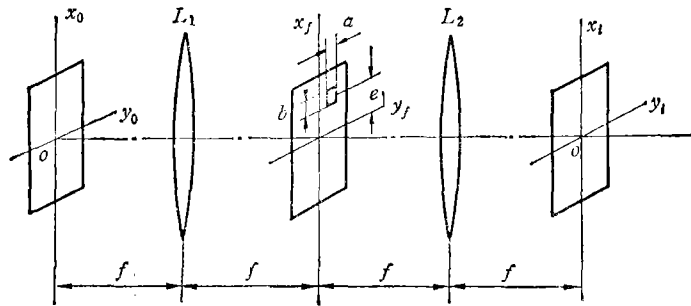


图 2 白光散斑直接记录光路图

这一粗糙表面的固有特征。当物体表面有微小位移时,它也会随之运动,因此,与激光产生的散斑场一样,它也可以作为测量物体表面变形的参照物,我们把这一辐射率随机分布的函数叫做白光散斑场。

用近场客观白光散斑法测量可展曲面的记录光路如图 2 所示。它利用全息软片的柔软性,使乳胶面与试件表面紧贴,并固定其中一点。加载时,物体表面与全息软片之间能自由地相对滑动,用闪光灯作光源,对此作物体变形前后的两次曝光,底片上得到两组散斑图的叠加,它与物体曲表面的位移呈一、一对应的关系。经正常冲洗后,再将底片展平放在富里哀光路图的输入面内进行全场滤波,提取信息。为分析方便起见,现以图 3 所示

图 3 全场滤波的四 f 系统

的四 f 系统说明之。设物体表面上任意一点 G ，在变形前后分别位于全息底片上 G_1, G_2 两点，相应的散斑强度分别为 $I(x'_0, y'_0)$ ， $I(x'_0 + dx, y'_0 + dy)$ 。如果仅考虑输入底片上 G_1, G_2 两点，则振幅透射率可写成

$$t(x_0, y_0) = KI(x'_0, y'_0) [\delta(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0) + \delta(x_0 - x'_0 - dx, y_0 - y'_0 - dy)] \quad (1)$$

当用单位振幅的单色平面波垂直照明时，由 G_1, G_2 两点在透镜 L_1 的后焦面上形成的光场复振幅分布

$$U(f_x, f_y) = \frac{k}{j\lambda f} I(x'_0, y'_0) \{1 + \exp[-j2\pi(f_x dx + f_y dy)]\} \\ \times \exp[-j2\pi(f_x x'_0 + f_y y'_0)] \quad (2)$$

其中

$$f_x = \frac{x_i}{\lambda f}, \quad f_y = \frac{y_i}{\lambda f}.$$

如在谱面上用矩形孔滤波，即用函数 $\text{rect}\left(\frac{x_i - e}{2b}\right)\text{rect}\left(\frac{y_i}{2a}\right)$ 乘以上式，由于透镜 L_2 的富里哀变换性质，在输出平面 x_i, y_i 上光场强度分布为

$$I(x_i, y_i) = K^2(4f_a f_b)^2 I^2(x'_0, y'_0) \cdot \sin^2[2f_b(x_i - x'_0)] \\ \cdot \sin^2[2f_a(y_i - y'_0)] \cdot 2(1 + \cos 2\pi f_c dx) \quad (3)$$

它表明，输出平面上的光强分布受到因子 $[1 + \cos(2\pi f_c dx)]$ 的调制，当 $dx = \frac{n\lambda f}{e}$ 时光强极大，当 $dx = \frac{\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda f}{e}$ 时，光强极小， $n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ 。

由此可见，用白光散斑场测量物体表面变形的原理与激光散斑场的原理是一样的，只不过散斑的起因不同而已。用白光散斑测量曲面变形，其散斑的运动规律简单，散斑的运动就是物体曲表面的运动，用全息软片作为记录介质的客观白光散斑法能忠实地记录散斑的运动，它克服了离焦现象，因而比主观白光散斑法更准确地反映变形信息，在全场分析时，又能将软片展平，将曲面问题简化成平面问题。

为了有效地利用变换孔径，减少渐晕效应，在实际分析中我们常采用图 4 的光路。此时，散斑底片紧贴透镜，物孔径完全被照明，投影光瞳函数可以略去。由此而得到的焦面上的振幅分布虽然不是输入面上复振幅分布的准确的富里哀变换，但与准确的富里哀变

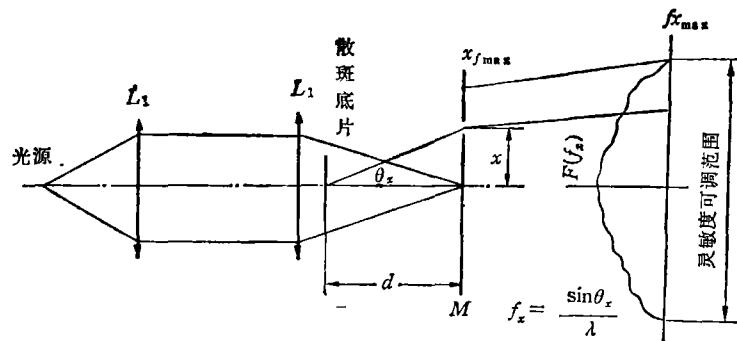


图4 常用的全场分析光路图

换之间只相差一个二次位相因子,它对强度测量不起作用。当物面在透镜 L_2 后,与谱平面的距离为 d 时空间频率与谱面上的坐标对应关系为

$$f_x = \frac{x}{\lambda d}, \quad f_y = \frac{y}{\lambda d}.$$

为了减少二次散斑效应,本文采用非相干光进行全场分析,光路图如图5所示。它以白光作光源,并加滤色片,滤色片的频率满足准单色光条件:

$$\frac{\Delta\nu}{\bar{\nu}} \ll 1, \quad \frac{1}{\Delta\nu} \gg \frac{r}{c}$$

此时,复振幅遵从的传播规律与频率为 $\bar{\nu}$ 的单色光所遵循的传播规律相同。

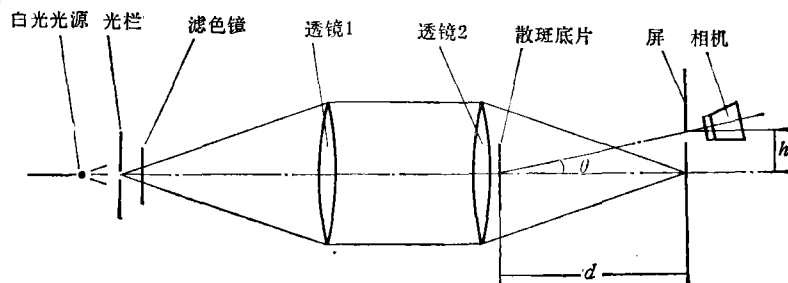


图5 非相干光全场分析光路图

三、测量灵敏度与散斑细度之间的关系

在散斑法的全场分析过程中可以看出,滤波孔的位置越高,空间频率也越高,测量的灵敏度也就越高。但是,滤波孔的位置不是能随意提高的,它受散斑底片中所包含的空间频率域的限制,当滤波孔的位置超出散斑底片所包含的频带范围,在输出面上将得不到任何干涉条纹。因此,用散斑法测量位移的灵敏度与散斑底片中所包含的空间频率域有密切而直接的关系。底片中的最高空间频率就是测量时所能达到的最高灵敏度,底片中的空间频率范围就是灵敏度可以调节的范围。因此,要提高测量灵敏度和扩大灵敏度调节范围,关键是要获得一个宽频域的散斑底片。

在相干光照明的条件下,成象系统对于复振幅的变换是线性空间不变的;在非相干光照明的条件下,成象系统对于光强的变换是线性空间不变的。对于线性空间不变系统有关系式

$$g_2 = g_1 * h.$$

其中 g_1 为输入函数, g_2 为输出函数, h 是该系统的脉冲响应。对上式两边作富里哀变换, 有下述更简单的关系式

$$G_2(f_x, f_y) = H(f_x, f_y)G_1(f_x, f_y)$$

其中 G_1, G_2 分别是输入函数 g_1 与输出函数 g_2 的富里哀变换, H 是脉冲响应的富里哀变换, 称为系统的传递函数。因此, 无论是相干光照明还是非相干光照明, 散斑底片上的空间频率响应是散斑场的空间频率和系统的传递函数综合的结果。直接记录的无镜头成象法提供了一条很好的记录途径, 它使物面上的高频成份几乎全部被紧挨着的全息底片所接受。但是, 仅此一点是不够的, 我们还必须使待记录的白光散斑场本身有很宽广的空间频谱范围。

由富里哀数学的知识得出: 一个窄的全频谱, 意味着一个比较光滑的函数, 而一个快速振荡的函数则产生一个宽的全频谱^[6] 因此, 要获得一个宽的全频谱的散斑场, 必须使物体表面光学结构迅速振荡, 并不断出现尖峰、谷值与间断点, 结构越精细, 它的富里哀分量的空间频率就越高, 频谱范围也就越宽广。

基于这一主导思想, 我们并未采用在试件表面喷洒玻璃微珠、涂添和洒小墨点等人工制斑手段, 而是用抛光法改造试件表面, 使物体表面有精细的光学结构, 辐射率满足快速振荡的条件, 同时又有很好的反射比。

四、实验验证

以铝合金薄壁圆柱筒壳为试件 (见图 6), 材料 LF 6 筒壳外径 $\phi 250$ mm, 壁厚 2.5 mm, 测量面积 100×100 mm², 圆筒受均布轴压, 载荷 $P = 9800$ N 为适应在不具备暗室条件的现场测量, 可制一暗袋, 暗袋的一端与试件相联结, 另一端与闪光灯联通, 全息软片通过暗袋放置、取下。图 7 是 $\phi 250$ mm 带孔园柱薄壁筒壳受轴压时全场干涉条纹图, 其空间频率分别为 1931/mm, 2271/mm, 2601/mm 及 2931/mm。图 8 是由图 7 测得的 s 截面上的应变分布曲线。

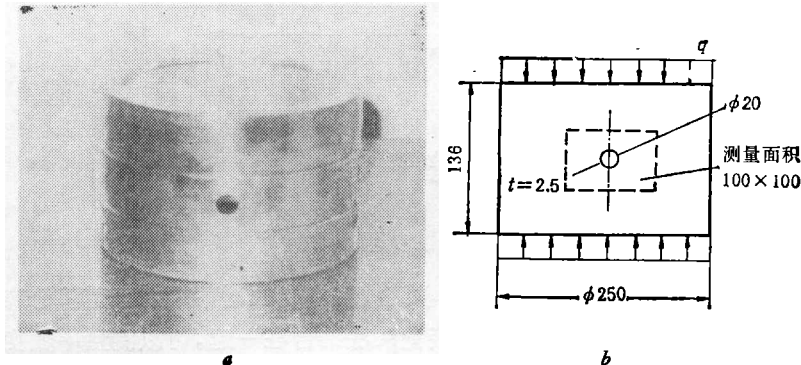


图 6 试件形状与尺寸图

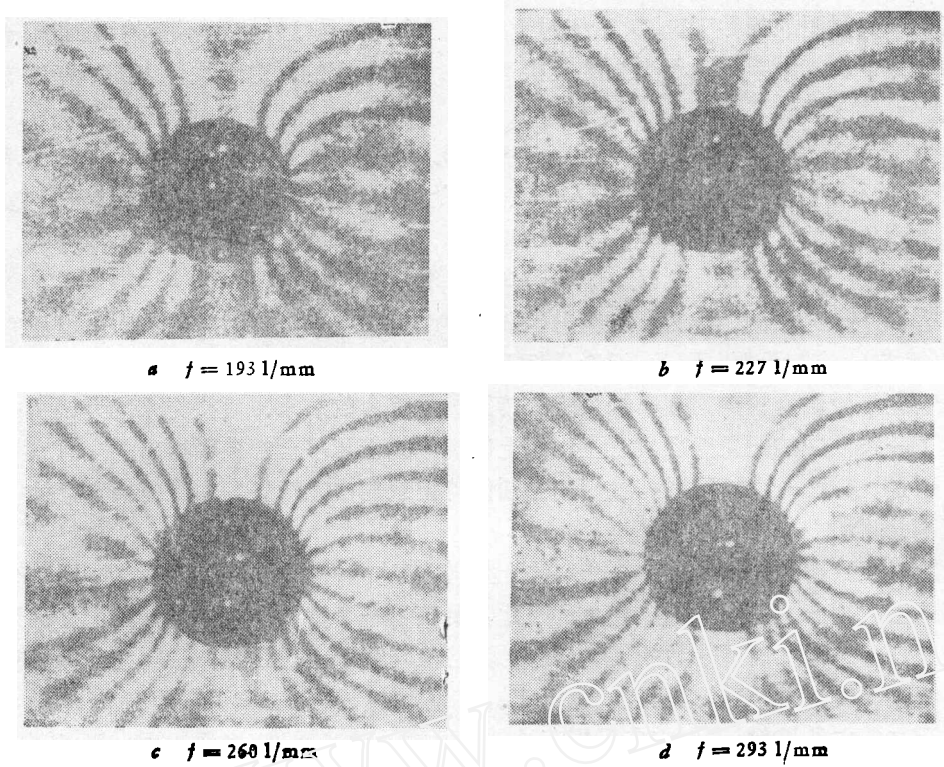


图 7 受压圆筒小孔附近的位移场

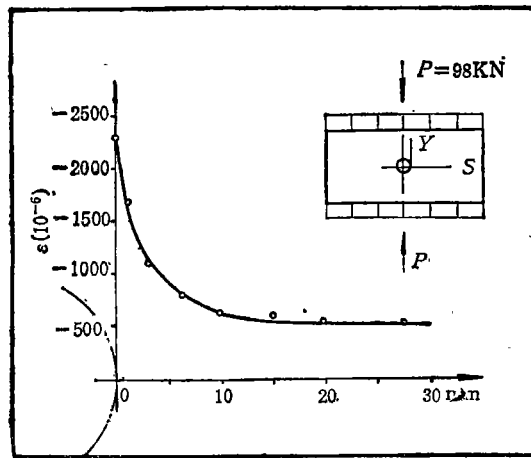


图 8 孔边应变分布曲线

五、结 束 语

实践表明,以抛光后物体表面精细光学结构在白光照射下辐射率随机分布的函数作为散斑场,将白光散斑与无镜头成象的直接记录法结合在一起,可以测量平面变形和可展曲面变形.它精简化了记录设备,克服了记录系统与被测物体之间的刚体位移,降低了实

验过程中对环境稳定性的要求,最大限度地保留了被测物体表面散斑场中的高频成份,并抑制了相干噪声、改善了图片质量,使干涉条纹光滑清晰,既保留了直接记录法的优点,又克服了激光光源带来的不足. 此方法在应用于可展曲面变形的测量时,将曲面变形问题简化为平面问题,其中的准备过程,记录过程和分析过程比现有的各种测量曲面变形的散斑法都要简单,它避免了对复杂的散斑空间运动规律的探讨,和散焦面元对于物体上各对应点的必要修正. 也避免了在照相记录过程中对细小散斑颗粒的严格对焦而必需进行的耐心而细致的工作,获得了高灵敏度的、清晰的全场干涉条纹图.

本方法的测量灵敏度介于普通云纹法和全息云纹干涉法之间,测量变形的范围正好是这两种方法的补充,而对环境稳定性的要求则比全息云纹干涉法大大降低,能脱离暗室,应用于工程现场,可以预言,它将在弹塑性应变场的测试中显示出越来越强的生命力.

参 考 文 献

- [1] Wu Xiaoping, He Shiping, Li Zhichao "Movement of space speckle" Fourth SESA International Conference on Experimental Mechanics, Boston, Mass. May, 1980.
- [2] Zhou xingeng, "Deformation measurement of curved surface by laser subjective speckle" Proceeding of the International Conference on Experimental Mechanics, Beijing China, Oct. 1985.
- [3] 姜复本、刘宝琛、蔺书田 "多孔白光散斑方法应用于受压带孔圆筒的应变分析", 固体力学学报 1981 年第一期.
- [4] Chiang, F. P., Kin, C. C. "Strain determination on curved surfaces using far-field objective laser speckles" *Opt. Eng.* 21(3) 441(1982).
- [5] Kin, C. C., Chiang, F. P. "Objective laser speckle method for three dimensional displacement measurement on curved surfaces" *Opt. Eng.*, 22(1) 153(1983).
- [6] Gaskill, JACK D. "Linear Systems, Fourier Transforms and Optics" John Wiley & Sons, Inc. 1978.

STRAIN DETERMINATION ON CURVED SURFACES BY OBJECTIVE WHITE LIGHT SPECKLES

Tu Meirong, Li Minhua, Han Jinhu

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract A close-range objective white light speckle method has been used for strain determination on single curved surfaces. The speckle field is not the artificially printed random dots but only the radiance distribution of object surface which was slightly treated before the test to produce fine structure of optical details. The holographic film in stead of holographic plat is clamped closely to the curved surface when illuminated by a flash light. Whole field fringe patterns are obtained with high sensitivities and large adjustable range. There is no longer a requirement to relate the speckle movement on image plane to the object surface. Defocus problem has been avoided. It can be practically applied to engineering problems with considerable convenience because of the very simple recording system and little demand for environmental stability.

Key words strain determination, curved surfaces, white light speckles.