

栅线 Fourier 变换分析法及计算机云纹技术

冯传玉, 韩 耘, 马 利, 何世平

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230026)

摘要:研究了栅线 Fourier 变换位相分析法,用以测试微小试件的小变形和大样品的大变形.为了实时显示试件的变形,研究了计算机云纹技术.文中进行了计算机模拟和实验标定,并对测试精度进行了分析.

关键词:栅线分析法;计算机云纹技术;FFT

中图分类号:0348

文献标识码:A

前 言

在基础研究或工程应用研究中,常常会遇到需要测量微小试件的小变形和大样品的大变形的情况.通常的测试技术用在这两种极端的情况下,都有一定的困难.

对于测量微小试件的小变形,已有不少文献研究了各种显微干涉云纹技术.虽然目前的制栅技术可以制出超高密度的精细栅线,但是建立在干涉计量基础上的显微干涉云纹技术,仅通过提高栅线密度来提高其测试灵敏度的途径是有限的.如果借助高放大倍数的显微成像系统,利用 Fourier 变换位相分析技术直接分析超高密度的变形栅线,则可提高测量微小试件小变形的测量灵敏度和空间分辨率.

对于大样品、大变形的现场测试,平面云纹法应该是最佳的技术.因为该技术设备简单、不需防震、测量范围大.但对于现场测量大样品的大变形,有两点困难: i 参考栅难以施加; ii 大量条纹图中的数据难以处理.从数据处理的角度考虑,最理想的方法是 FFT 技术.只要提供一幅条纹图,就可以给出每个像素点上的位移.但应用 FFT 技术必须给条纹图施加载波,而施加载波就要求能控制参考栅,这对大样品、大变形的现场测试同样有困难.但如果利用 Fourier 变换位相分析技术直接检测变形栅线的位相信息(简称栅线分析法),既不需要施加参考栅,也不用另外引入载波,且工艺简单、操作方便,在现场也易于实施;而且应用 Fourier 变换位相检测技术分析数据,还可以提高测试精度和空间分辨率,便于数据的自动处理.

栅线分析法不用参考栅,也就不可能实时显示云纹条纹图.为了能实时观测全场位移等值线,本文采用计算机云纹法,也即先用 CCD 摄像机采集原始栅线图存入计算机作参考栅,再将实时摄录的变形栅与参考栅实时叠加或相减,就可以在计算机上实现实时几何云纹法.

收稿日期:2000-07-15

作者简介:冯传玉,男,1972年生,硕士.

计算机云纹条纹图与几何云纹条纹图完全相同,其条纹也是位移分量等值线.

1 计算机模拟及计算机云纹实验

为了验证栅线分析法及所编软件的可行性,研究栅线分析法的测量灵敏度和精度,本文用计算机对栅线分析法进行了数值模拟.

1.1 栅及栅变形的模拟

为了进行栅线 Fourier 变换位相检测法的计算机模拟,首先必须模拟生成正弦栅及栅线变形.本文采用 Borland C++ Builder4.0 编制了模拟程序,生成单向正弦栅及正交的正弦栅(为了缩减篇幅,以下只介绍单向栅的栅线分析计算机模拟及结果).

(i) 正弦栅的生成

主方向沿 x 方向的单向正弦栅,其灰度分布用下式描述:

$$S(x, y) = 127.5[1 + \cos(2\pi f_x x)] \quad (1)$$

式中, f_x 为 x 方向的空间频率, $2\pi f_x x$ 是位相,其灰度从 0 至 255 呈正弦分布.

考虑到实验中用 CCD 摄像机拍摄栅线图时会产生随机噪声,本文在程序设计中加入由随机函数产生的随机噪声,以便尽可能模拟真实的实际情况.

(ii) 模拟正弦栅的变形

正弦栅的变形用下列三种函数来模拟:

$$1 > \text{试件 1:} \quad u = ay^2 + by + c$$

$$2 > \text{试件 2:} \quad u = \sqrt{ax^2 + by^2}$$

$$3 > \text{试件 3:} \quad u = a / \sqrt{x^2 + y^2}$$

为了便于将变形栅与原始栅进行比较,模拟变形栅的上部边界附近保持了部分未变形的原始栅.生成的单向正弦栅及三种变形栅如图 1 所示.

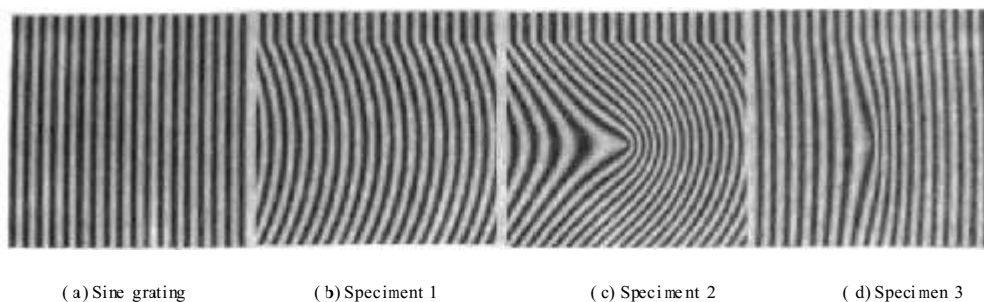


图 1 模拟的正弦栅及栅的变形

Fig.1 Simulative sine grating and deformed grating

1.2 计算机模拟步骤

(1) Fourier 变换位相分析

将原始栅图和变形栅图分别进行 Fourier 变换,并进行位相反解以及位相展开,以求出原始栅图和变形栅图的位相分布.再将原始栅图和变形栅图的位相分布相减,给出变形引起的位相分布.

(2) 求出位移分布

根据下式,由每个象素点上的变形位相值求出该点的位移.

$$u = \Phi / 2\pi f_x \quad (2)$$

对于正交栅线,其分析步骤与单向栅类似.但正交栅在进行 Fourier 变换时,需要分别提取两个正交方向上的频谱,分两次计算变形结果,分别求出 x , y 方向的位移分量.

1.3 计算机云纹实验

首先用 CCD 摄像机采集原始栅线图并存入计算机作参考栅,再将变形栅与参考栅实时叠加,就可以在计算机上实现实时几何云纹法.计算机云纹条纹图与几何云纹条纹图完全相同,其条纹也是位移分量等值线.文中用计算机对计算机云纹法同样进行了模拟.

1.4 计算机模拟及计算机云纹实验结果

(1) 试件 1 的实验结果,位移函数为 $u = 0.005y^2 + 0.05y + 0.5$ (18 线).

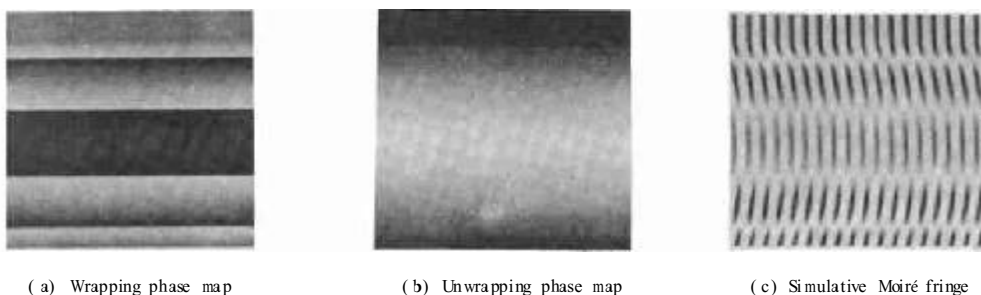


图 2 试件 1 的结果

Fig 2 Results of specimen 1

(2) 试件 2 的实验结果,位移函数为 $u = \sqrt{x^2 + y^2}$ (18 线).

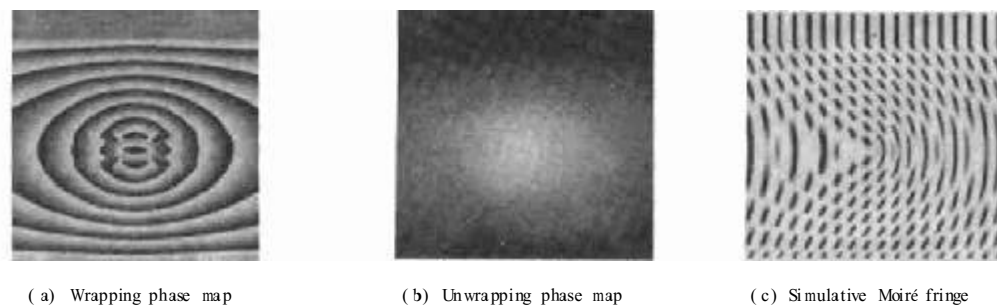


图 3 试件 2 的结果

Fig 3 Results of specimen 2

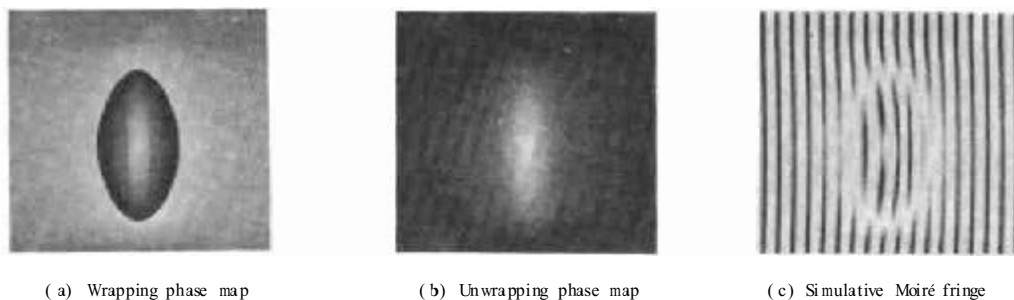


图 4 试件 3 的结果

Fig 4 Results of specimen 3

(3) 试件3的实验结果,位移函数为 $u = 1 / \sqrt{x^2 + y^2}$ (18 线)。

(4) 结果分析

为了检验栅线 Fourier 变换位相检测技术的测试精度,将上述模拟结果与变形函数的给出值相比较,进行误差分析,试件1、试件2及试件3结果的方差分别为 0.019、0.017、0.018。分析表明,该方法具有很高的精度,方差不超过 0.02 个像素。

2 标定实验

在实际的实验中,往往会遇到各种复杂的情况,给实验结果引起误差。本文对大样品大变形的测量进行了实际的标定实验,以便研究栅线分析法在现场测量时的实际精度。由于协作单位的大型模型试验机正在制造中,标定实验采用模拟实验进行。

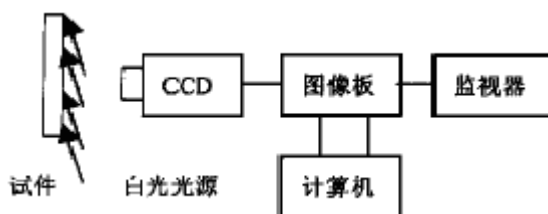


图5 实验装置示意图

Fig.5 Experiment setup

实验装置示意图如图5所示。实验所用栅线是用丝网印刷法将计算机生成的正弦栅复制在不干胶上形成的转贴型、可剥离的薄膜栅,薄膜栅大小为 400 mm × 400 mm。将剥离的薄膜栅转贴到水泥墙壁上,CCD 摄像机安装在三角架上,通过改变成像放大率以及旋转 CCD 摄像机镜头两种方式,来分别模拟

均匀拉伸和刚体旋转实验。这种模拟实验能在现场模拟真实栅线、白光照明、现场采图等实际情况,唯一不能反映试验机震动引起的实验误差。拉伸试件和旋转试件的栅线数分别为 25 线和 20 线。

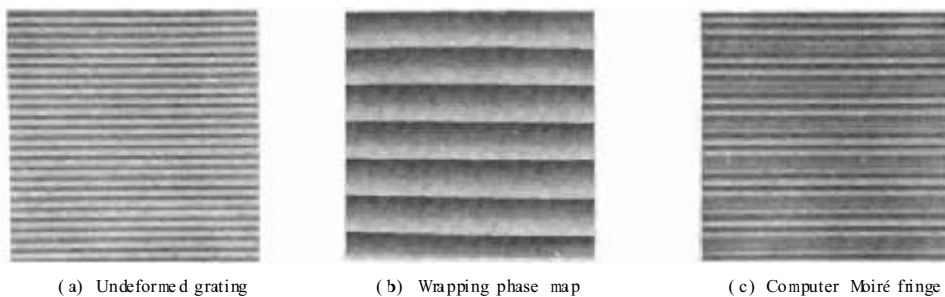


图6 均匀拉伸实验结果

Fig.6 Experimental results of affine tension specimen

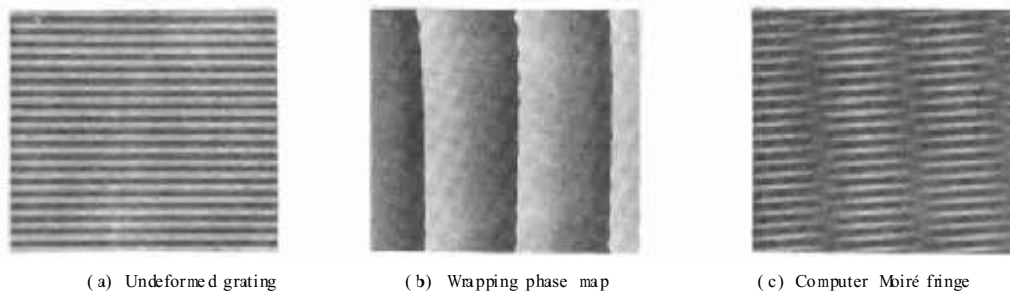


图7 刚体旋转实验结果

Fig.7 Experimental results of rigid rotation specimen

图 6 和图 7 分别为均匀拉伸和刚体旋转的实验结果.均匀拉伸实验的实际应变为 0.2547,利用栅线分析法测量的应变结果为 0.2598,两者相差 2%.刚体旋转实验的实际转角为 0.1317 弧度,利用栅线分析法测量的转角为 0.1285 弧度,两者相差 2.4%.

3 结论和讨论

本章的研究工作表明,栅线 Fourier 变换位相分析技术是可行的,无论对于微小试件小变形的测量,还是对于大样品大变形的检测都是适用的.

根据计算机的模拟结果可知,栅线 Fourier 变换位相分析技术的测试精度约为 0.02 个像素.具体到实际试件的测试精度,则由试件的大小及图像系统的分辨率来决定.考虑到实际测量的现场条件,实际的测试精度会有所下降.根据大样品大变形的检测标定实验可知,对于 400 mm × 400 mm 的试件,其测试精度好于 3%.

由于应用计算机软件处理 Fourier 变换,计算量特别大,处理速度较慢.目前的图象处理系统,按 512 像素 × 512 像素的大小,处理一幅变形栅的时间约为 2 分钟.若需测量动态变形过程,可以用录像机或高速摄像机先把变形栅实时记录下来,事后进行分析处理.

由于栅线分析技术不能实时显示条纹图,难以对实验过程进行实时监控,而计算机云纹技术则弥补了栅线分析技术的不足.可以用计算机云纹技术来实时监控变形情况,而用栅线分析技术进行定量分析.

参 考 文 献

- | | |
|---|---|
| [1] Kujawinska Metal. High accuracy transform fringe pattern analysis [J]. Opt. & Laser in Eng., 1991, 14(4):325 ~ 329. | [2] Pirodda L. Shadow and projection moiré techniques for absolute and relative mapping of surface shapes [J]. Optical Engineering, 1982, 21:640 ~ 649. |
| [3] 衡伟,何小元,徐铸.用栅线投影法自动提取物体表面三维形状信息的计算机处理方法 [J].实验力学,1993,8(3):248 ~ 253. | |

Grating Fourier Analysis and Computer Moiré Technique

FENG Chuan-yu, HAN Yun, MA Li, HE Shi-ping

(University of Science & Technology of China, Hefei, 230026)

Abstract: To measure the small deformations of small specimens and large deformations of large specimens grating analytical method was applied. Grating analysis computational simulation and experimental calibrations are processed. In addition, the measurement precision is analyzed.

Key words: grating analysis; computer Moiré technique; FFT