

文章编号: 0258-7025(2005)06-0787-04

利用数字全息干涉术测定材料的泊松比

徐莹, 赵建林, 范琦, 向强

(西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 陕西 西安 710072)

摘要 根据数字全息干涉术的基本原理, 利用 CCD 分别记录物场状态变化前后的无透镜傅里叶变换全息图, 通过数值再现分别得到不同状态下物场的复振幅分布, 从而直接得到不同状态下物场间的干涉条纹图样。如果该物场是由板状试样的离面弯曲引起的, 则通过测量干涉条纹图样中相同相位条纹的渐近线之间的夹角, 即可确定出材料的泊松比。实验证明该方法简单易行, 尤其适合对光学粗糙表面、小泊松比或小尺寸的试样进行全场测量, 测量结果具有良好的重复性, 较高的灵敏度和精度。

关键词 全息; 数字全息干涉术; 泊松比; 无透镜傅里叶变换全息图; 干涉相位差

中图分类号 O438; O348.12 **文献标识码** A

Determination of the Poisson's Ratio of Material by Digital Holographic Interferometry

XU Ying, ZHAO Jian-lin, FAN Qi, XIANG Qiang

(Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract Base on the principle of digital holographic interferometry, two lensless Fourier transform holograms representing two different deformation states of object field are captured by CCD. Then the numerical reconstruction of digital holograms is implemented respectively to acquire the complex amplitude of object waves, and the interference phase difference is determined by subtracting the phases of the different states. According to the pure bending theory in elastic mechanics, the Poisson's ratio is derived numerically from the angle between the asymptotic lines of the fringes of equal phase, which are caused from homogeneous deformation and reconstructed by digital holographic interferometry. This method for determination of Poisson's ratio of material in the full-access performance by experiment is simple and easy to operate, especially suitable for material with rough surface, low value Poisson's ratio and small size.

Key words holography; digital holographic interferometry; Poisson's ratio; lensless Fourier transform hologram; interference phase difference

1 引言

泊松比是反映材料弹性特性的一个常数, 表征试样拉伸时沿横向发生收缩的程度, 通常用于工程部件的数值压力分析。常用电子与机械相结合的方法如借助引伸计测量试样横向及纵向变形量来获得泊松比。该方法在测定材料长期性能时难免发生漂移, 而且引伸计自重及夹持力可引起软质试样的附加变形, 所以只适用于硬质试样。也可以通过在试

样上粘贴电阻应变片的方式测量其泊松比, 但该方法测量的变形范围有限, 并且试样附加了粘贴片的刚度, 会引起一定误差。此外传统的光学测量方法^[1]如全息法、散斑法、影像云纹法等, 均是从所得到的干涉图样推算出泊松比, 但这些方法需要经过对记录介质必需的曝光、显影等物理化学处理过程, 再现过程复杂, 周期较长, 有些还需要将待测试样弯曲表面研磨成镜面, 这对于非金属材料几乎是不可

收稿日期: 2004-05-31; 收到修改稿日期: 2004-09-30

基金项目: 航空科学基金(02I53075)资助项目。

作者简介: 徐莹(1980—), 女, 江西人, 西北工业大学理学院博士研究生, 主要从事全息术及其应用方面的研究。

E-mail: xy_1999@eyou.com

能的。

数字全息干涉术应用广泛^[2],同时还可方便地加入各种数学处理方法,进行真正意义上的两个或多个全息图以及复振幅之间的各种数学运算^[3]及消除零级衍射像的影响^[4]。本文利用数字全息干涉术,采用无透镜傅里叶变换记录光路测量材料的泊松比。实验证明,这是一种有效的光学测量泊松比的方法。

2 测量原理

2.1 基本原理

根据弹性力学中板或梁的纯弯曲理论,一块矩形平板试样在纯弯加载条件下(如图1),试样表面具有相同离面位移的点 (x,y) 构成两组双曲线,可表示为^[5,6]

$$x^2 - \mu y^2 = c, \quad (1)$$

式中 μ 为材料的泊松比, c 为常数。当 $c=0$ 时,(1)式即为该双曲线的渐近线。令该双曲线组的渐近线间的夹角为 2α ,由几何关系可得

$$\mu = x^2/y^2 = \tan^2 \alpha, \quad (2)$$

因此,可以采用全息干涉法得到试样纯弯曲变形前后的离面位移分布图,从而可进一步做出其渐近线并测得夹角 2α ,然后根据(2)式计算出待测试样材料的泊松比 μ 。

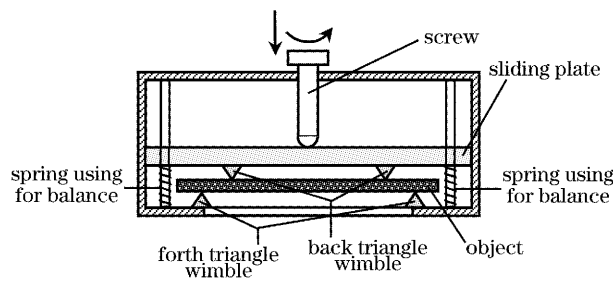


图1 用于泊松比测量的加载夹具装置示意图

Fig. 1 Loading clamp setup for Poisson's ratio measurement

2.2 数字无透镜傅里叶变换全息干涉原理

假设变化物场的全息图利用 CCD 并通过无透镜傅里叶变换全息光路^[7]记录,且该数字无透镜傅里叶变换全息图的复振幅透过率函数为 $i_H(k,l)$,用复振幅分布为 $R_H(k,l)$ 的数字球面光波照明该全息图,则透射光场的复振幅分布为

$$u_H(k,l) = R_H(k,l)i_H(k,l), \quad (3)$$

在非涅耳衍射条件下, $u_H(k,l)$ 向前传播,在距全息图平面为 d 的平面处将得到再现物场的虚像。由于菲涅耳衍射积分式中的球面相位因子可被 $R_H(k,l)$

中具有相同曲率半径的球面相位因子消除,则再现像的光波复振幅分布为

$$u_d(m,n) = A \exp \left[-j \frac{\pi}{\lambda d} (m^2 \Delta x^2 + n^2 \Delta y^2) \right] \times IDFT \{ i_H(k,l) \}_{m,n}, \quad (4)$$

式中 $IDFT$ 表示离散逆傅里叶变换, A 为复常数, λ 为波长; k,l 和 m,n 分别表示全息图平面和成像平面上抽样点沿水平和垂直方向的数字坐标,且 $m, k=0,1,2,\dots,M-1; n, l=0,1,2,\dots,N-1; M, N$ 分别表示全息图在 x,y 方向上的像素总数; $\Delta x_H, \Delta y_H$ 和 $\Delta x, \Delta y$ 分别表示全息图平面和再现平面上的采样间距,二者有如下关系

$$\Delta x = \frac{\lambda d}{M \Delta x_H}, \quad \Delta y = \frac{\lambda d}{N \Delta y_H}, \quad (5)$$

由(4)式算得再现像复振幅后,其相位分布可由下式得到

$$\phi(m,n) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[u_d(m,n)]}{\text{Re}[u_d(m,n)]} \right\}, \quad (6)$$

式中 $\text{Im}[u_d(m,n)]$ 和 $\text{Re}[u_d(m,n)]$ 分别表示 $u_d(m,n)$ 的实部和虚部。

与光学二次曝光法原理类似,用 CCD 采集物体不同状态下的全息图 $i_{H1}(k,l)$ 和 $i_{H2}(k,l)$ 并将其存储在计算机中。用计算机对其分别进行数值再现,可得到两种状态下物场的复振幅分布 $u_{d1}(m,n)$ 和 $u_{d2}(m,n)$,进而得到相位分布 $\phi_1(m,n)$ 和 $\phi_2(m,n)$,则两种状态下再现物场的相位差分布^[2]可表示为

$$\Delta \phi(m,n) = \begin{cases} \phi_1 - \phi_2, & \phi_1 \geq \phi_2 \\ \phi_1 - \phi_2 + 2\pi, & \phi_1 < \phi_2 \end{cases} \quad (7)$$

如果物场的变化为平板试样的纯弯曲变形,则由(7)式得到的相位差分布图样与平板试样纯弯曲变形的离面位移分布图样等效。因此,可通过由(7)式所得的相位差分布图计算试样材料的泊松比。

3 实验测量系统

实验测量系统主要由数字全息图记录光路、试样加载夹具、CCD、图像数据采集与处理系统组成。光路结构如图2所示。He-Ne激光器发出的细激光束($\lambda=632.8\text{ nm}$)由分束镜 BS_1 分为两束,其中一束光经扩束镜 BE_1 和准直透镜 L 扩束准直后照射在待测试样表面,经反射后作为物光垂直投射到 CCD 的光敏面上;另一束光依次经平面镜 M 反射,小孔扩束镜 BE_2 扩束和半透半反镜 BS_2 反射后,以一定的倾角投射在 CCD 的光敏面上。光阑 D 用于调节光斑大小,减光板 P_1 和 P_2 用来调节总光强以

及物光与参考光的光强比。通过改变分束镜 BS_2 的方位角可以方便地调节到达 CCD 光敏面上的物参夹角。实验所用 CCD 为敏通 1802CB 黑白型,其靶面的实际尺寸为 $6.40\text{ mm} \times 4.80\text{ mm}$,像素数为 $795(\text{H}) \times 596(\text{V})$,每个像素的尺寸为 $8.1\text{ }\mu\text{m} \times 8.1\text{ }\mu\text{m}$ 。采用无透镜傅里叶变换全息记录光路的特点是,光路结构简单便于实用化;光学元件少且无需成像透镜,因而可避免或降低因其表面的灰尘或污渍引起的衍射图样以及透镜带来的像差等非线性影响;数值重建算法简单,只需一次傅里叶变换,因而使得再现处理周期缩短;横向分辨率高且能够充分利用 CCD 的空间带宽^[7,8]。

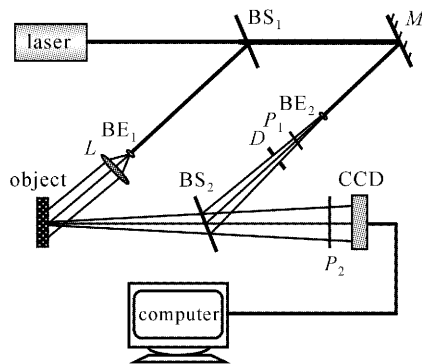


图2 无透镜傅里叶变换全息图记录光路

Fig. 2 Recording setup of lensless Fourier transform hologram for reflecting object

为了获得对称性好、条纹清晰的双曲线簇,需要对试样对称加载,并使其满足纯弯曲变形条件,为此设计了图1所示的加载夹具。为了保证试样的纯弯曲变形,整个夹具关于螺杆中心线对称分布,因而施加给试样的压力也是对称的。

测量时,首先将试样置于加载夹具的两对称加载支点之间,确保试样加载对称满足纯弯曲变形条件。其次对试样施加尽可能小的载荷,使其在夹具中不致滑落且加载点能够完全贴合试样,将该状态下的试样作为物场初始状态。然后对试样依次均匀加载,待试样稳定后记录下加载时的全息图。

4 实验结果与误差分析

4.1 实验结果

实验中选取型号为 2A12 的矩形铝板作为试样,试样尺寸为长 120 mm ,宽 20 mm ,厚 2 mm ,加载时,为使测量结果与真值最接近,取试样夹具的两个后三角锥的间距 (100 mm) 与试样宽度 (20 mm) 的比值为 $5:1$ ^[6]。实验中,在对试样均匀连续加载

的过程中先后进行了 10 次测量,依次经数值再现后得到了双曲线簇条纹状的相位差分布图样,图3所示为其中的两幅。由相位差分布图样测量出 2α 角,再利用式(2)计算出该试样的泊松比。10 次测量所得的数据如表1。由表1可得 10 次测量结果的平均值为 0.329 ,10 次中单次测量的最大相对误差为 0.6% 。由材料力学手册给出的轧制铝材的泊松比^[9]为 $0.32 \sim 0.36$,表明此测量方法具有较高的准确性和重复性。

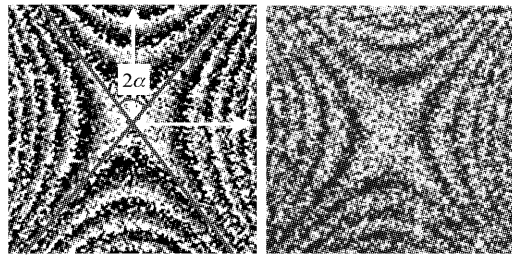


图3 试样纯弯曲变形前后的相位差分布图样

Fig. 3 Phase difference fringe pattern of the sample before and after pure bending

表1 对 α 和泊松比 μ 进行 10 次测量的结果

Table 1 Results of measuring α and Poisson's ratio (μ)

Times	$\alpha / (^{\circ})$	Poisson's ratio μ	Average
1	29.875	0.330	0.329
2	29.913	0.331	
3	29.763	0.327	
4	29.763	0.327	
5	29.800	0.328	
6	29.875	0.330	
7	29.838	0.329	
8	29.800	0.328	
9	29.875	0.330	
10	29.913	0.331	

4.2 实验误差分析

影响实验测量结果精度的主要因素及解决途径主要有以下几个方面:

1) 双曲线簇状全息干涉图样的对称性是直接影响实验结果准确性和精度的关键因素。用所设计的夹具对待测试样进行加载时,可能出现加载不对称的情况,其原因来自多个方面,如夹具本身不严格对称、试样形状不规则、平整度和均匀度不好、试样放置不对称都会引入误差。所以夹具的设计和加工必须尺寸精确,试样的形状必须规则,一般为矩形,同时在实验中必须充分满足板材纯弯的条件,需对试样实施对称加载,保证双曲线簇状的干涉图出现在试样表面的

中央照明区,以获得对称的全息干涉条纹。

2) 全息图记录和再现过程中产生的图像畸变。记录全息图时,被照明的试样表面必须平行于 CCD 的光敏面,否则所得到的双曲线簇图样会发生扭曲,产生畸变。同时,数值再现全息图时,必须考虑再现图像水平和垂直方向上的采样间隔与全息图匹配,如(5)式。在本实验中,对于同一记录光路, λ 和 d 的大小给定, $\Delta x_H, \Delta y_H$ 的尺寸均为 $8.1 \mu\text{m}$,所以 Δx 和 Δy 的比值为

$$\frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{N\Delta y_H}{M\Delta x_H} = 0.75。 \quad (8)$$

由于是在计算机上测量 α 角,计算机显示器的像素大小不可改变。因此,在计算 α 角之前,必须对直接得到的双曲线簇图样进行修正,即将直接得到的双曲线簇图样的 x 方向上的长度乘以 0.75,从而消除因再现图像水平和垂直方向上的采样间隔不同引起的图像畸变。

3) 确定双曲线簇的两条公共渐近线之间的夹角时引入的误差。确定双曲线簇渐近线的夹角时,需要首先确定好渐近线,然后记录下包含两渐近线间夹角的任意一个三角形的三个顶点的坐标,利用余弦定理计算其夹角。确定渐近线时,双曲线簇条纹的光滑度、清晰度及线宽是影响渐近线准确度的重要因素,所以应当选择那些条纹宽度锐细且光滑的双曲线簇。条纹宽度越窄,标划的渐近线就越准确,测量精度就越高。同时在确定三角形的三个顶点的坐标时,每次读数并不完全相同,这也会引入人为误差,所以在处理结果时要取多次测量的平均值,即

$$\bar{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_i, \quad (9)$$

本实验中, $n = 10$ 。此外,激光散斑在数字全息术中不但影响再现像的振幅信息,而且影响再现像的相位信息。但在本实验中,由于需要的仅仅是相位差分布图样,并不关心相位差的绝对值,同时利用 Photoshop 软件在相位差分布图上确定渐近线时,可人为地消除散斑对测量准确度的影响。因此,在本实验中由散斑引入的误差影响不大。

5 结 论

用于材料参数测量的物理模型是不尽相同的,

复杂的模型不易操作,简单的模型容易处理但在计算时易引入误差。所以对每一个材料参数的测量都应该给定一个实用的模型。在测量材料的线弹性特性参数如材料的泊松比时,采用数字全息干涉术这种相对较简单的方法,从所得到的干涉图样中具有相同相位条纹的渐近线之间的夹角就可以推导出材料的泊松比。实验结果表明,该方法简单易行,尤其适合对光学粗糙表面、小泊松比或小尺寸的试样进行全场测量,测量结果具有良好的重复性,且具有较高的灵敏度和精度,是一种有效的光学测量泊松比的方法。

参 考 文 献

- 1 Yang Guoguang. Modern Optical Testing Technology [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2002. 165~166, 235~242, 302~305
杨国光. 近代光学测试技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2002. 165~166, 235~242, 302~305
- 2 U. Schnars. Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(7): 2011~2015
- 3 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu *et al.*. Some quantitative analysis about digital holographic reconstructed image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 570~574
钟丽元, 张以谟, 吕晓旭 等. 数字全息图再现像的分析计算 [J]. 中国激光, 2004, **31**(5): 570~574
- 4 Liu Cheng, Li Yinzhong, Li Liangyu *et al.*. A new way to eliminate the zero-order image in digital holography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11): 1024~1026
刘 诚, 李银柱, 李良钰 等. 数字全息测量技术中消除零级衍射像的方法 [J]. 中国激光, 2001, **A28**(11): 1024~1026
- 5 Xie Dong, Tuo Yuokang. Study on measurement of Poisson's ratio of composite material by laser holographic interferometry [J]. *Laser Journal*, 2001, **22**(2): 48~51
谢 东, 庾有康. 应用激光全息干涉技术测量复合材料泊松比的研究 [J]. 激光杂志, 2001, **22**(2): 48~51
- 6 Denis Cuhe. Determination of the Poisson's ratio of filled epoxy and composite materials [C]. *SPIE*, 1990, **1212**: 315~324
- 7 Christoph Wagner, Sönke Seebacher, Wolfgang Osten. Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(22): 4812~4820
- 8 Xu Ying, Zhao Jianlin, Xiang Qiang *et al.*. Image processing in numerical reconstruction for lensless Fourier transform hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1503~1506
徐 莹, 赵建林, 向 强 等. 无透镜傅里叶变换全息图数值再现中的图像处理 [J]. 光学学报, 2004, **24**(11): 1503~1506
- 9 G. S. Pisarenko, A. P. Yakovlev, V. V. Matvlev. Translator: Fan Qinshan, Zhu Zucheng. Material Mechanics Manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1981. 165
Г. С. 皮萨连科, А. П. 亚科符列夫, В. В. 马特维也夫 著. 范钦珊, 朱祖成 译. 材料力学手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981. 165