

# 数字全息干涉法用于变形测量

周灿林<sup>1,2</sup> 亢一澜<sup>1</sup>

(1 天津大学力学系, 天津 300072)

(2 山东大学物理与微电子学院, 济南 250061)

**摘要** 介绍了数字全息干涉法的原理, 针对激光散斑噪声对包裹干涉相位图样的影响, 将小波去噪分析用于图样预处理, 可以提高解相精度. 用该方法对四周固定、中心加载典型试件的位移进行了测试. 实验结果表明, 该方法简单、快速、可行.

**关键词** 数字全息; 小波变换; 相位去包裹; 干涉计量; 去噪; 图象处理

**中图分类号** O348, TB877

**文献标识码** A

## 0 引言

全息干涉技术在力学变形测试中有着广泛的应用, 其中比较典型的是两次曝光法<sup>[1]</sup>, 但是这种方法只能得到干涉条纹, 要求取位移等变形信息, 则需要经过复杂的条纹分析. 数字全息由 Goodman<sup>[2]</sup> 提出, 其记录光路和普通全息完全相同, 全息直接记录在 CCD 上并数字存储, 数字再现. 没有了光学全息的湿处理过程, 记录和再现过程都要比普通全息方便快捷、简单. 由于数字全息对记录设备精度和计算机性能要求较高, 所以, 此方法在提出后很长一段时间一直没有有什么进展. 近些年来, 随着计算机速度及容量的大幅度提高, 数字全息的实验研究才全面展开<sup>[3,4]</sup>. 由于数字全息可重构被记录物体的复振幅分布, 也就是强度和相位信息可以同时获得, 因此能方便地用来进行多种测量. 从现有的文献看, 到目前为止, 国内偶尔也能见到相关报道, 但多是在原理方法方面的研究. 将数字全息用于位移、变形等力学量测量的文献还未见到. 另外, 由于全息记录时要用激光作光源, 激光散斑噪声对数字全息的图象质量有较大的负面影响. 小波分析作为一种新的时频分析方法, 它的多分辨率特性将信号在不同尺度下进行多分辨率分解, 并将交织在一起的各种不同频率组成的混合信号分解成不同频段的子信号, 从而可对信号按频带处理. 应用小波分解与重构的方法可以到达去除噪声, 重构真实信号的目的<sup>[8]</sup>.

本文尝试将数字全息用于力学测试, 对该方法的原理进行了介绍, 并针对全息干涉法包裹位图样中出现的噪声影响问题, 将小波去噪分析用于干涉图样预处理中, 提高解相精度. 最后用该方法测试了四周固定, 中心加载典型试件的位移.

## 1 数字全息干涉的原理

图 1 为离轴数字全息的示意图. 平面参考光与来自物体表面的散射光在 CCD 靶面上干涉, 干涉图样由 CCD 记录, 在光学重构时, 虚像和实像分别处在关于靶面对称的原来位置与另一位置. 如图 1(b) 所示. 在观察平面上的物体光波重构过程, 可由菲涅耳-基尔霍夫衍射<sup>[6]</sup> 关系来完成, 如图 2 所

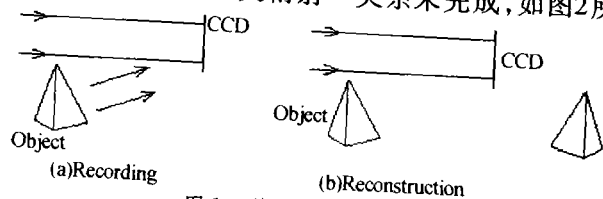


图 1 数字全息  
Fig. 1 Digital holography

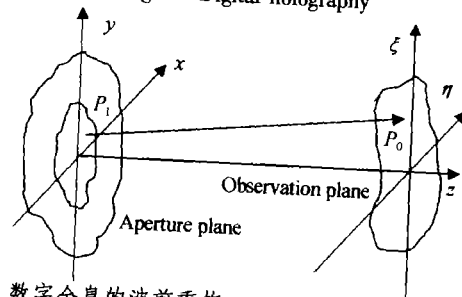


图 2 数字全息的波前重构  
Fig. 2 Digital wavefronts reconstruction by Fresnel-Kirchhoff diffraction

示.  $xy$  平面为全息记录面,  $\xi\eta$  平面为观察面, 在满足菲涅耳近似条件的情况下, 重构波前可表示为

$$b(\nu, \mu) = \frac{\exp\{ikz\} \exp\{i\pi d'\lambda\}}{i\lambda z} \iint h(x, y) r(x, y) \cdot \exp\left\{\frac{i\pi}{z\lambda}(x^2 + y^2)\right\} \exp\{-2\pi i(x\nu + y\mu)\} dx dy \quad (1)$$

式中,  $\nu = \xi/(z\lambda)$ ,  $\mu = \eta/(z\lambda)$ ,  $d'$  为重构距离, 一般应与记录时测试物体和全息面的距离相同.  $r(x, y)$  为重构参考光. 假设存储在 CCD 上的数字全息图由  $N \times M$  个离散数值构成, CCD 摄像机的像元大小为:  $\Delta x \times \Delta y$  于是上式的离散化表达式为

$$b(n, m) = \exp \left\{ i\pi z \lambda \left( \frac{n^2}{N^2 \Delta x^2} + \frac{m^2}{M^2 \Delta y^2} \right) \right\} \cdot$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} h(k \Delta x, l \Delta y) r(k \Delta x, l \Delta y) \exp \left\{ \frac{i\pi}{z \lambda} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2) \right\} \exp \left\{ 2\pi i \left( \frac{kn}{N} + \frac{lm}{M} \right) \right\} \quad (2)$$

式(2)是复数形式,于是强度分布和相位分布可以表示为

$$I(n, m) = b(n, m) b^*(n, m) = |b(n, m)|^2 \quad (3)$$

$$\phi(n, m) = \arctan \frac{\text{Im}[b(n, m)]}{\text{Re}[b(n, m)]} \quad (4)$$

$b(n, m)$ 为在重构距离为  $z$  的观察平面上离散化复波面. 在数字全息干涉中要测量的是干涉相位,也就是物体变形前后对应两状态数字全息重构波前的相位差.

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2, \Delta\phi \in [-\pi, \pi] \quad (5)$$

由于计算机程序中反正切函数的特点,所求取的相位范围为  $[-\pi, \pi]$ , 所以必须对取得的相位进行去包裹,我们采用最大交叉幅值生成树去包裹法<sup>[5]</sup>对相位去包裹获取连续的相位.

## 2 小波去噪的原理

1989年,文献[7]提出了多分辨分析的概念,并给出了小波分解与重构的快速算法,即Mallet算法. 据这一算法,若  $f_k$  为信号  $f(t)$  的离散采样数据,  $f_k = c_{0,k}$  则信号  $f(t)$  的正交小波变换分解公式为

$$\begin{cases} c_{j,k} = \sum_n c_{j-1,n} h_{n-2k} \\ d_{j,k} = \sum_n d_{j-1,n} g_{n-2k} \end{cases} \quad (k=0,1,2,\dots,N-1) \quad (6)$$

式中,  $c_{j,k}$  为尺度系数;  $d_{j,k}$  为小波系数,  $h, g$  为一对正交镜像滤波器组,  $j$  为分解层数,  $N$  为离散采样点数. 小波重构过程是分解过程的逆运算,相应的重构公式为

$$c_{j-1,n} = \sum_n c_{j,n} h_{k-2n} + \sum_n d_{j,n} g_{k-2n} \quad (7)$$

假设被高斯噪声污染的信号具有以下的模型

$$s(i) = f(i) + \sigma e(i) \quad (8)$$

式中  $e(i)$  表示标准正态分布. 若要从被噪声污染的信号  $s(i)$  中恢复出原始信号  $f(i)$ , 则可按如下的方法处理: 1) 计算含噪声信号的正交小波变换. 选择合适的小波和小波分解层数  $j$ , 将含噪信号运用式(6)进行小波分解至  $j$  层, 得到相应的小波分解系数. 2) 对分解得到的小波系数进行阈值处理, 其阈值的处理方法有 2 种:

$$\text{硬阈值法 } \hat{y} = T_h = \begin{cases} \gamma & |\gamma| \geq t \\ 0 & |\gamma| < t \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{软阈值法 } \hat{y} = T_h = \begin{cases} \text{sgn}(\gamma)(|\gamma| - t) & |\gamma| \geq t \\ 0 & |\gamma| < t \end{cases} \quad (10)$$

3) 进行小波逆变换. 将经阈值处理过的小波系数用式(7)重构, 得到恢复的原始信号估计值.

在上述三步中, 最关键的问题是如何选取阈值以及如何进行阈值化处理.

由于小波变换具有一种“集中”的能力, 它可将信号的能量集中到少数小波系数上, 而白噪声在任何正交基上的变换仍然是白噪声, 并且有着相同的幅度. 相对来说, 信号的小波系数值必然大于那些能量分散且幅值较小噪声的小波系数值. 选择一个合适的阈值, 对小波系数进行阈值处理, 就可以达到去除噪声而保留有用信号的目的. 该方法能得到原始信号的近似最优估计, 并且具有非常广泛的适应性.

## 3 实验

实验光路如图 3. He-Ne 激光器发出的光经扩束、滤波后被准直变为平行光束, 入射到分束镜后分为两束, 一束照射测试物体, 另一束照射参考面, 两束光被反射后再经过分束镜照射 CCD 摄像机靶面, 形成离轴菲涅耳全息记录光路, 被测试物体是四周固定, 中心加载的园板, 表面涂抹银粉, 以增强表面的反光效果. 摄像机与带图像卡的计算机图象处理系统相连接. 物体变形前后的两幅数字全息图样分别被记录下来, 然后用自编的图象处理软件进行重构、滤波、去包裹等处理, 得到描述园板位移的干涉条纹图样. 图 4 为直接得到的干涉相位图, 图 5 为去除噪声后的干涉相位图, 图 6 为与干涉图样过中心位置水平截面对应的位移图.

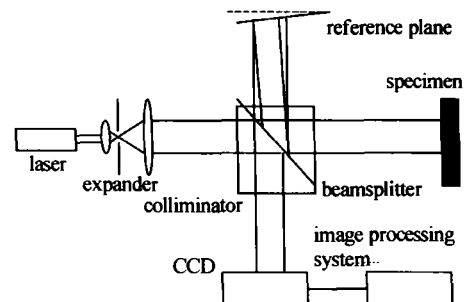


图 3 实验光路图  
Fig. 3 Experimental setup

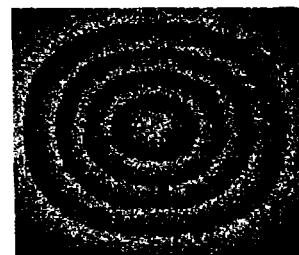


图 4 小波去噪前的包裹干涉相位  
Fig. 4 Wrapped interference phase before wavelet denoising

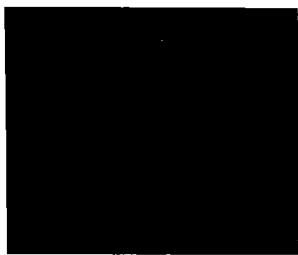


图5 小波去噪后的包裹干涉相位

Fig. 5 Wrapped interference phase after wavelet denoising

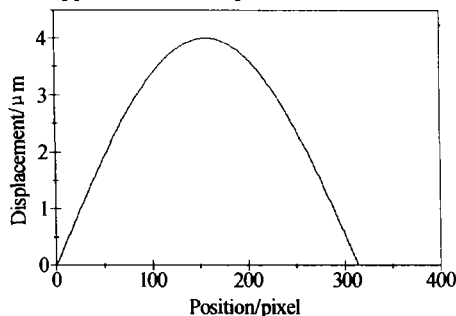


图6 一水平线对应的位移

Fig. 6 Displacement chart for the cross section corresponding to central line

#### 4 结论

用数字全息技术对四周固定,中心加载园板典型试件的位移进行了测量,实验表明:该方法进行位移测量免除了传统全息干涉法中的干板湿处理,同时可以直接获取相位信息,比传统全息干涉法更加优越。

#### 参考文献

- 1 戴福隆,方萃长,刘先龙,等. 现代光测力学,北京:科学出版社,1990. 116 ~ 142  
Dai F L, Fang C C, Liu X L, et al. Modern optical measurement mechanics. Beijing: Science Press, 1990. 116 ~ 142
- 2 Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formulation from electronically detected hologram. *Appl Phys Letter*, 1967, 11 (3): 77 ~ 99
- 3 Cuhe E, Marqret P, Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms. *Appl Opt*, 1999, 38(34): 6994 ~ 7001
- 4 Schedin S, Pedrini G, Tiaiani H J, et al. Simultaneous three-dimensional dynamic deformation measurements with pulsed digital holography. *Appl Opt*, 1999, 38(34): 7056 ~ 7062
- 5 Takeda M, Abe T. Phase unwrapping by a maximum cross-amplitude spanning tree algorithm: a comparative study. *Opt Eng*, 1996, 35(8): 2345 ~ 2351
- 6 Goodman T W. Introduction to Fourier optics. McGrawHill, New York, 1976. 64 ~ 80
- 7 Mallat S. Theory formulti-resolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674 ~ 693
- 8 秦前清,杨宗凯. 实用小波分析. 西安:西安电子科技大学出版社,1994. 29 ~ 32  
Qing Q Qn, Yang Z K. Applied Wavelet Analysis. Xi'an: Xidian University Press, 1994. 29 ~ 32

### Deformation Measurement by Digital Holography

Zhou Canlin<sup>1,2</sup>, Kang Yilan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanics of Tianjin University, Tianjin 300072

<sup>2</sup> School of Physics and Microelectronics, Shandong University, Jinan 250061

Received date: 2002-02-25

**Abstract** The interference technique with digital holography is presented. The noise emerges in digital holography when laser is used as light source because of its speckle effect. The wavelet denoising is applied to the wrapped interference phase in order to obtain better precision in course of phase unwrapping. Application of the technique to displacement measurement of a centrally loaded, fully-clamped circular plate is provided. Experimental result shows this method's advantages such as simplicity, speediness.

**Keywords** Digital holography; Wavelet transform; Phase unwrapping; Interferometry metrology; Denoising; Image processing



**Zhou Canlin** was born on June 12, 1966, in Yuanjiang Country Hunan Province, P. R. C. . He took his M. S. degree in solid mechanics from Department of Material Shandong University of Technology in 1994. Since 2000, he has been an associate professor and a tutor of postgraduate in Shandong University. Currently, he is a Ph. D. candidate in Department of Mechanics, Tianjin University. Now he has published over 20 papers. His main research fields include optical non-destructive measurement, digital image processing, mechanics measurement technique.