

文章编号: 0253-2239(2006)02-0193-4

# 在电子散斑干涉中利用反相位法进行三维变形测量\*

孙 平<sup>1</sup> 李爱华<sup>2</sup> 张 丽<sup>1</sup> 陶春先<sup>1</sup> 王晓凤<sup>1</sup> 韩 青<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

(<sup>2</sup> 山东警察学院侦察系, 济南 250014)

**摘要:** 提出一种可将离面位移与面内位移分离的三维位移计算方法。在双光束电子散斑干涉系统中增加一路参考光,使这一路参考光为两光束所共用。两束光各自独立地对变形物体进行测量,分别计算相位分布,并对其中之一进行反相位计算。理论分析表明,对二路检测光所得到的相位进行相减运算,就能够较好地减少电子噪声的影响,分离面内位移场与离面位移,实现物体变形的三维测量。介绍该方法的原理,并利用典型实验证实了该方法的可行性。

**关键词:** 光学测量; 电子散斑干涉; 相移; 相位计算; 三维位移

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

## Three-Dimensional Displacement Measurement in Electronic Speckle Pattern Interferometry by Using Reversed Phase Calculation

Sun Ping<sup>1</sup> Li Aihua<sup>2</sup> Zhang Li<sup>1</sup> Tao Chunxian<sup>1</sup> Wang Xiaofeng<sup>1</sup> Han Qing<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014)

(<sup>2</sup> Department of Scout, Shandong Police Institute, Jinan 250014)

**Abstract:** A method for three-dimensional displacement measurement by separating out-of-plane displacement from in-plane displacement is presented. A reference laser beam is added to dual beam symmetric illumination electronic speckle pattern interferometric (ESPI) system and is shared by the two illumination beams. The two illumination beams are used separately in experiment for the displacement measurement. Then two phase maps, including out-of-plane and in-plane displacement, are obtained with phase shifting technique, then one of which is calculated by reversed phase calculation method. Theoretical analysis shows that subtraction of the phase maps can greatly decrease electronic noises, separate out-of-plane displacement easily from in-plane displacement and complete three-dimensional displacement measurement. The principle of the method is presented and proved by a typical three-point-bending experiment.

**Key words:** optical measurement; electronic speckle pattern interferometry; phase-shifts; phase calculation; three-dimensional displacement

## 1 引 言

三维相移电子散斑干涉技术<sup>[1~5]</sup>是电子散斑干涉技术<sup>[6]</sup>结合相移技术<sup>[7,8]</sup>向三维、高精度和自动化方向发展,具有灵敏度高、可同时获得全场三维位移、非接触等优点。三维位移场的测量可通过光路组合的方法测量<sup>[1]</sup>,即通过参考型电子散斑干涉光路与双光束型电子散斑干涉光路的组合来实现,无需计算,可直接得到位移场,但光路设置复杂。大剪

切方法<sup>[2~4]</sup>测量三维位移,由于省去了参考光路,因此光路简单,但只适合于被测物附近可以放置参考物的环境下。位移场的分离技术<sup>[5]</sup>应用于三维位移的测量。由于在相位分离计算时采用相位相加的模式,会引起随机噪声的增加,当噪声较大时,结果是难以分离出离面位移。本文提出的反相位法,使离面位移的分离运算不再使用加法运算而是采用了相减的方式,减少了随机噪声的影响,更容易分离得到

\* 山东省教育厅科技计划(01901)资助课题。

作者简介: 孙 平(1964~), 山东人, 山东师范大学副教授, 主要从事散斑、云纹等计量技术、光学系统设计以及图像处理等方面的研究。E-mail: sunpingmail@sohu.com

收稿日期: 2005-04-04; 收到修改稿日期: 2005-06-24

离面位移的相位。

## 2 反相位法相移测量原理

在电子散斑干涉技术中,将变形前后所采集得到的干涉图像相减,所得到的干涉条纹图可表示为<sup>[6]</sup>

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Delta\phi(x, y)], \quad (1)$$

其中  $a(x, y)$  为背景光强,  $b(x, y)$  为条纹幅值,  $b(x, y)/a(x, y)$  常称为条纹衬比度,  $\Delta\phi(r)$  为物体变形引起的相位变化即待求相位, 它们都是空间位置的函数。光波相位变化  $\Delta\phi(r)$  与物体变形关系有不同的表达式。

如图 1 所示, Beam A 和 Beam B 分别经反射镜 M1 和 M2 反射, 经扩束镜扩束后照射到被测物上, 形成测量面内位移的双光束型电子散斑干涉。而光束 Beam C 则经反射镜 M3、M4 反射后, 经扩束镜照射到毛玻璃上, 形成散斑场, 再经半透半反光楔 BS 的反射, 形成参考光场。该光路是在双光束型电子散斑干涉光路中增加一路照明光, 并使两束照明光 Beam A 和 beam B 共用这一路参考光。

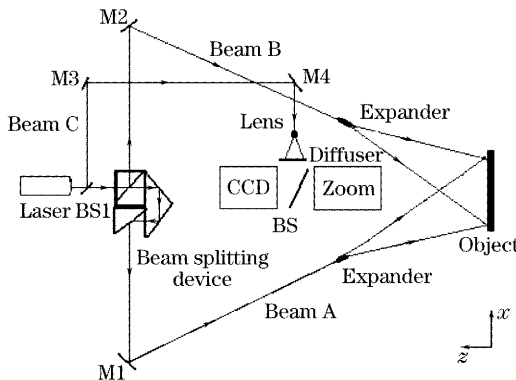


图 1 具有同一参考光的双光束电子散斑干涉光路图

Fig. 1 Schematic for dual beam electronic speckle pattern interferometry (Beam A and Beam B) with one reference beam (Beam C)

当关闭 Beam C 时, Beam A 和 Beam B 同时照射物体, 可直接得到  $u$  场<sup>[9]</sup>, 即

$$\Delta\phi(r) = \frac{4\pi}{\lambda} u \sin \theta,$$

其中  $\lambda$  是所用激光的波长,  $\theta$  是照明光与物体表面法线的夹角,  $u$  是物体变形的面内水平方向位移。

当开启 Beam C, Beam A 照射物体时, 得到的是离面位移场 ( $w$  场) 与面内位移场 ( $u$  场) 的混合场<sup>[5]</sup>, 由于在相移过程及相位解包过程中均可引入随机噪声, 故混合场可写为

$$\Delta\phi_{C+A}(r) = \frac{2\pi}{\lambda} [\tau w(1 + \cos \theta) + u \sin \theta] + n_A, \quad (2)$$

其中  $n_A$  为包含的随机噪声,  $w$  是物体变形的离面位移。当开启 Beam C, Beam B 照射物体时, 得到的同样是离面位移场 ( $w$  场) 与面内位移场 ( $u$  场) 的混合场, 只是相对 Beam A 来讲, 入射角  $\theta$  变为  $-\theta$ , 即

$$\Delta\phi_{C+B}(r) = \frac{2\pi}{\lambda} [\tau w(1 + \cos \theta) - u \sin \theta] + n_B, \quad (3)$$

其中  $n_B$  为包含的随机噪声。将(2)式与(3)式相加, 可得离面位移场。

$$\Delta\phi_{C+A}(r) + \Delta\phi_{C+B}(r) = \frac{4\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta) \tau w + (n_A + n_B), \quad (4)$$

将(2)式与(3)式相减, 可得面内位移场:

$$\Delta\phi_{C+A}(r) - \Delta\phi_{C+B}(r) = \frac{4\pi}{\lambda} u \sin \theta + (n_A - n_B), \quad (5)$$

由(4)式和(5)式可见, 对应 Beam A 和 Beam B 的两相位相加可得到离面位移场, 相减得到面内位移场。当两相位含有的随机噪声  $n_A, n_B$  比较小时, 经过滤波处理以后可以进一步减小噪声的影响, 则由相位的相加运算可以得到离面位移场。由于随着相位值的相加, 随机噪声也是叠加的, 所以当叠加后的噪声较大时, 滤波处理以后也难以分离出离面位移。最好是进行相减运算, 可以将随机噪声中相同的部分减掉, 最大程度的减少噪声的影响。下面以定步长四步相移算法为例, 说明反相位方法实现相位相减的原理。

当干涉条纹图引入相移  $\alpha_i$  后, (1)式可表示为

$$I(x, y; t) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Delta\phi(x, y) + \alpha_i],$$

若  $\alpha_i = \frac{\pi}{2} i$  ( $i=0, 1, 2, 3$ ) 时, 即相移角度分别为  $0, \pi/2, \pi$  和  $3\pi/2$ , 由四步相移公式<sup>[7]</sup> 计算出的位相为

$$\Delta\phi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right), \quad (6)$$

但是若  $\alpha_i = -\frac{\pi}{2} i$  ( $i=0, 1, 2, 3$ ) 时, 即相移角度分别为  $0, -\pi/2, -\pi$  和  $-3\pi/2$ 。那么四幅光强图为

$$I(x, y; t) = a(x, y) + b(x, y) \cos(\Delta\phi - \alpha_i),$$

表示为

$$I(x, y; t) = a(x, y) + b(x, y) \cos[(-\Delta\phi + \alpha_i)],$$

由四步相移公式(6)计算出的相位为

$$-\Delta\phi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right), \quad (7)$$

即相位全部反相。这也正是相位测量中的符号二义性问题。由于在实际测量对物理量的变化方向的判断是从实际物理变化的先验知识和其它约束条件得到的, 因此人们一般不考虑相移步长的方向。由(7)式得到的反相位, 代入到(3)式中, 得

$$\Delta\phi_{C+B}^{\text{Inv}} = \frac{2\pi}{\lambda}[-w(1 + \cos\theta) + u\sin\theta] + n_B, \quad (8)$$

将(8)式与(2)式相减,可得离面位移场:

$$\Delta\phi_{C-A} - \Delta\phi_{C+B}^{\text{Inv}} = \frac{4\pi}{\lambda}w(1 + \cos\theta) + (n_A - n_B), \quad (9)$$

可见,由相减得到的相位变化差值避免了由于相加而引起的噪声增加,更便于实现。在实际检测中,也可采用将  $I_2(x, y)$  和  $I_4(x, y)$  置换的方法,即将相移量为  $\pi/2$  的条纹图作为  $I_4(x, y)$ ,而将相移量为  $3\pi/2$  的条纹图作为  $I_2(x, y)$ ,也就是依次将相移量为  $0, 3\pi/2, \pi, \pi/2$  的四幅光强图:

$$\begin{cases} I_1(x, y) = a + b\cos[\Delta\phi(x, y)] = \\ \quad a + b\cos[-\Delta\phi(x, y)], \\ I_2(x, y) = a/b\sin[\Delta\phi(x, y)] = \\ \quad a \times b\sin[-\Delta\phi(x, y)], \\ I_3(x, y) = a - b\cos[\Delta\phi(x, y)] = \\ \quad a - b\cos[-\Delta\phi(x, y)], \\ I_4(x, y) = a \times b\sin[\Delta\phi(x, y)] = \\ \quad a/b\sin[-\Delta\phi(x, y)]. \end{cases} \quad (10)$$

将(10)式代入到四步相移公式(6)中,相位计算公式不变,得到的是反相位。由(5)式和(9)式可见,分别求出 Beam A 和 Beam B 照射时物体变形的相位变化,并对其中之一计算反相位,然后对相位场进行相减运算,就可以将离面位移场与面内位移场分离开来。竖直方向上的面内位移场,可以在竖直方向上设置对称光路直接测定。

### 3 典型实验

用图 1 所示光路,对简支梁进行了位移场的测量与分离,两光束的入射角为  $49.4^\circ$ ,实验在防震台上进行。试件为简支梁,150 mm 长,19.50 mm 高,18.50 mm 厚,有机玻璃制成。试件材料的弹性模量  $E=3.4 \times 10^9$  Pa,泊松比  $\nu=0.34$ 。加载的跨距为 71.00 mm,加载量约 75 N。在简支梁表面涂银粉以增强反射率。图 2(a)、图 2(b)分别为 Beam A 和 Beam B 照射物体时得到的相位图,图 3 为 Beam B 照射物体时运用反相位得到的相位图,分别进行解包络运算可得到其连续的相位图。由图 2 所示的相位图连续化并相减,可得出水平位移分量的相位灰度分布,如图 4 所示;图 2(a)、图 3 的二连续相位图相减后可得出如图 5 所示的离面位移相位灰度分布图。

根据(5)式和(9)式,将分离出的位移场相位转换成定量的位移场分布,图 6(a)为分离出的水平位

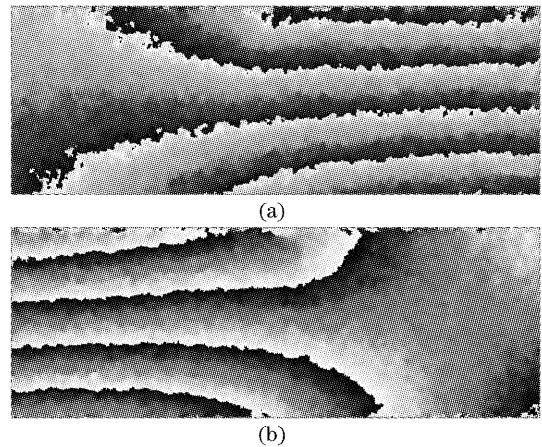


图 2 Beam A (a)和 Beam B (b)照射物体时的包络相位图  
Fig. 2 Wrapped phase map illuminated by Beam A (a) and Beam B (b)

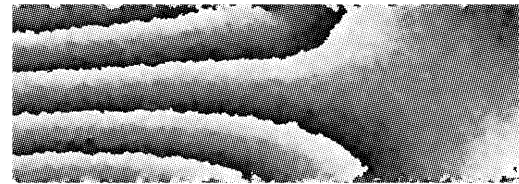


图 3 Beam B 照射物体时的反相位包络相位图  
Fig. 3 Reversed wrapped phase map illuminated by Beam B

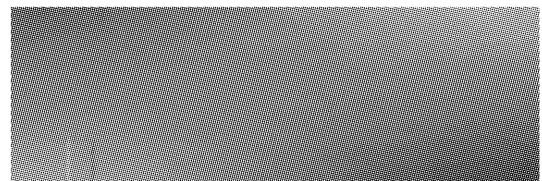


图 4 由图 2(a)、图 2(b)解包络后分离出的  $u$  场的相位灰度分布  
Fig. 4 Phase distribution of field  $u$  in gray separated from unwrapped phase map of Fig. 2 (a) and Fig. 2 (b)

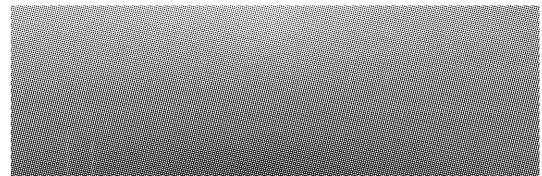
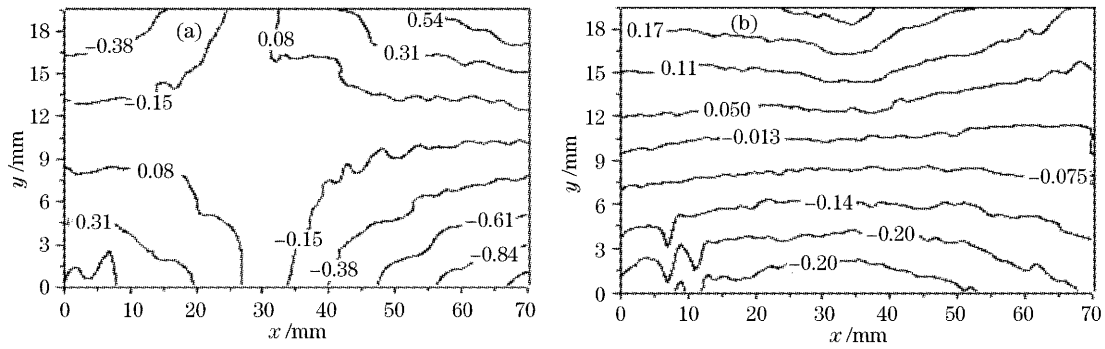


图 5 由图 2(a)和图 3 解包络后分离出的  $w$  场的相位灰度分布  
Fig. 5 Phase distribution of field  $w$  in gray separated from unwrapped phase map of Fig. 2(a) and Fig. 3  
移分量  $u$  场位移分布,图 6(b)为离面位移分量  $w$  场的位移分布图。其中,水平方向所示长度为试件的跨度(71.0 mm),竖直方向为试件的高度(19.5 mm),位移分量的单位为微米。

图 6 位移分量  $u$  场(a),  $w$  场(b)分布Fig. 6 Field distribution of displacement component, (a) for field  $u$ , and (b) for field  $w$ 

## 4 结 论

对相位关系的理论分析与典型实验表明,采用具有相同参考光路的双光束电子散斑干涉技术,经过反相位运算,就可以采用相减的相位运算模式,将面内位移场与离面位移场分离,并有效减少了噪声影响。该技术也为三维位移场的测量提供了一种新途径。

## 参 考 文 献

- Jingwei Tong, Dongsheng Zhang, Hongqi Li *et al.*. Automatic analysis of three-dimensional displacement field using ESPI[J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 1997, **26**(6): 515~529
- Zhang Xi, Sun Ping, Wang Haifeng. 3D-ESPI with phase-shifting and its application in diesel engine research[J]. *J. of Experimental Mechanics*, 2002, **17**(4): 393~397 (in Chinese)  
张 熹, 孙 平, 王海锋. 三维相移电子散斑干涉法在柴油机机身中的应用[J]. *实验力学*, 2002, **17**(4): 393~397
- Sun Ping, Wang Haifeng, Zhang Xi *et al.*. Study on three-dimensional ESPI and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 840~844 (in Chinese)  
孙 平, 王海锋, 张 熹 等. 三维电子散斑干涉技术及其应用研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 840~844
- Xie Mengmeng, Jiang Jinhua, Yang Yong *et al.*. Grating big shearing digital speckle pattern interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 125~128 (in Chinese)  
谢蒙蒙, 姜锦虎, 杨 勇 等. 光栅大错位数字散斑干涉术的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 125~128
- Sun Ping, Zhang Hongming, Lu Peng *et al.*. Study on isolation of displacement fields in 3-D phase-shifting ESPI [J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2004, **15**(2): 199~201 (in Chinese)  
孙 平, 张虹明, 陆 鹏 等. 三维相移电子散斑干涉中的位移场分离研究[J]. *光电子激光*, 2004, **15**(2): 199~201
- P. K. Rastogi. *Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques* [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2001
- H. A. Vrooman, Ad A. M. Maas. Image processing algorithms for the analysis of phase-shifted speckle interference patterns[J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(13): 1636~1641
- Sun Ping, Zhang Xi. Study on phase-shifting techniques in ESPI [J]. *J. of Optoelectronics Laser*, 2001, **12**(11): 1174~1176 (in Chinese)  
孙 平, 张 熹. 电子散斑干涉中相移技术研究[J]. *光电子激光*, 2001, **12**(11): 1174~1176
- J. N. Petzing, J. R. Tyrer. Recent development and applications in electronic speckle pattern interferometry[J]. *J. of Strain Analysis*, 1998, **33**(2): 153~169