

利用变形和形貌的关系测量三维形貌的方法

黄珍献¹ 赵瑞东² 孙平²

(¹ 天津商业大学理学院应用物理系, 天津 300134; ² 山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014)

摘要 提出了根据变形测量和形貌测量的关系测量物体三维形貌的方法。利用电子散斑干涉(ESPI)测量物体面形时,物体偏转微小角度会引入附加的物面高度差,从而引入载波条纹。分析了物面偏转角度和附加高度差之间的关系,得出了物面相位和物面高度之间的映射关系。物面的相位由傅里叶变换法求得。对球冠面形进行了测量,实验表明,在物面上产生干涉载波条纹,进而测量物面面形,具有灵敏度高的优点。

关键词 测量;电子散斑干涉;面形测量;载波;傅里叶变换

中图分类号 O348;TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.051201

3-D Shape Measurement Based on Relationship Between Deformation and Shape

Huang Zhenxian¹ Zhao Ruidong² Sun Ping²

(¹ Department of Applied Physics, College of Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)
(² College of Physics and Electronic, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract A method of shape measurement based on the relationship between displacement measurement and shape measurement is presented. When the shape of an object is measured by using electronic speckle pattern interferometry (ESPI), the test object tilting with a small angle will introduce an additional height difference and produce a carrier pattern. The relationship between the tilting angle and the additional height difference is analyzed. Then the relationship between the phase of the test object and the height of object's surface is obtained. The phase of the test object can be extracted by Fourier transform. A surface shape of a small ball is tested by using this method. The results indicate that the sensitivity of this method is high when the carrier pattern on an object surface is produced and object surface shape is measured.

Key words measurement; electronic speckle pattern interferometry; shape measurement; carrier pattern; Fourier transform

OCIS codes 120.6160;120.6650;260.6160;120.5050

1 引言

物体面形测量在计算机辅助设计、产品质量检测、医学等领域都有广泛的用途,具有十分重要的价值,因而引起了科研人员的极大关注。物体三维面形测量的重点是物体表面相位的测量,现阶段提取相位的主要方法有傅里叶变换法^[1,2]和相位移法^[3,4]。特别是基于傅里叶变换利用白光投影栅线或数字栅线的面形测量技术^[5],由于具有对比度高、易于动态处理的优点,因此具有较大的实用价值。该方法的不足之处是面形的测量精度依赖于投影栅线的空间频率,对微面形的测量灵敏度不高。

电子散斑干涉(ESPI)技术由于具有操作简单、非接触、全场测量、精度高的优点,已成为动态或静态物体变形测量的重要方法。将电子散斑干涉技术应用到物体面形测量上,利用光的干涉产生载波调制条纹,不

收稿日期: 2010-12-10; **收到修改稿日期**: 2010-12-15

基金项目: 山东省自然科学基金(Y2008G18)资助课题。

作者简介: 黄珍献(1982—),男,硕士,助教,主要从事散斑、投影光栅面形测量等方面的研究。

E-mail: huangzx820079@126.com

导师简介: 孙平(1964—),男,博士,教授,主要从事散斑、云纹等光干涉计量技术、光学系统设计以及图像处理等方面的研究。E-mail: sunpingmail@sohu.com

需要投影栅线,因而不受其空间频率的限制;物体的面形信息包含在以散斑为载体的干涉条纹内,因而灵敏度较高^[6]。利用典型的电子散斑干涉光路测量物体面形,需要将物体偏转一个微小角度,在物体表面产生携带物体高度信息的载波条纹,结合傅里叶变换的方法提取物面的相位信息,实现物体的面形测量。本文分析了物面偏转角度和附加高度差之间的关系,得出了物面相位和物面高度之间的映射关系。通过对球冠面形的测量,验证了该关系式。

2 物体变形测量和面形测量的对比

利用电子散斑干涉技术测量物体变形的典型光路如图 1 所示。入射光束经分光镜 (BS) 1 后,分成两束光。其中一束光经扩束镜后直接照射到物体上形成物光,另一束光经扩束镜后直接照射到分光镜 2 上形成参考光,两束光经反射和透射后在 CCD 靶面上发生干涉,产生散斑干涉图样。当物体受载变形后,物体表面的散斑会发生移动。采集物体变形前后的散斑干涉图并相减,可以得到包含物体变形量的信息。物体变形引入的相位^[7]为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}[u \sin \theta + w(1 + \cos \theta)], \quad (1)$$

式中 λ 是所用激光的波长, θ 是照明光与物体表面法线的夹角, w 是物体变形的离面位移, u 是物体变形的面内水平位移。

如果要测量物体的面形,可以把待测物体放置在可精密旋转的平台上,平台旋转带动物体偏转,采集物体偏转前后的散斑干涉图并相减,则产生载波条纹。由于受物面高度的调制,这些载波条纹包含了物面的相位信息。偏转引起的物面高度的变化相当于变形测量中的离面位移。通过 CCD 记录一幅载波条纹图,利用傅里叶变换法可以解调出物体表面的相位 $\Delta\phi$ 。

3 电子散斑载频调制面形测量原理

物体面形测量的关键技术是表面相位的测量,利用相位和高度的映射关系可以恢复物体的表面面形。利用偏转产生的相位差和物体高度的关系,高度与物面相位的关系得到物面相位,并通过傅里叶变换法提取出物面相位。

离面位移与高度的关系如图 2 所示,物体粘贴在可绕 o 点转动的参考平面上,以参考平面为零高度面,设物体上一点为 $p(x, y, z)$, 则该点高度为 z , 点 $p(x, y, z)$ 与物体表面法线夹角为 α 。当平面转动角度 $\Delta\alpha$ 后,点 $p(x, y, z)$ 移动到点 $p'(x', y', z')$, 则 $l_{op} = l_{op'}$ 。

由于物体的偏转,物面上的 p 点在 z 轴方向上产生了 Δz 的高度差,在 x 轴方向上产生了 Δx 的横向移动

$$\Delta z = z - z'; \quad \Delta x = x - x'. \quad (2)$$

高度差值 Δz 相当于变形场中的离面位移 w , 在 x 轴方向上的横向移动相当于物面的面内位移 $-u$ 。由图 2 中的三角形关系可得

$$\Delta z = l_{op} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \Delta\alpha)] = \frac{2z \sin(\Delta\alpha/2) \sin(\alpha + \Delta\alpha/2)}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

$$\Delta x = l_{op} [\sin \alpha - \sin(\alpha + \Delta\alpha)] = -\frac{2z \sin(\Delta\alpha/2) \cos(\alpha + \Delta\alpha/2)}{\cos \alpha}. \quad (4)$$

联立(2)和(3)式可得到物体的离面位移 w 与物体上任一点的高度 z 之间的关系为

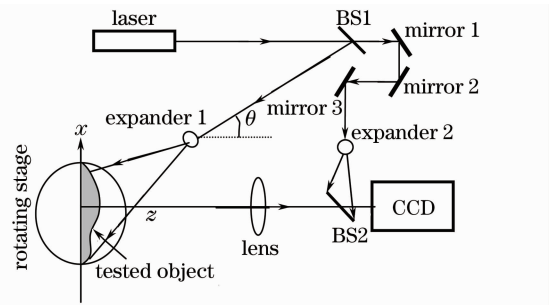


图 1 电子散斑干涉测量物体面形光路图

Fig. 1 Setup of shape measurement by using ESPI

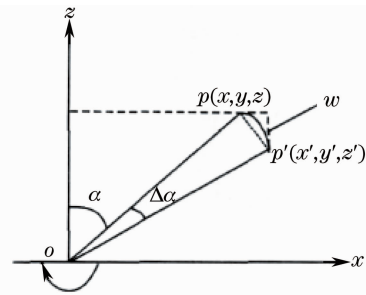


图 2 离面位移与物体高度的关系

Fig. 2 Relation between out-plane and object height

$$w = \frac{2z \sin(\Delta\alpha/2) \sin(\alpha + \Delta\alpha/2)}{\cos \alpha} \quad (5)$$

联立(2)和(4)式可得到物体的面内位移 u 与物面上任一点的高度 z 之间的关系为

$$u = \frac{2z \sin(\Delta\alpha/2) \cos(\alpha + \Delta\alpha/2)}{\cos \alpha} \quad (6)$$

由于偏转的角度微小,即 $\alpha \gg \Delta\alpha$,所以 $\sin(\Delta\alpha/2) \approx \Delta\alpha/2$, $\cos(\alpha + \Delta\alpha/2) = \cos \alpha$,则(5),(6)式可化为

$$w = z\Delta\alpha \tan \alpha = x\Delta\alpha; u = -z\Delta\alpha. \quad (7)$$

将(7)式代入(1)式,可以得到物面相位和物面高度的关系为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [x(1 + \cos \theta) - z \sin \theta] \Delta\alpha. \quad (8)$$

物光和参考光发生干涉后产生散斑干涉图样,采集物体偏转前后的散斑干涉图并相减,则产生散斑干涉条纹,其表达式为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos \Delta\phi. \quad (9)$$

(9)式是物体偏转前后产生的载波条纹,载波条纹受物面高度的调制变成弯曲的载波条纹,可表述为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [2\pi f_0 x + \Delta\phi_z], \quad (10)$$

式中 $a(x, y)$ 为背景光强, $b(x, y)$ 为条纹幅值, $b(x, y)/a(x, y)$ 称为条纹对比度. $\Delta\phi_z(x, y)$ 为偏转产生的高度差引起的相位变化,即所求相位. f_0 是物体偏转引入的沿 x 轴方向的空间频率^[6]:

$$f_0 = \frac{\Delta\alpha(1 + \cos \theta)}{\lambda}, \quad (11)$$

式中 λ 是所用激光的波长, θ 是照明光与物体表面法线的夹角, $\Delta\alpha$ 为物体转动的微小角度. 对照(8)和(10)式,可得由于物体的高度差引起的相位变化为

$$\Delta\phi_z = -\frac{2\pi z \sin \theta \Delta\alpha}{\lambda} = -2\pi \frac{\sin \theta}{1 + \cos \theta} f_0 z. \quad (12)$$

由(12)式可知,只要求出 $\Delta\phi_z(x, y)$ 就可以得到物面的高度 z 值. 由(7),(8),(10)和(12)式可知,离面位移 w 产生了平行的载波条纹,而面内位移 u 引入了含有高度信息的相位.

4 傅里叶变换法提取相位

利用欧拉公式,将(10)式表示为

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(j2\pi f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-j2\pi f_0 x), \quad (13)$$

式中 $c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[j\Delta\phi(x, y)]$. 在 x 方向上对(13)式进行傅里叶变换,得到

$$H(f_x, y) = A(f_x, y) + C(f_x - f_0, y) + C^*(f_x + f_0, y). \quad (14)$$

利用适当带通滤波器将 $A(f_x, y)$ 和 $C^*(f_x + f_0, y)$ 滤掉,只留下 $C(f_x - f_0, y)$ 项,并将其移到原点后变为 $C(f_x, y)$,再对其作逆傅里叶变换得到 $c(x, y)$,可得到相位分布为

$$\Delta\phi_z = \arctan \frac{\text{Im}[c(x, y)]}{\text{Re}[c(x, y)]}, \quad (15)$$

式中 Re 和 Im 分别表示复数的实部和虚部.

5 典型实验

试件为一球冠,球冠的直径为 27.0 mm,高度为 5.4 mm,粘贴在一参考平面上以后放在可转动的平台上,利用图 1 所示系统进行实验. 用 He-Ne 激光经扩束镜后照明被测物体,光束中心入射角 $\theta = 47^\circ$. 扩束镜为 40× 的显微镜头,距离被测物约 1.0 m. 由于被测物较小,扩束镜较远,故可近似认为入射的照明光为准直光束. 当转动平台转动角度 $\Delta\alpha$ ($\Delta\alpha < 5^\circ$) 后,在物体表面形成明暗相间的载波条纹. 由于物体表面具有一定的高度使得条纹发生弯曲,因此这些弯曲的载波条纹携带了调制物体高度的相位信息. 图 3 表示物体偏转后物体表面信息产生的载波条纹,图 4 表示利用傅里叶变化法解调出的球冠包络相位图,经相位连续化

及位移转化的计算可得出物体的高度分布。图5为球冠的三维高度网格图。

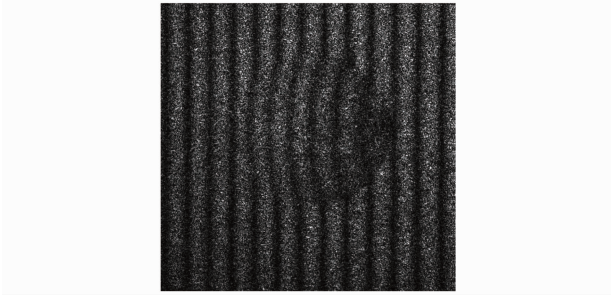


图3 偏转物面引入的载波条纹

Fig. 3 Carrier fringe pattern introduced by tilting object

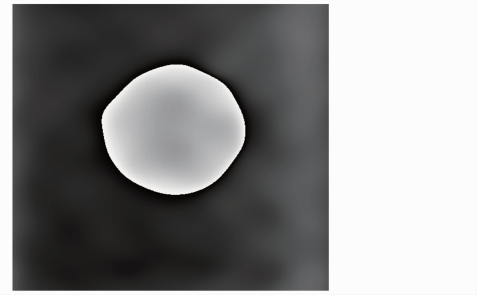


图4 物体的包裹相位图

Fig. 4 Wrapped phase pattern of object

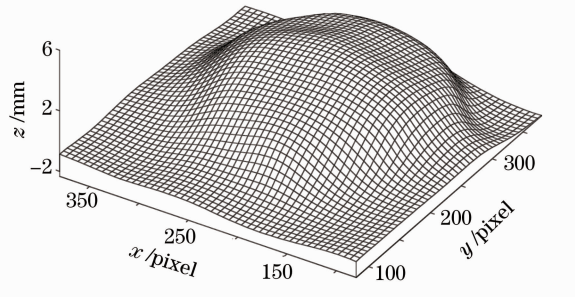


图5 物体的三维面形

Fig. 5 3-D shape of object

6 结 论

在电子散斑载频调制面形测量中,物体偏转微小角度会引入附加的物面高度差,相当于物体有一附加的刚体位移,因而在物体表面产生载波条纹。理论和实验证明,根据物面偏转角度和附加高度差之间的关系,得到物面相位和物面高度之间的映射关系,结合傅里叶变换方法,可以测量物体的面形。另外,控制偏转角度的大小可实现不同大小空间频率和测量灵敏度的调制。该方法基于光的干涉且只需采集一幅散斑图像,操作相对简单,对测量微小面形有较高的灵敏度。

参 考 文 献

- 1 T. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(4): 3977~3982
- 2 J. Li, X. Y. Su, L. R. Gao. An improved Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(12): 1439~1444
- 3 X. He, D. Zou, S. Liu *et al.*. Phase-shifting analysis in Moire interferometry and its application in electronic packaging [J]. *Opt. Eng.* 1998, **37**(5): 1410~1319
- 4 X. Y. Su, G. Von Bally, D. Vukicevic. Phase-stepping grating profilometry: Utilization of intensity modulation analysis in complex object evaluation[J]. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(1~3): 141~150
- 5 Sun Ping, Zhang Li, Tao Chunxian. 3-D Shape measurement with Fourier transform based on LCD projector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1250~1252
孙平,张丽,陶春先. 基于LCD数字投影技术的傅里叶变换法测量物体三维面形[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1250~1252
- 6 Sun Ping, Tao Chunxian, Zhang Li *et al.*. Spatial modulation and demodulation for electronic speckle patterns[J]. *J. Opt. Laser*, 2005, **16**(9): 1093~1096
孙平,陶春先,张丽等. 电子散斑干涉场的空间调制与解调技术[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(9): 1093~1096
- 7 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
孙平,王海峰,张熹等. 三维电子散斑干涉及其应用研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 840~844