

一种三维变形光学测量系统及微结构力学性能测试应用

史红健¹ 计宏伟² 何小元¹

(¹ 东南大学工程力学系, 江苏 南京 210096; ² 天津商业大学机械工程学院, 天津 300314)

摘要 描述了一种使用显微栅线投影技术和数字图像相关技术同时测量微结构三维形貌和变形的光学测量系统。在此系统中, 正弦栅线通过相移投影器投影到被测物体表面, 变形的条纹图由高分辨率的 CCD 相机和显微镜头采集并保存。相移技术处理条纹图得到形貌和离面变形, 同时从相移图像中提取出被测物表面纹理, 数字图像相关技术处理变形前后表面纹理得到面内变形。此系统为微结构光学测量提供了一种有效的手段。作为微结构力学性能测试的一个应用, 系统测量了纸浆模塑材料在单向拉伸时在微小局部区域的力学行为。

关键词 光学测量; 栅线投影; 相移; 数字图像相关; 形貌和变形测量

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0312007

Optical 3D Deformation Measurement System and its Application to Investigation of Mechanical Behaviors of Micro-Structure

Shi Hongjian¹ Ji Hongwei² He Xiaoyuan¹

(¹ *Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China*)
(² *School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300314, China*)

Abstract An optical measurement system for simultaneous 3D surface profile and deformation measurement of micro-components is presented by using microscopic fringe projection and digital-image correlation technique. In the system, sinusoidal fringes are projected on the surface of the specimen by a grating phase shifting projector. The deformed fringe patterns are captured by a high-resolution CCD camera and a microscope. The images are processed with phase-shifting technique. The intensity of the specimen's background before and after deformation obtained by adding the phase-shifting images are processed by digital-image correlation technique. This system will be useful for optical measurement of micro-structure. As an application, the system is used to investigate the mechanical behaviors of molded pulp material in micro-zone during tension testing.

Key words optical measurement; fringe projection; phase shifting; digital-image correlation; profile and deformation measurement

OCIS codes 120.0120; 100.2000; 120.6650

1 引 言

在很多工业应用中, 微小物体和结构的力学性能测试对于其优化设计和提高可靠性有着重要的意义。光学测量方法具有非接触、全场测量的优点, 适合对微结构进行形貌和变形测量。近年来, 一系列

光学方法已经被广泛应用于微结构的表面形貌、变形以及力学性能等领域的测量^[1~3], 并逐渐成为一种基本而有效的测试技术。其中参考光束型电子散斑干涉(ESPI)^[4]利用物体变形前后两幅散斑图相减, 可以测量物体的离面变形, 而双光束型 ESPI 则

收稿日期: 2010-06-07; 收到修改稿日期: 2010-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(10727201, 10972054)和天津市自然科学基金(08JCZDJC16100)资助课题。

作者简介: 史红健(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事微结构动静态力学性能光学测试方面的研究。

E-mail: shj_seu@yahoo.com.cn

导师简介: 何小元(1956—), 男, 博士, 教授, 主要从事光测力学方法与应用等方面的研究。

E-mail: mmhxy@seu.edu.cn

适合测量面内位移。云纹干涉法^[5]以试件表面的高密度光栅作为变形的传感元件,主要用来测量面内位移。数字图像相关技术^[6,7]通过分析变形前后物体表面的数字图像获得被测物的变形信息,使用单个相机的二维数字相关,适合于面内位移测量。栅线投影^[8~10]将光栅投影到物体表面,通过解调相位信息来获得物体三维形貌。

在实际工程中,大量的变形都是三维的,因此同时测量面内位移和离面位移显得更加重要。人们提出了多种方法改进云纹干涉法使其可以同时测量三维位移场^[11~13],由于测量灵敏度和试件栅密切相关,所以高质量、高灵敏度的云纹光栅及其复制成为该方法推广应用的关键技术。使用四光束型的 3D-ESPI 系统^[14]已经被 Dantec Dynamics GmbH 公司研制成功,并被用于电子元件热膨胀以及芯片封装的无损检测。基于双目立体视觉原理的三维数字图像相关技术^[6]也可进行三维变形测量,但是由于摄像机标定和立体匹配很复杂,因此限制了它在实际运用中的推广。

本文采用相移栅线投影结合数字图像相关技术,提出适合同时测量微结构三维形貌和变形的光学测量系统。相移投影器将正弦栅线投射到被测物表面,其中相移技术用来处理投影条纹图像,得到被测物体表面形貌和离面变形。同时将相移图像作相加处理,去除投影条纹得到被测物表面纹理后,利用数字图像相关计算得到面内变形。此系统测试了纸浆模塑材料拉伸时在微小局部区域内的力学性能,并给出了实验结果。

2 测量原理

2.1 栅线投影法测量形貌和离面变形

栅线投影法的测量光路如图 1 所示,CCD 相机和栅线投影器关于中轴对称布置。图中左边为投影部分,正弦栅线由相移投影器投影到被测物体表面。右边是图像采集部分,变形后的条纹图像由 CCD 相机采集并保存到计算机硬盘。图中 θ_1 是投影器轴线与中垂线之间的夹角, Δs 是像平面上条纹的移动量, oq 垂直于 o 点反射光线,如果试样到成像系统的工作距离远远大于试件本身的几何尺寸,那么条纹相位与被测物体表面高度之间关系^[15]为

$$h(x, y) = \frac{\Delta s}{M \cos \theta_2} \cos \theta_1 = \frac{\phi}{2\pi f M \cos \theta_2} \cos \theta_1 = k\phi, \quad (1)$$

式中 $h(x, y)$ 为被测物体表面高度; f 是像平面上的空间频率; $M = \Delta s / oq$ 是系统的放大倍数; $\theta_2 = \pi/2 - 2\theta_1$; ϕ 是对应于高度的相位; k 为与测量系统有关的常数,可通过标定来确定。

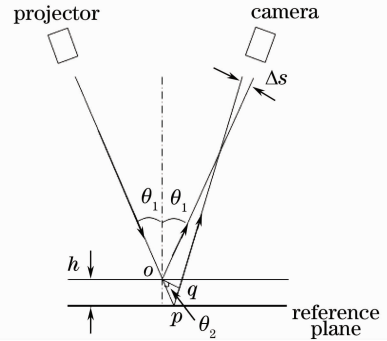


图 1 栅线投影光路图

Fig. 1 Optical setup of grating-line projection

两个不同状态的相位差 $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ 对应于物体离面变形。对于三维变形情况,由于面内位移的存在,使变形前后同一个点的坐标发生了改变,因此计算离面变形的时候,需要将变形前后的对应点的形貌作比较,即离面变形为

$$\Delta h = h_2(x^*, y^*) - h_1(x, y) = h_2(x + u, y + v) - h_1(x, y), \quad (2)$$

式中 $h_2(x^*, y^*)$ 和 $h_1(x, y)$ 分别是变形前后的形貌, u 和 v 分别是 x 和 y 方向面内位移,可以通过后面介绍的数字图像相关法计算得到。

相移技术^[16]已经被广泛运用于提取条纹图像的相位。本文使用四步相移算法,取相移量为 $\pi/2$, 则有 4 幅图像,其光强表达式为

$$I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y)], \quad (3)$$

$$I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi/2], \quad (4)$$

$$I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi], \quad (5)$$

$$I_4(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + 3\pi/2], \quad (6)$$

式中 $A(x, y)$ 为背景光强; $B(x, y)$ 为调制光强; $\phi(x, y)$ 是待求解的相位。联立以上 4 个方程(3)~(6)可解得:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}, \quad (7)$$

(7)式得到的是包含 2π 不连续的包裹相位,利用空间相位展开^[17]算法,可以得到连续的相位分布,再根据标定系数,就可以转换成高度值,得到表面形貌。

2.2 数字图像相关法(DIC)测量面内变形

数字图像相关计算面内变形时可以直接以试件

表面的自然纹理作为散斑模式,因此只需将同一个状态下的相移图像中的投影条纹去除即可,当把一个周期内的四幅相移图像的光强(3)~(6)式相加时,即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 4A(x, y), \quad (8)$$

从(8)式可以看出:投影条纹被消除了,得到了处于一个状态下的试件表面的纹理图像,根据不同状态下的相移图像处理得到的试件表面纹理,就可以使用数字图像相关计算面内位移 $u(x, y)$ 和 $v(x, y)$, 其中 $u(x, y)$ 和 $v(x, y)$ 分别是 x 和 y 方向位移分量。

为了提高测量精度,还需要进一步实现亚像素级的估计,本文采用曲面拟合法^[18]求解亚像素位移。当被测物体表面上每个点的位移分量都计算出后,就可以得到全场位移分布,从而提取应变分量。

3 系统标定

3.1 系统组成

测量系统组成如图 2 所示,主要包含正弦栅线相移投影器、1600 pixel×1200 pixel 的 CCD 相机 (Basler SCA1600 pixel×1400 pixel)、远距离显微镜 (Optem 7×zoom) 和焦距调节控制器、光纤冷光源 (CHL-1) 以及用于控制相移投影器和采集图像的计算机主机。相移投影器主要由正弦光栅、步进电机、高精度螺纹副和限位开关组成。使用程序控制步进电机驱动高精度螺纹副,将角位移转化为线位移,就可以推动光栅平移。根据图像上相应的四分之一条纹的移动量,就可以实现相移。限位开关用于控制光栅平移的极限位置。

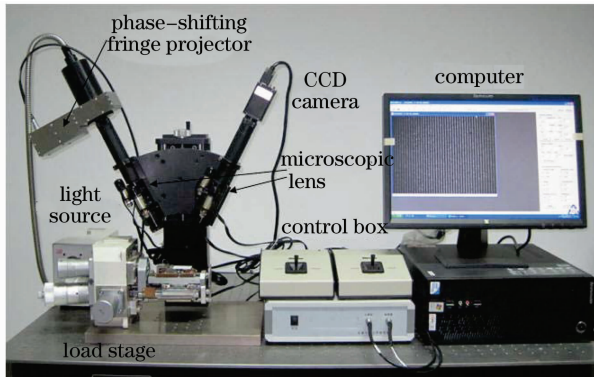


图 2 测量系统组成

Fig. 2 Configuration of measurement system

3.2 系统标定

测量前需要对参数 k 与放大倍率进行标定。标定过程如下:将标准平面置于三维移动平台上,使三维移动平台在高度方向每次移动 0.05 mm,采集到

一系列随高度变化的图像,由相移技术计算出相应的相位值,可以标定出相位与高度之间的关系。图 3 表示的是相位与高度之间的关系,纵轴代表高度,横轴代表相位。图 4 是高度的残差和相位的关系。使用标定好的系数 k ,计算出的相位值就可以转化为相应的高度值。图 5 表示的是高度分别为 0.25, 0.45, 0.6 和 0.7 mm 的四个标准台阶,图 6 是使用系统测量计算得到的台阶的高度云图。

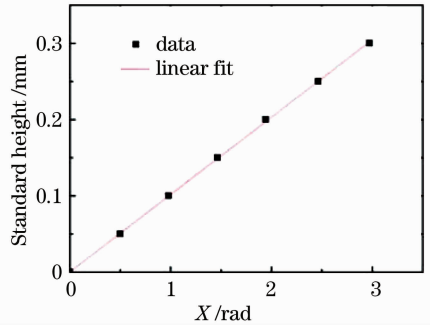


图 3 相位和高度的关系

Fig. 3 Relation between phase and height

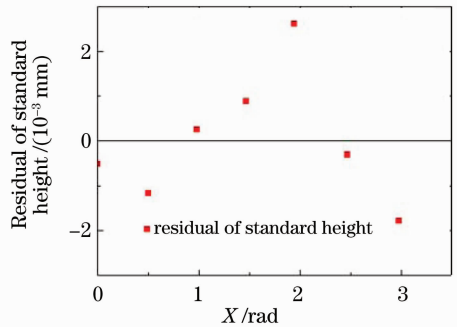


图 4 高度残差与相位的关系

Fig. 4 Residual of height versus phase

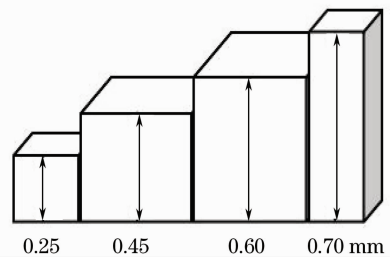


图 5 4 个台阶高度

Fig. 5 Height of four steps

使三维移动平台在面内方向每次移动 0.02 mm,采集得到一系列位移不同的图像,去除表面条纹,得到平面表面的纹理后使用数字图像相关计算出相应的图像像素数,可以标定出位移与像素之间的关系。图 7 表示的是位移与像素之间的关系,图 8 是位移的残差和像素之间的关系。

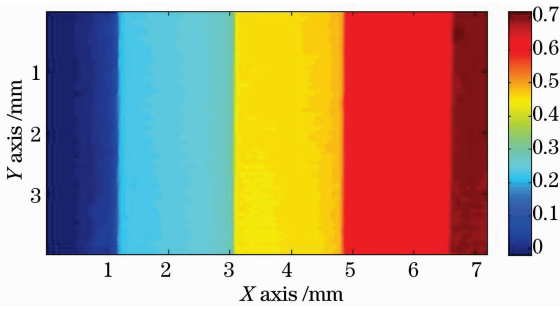


图 6 4 个台阶高度云图

Fig. 6 Contour map of four steps' height

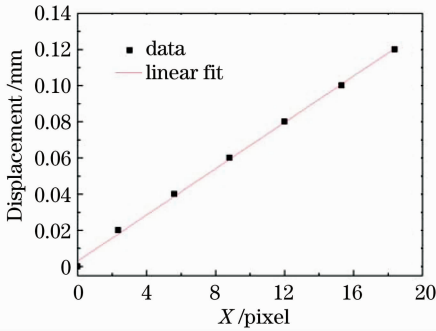


图 7 位移和像素的关系

Fig. 7 Relation between displacement and pixel

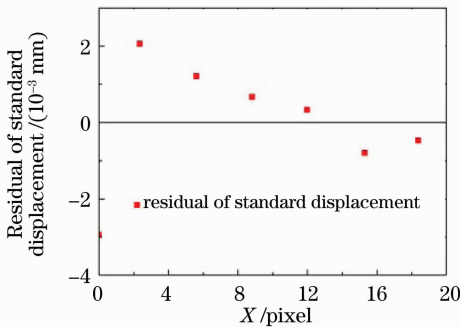


图 8 位移残差和像素的关系

Fig. 8 Residual of displacement versus pixel

4 实验及结果

纸浆模塑材料由废报纸和杂志经水力碎浆配成浆料并在特制模具上经真空吸附成湿坯制品,再经干燥和热压整型而制成,是一种可回收的绿色环保包装材料,可代替聚合包装材料,广泛应用于电子产品、农产品和家用电器等的运输包装。目前对于纸浆模塑材料的研究主要集中在几个方面: Eagleton 等^[19]研究了纸浆模塑材料在低应力和一次冲击下的缓冲性能; Hoffman 等^[20]研究了纸浆模塑材料的结构几何形状与静态强度关系; Gurav S. P. 等^[21]研究了纸浆模塑材料力学性能,测试了拉压强度,并用有限元分析了改变几何结构对力学行为的影响;

计宏伟等^[22]使用光测力学对纸浆模塑材料的力学性能进行了研究。但对纸浆模塑材料的微观力学性能研究很少有报道,系统将被用来研究纸浆模塑材料在微小区域内的变形。

实验中测试试件取自缓冲衬垫上较为平坦的部分,长宽分别为 20 mm 和 10 mm,平均厚度为 1.28 mm,在测量系统中的观察的图像区域约为 5 mm×5 mm 的微小局部。加载装置为图 2 所示的微拉伸试验台,加载方式为静态加载。将试样两端夹持好,调节好焦距,通过程序控制相移并采集初始状态下的四幅图像。然后逐级加载 10 次,分别为 3.58, 7.08, 10.25, 12.75, 17.02, 20.48, 27.75, 31.58, 34.58 和 36.75 N,并将相应状态下的图像保存到计算机。

图 9 显示的是在初始状态下采集的 4 幅相移条纹图,相移量为 90°,采用相移技术处理四幅图像计算出相位值,再使用标定系数就可以得到表面三维形貌,图 10 中显示的是表面形貌的三维视图,图 11 中显示的是表面形貌的云图。将四幅图像相加后可以去除条纹,得到表面纹理,如图 12 所示。同理处理所有的相移条纹图像,依次得到不同加载条件下

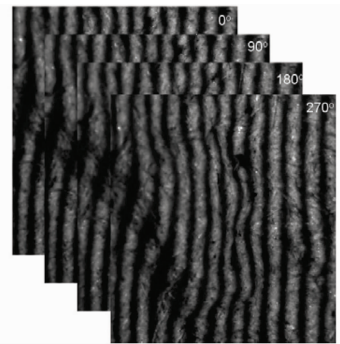


图 9 四幅相移条纹图

Fig. 9 Four fringe patterns with $\pi/2$ phase shifting

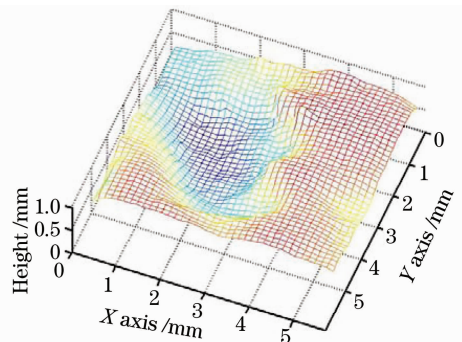


图 10 表面形貌的三维图

Fig. 10 3D plot of surface profile

的表面三维形貌,可以观察纸浆模塑材料在加载时表面形态的演变过程。

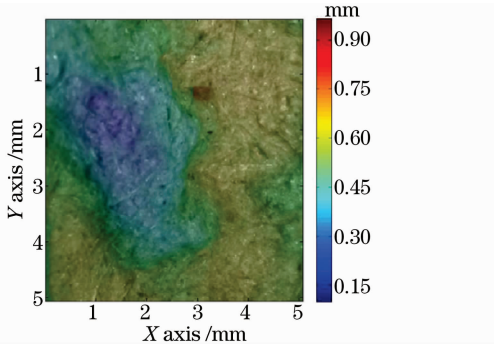


图 11 表面形貌的高度云图

Fig. 11 Contour map of surface profile

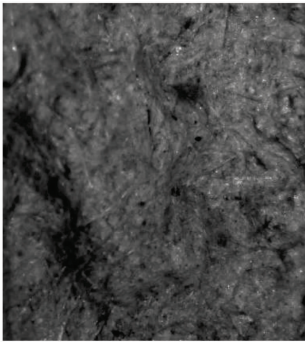


图 12 试件表面纹理

Fig. 12 Surface texture of specimen

使用 DIC 计算两个不同状态下的面内位移的流程如图 13 所示,先对被测物体在变形前的四幅相移图像作相加处理,得到被测物体在变形前的表面纹理图,再对变形后的四幅相移图像作相似处理,得到变形后的纹理图,利用 DIC 比较变形前后的纹理图就可以得到面内位移场,图 13 中最右边的是加载

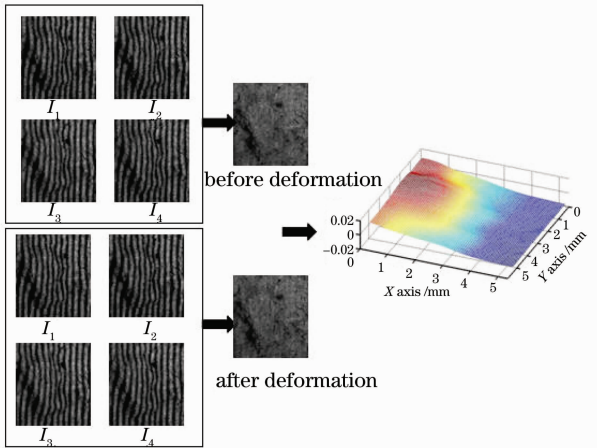


图 13 面内位移计算示意图

Fig. 13 Sketch map of calculation of in-plane displacement

12.75 N 后产生的 x 方向位移场的三维图,图 14 是加载 12.75 N 后产生的 x 方向位移场云图。从全场变形结果中可以看出,位移场是非均匀的,比较大的变形发生在纤维细小稀疏的区域或者存在有空隙的地方,小的变形发生在纤维长且分布密集的地方。造成纸浆模塑材料不均匀的原因是由于材料成型工艺的原因致使纤维不规则排列和形成空隙。

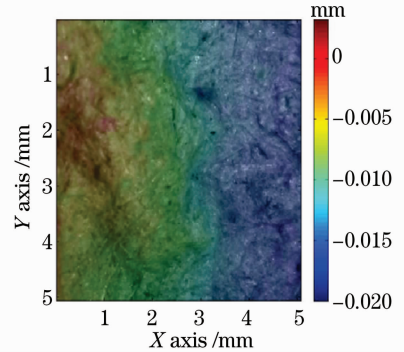


图 14 加载 12.75 N 后的面内位移云图

Fig. 14 Contour map of in-plane displacement with 12.75 N

依次计算出各个状态下的位移,可以计算出正应变 ϵ_x ,然后对应加载时记录的力,就可以得到应力应变关系。图 15 表示的是应力应变曲线,曲线表明,纸浆模塑材料在小变形时应力与应变成线性关系。

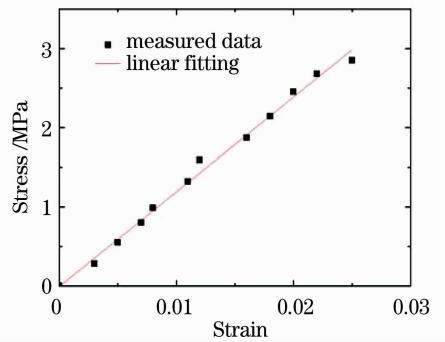


图 15 应力应变关系

Fig. 15 Relation between stress and strain

计算两个不同状态下的离面变形的时候,由于试件处于单向拉伸,因此可以忽略 y 方向位移的影响,(2)式简化为

$$\Delta h = h_2(x^*, y^*) - h_1(x, y) = h_2(x + u, y) - h_1(x, y), \quad (9)$$

将变形前后形貌和 x 方向位移场代入就可以得到离面变形,图 16 是试件加载 12.75 N 后产生的离面变形图和离面变形云图。

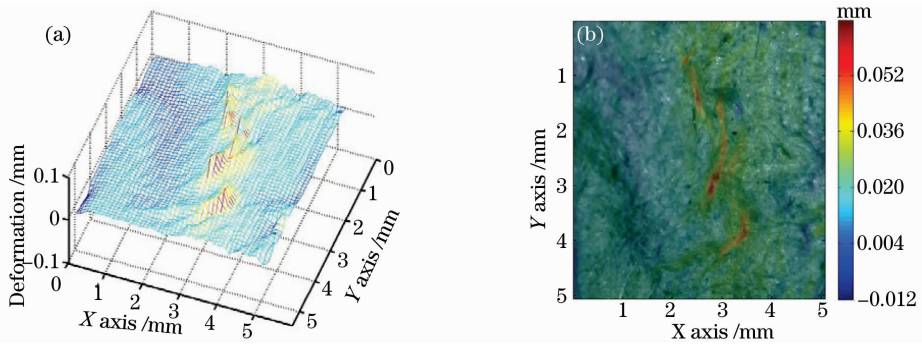


图 16 加载 12.75 N 后试件的 (a) 离面变形图和 (b) 离面变形云图

Fig. 16 (a) 3D plot and (b) contour map of out-of-plane deformation with 12.75 N

5 结 论

结合相移投影技术和数字图像相关技术,提出了适用于同时测量微结构三维形貌与变形的光学测量系统。相移投影技术用于测量微结构的三维形貌和离面变形,同时将从相移图像中提取的被测物表面自然纹理作为散斑模式,利用数字图像相关技术得到面内变形。系统设置简单,能够实现自动测量,为微结构力学性能测量提供了一种有效的方法。

参 考 文 献

- 1 W. Osten, W. Jupter, S. Seebacher *et al.*. The qualification of optical measurement techniques for the investigation of material parameters of microcomponents [C]. *SPIE*, 1999, **3825**: 152~164
- 2 L. Salbut, M. Kujawska. Optical measurement station for complex testing of microelement [J]. *Opt. & Laser in Engng.*, 2001, **36**(2): 225~240
- 3 S. H. Wang, C. Quan, C. J. Tay *et al.*. Deformation measurement of MEMS components using optical interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **14**(7): 909~915
- 4 P. K. Rastogi. Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques [M]. Chichester: John Wiley & Sons Inc, 2001
- 5 D. Post, W. A. Barakat. High-sensitivity moiré interferometry—a simplified approach [J]. *Exp. Mech.*, 1981, **21**(3): 100~104
- 6 Hubert Schreier, Jean-José Orteu, Michael A. Sutton. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concept, Theory and Applications [M]. New York: Springer, 2009
- 7 Pan Bing, Xie Huimin. Full-field strain measurement based on least-square fitting of local displacement for digital image correlation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1980~1986
潘 兵, 谢惠民. 数字图像相关中基于位移场局部最小二乘拟合的全场应变测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1980~1986
- 8 S. Zhang. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Opt. & Laser in Engng.*, 2010, **48**(2): 149~158
- 9 Kang Xin, He Xiaoyuan, Quan C. 3-D sensing using sinusoidal

fringe projection and phase unwrapping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1444~1447

康 新, 何小元, Quan C. 基于正弦条纹投影的三维传感及其去包裹处理[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12): 1444~1447

- 10 Bian Xintian, Su Xianyu, Chen Wenjing. Analysis on 3-D object measurement based on fringe projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 416~420

边心田, 苏显渝, 陈文静. 基于条纹投影的三维坐标测量方法 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 416~420

- 11 Yinyan Wang, Fupen Chiang. New moiré interferometry for measuring three-dimensional displacements [J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(8): 2654~2658

- 12 Shyh-Tsong Lin. Three-dimensional displacement measurement using a newly designed moiré interferometer [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(5): 822~826

- 13 Fulong Dai, HaiXia Shang, Chao Li *et al.*. Three dimensional moiré interferometer [C]. *SPIE*, 2003, **5058**: 393~399

14 <http://www.dantecdynamics.com>

- 15 C. Quan, C. J. Tay, X. Y. He *et al.*. Microscopic surface contouring by fringe projection method [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2002, **34**(7): 547~552

- 16 Daniel Malacara. Optical Shop Testing [M]. 3rd Edition. Hoboken: Wiley, 2007

- 17 D. C. Ghiglia, M. D. Pritt. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software [M]. New York: Wiley, 1998

- 18 Pan Bing, Xu Boqin, Chen Ding *et al.*. Sub-pixel registration using quadratic surface fitting in digital image correlation [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2005, **26**(2): 128~134

潘 兵, 续伯钦, 陈 丁等. 数字图像相关中亚像素位移测量的曲面拟合法[J]. *计量学报*, 2005, **26**(2): 128~134

- 19 D. G. Eagleton, J. Marcondes. Cushioning properties of molded pulp [J]. *Packag. Technol. Sci.*, 1994, **7**(2): 65~72

- 20 J. Hoffmann. Compression and cushioning characteristics of molded pulp packaging [J]. *Packag. Technol. Sci.*, 2000, **13**(5): 211~220

- 21 S. P. Gurav, A. Bereznitski, A. Heidweiller *et al.*. Mechanical properties of paper-pulp packaging [J]. *Compos. Sci. Technol.*, 2003, **63**(9): 1325~1334

- 22 Ji Hongwei, Yu Bennong, Ping Yaomei *et al.*. Investigation of the mechanical properties of molded pulp with DICM [J]. *Packaging Engineering*, 2004, **25**(4): 24~27

计宏伟, 余本农, 平幼妹等. 用数字相关测量方法研究纸浆模塑材料拉伸时的力学性能[J]. *包装工程*, 2004, **25**(4): 24~27