

文章编号 1004-924X(2012)02-0226-07

剪切散斑干涉术中剪切量的测量

贾大功, 武立强*, 马彩缤, 张红霞, 张以谟

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院
光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 由于采用剪切散斑干涉术测量离面应变和面内应变都与剪切量有关, 所以剪切量的测量精度决定了应变场分布测量的准确性。本文论述了公式法、成像法、莫尔条纹法和相关法等 4 种剪切量测量法的测量原理, 定性分析了它们的测量范围。搭建了一套剪切量测量系统, 利用成像法、莫尔条纹法、相关法测量剪切散斑系统的剪切量, 并以公式法计算的结果为准, 比较其他 3 种方法的测量结果。结果表明: 剪切量 > 3 mm 时, 利用相关法测量具有较高的测量精度; 剪切量 < 3 mm 时, 莫尔条纹法测量效果会更好。因此, 实际应用中, 应该先根据实际测量条件估算剪切量的大致范围, 然后依据估算范围选择合适的测量方法。

关键词: 剪切散斑干涉术; 应变场分布; 应变场测量; 剪切量测量

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122002.0226

Shear measurement of shearing speckle interferometry

JIA Da-gong, WU Li-qiang*, MA Cai-bin, ZHANG Hong-xia, ZHANG Yi-mo

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology of
the Ministry of Education, College of Precision Instrument & Opto-electronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: wlqgood2009@163.com

Abstract: Since the shear directly determines the displacement gradients of both out-of-plane and in-plane in the shearing speckle interferometry, the measurement precision of the shear should be improved to obtain the accurate strain distribution during the measurements of out-of-plane and in-plane strains. In this paper, four methods for the shear measurement: formula method, imaging method, Moiré fringe method and correlation method are compared in detail. An experimental setup is established to measure the shear using the imaging method, Moiré fringe and correlation method. The measurement results based on the three methods are compared with that of the formula method as a criterion. The result shows that when the shear is more than 3 mm, the correlation method has higher accuracy; however, once the shear is less than 3 mm, the Moiré fringe has higher accuracy. It suggests that the appropriate measurement method can be chosen after estimating the amount of the shear to obtain the higher out-of-plane and in-plane strains.

收稿日期: 2011-07-20; 修订日期: 2011-09-08.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2010CB327604, 2010CB327806); 天津市自然科学基金资助项目 (No. 09JCYBJC01300); 中俄合作交流项目 (NSFC-RFBR); 天津市科技支撑重点项目 (11ZCKFSF00400)

Key words: shearing speckle interferometry; strain distribution; full surface strain measurement; shear measurement

1 引言

在航空航天^[1]、电子工业^[2]和文物保护^[3]中,应变及相关参数的测量受到越来越多的关注。现有的应变光学测量方法主要为剪切散斑干涉术^[4-5]、数字图像相关法^[6]、布拉格光纤光栅^[5,7]等。由于剪切散斑干涉术具有应变场全场测量和对环境干扰不敏感^[8]等优点,所以该技术已经成为常用的诊断技术,并广泛应用于航空飞机轮胎和蒙皮^[9]的检测。

剪切散斑干涉术是一种精确测量表面应变场的计量术^[8]。文献^[10]中提出了一种基于光纤的三维电子散斑测量结构,将这种光路应用到剪切散斑中同样可以精确测量三维表面应变场的 6 个分量^[11],这 6 个分量可以归类为离面应变和面内应变两类。由于应变的大小由条纹图的相位、剪切量、照明光源的波长决定;因此,当其余物理量保持不变时,剪切量的大小直接影响表面应变场,同时,也会对由应变场衍生的物理量(比如曲率)^[12]的测量有很大的影响。目前,测量剪切量的通用方法是公式法,但是由于其在测量过程中需要完成剪切角和物距的测量而无法与应变实现同步测量,因此,国外又发展了成像法^[13]、莫尔条纹法^[14]和相关法^[15]对剪切量进行测量。但上述文献只是提出这 3 种测量方法,并没有明确指出剪切量可以精确测量的范围,而国内亦未见到这方面的报道。本文主要分析了公式法、成像法、莫尔条纹法和相关法的测量原理,并搭建了试验系统,利用 4 种方法对不同大小的剪切量进行测量,得出了 4 种方法的剪切量测量适用范围。

2 测量原理

2.1 公式法

公式法利用剪切量与剪切角、物距之间的线性关系直接求解剪切量。这是因为在剪切角很小的情况下,剪切量与剪切角呈线性关系,即不存在剪切畸变^[16],所以可以利用剪切量与剪切角的线性关系直接测量剪切量。

图 1 是利用迈克尔逊干涉系统实现剪切量测量的原理示意图。图中,激光照射到物体表面,假设物体表面的某一点 p 发出漫反射光进入分光棱镜中。经 M_1 和 M_2 反射后又经过分光棱镜,最终在像面 l 上分别成像 q' 和 q 。在像面 l 上,2 个像之间的距离为剪切量 d_x 。 d_0 是分光棱镜中心 o 到物体的距离, d_s 是 o 到反射镜之间的距离。剪切镜 M_2 与竖直方向的夹角为 θ ,定义为剪切角。物距是 d_s 与 d_0 的和。

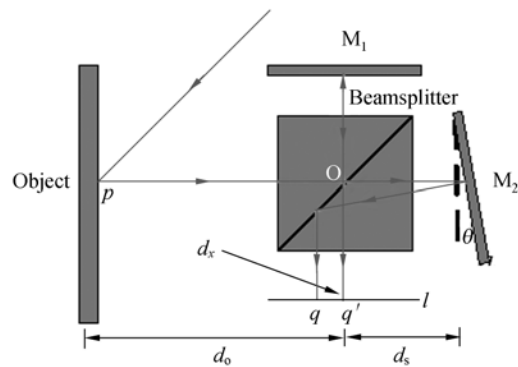


图 1 迈克尔逊干涉仪测量剪切

Fig. 1 Measurement of shear with Michelson interferometer

所以,像方剪切量 d_x 与剪切角 θ 之间的关系为:

$$d_x = (d_0 + d_s) \sin(2\theta), \quad (1)$$

当 θ 很小时,式(1)变为:

$$d_x = 2(d_0 + d_s) \sin \theta \approx 2(d_0 + d_s) \theta. \quad (2)$$

实际测量中,剪切角通常小于 1° ,所以当物距不变时,像方剪切量与剪切角有很高的线性关系。在应变的测量过程中,剪切角一般均小于 1° ,很难进行精确测量;而在如图 1 所示的系统中,可以利用步进电机精确控制反射镜 M_2 的偏转,所以可以精确测量剪切角,此时物距是剪切量测量的关键因素。如果可以精确测量物距,公式法可以适用于所有的剪切量测量范围。但是,实际情况是在测量应变的同时需要精确测量剪切量,在这种情况下,公式法显然不适合。

2.2 成像法

成像法是利用物体在摄像头上成像的灰度分布来计算剪切量大小的方法。调节剪切镜,在 x 方向上产生剪切量,此时像平面产生两个错位的

圆斑图像如图 2 所示,被测物体为直径为 d 的圆。图中两个像沿 x 方向的错位距离为剪切量 d_x 。 γ 表示实际物理长度与其在 CCD 上成像的像素个数之间的比值,即 $\gamma=d/D$, D 是 d 在 CCD 成像的像素个数。

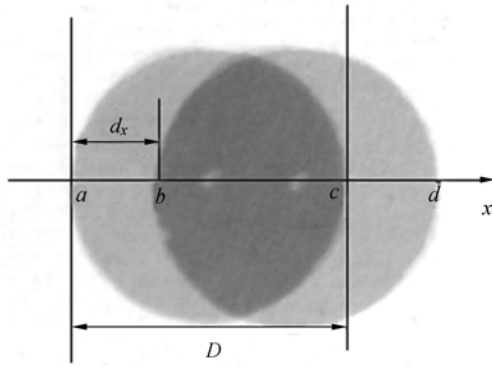


图 2 圆斑在像平面的错位像
Fig. 2 Shearing image on image plane

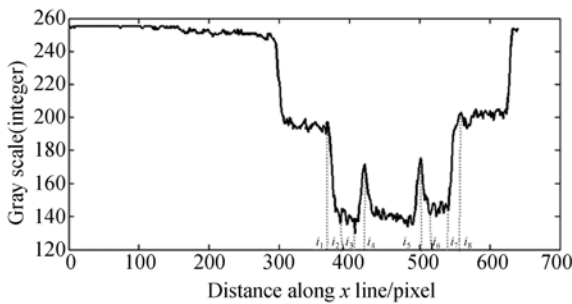


图 3 像素值与图像灰度分布之间的关系图
Fig. 3 Relationship between gray scale and distance

为了精确计算 D 的大小,计算图 2 中沿 x 轴的像素的灰度分布如图 3 所示。对照图 2 求得灰度变化很大的 4 个像素位置 a, b, c, d 。取 a, b, c, d 4 个位置附近灰度值最小和最大的像素位置 $i_1 \sim i_8$, 得到 $a=(i_1+i_2)/2, b=(i_3+i_4)/2, c=(i_5+i_6)/2, d=(i_7+i_8)/2$ 。则:

$$D = \frac{(c+d)-(a+b)}{2} \quad (3)$$

像方剪切量 d_x 为

$$d_x = (b-a)\gamma \quad (4)$$

通常,利用相对不确定度 $E^{[16]}$ 表示成像法测量剪切量的准确度,其表达式为:

$$E = \gamma/d_x \quad (5)$$

由式(5)可知,随着剪切量增大,不确定度在减小,所以成像法适合测量大剪切量。

2.3 莫尔条纹法

一般来说,任何两组(或多组)有一定排列规律的几何线簇的叠合,均能产生按照新规律分布的莫尔条纹图案。当同心光栅在水平方向上有一个小的位移,则变化前后叠加会形成干涉条纹即莫尔条纹。同心光栅可以用数学式表示为:

$$x^2 + y^2 = n^2 p^2 \quad (6)$$

式中 p 是间距, $n=1, 2, 3, \dots$ 。当 x 方向上的位移为 d_x 时,式(6)变为

$$(x+d_x)^2 + y^2 = m^2 p^2 \quad (7)$$

上式中 $m=1, 2, 3, \dots$, 则莫尔条纹的级次 k 为:

$$k = m - n \quad (8)$$

由式(6)、式(7)和式(8)得:

$$k = \{ [(x+d_x)^2 + y^2]^{1/2} - [x^2 + y^2]^{1/2} \} / p \quad (9)$$

假设: $(d_x)^2 \ll x d_x \ll (x^2 + y^2)$, 且 x, y 在极坐标中可表示为: $x = r \sin \theta, y = r \cos \theta$ 。所以上式变为:

$$k = d_x \sin \theta / p \quad (10)$$

当 $\theta=90^\circ$ 时, k 的数值为莫尔条纹的数目 N , 即有:

$$N = d_x / p \quad (11)$$

所以,只要知道莫尔条纹的数目就可以求出剪切量的大小。

2.4 相关法测量

相关法一般用来测量图像或者信号的微小变化量。文献[17]采用动态散斑相关法测量压电陶瓷的位移变化量,同样也可以使用散斑相关法来测量剪切量的大小。

相关法通过两幅图的相关运算,求得剪切量。图 4 是相关法测量剪切量的示意图。保持其他条

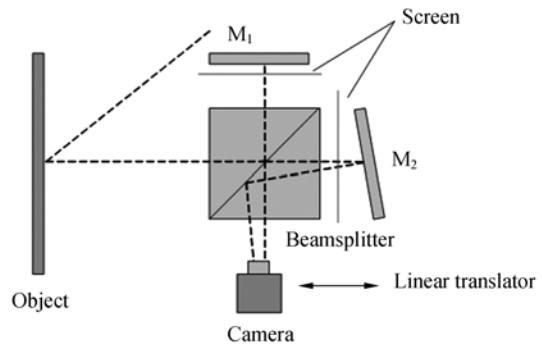


图 4 相关法测量剪切量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of shear measurement with correlation method

件不变, CCD 记录反射镜 M_1 和 M_2 分别被挡板遮住时物体的像。此时对两像求相关可以得到两幅图像的错位量即剪切量对应的像素值。由于实验室搭建的剪切干涉仪反射镜 M_1 和 M_2 与摄像机集成为一体,其相对距离保持恒定,所以不能利用文献[15]中水平移动摄像机的方法求比例系数 γ 。因此,可采取与成像法相同的方法确定比例系数 γ 。

同样,利用相对不确定度来标定相关法的测量准确度。显然,随着剪切量测量值的增大,其不确定度也在减小。所以,相关法也适合测量大剪切量。相比于成像法,相关法在求解剪切量对应的像素大小时准确度更高,剪切量测量耗时更少。

3 实验及结果分析

实验系统如图 5 所示,主要包括 532 nm 的固体激光器和 650 nm 的半导体激光器,剪切反射镜(步进电动机驱动其偏转,调整剪切量)、相移反射镜、分光棱镜和图像采集设备(镜头和 CCD)。测量物体是 150 mm×150 mm 的矩形铝板,表面涂反射漆。

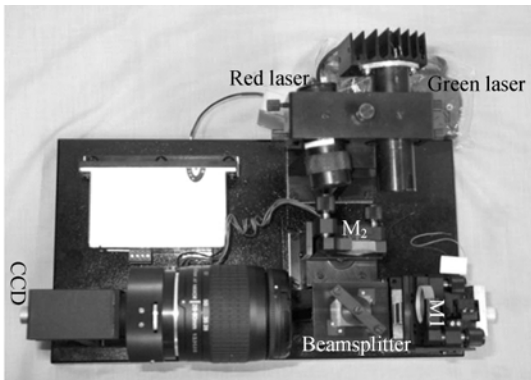


图 5 相移剪切散斑干涉仪实物图

Fig. 5 Physical map of electronic speckle shearing phase-shifting pattern interferometry

图 6 是成像法测量结果。图 7 是不确定度 E 与剪切量测量值的关系,从图 7 可知,随着剪切量值的增大,不确定度在减小。图 8 是利用莫尔条纹法测量剪切量的结果,条纹的间距 p 为 0.5 mm。

从图 8 中可以看到,莫尔条纹法存在一定缺陷。其测量精度由间隔 p 决定,测量范围由圆环数目决定。间隔 p 越小,精度越高,所以为了保

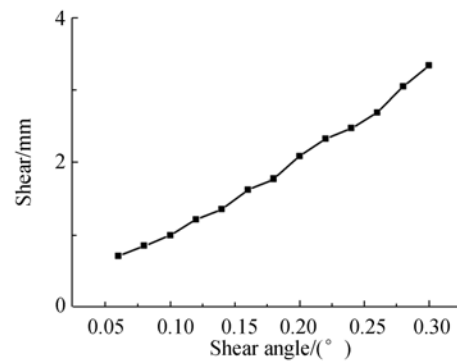


图 6 剪切量与剪切角之间的关系图

Fig. 6 Relationship between shear distance and shear angle with imaging method

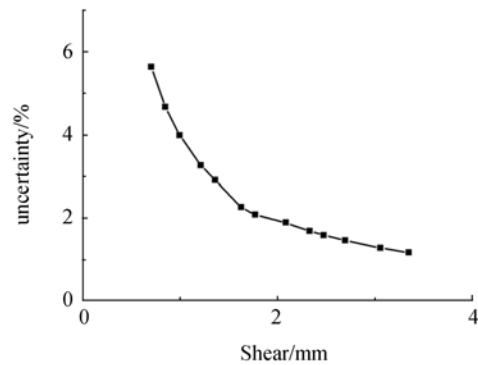
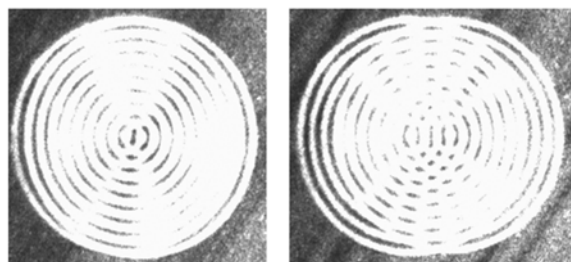


图 7 不确定度与剪切量之间的关系图

Fig. 7 Relationship between shear distance and uncertainty



(a) Cycle number $N=3$ (b) Cycle number $N=7$

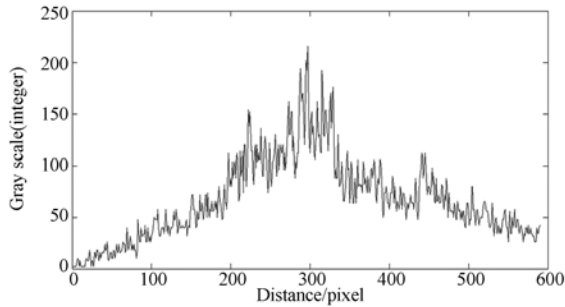
图 8 莫尔条纹法实验结果图

Fig. 8 Results of shear measurement with Moiré fringe method

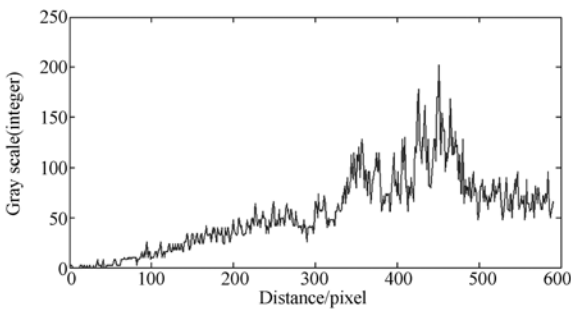
证剪切量的最大测量值不变,需要增加圆环的数目。但当剪切量值很大时,相对应的条纹数目也会很大,这使计数的难度增加,很容易引起误差。因此,莫尔条纹法通常用于测量小剪切量。

图(9)是利用相关法测量剪切量的测量结果。图 9(a)和图 9(b)分别表示反射镜 M_1 和 M_2 被遮住后,CCD 采集的物体像的一维灰度分布。图 10

(a)是图 9(a)的自相关,图 10(b)是图 9(a)和图 9(b)的互相关。由图(10)可得灰度值最大的像素移动了 138 个像素,比值系数 $\gamma=0.039\ 68$,求得剪切量为 5.458 mm。相关法相对于成像法有两个优势:一是确定剪切量对应的像素值数目测量准确度高;二是耗时短,不需要确定多个点的像素值。



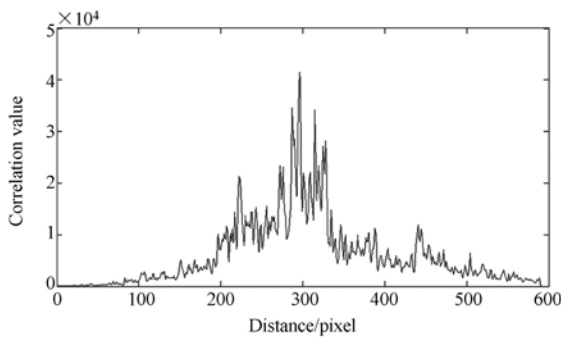
(a) M_1 遮挡后
(a) M_1 blocked



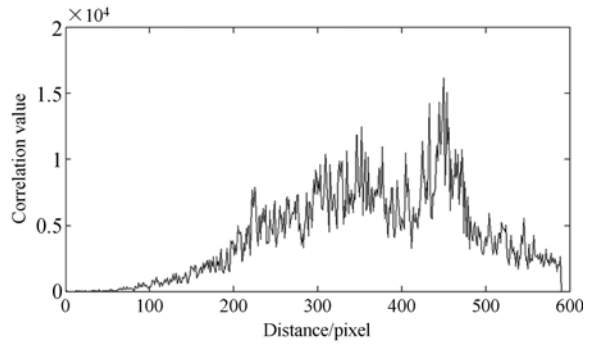
(b) M_2 遮挡后
(b) M_2 blocked

图 9 灰度值与像素位置的关系图

Fig. 9 Relationship between gray value and pixel location



(a)图 9(a)的自相关图与像素位置的关系图
(a)Lag correlation of Fig. 9(a)



(b)图 9 两幅图的相关值与像素位置的关系图

(b) Cross correlation of Fig. 9

图 10 相关值与像素位置的关系图

Fig. 10 Relationship between correlation value and pixel location

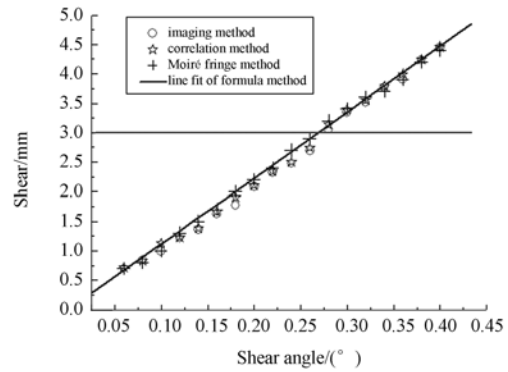


图 11 剪切量的测量结果

Fig. 11 Results of shear measurement with four methods

为了对比以上 3 种方法的测量结果,分析各自适用的测量范围,以公式法的测量结果为标准,分别采用成像法、莫尔条纹法、相关法测量剪切量,测量结果如图 11 所示。此时,剪切角在 $0\sim 0.4^\circ$ 每隔 0.02° 变化。物距为 319.4 mm。结果表明:剪切量 < 3 mm 时,莫尔条纹法的测量结果最接近公式法;但是当剪切量 > 3 mm 时,相关法与成像法的测量结果会更准确,而且相关法的测量精度更高。这是因为,利用莫尔条纹测量时间间隔 $p=0.1$ mm, $N=50$,当剪切量较小时,条纹级次 N 很容易判断;当剪切量增大时,随着级次的增多,级次判断会变得很困难,因此导致测量结果不准确。相关法与成像法都具有随着剪切量增大,不确定度减小,准确性增强(如图 7 所示)的特点,所以利用这 2 种方法测量大剪切量比莫尔条纹法更好。而相关法的测量精度比成像法更高,这是因为相关法确定的未知量少。

4 总 结

本文论述了测量剪切量的4种方法:公式法,成像法,莫尔条纹法和相关法。其中,成像法和相关法都是基于CCD成像求解剪切量,所以都需要知道长度与像素数的比值系数。在测量精度上,

由于相关法测量求解的未知量少,因此它比成像法的测量精度高。这2种方法均适合测量大剪切量。公式法适用于所有剪切量的测量。莫尔条纹法在测量小剪切量时有很高的精度,但是需要对被测物体进行表面处理。测量结果分析表明,当剪切量 <3 mm时,莫尔条纹法的测量精度高;而当剪切量 >3 mm时,相关法的测量精度高。

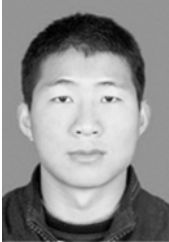
参考文献:

- [1] CHRISTIAN G, MARIE-LAETITIA P, FLORENT E, *et al.*. The detection of aeronautical defects in situ on composite structures using non-destructive testing [J]. *Composite Structures*, 2011, 93:1328-1336.
- [2] GANESHA U, BKA N, HCFREDDY G, *et al.*. Defect detection in unpolished Si wafers by digital shearography[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15:34-43.
- [3] GROVES R M, PRADARUTTI B, KOULOUMPI E, *et al.*. 2D and 3D non-destructive evaluation of a wooden panel painting using shearography and terahertz imaging [J]. *NDT&E International*, 2009, 42:543-549.
- [4] STEINCHEN W, YANG L X, KUPFER G, *et al.*. Strain analysis by means of digital shearography: potential limitations and demonstrations [J]. *J. Strain Anal.*, 1998, 33:171-182.
- [5] GROVES R M, CHEHURA E, LI W L, *et al.*. Surface strain measurement: a comparison of speckle shearing interferometry and optical fibre Bragg gratings with resistance foil strain gauges [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18: 1175-1184.
- [6] PAN B, KEMAO Q, XIE H, *et al.*. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, 20:062001.
- [7] RAO Y J. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors [J]. *Opt. Laser. Eng.*, 1999, 31:297-324.
- [8] DFRANCIS D, TATAM R P, GROVES R M. Shearography technology and applications: a review [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21: 1-29.
- [9] HUNG Y Y. Applications of digital shearography for testing of composite structures [J]. *Composites*, 1999, B30:765-773.
- [10] GROVES R M, JAMES S W, TATAM R P. Full surface strain measurement using shearography [J]. *SPIE*, 2001, 4448:142-152.
- [11] 周文静, 于瀛洁. 基于光纤的三维电子散斑干涉测量系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1815-1821.
- ZHOU W J, YU Y J. Design of 3D ESPI system by optical fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1851-1821. (in Chinese)
- [12] BHADURI B, KOTHIYAL M P, KRISHNA M N. Curvature measurement using three-aperture digital shearography and fast Fourier transform [J]. *Optical and Lasers in Engineering*, 2007, 45:1001-1004.
- [13] NG T W, CHAU F S. Automated linear shear measurements in digital shearing speckle interferometry[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(5): 1728-1729.
- [14] NG T W, CHAU F S. Moire-technique for linear shear measurement in photographic speckle shearing interferometry [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(5):1726-1727.
- [15] NG T W. Shear measurement in digital speckle shearing interferometry using digital correlation [J]. *Optical Communications*, 1995, 115:241-244.
- [16] AEBISHER and PECHSTEINER H A. Theoretical prediction of the effect of shear distortion in the Michelson interferometer [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(29):5429-5437.

- [17] 朱猛,黄战华,王小军,等. 显微动态散斑法测量压电陶瓷位移特征曲线[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4):844-849.
ZHU M, HUANG ZH H, WANG X J, *et al.*.

Measurement of piezoelectric displacement characteristic curves using dynamic speckle correlation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):844-849. (in Chinese)

作者简介:



武立强(1987-),男,山西孝义人,硕士研究生,2009年于西北工业大学获得学士学位,主要从事剪切散斑干涉技术的研究。E-mail: wlqgood2009@163.com



马彩缤(1987-),女,广西南宁人,硕士研究生,2009年于天津工业大学获得学士学位,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: macaibin@126.com



张红霞(1977-),女,江苏扬州人,副教授,2000年、2005年于天津大学分别获得测控技术与仪器专业和管理学院技术经济专业双学士学位、光学工程专业工学博士学位,主要研究方向为光电检测,光纤传感和光学设计。E-mail: hxzhang@tju.edu.cn



张以谟(1933-),男,天津人,教授,1955年毕业于天津大学机械系。1958年毕业于天津大学精密仪器系研究生毕业。历任天津大学讲师、教授、现代光学仪器研究所副所长,中国光学学会光电技术专业委员会主任,国务院学位委员会仪器仪表评审组成员,中国光学学会常务理事,中国仪器仪表学会复印科学与工程分会理事长,“863”光电子专家组成员,中国科技大学兼职教授,1992年当选为 SPIE Fellow。主要研究方向为:光学系统设计,光互连,激光、光学信息处理技术与应用。E-mail: ymzhang@tju.edu.cn

导师简介:



贾大功(1972-),男,内蒙古赤峰人,副教授,2004年于天津大学精密仪器与光电子工程学院获工学博士学位,主要从事光互连技术、光电检测技术和光纤传感技术的研究。E-mail: dagongjia@tju.edu.cn