

文章编号 1004-924X(2013)07-1701-06

双孔载频剪切散斑干涉法测量表面动态形变

朱 猛*, 李翔宇, 黄战华, 李宏跃

(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:为了精确地测量物体表面的动态形变并得到形变高度和梯度信息,提出了一种基于双孔衍射结构的空载频剪切散斑干涉法。该方法采用双孔产生固定的载频条纹,利用双旋转光楔实现剪切量的连续调节,采用正弦拟合算法进行相位计算。首先,分析了双孔调制的相位载频与双孔距和像距之间的关系,讨论了双旋转光楔得到线性剪切量调整的实验参数。然后,设计了测量光路参数;采用孔距为 3.8 mm 的双孔径配合焦距为 80 mm 的成像镜头在物距为 300 mm 时得到了载频为 $\pi/2$ 的散斑场。最后,对动态形变的薄金属板进行了测量。实验结果表明:配合实时图像处理系统,该方法可以在帧率为 15 frame/s 的采集速度下实现动态形变的测量与显示,可测形变峰值为 0.11~1.15 μm 。本系统结构简单,易于集成,适用于动态形变的实时检测。

关键词:散斑干涉;剪切干涉;空载频;动态形变测量

中图分类号: O436.1; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1701

Measurement of dynamic deformation using speckle shearography with carrier frequency generated by double-aperture

ZHU Meng*, LI Xiang-yu, HUANG Zhan-hua, LI Hong-yue

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

* Corresponding author, E-mail: zhumeng@tju.edu.cn

Abstract: To measure the dynamic deformation and slope of an object surface, this paper proposed a shearing speckle interferometry with a spatial carrier frequency generated by double-apertures. In this method, a double-aperture mask was used to generate a spatial carrier, a rotating wedge pair was utilized to adjust the shear continuously and the sinusoidal-fitting algorithm was taken to calculate the phase distribution. This paper firstly derived the relationship between the carrier phase and the separation of double apertures and also imaging distance. Then, the experimental condition to generate adjustable lateral shear was discussed based on the rotatable wedge pair. Finally, the parameter of this measuring method was analyzed. To produce a $\pi/2$ carrier frequency, it suggested that the separation of double aperture was selected as 3.8 mm when the focus length of the imaging lens and object distance were 300 mm and 80 mm, respectively. A stress release plate after centre loading was meas-

收稿日期:2013-02-07;修订日期:2013-03-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61275009);国家科技支撑计划资助项目(No. 2007BA000013),高等学校博士学科点专项基金资助项目(No. 20110032120059)

ured, and the experimental results demonstrate that this measuring system can obtain the information of deformation in real time under the capturing rate of 15 frame/s and the measurable range of displacement peak value is from 0.11 to 1.15 μm . This approach yields simple and compact optical implementation and allows a real time detection for dynamic deformation.

Key words: speckle interferometry; shearing interferometry; spatial carrier frequency; dynamic deformation measurement

1 引言

剪切散斑干涉法是无损检测领域中一种常用的非接触、全场检测方法,在各种工程材料的无损检测中有着广泛的应用。该方法采用外部加载使不同材料产生相异的形变,通过测量形变来测量材料分布。采用剪切散斑干涉法可以测量物体表面形变和位移梯度等^[1-4]。在剪切散斑干涉技术中融入相移干涉技术可以直接获得变形引起的相位差,通过相位解调得到连续分布的相位,可间接测量形变。

根据相移的实现机理可以将相移干涉技术分为时间相移和空间相移两类。时间相移在不同时刻采集不同相移量的干涉图,常采用压电陶瓷驱动的平移反射镜或旋转偏振片等方式来实现^[5-6]。由于需要不同时间的散斑场来计算一个状态的相位分布,时间相移方法主要适用于静态或缓变的测量。对于形变变化较快或者测量环境随时间快速变化的情况,常采用空间相移法。空间相移法可以分为单相机和多相机两类。采用多通道-多相机拍摄相移图的方法成本较高,图像对准较困难,实用性不强^[7]。而单相机的测量方法采用空间载频实现多像素复用的相位计算,空间载频测量方法结构简单,能够以低成本实现动态的形变测量。单相机空间载频散斑干涉的相位计算方法分为空域法和频域法两类,空域法采用正弦拟合进行相位计算,利用邻域内像素组成方程组计算待求相位;而频域法采用傅里叶分析,在频域提取频谱并通过反变换得到待求相位^[8-9]。

双孔屏的载频散斑干涉光学系统最早由 Duffy 提出,用于散斑照相测量面内位移^[10]。Sirohi 等^[11]又将双孔结构的迈克耳逊双星干涉光路用于离面位移的测量。此种光路虽然结构复杂,但可以方便地将载频调节和剪切量调节分离开。采用双孔配合单光楔进行的剪切散斑干涉也

有大量的研究,但这些光路存在如下问题:引入相移采用的是移动光楔的时间相移法,不适合动态测量;加入单光楔只能实现一种剪切量的测量。本文借鉴迈克耳逊双星干涉光路中双孔产生固定载频的结论,利用双旋转光楔实现剪切量在一定范围内的连续可调。采用正弦拟合方法计算相位分布,实现了通过一幅干涉强度图实时地进行相位计算的剪切散斑干涉光路。

2 测量原理

2.1 光学系统构成

用双孔屏产生空间载频的光路结构如图 1 所示,成像系统由透镜和双孔径光阑组成。在其中一个孔径中加入 2 个光学参数相同的光楔组成剪切干涉光路。像面上点 $P_1(X, Y)$ 和 $P_2(X', Y')$ 经过双孔和双光楔后由镜头成像于 $P'(x, y)$ 点并产生载频散斑干涉图。空间载频是由双孔产生的杨氏条纹决定的。成像系统的物距和像距分别为 Z 和 V ,双孔距为 D ,孔直径为 d 。 $P'(x, y)$ 点的光强可表示为:

$$I(x, y) = I_0(x, y) + \gamma(x, y) \times \cos[\varphi_s(x, y) + \varphi_v(x, y)], \quad (1)$$

式中: I_0 为平均光强, γ 为调制系数, φ_s 为光线 r_1 和 r_2 从双孔出射后的散斑随机相位差, φ_v 为双孔至 P' 点引入的球面波相位差。根据杨氏双缝干涉光程差计算公式, φ_v 表示为:

$$\varphi_v(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \left[V^2 + \left(x + \frac{D}{2} \right)^2 \right]^{1/2} - \left[V^2 + \left(x - \frac{D}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (2)$$

式中: λ 为照明激光波长, x 为物平面坐标,坐标 y 的影响已忽略。利用泰勒级数展开后,式(2)可以化简为:

$$\varphi_v(x) \cong \frac{2\pi}{\lambda} \frac{D}{V} x. \quad (3)$$

式(3)表明像面上任意点到双孔所产生的相位差

与双孔距离和像点的高度成正比,与像距成反比。设 CCD 像面上两像素点之间的距离为 d_p ,则相邻像素之间的相位差表示为 $\varphi_v = 2\pi D d_p / (\lambda V)$ 。

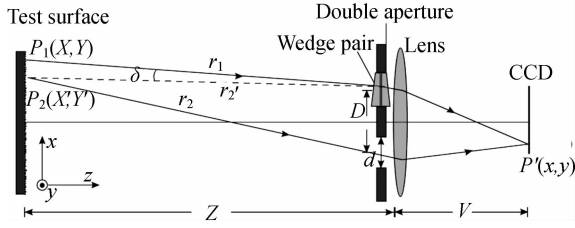


图1 双孔载频系统光路原理图

Fig. 1 Optical arrangement of double-aperture carrier frequency optical system

2.2 旋转双光楔剪切量调节

光楔是一种顶角足够小的折射棱镜,其色散效应可以忽略。双旋转光楔又称为 Risley 棱镜^[12],其光路如图2所示。入射光线 S 平行于 z 轴,经过旋转双光楔后出射光线在距离为 P 的平面内的轨迹落在一圆内,轨迹点 $S'(x, y)$ 的坐标表示为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = P\epsilon \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta'_1) + \cos(\theta_2 + \theta'_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta'_1) + \sin(\theta_2 + \theta'_2) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: θ'_1 和 θ'_2 为光楔的初始方位角度。 θ_1 和 θ_2 分别为两个光楔的旋转角度, $\epsilon = \alpha(n-1)$ 为单光楔对近似垂直入射光束所产生的偏转角, n 为光楔材料的折射率, α 为光楔的楔角。要产生横向剪切干涉并且随着光楔的旋转出现直线型的出射轨迹,需要满足 $\theta'_1 = \theta'_2 = 0$ 且 $\theta_1 = -\theta_2 = \theta$ 。当两个光楔的旋转角 θ_1 和 θ_2 相等且方向相反时得到的出射光线轨迹为一圆,这时得到的光束偏转角 $\delta = 2\alpha(n-1)\cos\theta$ 。

由图1可计算偏转角为 δ 时的物方剪切量。 P' 点对应的剪切量为 $\Delta X = |X' - X|$, 根据几何关系得:

$$\Delta X = \left| \left[Z \tan\left(\frac{X - D/2}{Z}\right) + \delta \right] + \frac{D}{2} - X \right|. \quad (5)$$

物方剪切量为坐标 X 的函数,与双孔距、物距和光楔偏折角有关。当满足双孔距远远小于物距,且二者的比值与偏转角 δ 量级相当时,式(5)可进一步化简为:

$$\Delta X \cong Z \cdot \delta = 2Z\alpha(n-1)\cos\theta. \quad (6)$$

选择合适的光楔转角可以获得 $0 \sim 2Z\alpha(n-1)$ 之间的剪切量取值。

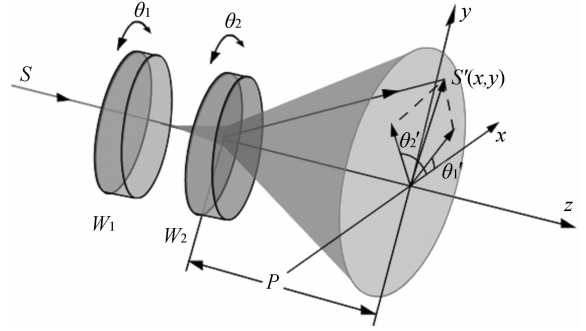


图2 旋转光楔光路

Fig. 2 Optical arrangement of rotating wedge prism

2.3 空间载频干涉相位提取

为了计算相位分布,将式(1)改写成离散形式。空间载频分布如图3所示,图像中第 $n+k$ 列的某点光强为^[10]:

$$I_k(x_{n+k}, v) = I_0(x_{n+k}, v) + \gamma(x_{n+k}, y) \times \cos[\varphi_s(x_{n+k}, y) + (n+k)\beta], \quad (7)$$

式中: $k \in \{-1, 0, 1, 2\}$, 相邻像素之间相位差 $\beta = \pi/2$ 时,作如下假设: I_0 、 γ 、 φ_s 和在这4个像素上近似相等或者变化梯度较小。将这相邻四点作为4个方程组的值带入相移公式可得:

$$\varphi_s + n\beta = \arctan\left(\frac{I_{n+2} - I_n}{I_{n-1} - I_{n+1}}\right) = \arctan\left(\frac{N_s}{D_s}\right) \bmod 2\pi, n = 2, 3, \dots, N-1, \quad (8)$$

式中: $N_s = I_{n+2} - I_n$, $D_s = I_{n-1} - I_{n+1}$ 分别为正弦余弦部分,下脚标 s 代表了检测物面的状态,发生形变后的相位差则表示为:

$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{N_f D_i - N_i D_f}{N_f N_i - D_f D_i}\right) \bmod 2\pi. \quad (9)$$

式(9)利用相邻四点计算空间中某点的相位差,其中脚标 f 和 i 分别代表了变形后和初始状态。

设物面的形变矢量为 $\mathbf{L} = \hat{u}i + \hat{v}j + \hat{w}k$, u, v, k 分别为3个坐标方向的形变分量,则相位变化与形变矢量之间的关系为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \left[\frac{\partial w}{\partial X} (1 + \cos\theta) + \frac{\partial u}{\partial X} \sin\theta \right] \Delta X + 4u \sin\theta \right\}, \quad (10)$$

式中: $\partial w / \partial X$, $\partial u / \partial X$ 分别为离面位移与面内位移在 X 方向上的一阶导数, ΔX 为横向剪切量, θ 为照明光与物表面法线之间的夹角。当只考虑发

生离面位移且光线正入射照明即 $\theta=0$ 时,式(9)可以简化为:

$$\frac{\partial w}{\partial X} = \frac{\Delta \varphi \lambda}{4\pi \Delta X} \quad (11)$$

相位差与离面位移一阶导数之间存在一个比例因子 $(\lambda/4\pi)\Delta X$ 。可知当剪切量越大时,所得测量灵敏度越高。剪切量的大小由式(6)决定。

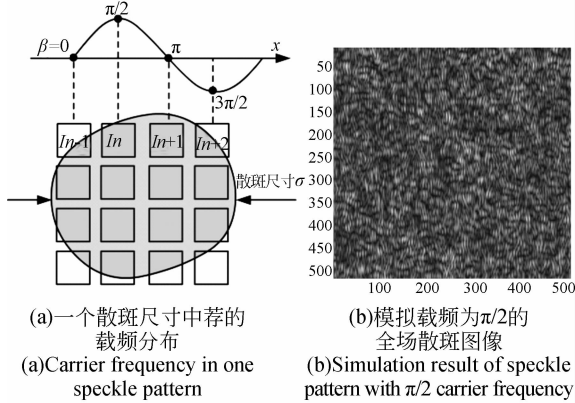


图 3 空间载频分布示意图

Fig. 3 Schematic of distribution of spatial carrier frequency

3 实验与分析

采用图 1 所示的检测光路,照明光波长为 650 nm,且正入射照明。单透镜焦距 $f=80$ mm,物距为 $Z=300$ mm,所使用的 CCD 相机为 PonitGrey 公司 GRAS-14S5M,像素尺寸为 4.65 μm ,测量使用帧频为 15 frame/s。则根据式(1)可计算出相邻像素之间产生相位差 $\beta=\pi/2$ 时,双孔之间的距离 $D=3.8$ mm。由于采用正弦拟合计算相位需要相邻像素之间的散斑随机相位差远远小于载频相位差,需要满足单个散斑尺寸大于参与计算的像素尺寸之和,根据几何关系还需要满足 $d \leq D$, d 为孔直径。散斑统计平均尺寸定义为 $\sigma=1.22 \lambda V/d$,选取 $d=3.5$ mm 符合测量条件要求。光楔楔角为 2° ,对应最大剪切量为 10.5 mm,剪切方向为横向。实验对象为直径 50 mm,厚 2 mm 的金属板。对其施加中心载荷,通过实验光路采集载荷解除后的金属板表面形变过程,所得变形包裹相位如图 4 所示。

对图 4 所示相位分布图进行解包裹处理,得到连续分布的相位图,并将实验参数带入式(11),求解出离面位移梯度,得到的位移梯度结果如图

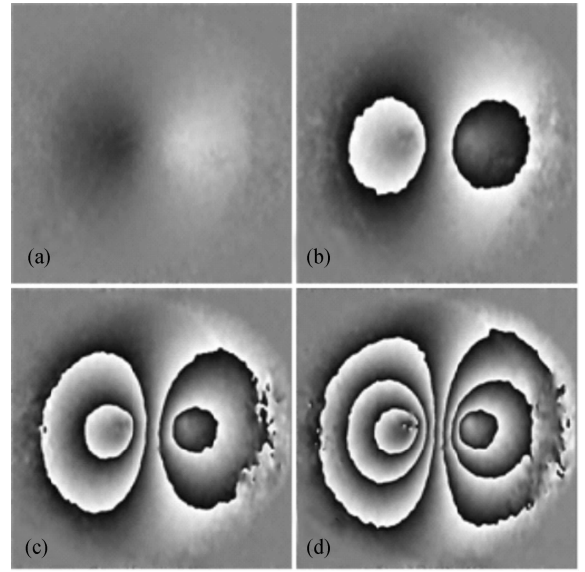


图 4 不同时刻的形变包裹相位图

Fig. 4 Wrapped phase map under different captured time

5 所示。物体的离面形变导数最大值随着时间的增大而增大,它反映了物体的离面形变沿剪切方向的变化率,将其沿 x 方向积分可求出物体的离面位移分布,如图 6 所示。

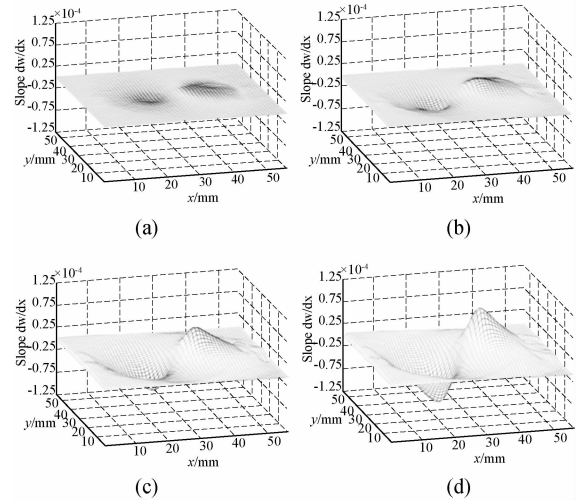


图 5 不同时刻离面位移梯度图

Fig. 5 Slope map of out-plane displacement under different captured time

连续计算一组相等时间间隔的相位分布图,得到表 1 中离面位移与其导数在不同时刻的峰值数据,可以看出在金属板的弹性形变恢复过程中形变位移逐渐增大,如图 7 所示。为了研究形变恢复的动态过程,对数据进行不同的拟合处理,得

到一次线性拟合的残差为 $0.134 \mu\text{m}$,二次拟合残差为 $0.098 \mu\text{m}$ 。说明金属板的应力释放形变过程用二次曲线描述较为准确。

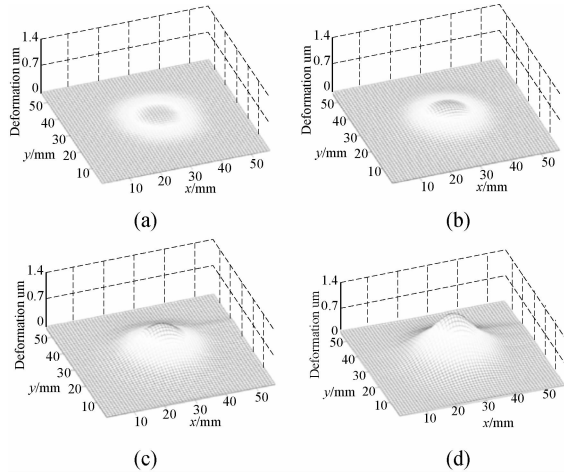


图 6 不同时刻离面位移图

Fig. 6 Out-plane displacement map for different captured time

表 1 连续 7 帧采集得到的离面位移及其导数峰值数据

Tab.1 Peak values of out-plane displacement and its slope

帧数	1	2	3	4	5	6	7
导数峰值 ($\times 10^{-4}$)	0.10	0.33	0.44	0.55	0.68	0.83	0.98
形变峰值 / μm	0.11	0.38	0.50	0.64	0.78	0.95	1.15

采用正弦拟合进行相位计算的方法需要满足参与运算的相邻点之间的光强和散斑相位差很小,这使得这种测量方法适用于表面形变斜率较小的场合,对于突变处会产生测量误差。另外,采用空域的相位计算方法利用连续的几个像素进行计算会降低测量的分辨率。不过其他相位检测法相比,此种方法结构简单,成本低,校准方便,是动态形变测量的有效方法。表 1 中得到的离面位移

参考文献:

[1] JACQUOT P. Speckle interferometry: A review of the principal methods in use for experimental mechanics applications [C]. Strain, 2008, 44:57-69.

数据是在 15 frame/s 的采集速度下得到的,位移测量峰值会随着采集速率的提高而变小,今后将要开展高速采集(1 000 frame/s 以上)条件下形变的测量与提高灵敏度的研究工作。

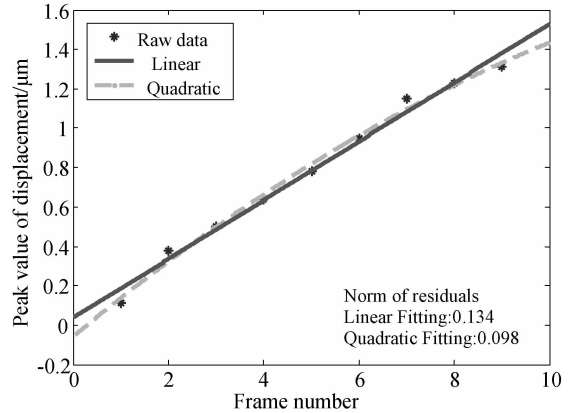


图 7 连续采集离面位移分布曲线

Fig. 7 Out-plane displacement curves for continuous captured

4 结 论

本文根据工业无损检测检测精度高、速度快的要求,采用双孔式空间载频剪切散斑干涉法测量了动态形变的金属薄板离面位移及其梯度。采用双旋转光楔进行剪切量的调节,满足了不同测量环境的需要。分析了光学系统参数:双孔距、孔直径和光楔偏转角对测量系统的影响。最后,设计了实验参数:采用孔距为 3.8 mm 的双孔径,配合焦距为 80 mm 的成像镜头,在物距为 300 mm 时得到了载频为 $\pi/2$ 的散斑场。对动态形变的薄金属板进行了测量,实验结果表明:配合实时图像处理系统可以在帧率为 15 frame/s 的采集速度下实现动态形变的测量与显示,可测形变峰值为 $0.11 \sim 1.15 \mu\text{m}$ 。

实验结果表明,该系统适用于散射表面动态形变的测量。

[2] 朱猛,黄战华,王小军,等. 显微动态散斑相关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.. Piezoelectric displacement characteristic curve measure-

- ment using dynamic speckle correlation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):844-849. (in Chinese)
- [3] 刘战伟, 吴宁宁, 谢惠民, 等. 电子显微镜散斑照相技术[J]. *光子学报*, 2009, 38(1):64-68.
LIU ZH W, WU N N, XIE H M, *et al.*. Electron microscope speckle photography technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1):64-68. (in Chinese)
- [4] VISWANATH B, RAGHAVENDRA J, EMILIA M, *et al.*. Electronic speckle-pattern interferometer using holographic optical elements for vibration measurements [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(19):3273-3275.
- [5] 周文静, 于瀛洁. 基于光纤的三维电子散斑干涉测量系统设计[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):1815-1821. (in Chinese)
- [6] JOENATHAN C, FRANZE B, HAIBLE P, *et al.*. Large in-plane displacement measurement in dual beam speckle interferometry using temporal phase measurement [J]. *J. Mod. Opt.*, 1998, 45:1975-1984.
- [7] BAIK S H, PARK S K, KIM C J, *et al.*. Two channel spatial phase shifting electronic speckle pattern interferometry [J]. *Optics Communications*, 2001, 192:205-211.
- [8] 王小鹏, 朱日宏, 苏俊宏, 等. 空间载频干涉法全场测量长度技术[J]. *光子学报*, 2010, 39(11):2031-2035.
WANG X P, ZHU R H, SU J H, *et al.*. Length measurement of whole field based on spatial carrier frequency interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(11):2031-2035. (in Chinese)
- [9] 蔡怀宇, 李宏跃, 朱猛, 等. 用空间载频法测量玻璃平板的厚度均匀性[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2):260-266.
CAI H Y, LI H Y, ZHU M, *et al.*. Measurement of thickness uniformity for glass plate by spatial carrier [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):260-266. (in Chinese)
- [10] SIROHI R S, BURKE J, HELMERS H, *et al.*. Spatial phase shifting for pure in-plane displacement and displacement-derivative measurements in electronic speckle pattern interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36:5787-5791.
- [11] BASANTA B, MOHAN N K, KOTHIYAL M P, *et al.*. Use of spatial phase shifting technique in digital speckle pattern interferometry (DSPI) and digital shearography [J]. *Opt Express*, 2006, 14:11598-11607.
- [12] HORNG J SH, LI Y J. Error sources and their impact on the performance of dual-wedge beam steering systems [J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(18):4168-4175.

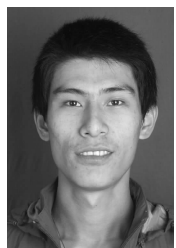
作者简介:



朱 猛(1984—),男,河北秦皇岛人,博士后,2006年于燕山大学获得学士学位,2008年、2011年于天津大学分别获得硕士和博士学位。2011年至今,天津大学仪器科学与技术博士后流动站博士后,主要从事全息与散斑检测、光学信息处理等方面的研究。E-mail: zhumeng@tju.edu.cn



黄战华(1965—),男,湖北省孝感人,博士,教授,1986年于华中科技大学获得学士学位,1989年、1992年于天津大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光电图像处理与模式识别、光电子信息技术及多媒体计算机应用与控制的研究。E-mail: zhanhua@tju.edu.cn



李翔宇(1986—),男,辽宁锦州人,博士研究生,主要从事高速散斑检测方面的研究。E-mail: tjulxy@tju.edu.cn



李宏跃(1986—),男,天津人,硕士,2012年于天津大学获得硕士学位,主要从事全息与散斑检测方面的研究。E-mail: lihongyue@tju.edu.cn