

二维数字散斑相关技术测量中斜光轴拍摄的误差修正

梅 潇 解东平* 乔 榛

上海海事大学物流工程学院, 上海 201306

摘要 针对二维数字散斑斜光轴近距离测量时由于镜头光轴和待测目标面不垂直引起的误差问题,根据光学原理推导出不同角度拍摄时修正镜头畸变的校准应变公式。通过标准试件在弹性范围内进行拉压实验,验证校准应变公式对数字散斑图像测量数据修正的有效性,并与理论计算和应变片测试值进行比较。结果表明修正后的应变值误差在9.24%之内,提高了二维数字散斑相关测量技术的效率和精度。

关键词 成像系统; 数字散斑相关技术; 镜头畸变; 误差修正; 应变

中图分类号 O348 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.051101

Error Correction of Optical Axis at an Angle Shooting in Two-Dimensional Digital Speckle Correlation Method

Mei Xiao Xie Dongping Qiao Zhen

College of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

Abstract In order to solve the error problem caused by misalignment of the lens optical axis and the target surface for two-dimensional digital speckle inclined axis measurement at a close range. A simple and effective lens distortion correction formula based on optical principle under different angles is worked out to modify the testing strain and at last the data correction effectiveness of calibration strain formula is verified by standard specimen under compressive and tensile tests. The results show that the proposed method can eliminate the effect of misalignment distortion whose error is not exceed 9.24% so that the efficiency and accuracy of two-dimensional digital speckle correlation technology are improved.

Key words imaging systems; digital speckle correlation technology; lens distortion; error correction; strain

OCIS codes 110.6150; 110.2970; 120.6150

1 引言

数字散斑相关测量技术是由 Peter 等^[1-2]最早提出的一种全场光学测量方法, 在应用中需满足两个条件: 1) 待测目标面是一个平面; 2) 镜头光轴与待测目标面法线夹角不超过 5° ^[3]。但在实际工程应用中, 因需测量的材料表面特征和试件安装空间的限制, 很难完全满足上述条件。尤其使用二维数字散斑相关方法(2D-DIC)时, 镜头光轴不垂直于待测目标平面会使测得的位移场存在较大的误差, 使其在工程应用和实验研究中的应用受到了限制, 因此研究二维数字散斑技术斜光轴测量的误差修正很有必要。

目前, 国内外有很多学者对斜光轴数字散斑测量技术进行了大量的研究。陈大庆等^[4]研究远距离斜光轴成像时, 像模糊和成像位置变化对白光数字散斑相关方法产生影响, 给出了两种影响的误差理论计算公式, 提出使用参考测量技术克服斜光轴成像位置变化带来的影响。孙平等^[5]提出利用平台上物体的偏转引入附加相位, 实现剪切电子散斑干涉的相移, 给出了物体偏转角度与附加相位之间的关系式。Zhao 等^[6-9]研究了数字图像相关技术测量刚体位移、面内位移时对镜头畸变的标定和校正。李喜德等^[10]详细分析了斜光轴数字强度相关计量时, 允许由离面位移、变形及倾斜等所引起的最大像模糊容限。

本文研究了2D-DIC近距离斜光轴位移场的误差修正, 镜头光轴和待测目标面法线有夹角, 且镜头高度

收稿日期: 2014-11-04; 收到修改稿日期: 2014-12-25; 网络出版日期: 2015-04-17

基金项目: 第48批教育部留学回国人员科研启动基金项目

作者简介: 梅 潇(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要从事现代设计理论、焊接结构的疲劳与损伤的分析等方面的研究。

E-mail: xiaomei@shmtu.edu.cn

* 通信联系人。 E-mail: dongping7@126.com

变化是造成镜头畸变的主要原因。为了使二维数字散斑成像系统获得有效的数据,必须对所测数据进行修正。根据小孔成像原理推导出不同角度拍摄时镜头畸变校准公式,并结合标准试件在弹性范围内进行拉压实验对其进行了验证,提高了二维数字散斑相关测量技术的效率和精度,从而拓展了二维数字散斑相关方法的应用范围。

2 误差校准原理

2.1 镜头拍摄仰角为 θ 时

如图1所示,垂直拍摄 $\theta=0^\circ$ 时,待测目标面与 xoy 平面平行,法线方向 \mathbf{n} 与镜头光轴 oz 共线;非垂直拍摄时,若保持镜头不动,待测目标面相对偏转了 θ 角,即法线方向 \mathbf{n}' 和镜头光轴夹角为 θ 。 L 为图像和镜头的距离, Z 为待测目标平面和镜头间的距离。在 yoZ 平面内,待测目标平面上取 BC 线段, C 点坐标为 (Y, Z) , 成像点 E 在 y 方向的坐标值为 $y_s(Z)$ 。利用经典小孔成像原理^[9]得到

$$y_s(Z) = -\frac{L}{Z}Y. \quad (1)$$

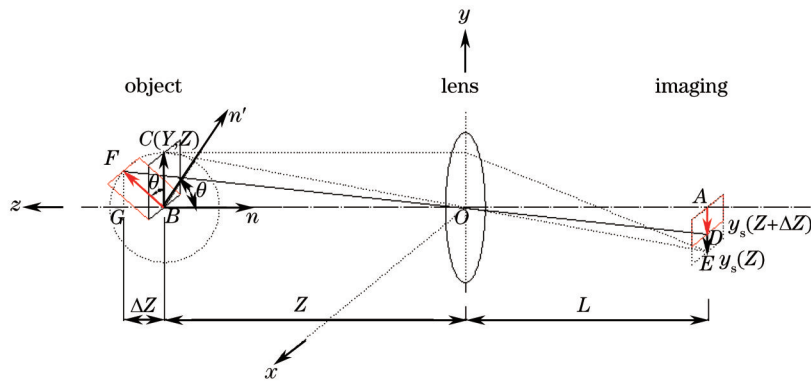


图1 镜头光轴与待测目标面法线有夹角的光路图

Fig.1 Optical path diagram when lens axis and test target surface normal exists an angle

当待测目标面偏转了 θ 角,此时 C 点到达 F 点,其坐标为 $(Y \cos \theta, Z + \Delta Z)$ 。其中, $\Delta Z = Y \sin \theta$, 而成像点 E 变为 D , 点 D 在 y 方向的坐标值为 $y_s(Z + \Delta Z)$ 。

由 $\triangle ADO \sim \triangle GFO$ 得

$$\frac{|AD|}{|GF|} = \frac{L}{Z + \Delta Z}. \quad (2)$$

因小孔成像后是倒像,所以

$$y_s(Z + \Delta Z) = -\frac{L}{Z + \Delta Z}Y \cos \theta = -\frac{L}{Z[1 + (\Delta Z/Z)]}Y \cos \theta \approx -\frac{L}{Z}\left(1 - \frac{\Delta Z}{Z}\right)Y \cos \theta, \quad (3)$$

式中

$$\frac{1}{1 + (\Delta Z/Z)} = \frac{Z}{Z + \Delta Z} = \frac{Z + \Delta Z - \Delta Z}{Z + \Delta Z} = 1 - \frac{\Delta Z}{Z + \Delta Z} \approx 1 - \frac{\Delta Z}{Z}, (\Delta Z \ll Z). \quad (4)$$

y 方向成像坐标的改变量

$$\begin{aligned} V(\Delta Z) &= y_s(Z + \Delta Z) - y_s(Z) = -\frac{L}{Z}\left(1 - \frac{\Delta Z}{Z}\right)Y \cos \theta + \frac{L}{Z}Y = -\frac{L}{Z}Y\left(\cos \theta - \frac{\Delta Z}{Z}\cos \theta - 1\right) = \\ &= -\frac{L}{Z}Y\left(\cos \theta - 1 - \frac{Y \sin \theta \cos \theta}{Z}\right) = y_s(Z)\left[\cos \theta - 1 + y_s(Z)\frac{\sin \theta \cos \theta}{L}\right], \end{aligned} \quad (5)$$

则

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial V(\Delta Z)}{\partial y_s} = \cos \theta - 1 - \frac{2Y \cos \theta \sin \theta}{Z} = \cos \theta - 1 - \frac{Y \sin 2\theta}{Z}, \quad (6)$$

式中 ε_{yy} 为由于待测目标面与镜头光轴 oz 不垂直在 y 方向上产生的附加应变。

2.2 镜头与待测目标有相对位移时

如图2所示,在角度拍摄时,为使待测目标相同区域保持在相应的视场内,镜头与待测目标在 y 方向上

有一定的相对位移, Δh 为镜头下降的高度, 相当于 BC 线段沿 $+y$ 方向平移 Δh 到达 GF 位置。此时 G 点通过镜头成像为 D 点, 其在 $-y$ 方向坐标值相对于镜头下降之前 B 点所成的像 A 点平移了 L' 距离, F 点成的像为 E 点, 其在 $-y$ 方向坐标值由 $y_s(Z)$ 变成 $y'_s(Z)$ 。

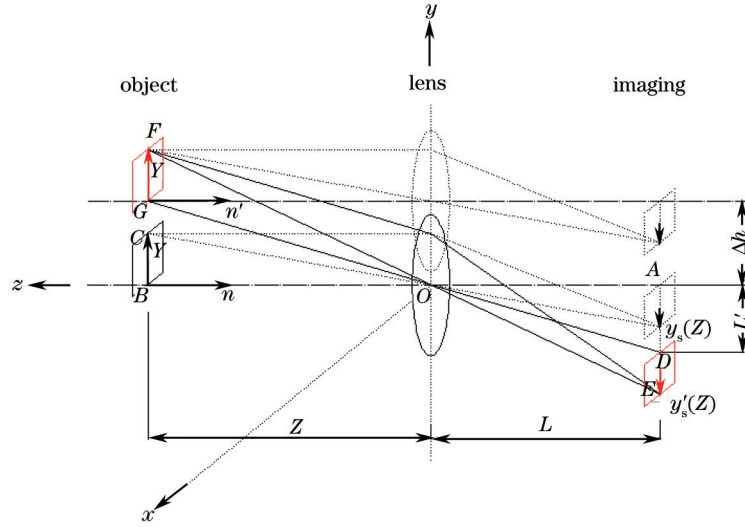


图2 镜头与待测目标有相对位移时的光路图

Fig.2 Optical path diagram when lens and test target exist displacement

由 $\triangle DEO \sim \triangle GFO$ 有

$$\frac{y'_s(Z) + L'}{Y} = -\frac{L}{Z}, \quad (7)$$

$$y'_s(Z) = -\frac{L}{Z}Y - L'. \quad (8)$$

由 $\triangle ADO \sim \triangle BGO$ 得

$$\frac{|AD|}{|BG|} = \frac{L'}{\Delta h} = \frac{L}{Z}, \quad (9)$$

$$L' = \frac{L}{Z}\Delta h, \quad (10)$$

所以

$$y'_s(Z) = -\frac{L}{Z}Y - \frac{L}{Z}\Delta h = y_s(Z) + \frac{y_s(Z)}{Y}\Delta h. \quad (11)$$

则 y 向成像坐标的改变量

$$V(\Delta h) = y'_s(Z) - y_s(Z) = \frac{y_s(Z)}{Y}\Delta h. \quad (12)$$

因镜头高度变化 Δh 而引起的附加应变为

$$\varepsilon'_{yy} = \frac{\partial V(\Delta h)}{\partial y_s} = \frac{\Delta h}{Y}. \quad (13)$$

由(6)、(13)式得轴向校准应变为

$$\varepsilon_y \approx \varepsilon_{yy} + \varepsilon'_{yy} = \cos\theta - 1 - \frac{Y \sin 2\theta}{Z} + \frac{\Delta h}{Y}. \quad (14)$$

因此由于镜头倾斜以仰角为 θ 拍摄及镜头高度变化引起的应变误差为 ε_y , 由世界坐标系转换到计算机图像坐标系得到理论应变误差为 $\varepsilon'_y = \frac{\varepsilon_y}{N} = \varepsilon_y \times 10^{-6}$ [3,11], N 为像素。

3 实验

实验装置如图3所示, 包括美国 MTS370 型 100 kN 疲劳实验机、二维数字散斑成像系统和应变片测试系统。采用 Q235 材料标准拉伸试件, 宽为 30.03 mm, 厚为 9.77 mm, 试件断面的面积 $A = 2.934 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 弹性

模量 $E = 2.05 \times 10^{11}$ Pa。试件正面进行散斑处理,背面贴有应变片,如图3(b)所示。测试中,镜头相对试件的距离 $z = 0.855$ m,镜头拍摄仰角 $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 。实验步骤如下:1)以镜头和试件表面垂直,即拍摄角度 θ 为 0° 时为基准状态,由MTS疲劳实验机对试件进行阶梯加载(图4),斜线段为加载持续段,水平线段为加载保持段,拉为正,压为负。2)在载荷保持段,用2D-DIC拍照系统每0.5 s拍摄一张照片,同时记录应变片的应变值和镜头高度 h_i 。3)调节镜头拍摄仰角 θ 分别取 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$,重复步骤1)和2)并记录相应数据。镜头高度如表1所示。

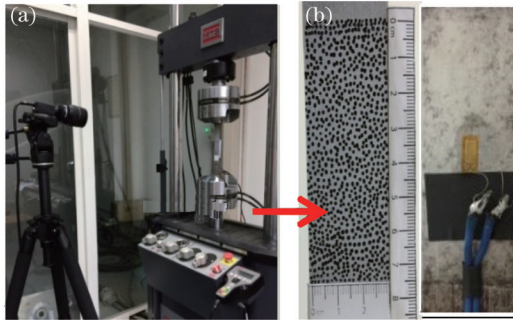


图3 实验装置

Fig.3 Experimental setup

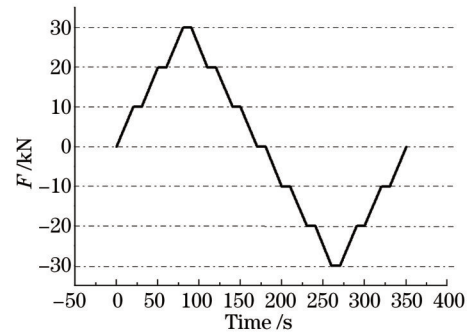


图4 试件加载情况

Fig.4 Specimen loading conditions

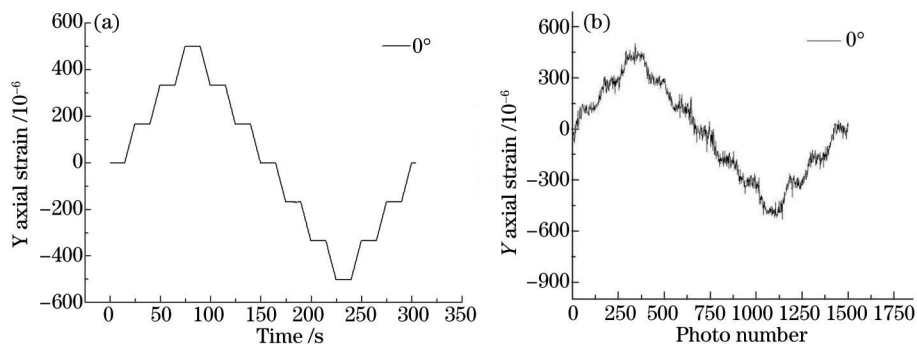
表1 不同仰角拍摄时镜头高度

Table 1 Lens height at different θ

θ	0°	10°	20°	30°
Lens height $h_i, i = 0, 1, 2, 3$	1.118 m	0.958 m	0.761 m	0.58 m
$\Delta h = h_0 - h_{i+1}, i = 0, 1, 2, 3$	0	0.16 m	0.357 m	0.538 m

4 实验结果分析

以 $\theta = 0^\circ$ 为例,在试件所贴应变片对应的 $5 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 区域内,应变片和数字散斑技术测量的轴向应变如图5所示。

图5 $\theta = 0^\circ$ 时拍摄试件受载全程兴趣区域的轴向应变。(a) 应变片测量数据; (b) 二维数字散斑测量数据Fig.5 $\theta = 0^\circ$, axial strain curve of the interest area in the whole loading process. (a) Strain gauge data; (b) 2D-DIC data

定义 ε_i 为理论轴向应变,根据胡克定律知,试件理论轴向应变 $\varepsilon_i = \frac{F}{EA}$ 。 ε_s 为加载保持段应变片所测得的轴向应变均值, ε_i 和 ε_s 曲线如图6所示。 ε_D 为加载保持段数字散斑技术测得不同角度下的轴向应变均值, ε_i 和 ε_D 曲线如图7所示。

因为试件所受载荷在其弹性范围内,由图6可知应变片所测数据保持很好的线性关系,所测数据和理论值非常接近,表明应变片测量方法对单向应力状态下的应变测量精度是很高的,但应变片是接触式的测量方法,仅能获得应变片区域的平均应力,无法反映应力集中区域的位移场梯度,这时数字散斑技术是一种有效的方法,尤其是测量裂纹尖端区域的位移场。但是如图7所示,不同角度拍摄时的数字散斑数据和理论计算值存在误差,这种误差由镜头畸变引起。

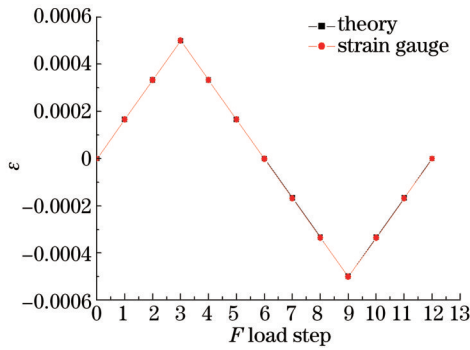


图6 理论 ε_1 和应变片测量轴向应变 ε_s 曲线

Fig.6 Axial strain curve of theoretical value ε_1 and strain gauges measurements ε_s

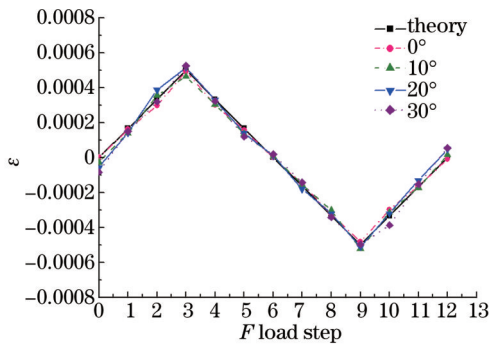


图8 各个角度 ε'_D 和 ε_1 对比曲线

Fig.8 Contrast curve of ε'_D and ε_1 at different angles

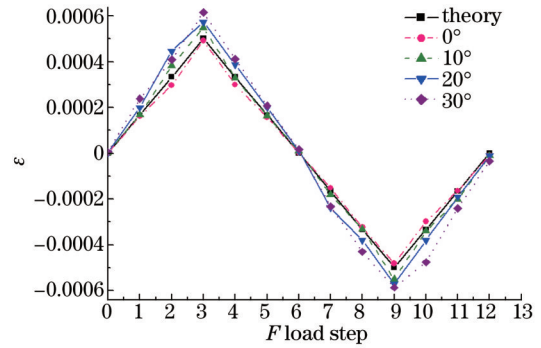


图7 数字成像系统测量的轴向应变 ε_D 及理论值曲线 ε_1

Fig.7 Axial strain curve of 2D-DIC data ε_D and theoretical value ε_1

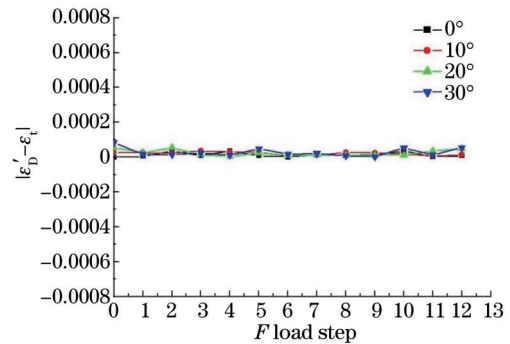


图9 各个角度 $|\varepsilon'_D - \varepsilon_1|$ 曲线

Fig.9 $|\varepsilon'_D - \varepsilon_1|$ curve at different angles

由(14)式校准应变 ε'_y 对图7中的数字散斑测量数据 ε_D 进行修正得 ε'_D 。因为加载前半周期拉伸,后半周期压缩,所以修正时前半周期 $\varepsilon_D - \varepsilon'_y$,后半周期 $\varepsilon_D + \varepsilon'_y$,得各个角度轴向修正应变 ε'_D ,结果如图8所示,和理论值 ε_1 几乎吻合。各个角度修正后的数字散斑测量的轴向应变 ε'_D 相对于理论计算轴向应变 ε_1 之差绝对值曲线如图9所示,可见修正后的误差绝对值变得很小,修正误差为 $\eta = \left| \frac{\varepsilon'_D - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} \right| \times 100\%$ 。加载时各个角度的修正误差平均值 $\bar{\eta}$ 如表2所示。

表2 加载时各个角度的修正误差平均值

Table 2 Average corrected error when loading at different angles

	0°	10°	20°	30°
$\bar{\eta}$	5.77%	8.69%	9.04%	9.24%

最大修正误差为9.24%,在所测目标平面内以微应变变化时,这样的修正误差是很小的,说明经过修正后的数据能够达到理想的效果。

5 结 论

当使用二维数字散斑相关方法时,由于镜头和待测目标面不垂直,且不能处于理想的位置而造成镜头畸变,从而影响所测数据的精度。基于小孔成像原理,推导不同角度拍摄时所测目标相同位置处对应的轴向校准应变公式,通过标准试件的拉压实验并利用数字散斑相关方法测量,进行镜头畸变分析,对其数据修正后和理论数据吻合很好,误差不超过9.24%,对于测量微应变来说这样的误差已很小。在工程应用中,因设备装置安排和空间限制,用二维数字散斑相关方法镜头无法垂直拍摄待测目标时,可以通过对非垂直拍摄的数据进行修正来获得比较理想的结果,从而扩展了二维数字散斑相关技术的应用范围。

参考文献

- 1 W H Peter, W F Ranson, M A Sutton. Application of digital correlation methods to rigid body mechanics[J]. *Opt Eng*, 1983, 22(6): 738-742.
- 2 T C Chu, W F Ranson, M A Sutton. Applications of digital image correlation techniques to experimental mechanics[J]. *Exp Mech*, 1985, 25(3): 232-244.
- 3 Meng Libo, Jin Guanchang, Yao Xuefeng. Errors caused by misalignment of the optical camera axis and the object surface in the DSCM[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, 46(11): 1930-1932.
孟利波, 金观昌, 姚学锋. DSCM中摄像机光轴与物面不垂直引起的误差分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46(11): 1930-1932.
- 4 Chen Daqing, Gu Jihua, Jiang Jinhua. Study on the digital speckle correlation method for in-plane displacement measurement in the case of slant optical axis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(7): 907-912.
陈大庆, 顾济华, 姜锦虎. 斜光轴面内位移测量的数字散斑相关法研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(7): 907-912.
- 5 Sun Ping, Zhang Xi. Study on rotating stage phase-shifting technique in electronic speckle shearing interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(4): 558-562.
孙平, 张熹. 偏转平台剪切电子散斑干涉相移技术研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(4): 558-562.
- 6 J Zhao, D Zhao, Z Zhang. Calibration and correction of lens distortion for two-dimensional digital speckle correlation measurement[J]. *Optik*, 2013, 124(23): 6042-6047.
- 7 S Yoneyama, H Kikuta, A Kitagawa, *et al.*. Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement[J]. *Opt Eng*, 2006, 45(2): 023602.
- 8 S Yoneyama, A Kitagawa, K Kitamura, *et al.*. In-plane displacement measurement using digital image correlation with lens distortion correction[J]. *JSME International Journal Series A*, 2006, 49(3): 458-467.
- 9 B Pan, L Yu, D Wu, *et al.*. Systematic errors in two-dimensional digital image correlation due to lens distortion[J]. *Opt Laser Eng*, 2013, 51(2): 140-147.
- 10 Li Xide, Tan Yushan. Image blurring allowance of digital intensity correlation metering in the case slant optical axis[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(6): 632-635.
李喜德, 谭玉山. 斜光轴数字强度相关计量的像模糊容限[J]. *光学学报*, 1994, 14(6): 632-635.
- 11 M A Sutton, J H Yan, V Tiwari, *et al.*. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements[J]. *Opt Laser Eng*, 2008, 46(10): 746-757.

栏目编辑: 苏 岑