

研究子窗口对数字散斑相关计算影响的新方法

梁振宁¹ 印 波¹ 王石刚¹

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要 子窗口尺寸选择是数字散斑相关计算中的一个重要问题,对计算结果的精确度有重要的影响,研究了子窗口内各像素对计算结果的影响,并提出了一种新的方法用于处理该问题。该方法不再像传统数字散斑相关方法中那样平等对待所有的像素,而是根据它们从目标图像中识别出子窗口的能力分别处理,各像素的权系数由分布函数根据它们与参考图像子窗口中心的距离计算得到。与传统的选择子窗口尺寸的方法相比,该方法不仅具有根据不同测试条件选择合适数量的像素包含进子窗口的功能,而且缓解了子窗口边缘像素对计算结果的影响,提高了相关计算的精度。

关键词 测量;数字散斑;子窗口尺寸;权系数

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1212005

Study on Effect of Subset Size on Digital Image Correlation with a New Method

Liang Zhenning¹ Yin Bo¹ Wang Shigang¹

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China)

Abstract Subset size selection is an essential step for digital image correlation which affects the calculation accuracy greatly. The effects of pixels in a subset on calculation result are investigated. A new method is developed to deal with the problem. In the method, all the pixels in a subset are not treated equally as the traditional method. Coefficients are set to each pixel rely on the importance of them to identify a subset from target images which are calculated by the normal distribution based on the distances between them and the central pixel. Similar to subset size selection in traditional digital image, it is available to select appropriate number of pixels in subsets according to test conditions. The effect of pixels at the edge of subsets on correlation calculation is somewhat alleviated. Thus, the calculation accuracy is improved.

Key words measurement; digital image correlation; subset size; coefficient

OCIS codes 120.3940; 120.6150; 100.2000

1 引 言

试件表面变形测量是实验力学中的一项重要内容,数字散斑相关技术(DIC)^[1-2]是一项基于数字图像处理的光学测量技术,因其好的灵活性和对测量环境较低的要求而被广泛的应用于众多的测量领域。DIC通过对比计算试件变形前后的数字图像来获取全场的变形信息,其测试精度受散斑类型、图像

采集系统和相关计算公式等诸多因素的影响,子窗口大小通常由测试者根据实验条件人工选取,是影响 DIC 计算速度和精度的重要因素之一。

近年来,影响 DIC 的各种因素得到了广泛的研究^[3-5],并且,计算速度、计算精度和使用范围等都有相应的提高。在使用 DIC 计算试件表面变形信息之前,需要选择一个合适的子窗口大小,子窗口的

收稿日期: 2014-06-27; **收到修改稿日期**: 2014-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(51375303)

作者简介: 梁振宁(1980—),男,博士研究生,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: liangzhenning@gmail.com

导师简介: 王石刚(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: wangshigang@sjtu.edu.cn

尺寸需要足够大,以便有足够的像素包含在子窗口中用于将其从目标图像中识别出来,然而,过大的子窗口可能产生错误的计算结果,尤其是试件表面变形较大并且不均匀时更为明显。因此,在实际使用 DIC 测量时,子窗口的选择是在较大和较小的尺寸间做一个折衷,已有若干关于如何根据图像散斑和试件表面变形情况来选择合适子窗口大小的研究^[6-7]。本文采用一种新的方法来处理子窗口大小对 DIC 计算的影响,DIC 是通过追踪参考图像和目标图像中的相同点来计算变形信息的,而子窗口中的像素用于从目标图像中识别出参考图像中对应的子窗口。通常情况下,在试件表面变形的过程中,参考图像中的子窗口不仅位置有所改变,同时其形状也会产生改变,因为试件表面的连续性,在参考图像中相邻的像素变形后仍然相邻,因此,与子窗口中心像素相邻的像素变形与其比较接近,而子窗口边缘像素的变形可能有较大差别。由此可见,子窗口中各个像素在将其从目标图像中识别出来时的重要性并不相同,与该像素和子窗口中心像素的距离有关。然而,在传统的数字散斑相关方法的相关公式中,所有像素都被同等对待。本文不再同等对待每个像素,其重要性由正态分布计算的相关系数决定,以便更高效的利用各个像素计算子窗口的相关性。在该方法中,子窗口一直使用一个相对较大的尺寸,各个像素的相对重要性由改变分布公式的参数来调节,传统方法中选择子窗口大小的步骤由挑选合适的参数代替。因为与中心像素较远的像素对计算结果的影响小于中心像素附近的像素,该方法的计算精度也有所提高。

$$C_{\text{ZNCC}} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{[f(x_i, y_j) - f_m] \times [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\}, \quad (1)$$

式中 $f(x_i, y_j)$ 和 $g(x'_i, y'_j)$ 是参考图像和目标图像在该点的灰度值,

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j), \quad g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j),$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2}, \quad \Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2}. \quad (2)$$

2.2 子窗口尺寸的选择

在传统的 DIC 应用中,选择子窗口尺寸是一个重要的步骤,对计算结果的精度有着显著的影响,通常情况下,子窗口的大小由使用者根据散斑质量和试件表面的变形情况人工选取。子窗口中需要包含足够的像素以便能够在目标图像中识别出来,而较

2 含权系数的数字散斑相关方法

2.1 数字散斑相关方法的基本原理

数字散斑相关方法以数字图像处理为基础,通过处理物体在不同变形状态或者不同变形时刻的两幅图像从而得到面内位移分量和面内位移梯度。被测物体表面必须具有随机的灰度分布,该散斑场作为变形信息的载体与试样表面一起变形^[8],在实际应用中,散斑场可以是试样表面的自然纹理也可以是通过随机喷涂黑白漆等方法制作的人工散斑场。其他光学测量方法通常需要使用激光光源^[9-10],DIC 使用普通灯光或自然光照明即可,更易于应用到实验室外的现场测量环境中。不同加载条件下被测物体表面的散斑图由放置在被测物体正前方的摄像机采集并存入计算机,随后用数字图像相关方法可分析试样表面的变形信息。在变形前的图像中选取 $(2M+1) \times (2M+1)$ 个像素的一小块图像定义为样本子区,变形后的图像中与样本子区相对应的那一小块图像定义为目标子区,只要找出目标子区和样本子区之间的一一对应关系,就可以实现变形量的提取。目标子区的位置通过搜索相关系数分布图的极大或极小点完成,同一个子区在目标图像和参考图像间的位置差异反应了试件表面在该处的变形量。

为了衡量参考图像和目标图像中子区的相似性,在使用 DIC 计算之前必须先定义一个相关函数。作为 DIC 的基础内容,已有大量关于相关函数的研究^[11],并且提出了各种不同的函数公式,其中 ZNCC(zero-normalized cross-correlation)相关函数因其较好的抗噪声能力以及对光照变化的不敏感性而得到了广泛的应用。

大尺寸的子窗口通常会带来较大的计算误差,因此选择子窗口的尺寸是在较大和较小的尺寸中做一个折衷。当子窗口尺寸增大时,其中包含的像素数量会显著增加,例如,如果尺寸由 30 pixel \times 30 pixel 增大到 40 pixel \times 40 pixel,其中包含的像素数近似增加一倍。而新增的像素因为远离子窗口中心,其

变形与中心像素可能存在较大的差异,在从目标图像中识别该子窗口的可靠性上要低于其他像素,计算结果的精度可能受这些像素的影响而降低。因此,传统方法中同等对待子窗口中的所有像素是不恰当的,研究各个像素的重要性并更为有效地使用它们将可以提高计算结果的精确度。

如图1所示,三个不同的子窗口尺寸分别是20 pixel×20 pixel、40 pixel×40 pixel和60 pixel×60 pixel,假设一直使用的是一个相对较大的子窗口尺寸如70 pixel×70 pixel,选择子窗口大小的过程等同于选择一条系数曲线,较小子窗口内的所有像素的权系数为1,而其余像素的权系数为零。可以看出,无论采用多大的子窗口尺寸,待测量点附近的像素与其关系较为紧密,一直被包含在子窗口中,即权系数一直设为1,而其余像素与待测量点的关系相对较弱,需要根据测试情况决定是否包含在子窗口中。显然采用取值0或1的系数曲线并不平滑,可以选择更为光滑的曲线代替。

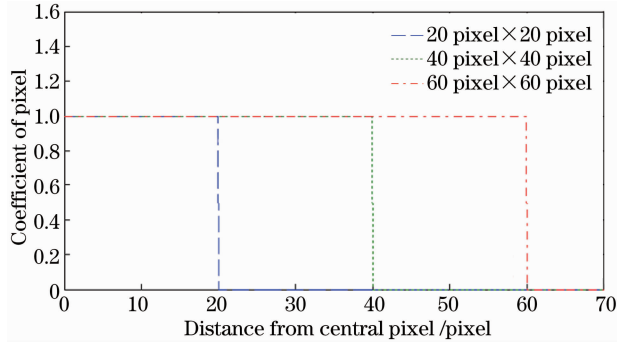


图1 不同大小的子窗口内的像素权系数

Fig.1 Coefficients of pixels in different subset sizes

2.3 含权系数的相关公式

本文中子窗口内每个像素的系数根据其与中心像素的距离从光滑曲线计算得到而不是仅在0和1中选取,并根据图像散斑状态及试件变形情况调整曲线的形状。因此,为DIC选择子窗口大小的步骤由改变计算像素系数公式的参数取代,该方法的优点是可以根据具体的测试情况选择合适的曲线,从而更加精确的调整每个像素的系数,并且,靠近中心像素的系数大于其他像素的系数,有助于提高计算的精确度。为实现该方法,需要建立一个公式来计算每个像素的权系数,然而,由于试件表面的散斑和变形情况较为复杂,并且在每个测试中都有所不同,各像素系数的精确分布函数是难以预知的。根据实验条件的具体情况,可能有多种计算公式可以用来计算各像素的权系数,各计算公式应当满足的基本

要求是子窗口中心较近的像素系数较高,随着与子窗口中心距离的增加而减小,子窗口边缘的像素系数最小。正态分布函数在统计学中有着非常重要的作用,经常用来处理具体分布函数未知的问题,本文用其计算各像素的权系数。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3)$$

式中 μ 为数学期望值, σ 为标准偏差。当 $\mu=0, \sigma=1$ 时,该分布为标准正态分布。

为简化公式参数的选取,将各像素与中心像素的距离与最大距离的比值设为自变量 x ,取值范围在0~1之间,数学期望值设为0,根据测试的具体情况调整公式的标准偏差,从而调整各像素的权系数。

$$c_i = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^2\right], \quad (4)$$

式中 c_i 为像素的权系数, d_i 为该像素与子窗口中心的距离, d_{\max} 是所有 d_i 中的最大值。

如图2所示,当标准方差取不同值时,像素权系数的分布情况有明显的差别,标准偏差的取值越小,靠近子窗口中心像素与边缘像素的权系数差别越大。例如,当标准偏差取值为0.2时,子窗口中心较远的像素的权系数接近于零,对计算结果的影响可以忽略不计;相反地,当标准方差取为较大的值时,所有像素的权系数近似相同。

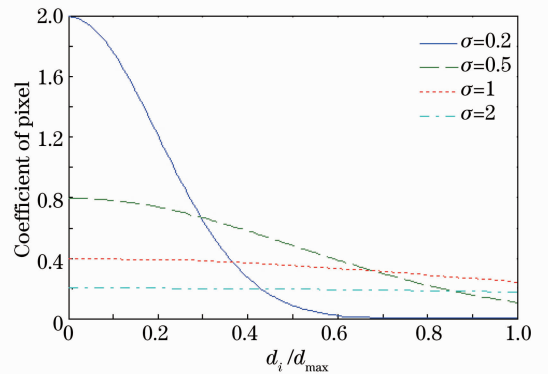


图2 不同标准偏差时像素的权系数

Fig.2 Coefficients of pixels with different standard deviations

将由(4)式计算所得的各像素的权系数增加到相关公式中,公式中各像素的重要性不再像传统DIC中那样完全相同。各像素的权系数是基于它们与子窗口中心的距离计算所得,所以在各个子窗口中相同位置的像素具有相同的权系数,因此可事先计算获得与子窗口同尺寸的权系数矩阵,然后将其

应用到相关公式中。如果图像的变形较大,对权系数的选取会造成一定的影响,数字散斑相关方法中子窗口的相关性会随着图像变形量的增大而减小,通常应用于变形量相对较小的测量中,因此本文所

提出的方法未考虑图像拉伸因素对权系数分布所造成的影响,各像素的权系数由参考图像中子窗口内像素之间的距离决定。

$$C_{\text{coe}} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{c_i \times [f(x_i, y_j) - f_m] \times [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\}, \quad (5)$$

式中 C_{coe} 为用本文方法计算的相关系数, 以与 C_{ZNCC} 区分。

在应用该方法时, 与传统方法中选择子窗口大小类似, 需根据具体的实验条件调整标准方差以改变各像素的权系数分布。合适的标准方差值受若干因素的影响, 图像的散斑样式是其中最重要的一个, 如果散斑的质量较高, 图像噪声较小, 应当选择较小的标准方差值; 如果散斑的质量较差, 图像噪声较多, 则应当选择较大的值。试件表面的变形情况是影响标准方差选择的另一个因素, 如果变形较大并且不均匀, 子窗口边缘像素的变形与中心像素可能存在较大的差异, 因此需要选择一个较小的标准方差值; 如果变形较小时, 则应当选择较大的值以提高计算的精确度。因为该方法采用相对较大的子窗口尺寸, 所以计算比传统 DIC 要更加耗时, 尤其是在传统 DIC 选择较小的子窗口尺寸时, 该方法相应的会选择较小的标准方差值, 子窗口边缘像素的权系数会非常小甚至接近于零, 为提高计算速度, 可设定一个阈值, 当像素的权系数低于该值时忽略此像素。

3 结 果

数字模拟散斑图像能够避免实验过程中诸多不

表 1 各图像在不同标准偏差取值时的计算结果误差(单位: 像素)

Table 1 Errors of different standard deviations for each image set (unit: pixel)

	$\sigma=0.2$	$\sigma=0.4$	$\sigma=0.6$	$\sigma=0.8$	$\sigma=1$	$\sigma=1.5$	$\sigma=2$	$\sigma=3$
1	0.0789	0.0262	0.0156	0.0114	0.0058	0.003	0.0007	0
3	0.0977	0.0298	0.0199	0.0118	0.0092	0.0073	0.0059	0.006
5	0.0835	0.0353	0.0196	0.0138	0.0128	0.0099	0.01	0.0102

为了研究不同 σ 值对子窗口内各像素权系数的影响, 在参考图像一子窗口内取 4 个点, 距离该子窗口中心分别为 5、15、25、35 pixel, 在 σ 取不同值时各点的权系数与子窗口中心像素权系数的对比计算结果如图 3 所示。当 σ 取值为 0.2 时, 除距离子窗口中心较近的点 1 外, 其余各点的权系数都非常低, 相当于传统 DIC 方法中选择一个尺寸非常小的子窗口, 在实际应用测试中将带来较大的计算误差。随

可控因素对实验结果的影响, 在 DIC 研究中得到了广泛的应用, 采用模拟散斑图像来验证本文所提出方法的有效性。在图像采集过程中不可避免的会产生各种噪声, 对计算结果的精确性有显著的影响^[12-13], 已有部分关于如何根据图像噪声选择子窗口尺寸的研究。为研究标准方差值对计算结果的影响, 采用模拟散斑图像作为参考图像, 向参考图像中添加不同的高斯噪声形成目标图像。各图像组的变形量分别由本文所述的方法计算, 计算中统一采用较大的子窗口尺寸 71 pixel×71 pixel, (4) 式中的标准方差取值范围为 0.2~3, 因为图像中各像素的位置并未改变, 计算结果的位移量即是计算的误差, 统计数据见表 1。误差随图像噪声的增加而增大, 随 σ 取值的增大而减小, 因为参考图像与目标图像间没有变形量, 当 σ 值增大时子窗口内有更多的有效像素用于相关性计算, 因而计算的精确性得以提高。当 σ 值取为 0.2 时, 各图像的计算误差都比较大, 因为此时除子窗口中心附近的像素外, 其他像素的权系数都非常低, 导致参与相关计算的有效像素过少, 从而带来了较大的计算误差, 所以在使用该方法时应当避免 σ 取值过低。

随着 σ 取值的增大, 与子窗口中心较远的点的权系数逐渐增大, 等效于传统 DIC 方法中选择较大的子窗口尺寸。

为了研究试件表面变形对测量结果的影响, 以上述实验中添加高斯噪声方差为 5 的图像作为参考图像, 将参考图像分别横向拉伸 0.5%、1%、1.5% 和 2% 形成目标图像。分别采用传统 DIC 和本人的方法计算图像的变形量, 并将结果与理论变形量对

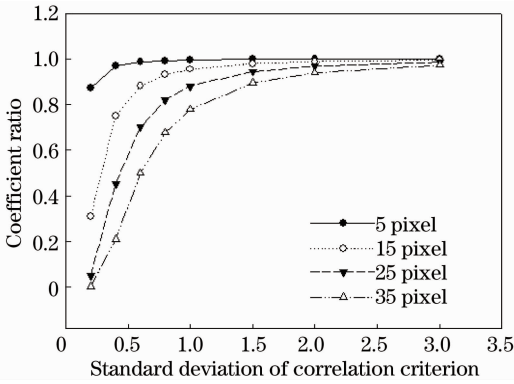


图3 各像素与中心像素权系数比值随标准偏差的变化

Fig. 3 Coefficient ratio of pixels to central pixel versus standard deviation

比得到测试误差。图4为采用传统DIC计算各图像组的结果，误差随拉伸比例的增加而增加，当拉伸比例较小时，测试误差随子窗口尺寸的增加而减小，然而当拉伸比例较大时，随着子窗口尺寸的增加误差也有明显的增大，原因是当图像拉伸比例较大时，距子窗口中心较远像素的位移与其差别较大，并且相对位移量与两者之间的距离成正比，如果选择较大的子窗口尺寸，边缘像素的位移与中心像素差别较大，从而带来计算误差。

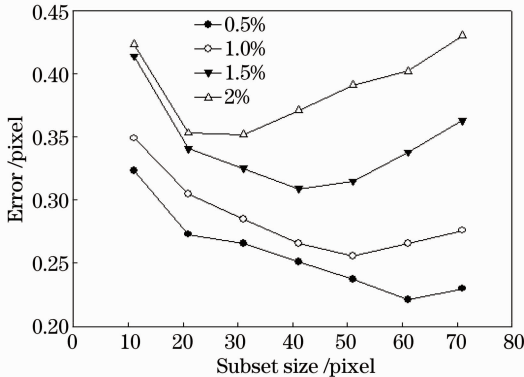


图4 传统DIC在不同子窗口尺寸下各图像组的误差

Fig. 4 Error for each image set calculated by traditional DIC versus subset size

图5为采用本文方法计算各图像组的结果，与传统DIC相似，误差随拉伸比例的增加而增加。当 σ 取值较大时，由于有较多的与子窗口中心像素相关性较差的像素参与到相关计算中，计算结果的误差有所增加，但位于子窗口边缘像素对计算结果的影响得到了一定的缓解，因为在该方法中它们的权系数相对较低。本文采用了相对较为简单的正态分布计算各像素的权系数，而在实际应用中，为了处理更为复杂的试件散斑和表面变形状态，可以选用更加精确的分布计算公式。

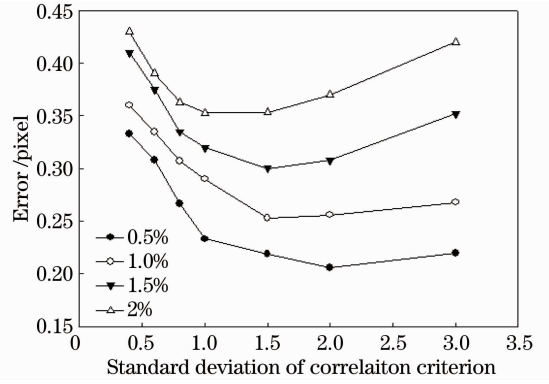


图5 含权系数DIC在不同标准偏差下各图像组的误差

Fig. 5 Error for each image set calculated by weight coefficient including DIC versus standard deviation

4 结 论

研究了一种新的方法用于解决数字散斑相关计算中的子窗口尺寸选择问题，在该方法中，所有的像素不再被平等对待，而是根据它们与子窗口中心的距离分别处理，各像素的权系数由正态分布函数计算得到，子窗口尺寸的问题由选择分布函数参数的方法代替。与传统DIC相比，该方法可以看作是在较大子窗口尺寸和较小子窗口尺寸之间的折衷，不仅完成了根据不同测试条件选择合适数量的像素包含进子窗口的功能，而且缓解了试件存在较大变形时子窗口边缘像素对计算结果的影响，提高了相关计算的精度，另外，采用正态分布函数计算各像素的权系数，实际应用中可根据具体的测试条件选择合适的分布函数，比传统DIC更加灵活，但如何根据测试情况选择更为精确的权系数计算方法需要进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 F Hild, S Roux. Comparison of local and global approaches to digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2012, 52 (9): 1503-1519.
- 2 Zhang Huajun, Li Guihua, Liu Cheng, *et al.*. Reliable initial guess based on SURF feature matching in digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1112005.
张华俊, 李桂华, 刘程, 等. 基于SURF特征匹配的数字图像相关变形初值可靠估计[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1112005.
- 3 Tang Zhengzong, Liang Jin, Guo Cheng. Slant-axis digital image correlation method based on photogrammetric correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1112007.
唐正宗, 梁晋, 郭成. 基于摄影测量校正的斜光轴数字图像相关方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1112007.
- 4 Pan Bing, Yu Liping, Wu Dafang. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412004.
潘兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图

- 像相关测量系统[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412004.
- 5 H Haddadi, S Belhabib. Use of rigid-body motion for the investigation and estimation of the measurement errors related to digital image correlation technique [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(2): 185–196.
- 6 Bing Pan, Huimin Xie, Zhaoyang Wang, *et al.*. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns [J]. Opt Express, 2008, 16(10): 7037–7048.
- 7 Sun Yaofeng, John H L Pang. Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(9): 967–974.
- 8 H Schreier, J J Orteu, M A Sutton, *et al.*. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications [M]. New York: Springer-Verlag US, 2009.
- 9 M Y Y Hung, K W Long, J Q Wang. Measurement of residual stress by phase shift shearography [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1997, 27(1): 61–73.
- 10 J Gao, H Shang. Deformation-pattern-based digital image correlation method and its application to residual stress measurement [J]. Appl Opt, 2009, 48(7): 1371–1381.
- 11 H A Bruck, S R McNeil, M A Sutton, *et al.*. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction [J]. Experimental Mechanics, 1989, 29(3): 261–267.
- 12 Z Y Wang, H Q Li, J W Tong, *et al.*. Statistical analysis of the effect of intensity pattern noise on the displacement measurement precision of digital image correlation using self-correlated images [J]. Experimental Mechanics 2007, 47(5): 701–707.
- 13 D Lecompte, A Smiths, Sven Bossuyt, *et al.*. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(11): 1132–1145.

栏目编辑: 史 敏