

# 基于数字图像相关法的风洞试验测量技术

何能 廖海黎 马存明 王凯 曾要争 曾力

(西南交通大学风工程试验研究中心, 四川 成都 610031)

**摘要** 以风洞试验中的气动弹性模型表面的标记点为载体,运用数字图像相关法(DIC)对 CCD 摄像机高频采集的灰度图像进行处理,得到标记点在时间序列下的位移值,从而得到待测结构的振动响应。通过介绍数字图像相关法的基本原理及其在风洞试验中的应用,并将其与激光位移计进行对比试验,验证了该方法的可靠性、稳定性和优越性。

**关键词** 测量;数字图像相关;风致振动;风洞试验;非接触

**中图分类号** U448 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP50.051201

## Wind Tunnel Measurements Based on Digital Image Correlation Method

He Neng Liao Haili Ma Cunming Wang Kai Zeng Yaozheng Zeng Li

(Research Center of Wind Engineering Test, Southwest Jiaotong University,  
Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract** Based on mark points on the surface of bridge pneumatic model adopting the digital image correlation (DIC) method to handle the pictures captured by CCD video camera in the high frequency, the displacement values of the mark points in the time series are gotten and thus the vibration responses of the bridge are obtained. The fundamental principles of the DIC method and its application are introduced. The reliability, stability and advantages of the method are testified by the comparison of the results with those measured by the laser displacement sensor.

**Key words** measurement; digital image correlation; wind-induced vibration; wind tunnel test; non-contact

**OCIS codes** 120.6150; 120.4640; 120.7280

## 1 引言

随着对风工程的不断重视以及相关技术的不断发展,风洞试验在结构抗风工程中扮演着越来越重要的角色。由于大部分接触式传感器存在对环境要求高、难于同步多点和单次多参数测量等缺陷,相比之下,由于有着非接触、对环境要求低、因仪器本身不接触被测样本所以对测量结果干扰较小等优点,非接触式测量仪的应用已经成为发展的必然趋势。

在风洞试验中,对结构物风致振动响应进行较准确测量的传统方法是使用激光位移传感器。它的优点是使用方便,不需要固定参考坐标系,实现非接触测量,不影响被测结构的振动,测量频率范围宽、精度高、动态范围大。缺点是测量过程受其他杂散光的干扰较大,量程受一定的限制,而且激光位移计自身的风致振动对测量结果和风洞中气流的影响较为明显。

随着光测力学的发展,数字图像相关法(DIC)<sup>[1]</sup>被成功地运用在非接触式测量技术中。该方法不同于传统的测量方法,它直接利用变形前后数字图像的灰度变化来测量试件表面的位移和变形场。其主要优点

**收稿日期:** 2012-11-26; **收到修改稿日期:** 2013-01-14; **网络出版日期:** 2013-04-08

**基金项目:** 国家 973 计划(2013CB03631)和国家自然科学基金(51278435)资助课题。

**作者简介:** 何能(1988—),男,硕士研究生,主要从事数字图像相关法和桥梁风工程方面的研究。

E-mail: hn881107@gmail.com

**导师简介:** 廖海黎(1956—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事桥梁风工程方面的研究。

E-mail: hlliao@home.swjtu.edu.cn

有非接触、全场内多点同步测量、动态实时测量、可同步测量多个参数、实验设备简单以及可适合各种复杂环境的测量。

西南交通大学风工程试验研究中心于 2011 年采购了美国 CSI 非接触式全场应变及三维(3D)位移测量仪。通过其在风洞试验中的运用实践,我们对基于数字图像相关法的非接触式变形测量方法开展了研究,并对该方法的原理、可靠性、影响因素等进行了深入探究。

## 2 数字图像相关法基本原理

### 2.1 二维数字图像相关法基本原理

对于二维(2D)的数字图像相关法<sup>[2]</sup>,仅使用一台 CCD 摄像机即可测量同一平面内两个方向的位移。过程要求被测试样表面平整,摄像机的光学主轴尽可能与被测试样表面垂直,调整焦距使其清晰准确地成像。计算忽略微小的面外位移影响。CCD 摄像机以一定的频率对试样采集图像,计算机根据采集图像的灰度值将每幅图像离散成数值矩阵,第一张图像被称为初始参考图像,被预先标记的物理点在前后两张图像中的坐标矢量就是所要测量的位移值。实际工作中单个灰度值并不是每个像素点所特有的,所以要通过相邻的像素构建一个子区,再根据子区中灰度矩阵的独特性来实现对标记点的准确跟踪。

举例说明:假设从摄像机中得到变形前后的两张图像,大小为 9 pixel × 9 pixel,以标记点为中心取大小为 5 pixel × 5 pixel 的子区。如果黑色像素块的灰度值为 0,白色像素块的灰度值为 100,则可把这两张图像转化为用灰度值表示的矩阵,如图 1 所示。

利用相关函数对试凑位移  $(u, v) = (-2, -2)$ 、 $(u, v) = (1, 1)$  进行相似性评分:

$$C(x, y, u, v) = \sum_{i, j = -n/2}^{n/2} [I(x + i, y + j) - I^*(x + u + i, y + v + j)]^2,$$

式中  $(x, y)$  为参考图像的像素坐标,  $(u, v)$  为位移,  $n$  为子区的大小,  $I$  和  $I^*$  分别为位移前后的图像。评分结果为

$$C(5, 5, -2, -2) = \sum_{i, j = -2}^2 [I(5 + i, 5 + j) - I^*(3 + i, 3 + j)]^2 = 180000, \quad C(5, 5, 1, 1) = 0.$$

因此,认为标记点是按照  $(u, v) = (1, 1)$  移动的,而不是  $(u, v) = (-2, -2)$ 。

当然这只是理想解,实际工作中受噪声的影响,相关函数不可能完美地匹配使其值等于 0,只能近似取相关函数评分最小值所对应的位移。

### 2.2 三维数字图像相关法基本原理

三维数字图像相关法<sup>[3~5]</sup>,就像人类的双目,两台 CCD 摄像机可提供足够的信息来感知三维空间环境,因此它可对任意形状任何运动进行三维测量。其计算算法类似于二维数字图像相关法。

单一视点下得到的图像还不足以分析出实际物体的大小和形状,但是三维结构可由两张不同视点的平面图组合得到,如图 2 所示。

通常需要先确定的是两个视点(摄像机)位置和被测试样上每个特征点到视点的距离,这就需要用特制的矫正板对相机进行预先矫正<sup>[6]</sup>,矫正需要两个条件:1)矫正板是刚性的,在矫正过程中不能有弹塑性变形;2)矫正板的大小和矫正板上目标点的距离是已知的。

### 2.3 数字图像相关法中的亚像素定位算法

亚像素位移定位法<sup>[7]</sup>被认为是数字图像相关法中的关键技术之一。利用这种亚像素技术,可以将一个像

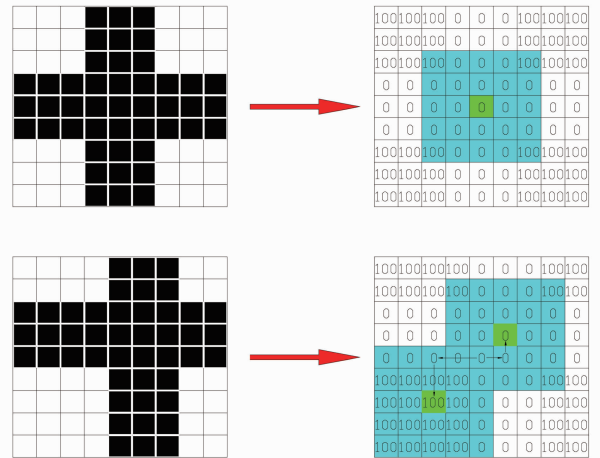


图 1 图像等效灰度矩阵图

Fig. 1 Equivalent image gray matrix

素元再进行细分,认为一个像素元由多个亚像素组成。比如:通过一种计算方法,可以把一个像素细分成  $10 \times 10$  个亚像素元,这样的话,可以识别的最小长度单位由 1 pixel 变为  $1/10$  pixel,那么测量精度也就提高了 9 倍。

数字图像相关法中的亚像素测量方法有灰度插值法、曲面拟合法、坐标轮换法、Newton-Raphson(N-R)迭代法和基于梯度的算法等。其基本原理和特点如表 1 所示。

### 3 三维位移测量仪在风洞试验中的应用

#### 3.1 三维位移测量仪简介

##### 3.1.1 主要技术参数

非接触式三维位移测量仪主要由 CCD 摄像机、计算机、矫正板以及白光光源等组成,如图 3 所示。

表 1 数字图像相关法中的亚像素测量方法  
Table 1 Sub-pixel measuring methods in DIC

Method	Theory	Characteristics
Gray interpolation method	The single pixel is dispersed into many sub-pixels. The gray values of sub-pixels are calculated by interpolation method and thus the gray matrix is established	Huge calculation. The precision is related to the sub-pixels
Curve-surface fitting method	The correlation functions of adjacent full-pixels are fitted into continuous curved surface and the extreme points of the curved surface are the displacement results of sub-pixels	Simple calculation with a high precision
Coordinate exchange method	The influence of correlation functions is considered and the parameters are obtained by experimental method	Slightly hard calculation but with a high precision
N-R iterative method	Calculated by Newton iteration method	Hard calculation but with a high precision
Gradient-based routing method	The influence of gray gradient of the pictures before and after the deformation is considered	Effectiveness and high-accuracy

非接触式三维位移测量仪的测量精度取决于摄像机的有效像素和视场的大小,摄像机的有效像素越高,视场越小,则测量精度越高。当摄像机有效像素一定时,测量精度随着测量距离的减少而提高。在风洞试验中,测量距离一般都在 10 m 以内,采用高分辨率( $2320 \text{ pixel} \times 1726 \text{ pixel}$ )镜头,非接触式三维位移测量仪的位移分辨率理论上优于 0.012 mm。

##### 3.1.2 使用意义

非接触式应变位移测量仪与传统的传感器相比,在保证测量精度高的情况下,具有可以进行非接触式测量、动态实时测量和同步多点测量、同步测量多个参数等优点,如表 2 所示。

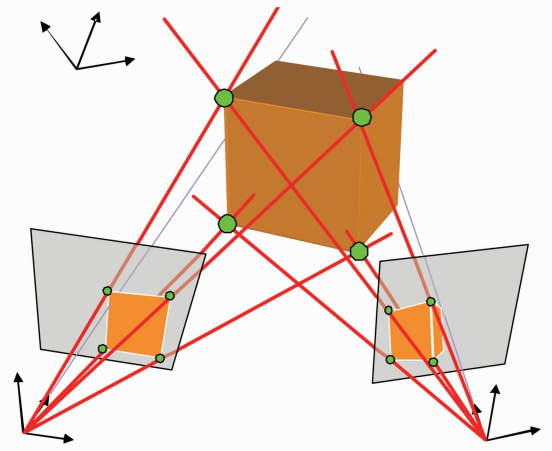


图 2 双视点投影图

Fig. 2 Projection for double points of sight

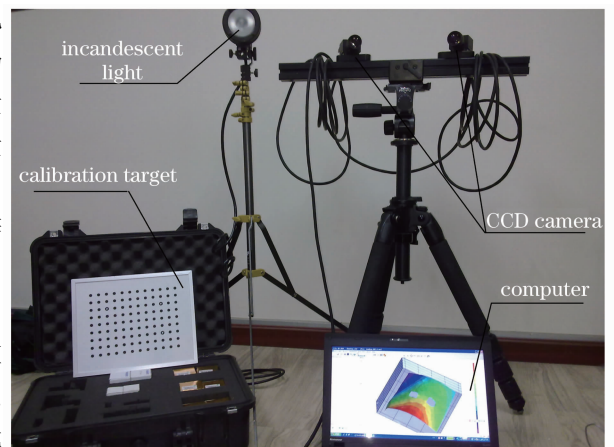


图 3 非接触式三维位移测量仪

Fig. 3 Three-dimensional non-contact displacement sensor

表 2 非接触式三维位移测量仪与传统传感器的比较

Table 2 Comparison between three-dimensional non-contact displacement sensor and traditional sensor

	Three-dimensional non-contact displacement sensor	Traditional sensors(displacement meter, strain gauge)	
		Property	Possible problem
Work manner	Non-contact	Contact	Slip, hard to fix
Measuring object	For all materials, wide scope of testing size	For materials with normal size	For big testing samples many strain gauges are need. Inadequacy for special and small testing samples
Measurement range	Scale distance could be set freely from several millimeters to several meters		The measurement range is easy to be exceeded
Measurement environment	Wide: in the environment of high temperature, moisture, fast speed, etc.	Normal circumstances	
Measurement direction	Any directions on the plane, multi-point measurement	Only one direction	More strain gauges are needed if different directions need to be measured
Measurable parameters	Displacements, strains, Poisson ratio, etc.	One sensor only has one function	

### 3.2 桥梁气弹模型风洞试验

为了验证非接触式三维位移测量仪的可靠性与稳定性,特将其与激光位移计进行对比试验。西南交通大学 XNJD-3 风洞实验室对在建的某单跨简支悬索桥的全桥气动弹性模型进行风洞对比试验,该桥主跨 538 m,梁宽 28 m,主梁由梁高 4.5 m 的桁架梁及 0.8 m 厚的正交异性板组成。全桥气动弹性模型的缩尺比为 1:80,风速比  $C_U = 1/\sqrt{80} = 1/8.94$ ,频率比  $C_f = \sqrt{80}/1 = 8.94/1$ 。模型如图 4 所示。

测点布置在模型主跨跨中、1/4 跨和塔顶,所使用的标记点有两种,如图 5 所示,我们认为前一种标记点更有利于准确的跟踪计算。



图 4 全桥气动弹性模型构造图

Fig. 4 Construction of full-bridge aeroelastic model

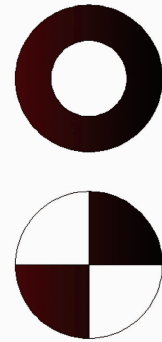


图 5 标记点图案

Fig. 5 Mark-point pattern

#### 3.2.1 全桥模态测试试验

用两种仪器分别采集激励振动下的响应曲线,如图 6、图 7 所示,用快速傅里叶变换分别计算该桥梁模型的基频,结果均为 1.67 Hz。

#### 3.2.2 全桥均匀流施工态试验

对该悬索桥在均匀流下某施工态进行试验,得到的气动响应结果(已换算至实桥)如图 8、图 9 所示。

#### 3.2.3 裸塔均匀流试验

将来流风向与横桥向的夹角定义为偏角。对该悬索桥的裸塔在均匀流下进行试验,得到  $0^\circ$  和  $90^\circ$  偏角时的气动响应结果(已换算至实桥)如图 10、图 11 所示。

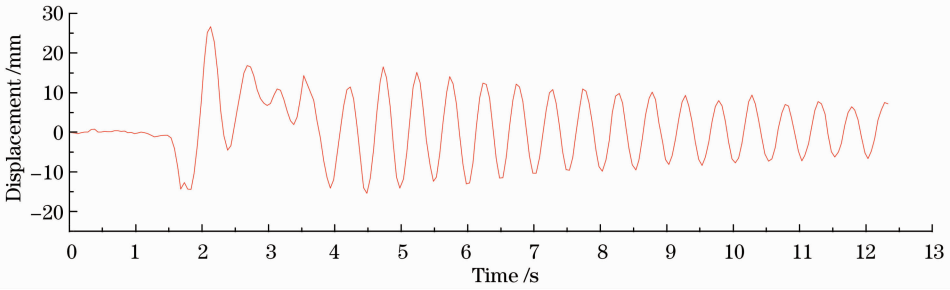


图 6 非接触式三维位移测量仪记录的振动响应曲线

Fig. 6 Recorded vibration response in three-dimensional non-contact displacement sensor

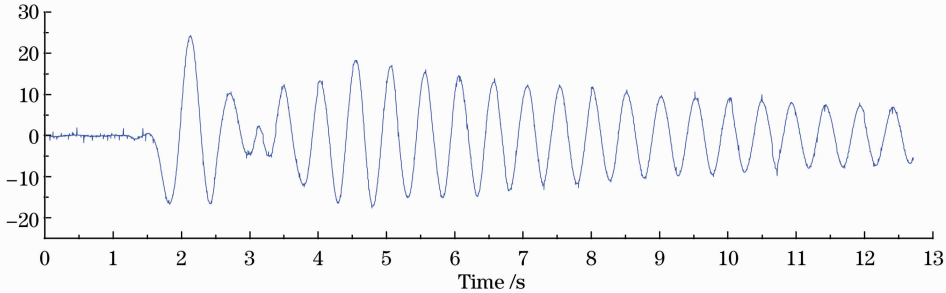


图 7 激光位移计记录的振动响应曲线

Fig. 7 Recorded vibration response in laser displacement sensor

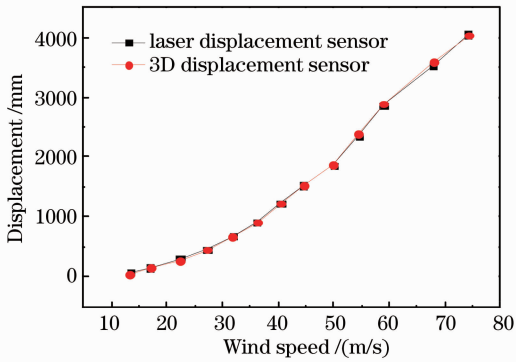


图 8 主梁跨中横向位移平均值与风速的关系

Fig. 8 Relation between transverse mean displacement in midspan of the girder and wind speed

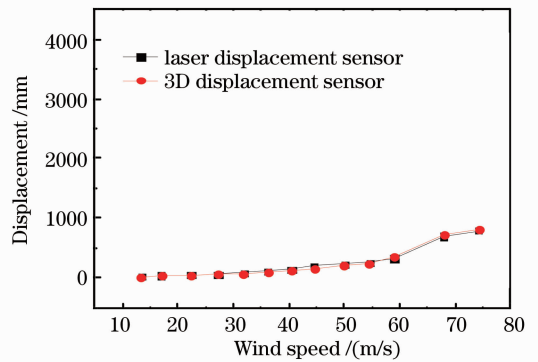


图 9 主梁跨中竖向位移平均值与风速的关系

Fig. 9 Relation between longitudinal mean displacement in midspan of the girder and wind speed

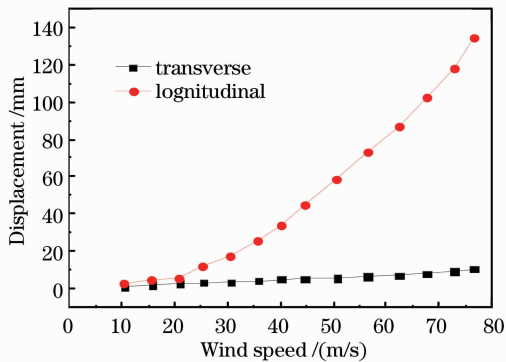


图 10 塔顶位移均值与风速关系曲线(0°偏角)

Fig. 10 Relation between mean displacement at the top of the tower and wind speed(0°declination)

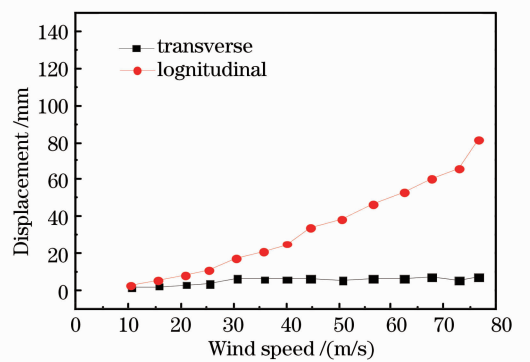


图 11 塔顶位移均值与风速关系曲线(90°偏角)

Fig. 11 Relation between mean displacement at the a top of tower and wind speed(90°declination)



### 3.2.4 试验结论

试验结果表明:两种仪器的相对误差能很好地保持在 0.1 mm 以内,且三维位移测量仪测量的曲线更为光滑,受外部环境的干扰相对较小。理论上两种仪器的精度都可以达到 0.02 mm,但是由于不可避免的试验误差,试验结果并未完美地重合。不过该精度已经完全能符合风洞试验的要求。

## 4 测量的影响因素及操作建议

除了仪器自身的因素,影响非接触式三维位移测量仪测量精度的因素<sup>[8]</sup>主要包括测量现场的光线、标记点散斑、测距、测量前的矫正、相机镜头的清洁度、相机的焦距和夹角等。在实际测量中,相机的焦距和夹角是较难把握的因素。我们专门对其进行了分析研究,设计了 15、20、25 mm 三种不同焦距和 5.1°、9.8°、15.3°、20.2°、25.6° 五种不同夹角分别对产生的矫正后的误差进行定量分析,测量距离为 3 m 保持不变,分析结果如图 12 所示。

分析该图,可以得出如下结论:

1) 增大相机夹角可以有效地减小测量误差,但这种增大不是无限制的,过大的夹角使得对相机的矫正精度降低。大量试验结果表明,测量中相机夹角最好保持在 15°~45° 范围内。

2) 测量的误差随着相机镜头焦距的减小而增大,为了满足对各种环境的测量要求,一般使用的是变焦镜头,如果测量允许尽可能地调整光照和测距而使用小光圈、长焦距,要避免沿光轴方向的虚化,最好使得待测区域位于成像中心,减小畸变对测量精度的影响<sup>[9]</sup>。

## 5 结 论

在风洞试验的运用实践中,验证了该方法的准确性和可靠性,在高精度测量时,还必须考虑成像系统的畸变。发现该方法对计算机要求高、数据处理复杂、计算工作量较大,因此,如何在保证精度的前提下提高测试效率和计算效率有待深入研究。文献[10]利用被测样本自身变形函数的位移值作为试凑位移值,大大提高了计算速度。另外,还存在大结构的小变形的测量相对精度比较低、小结构的大变形测量容易出错等问题,有待完善<sup>[11]</sup>。

总之,数字图像相关法作为一种非接触、全场测量以及对环境要求低的新型光学测量方法,已经在很多领域得到了广泛应用。相信随着更多的深入研究,计算方法将不断改进和优化,广义数字图像相关技术将会得到更长足的发展。

## 参 考 文 献

- 1 Mark N. Helfrick, Christopher Niezrecki, Peter Avitabile *et al.*. 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, **25**(3): 917~927
- 2 B. Winiarski, G. Schajer, P. Withers. Surface decoration for improving the accuracy of displacement measurements by digital image correlation in SEM [J]. *Experimental Mechanics*, 2012, **52**(7): 793~804
- 3 Sun Mingyong, Cai Kang, Yang Deyu *et al.*. Three-dimensional deformation measurement with the combination of DSCM and ESPI [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(11): 111201
- 孙明勇,蔡康,杨德宇等. 数字散斑相关法和电子散斑干涉术相结合的三维变形测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(11): 111201
- 4 Bridges Andrew, Tofts Alistair. Digital image correlation measures 3D surface deformation [J]. *Laser Focus World*, 2012,

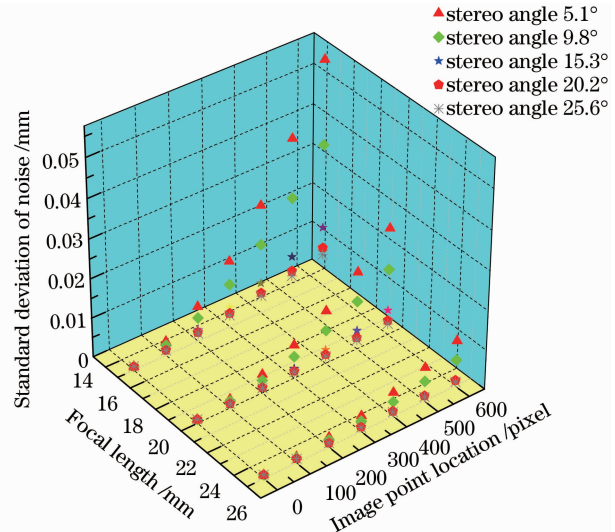


图 12 相机焦距和夹角对测量精度的影响图  
Fig. 12 Effects of focal length and stereo angle on measurement precision

48(9): 55~58

- 5 C. Cofaru, W. Philips, W. Van Paepegem. A three-frame digital image correlation (DIC) method for the measurement of small displacements and strains [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, **23**(10): 105406
- 6 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
- 7 Pan Bing, Xie Huimin, Xu Boqin *et al.*. Development of sub-pixel displacements registration algorithms in digital image correlation [J]. *Advances in Mechanics*, 2005, **35**(3): 345~352  
潘 兵, 谢惠民, 续伯钦 等. 数字图像相关中的亚像素位移定位算法进展[J]. 力学进展, 2005, **35**(3): 345~352
- 8 Bing Pan, Dafang Wu, Liping Yu. Optimization of a three-dimensional digital image correlation system for deformation measurements in extreme environments [J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(19): 4409~4419
- 9 Gao Jianxin. Digital image correlation analytic method in deformation measurement [J]. *J. Tongji University(Natural Science)*, 1997, **23**(1): 98~104  
高建新. 变形测量的数字图像相关分析法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1997, **23**(1): 98~104
- 10 Xiao Zhenzhong, Oichoo Chee, Anand Asundi *et al.*. Measurement of large deformation by digital image correlation method based on seed points [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **19**(9): 2277~2283  
肖振中, 徐爱珠, 安顺泰 等. 用基于种子点的三维图像相关法测量连续大变形[J]. 光学精密工程, 2007, **19**(9): 2277~2283
- 11 Ye Nan, Zhang Liyang. Improved fractionized displacement transfer algorithm based on digital image correlation in large deformation applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 976~983  
叶 南, 张丽艳. 大变形下基于数字图像相关的改进分段位移传递法[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 976~983