

文章编号: 0253-2239(2005)07-907-6

斜光轴面内位移测量的数字散斑相关法研究

陈大庆 顾济华* 姜锦虎

(苏州大学物理系, 苏州 215006)

摘要: 以工程环境中远距离位移和位移场的光学测量为研究课题,分析了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的影响,给出了这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影响,给出一种新的远距离斜光轴高精度测量面内位移的方法,在 2~50m 处作静载挠度测量,其最大相对误差小于 1%,测量精度在实验室环境和工程测量环境中都得到了验证。该方法无需共轴光路的测量环境要求,特别适用于桥梁、高速公路立交桥的静载挠度测量等工程应用。使用高速图像采集卡,该方法可应用于斜光轴动态位移测量,拓展了数字散斑相关方法的应用范围。

关键词: 应用光学; 数字散斑相关测量; 斜光轴; 挠度

中图分类号: O348.1 文献标识码: A

Study on the Digital Speckle Correlation Method for In-Plane Displacement Measurement in the Case of Slant Optical Axis

Chen Daqing Gu Jihua Jiang Jinhu

(Physics Department, Soochow University, Suzhou 215006)

Abstract: To resolve the long-range displacement and displacement field measurement by using optical method in engineering environment, the influence of image blurring and image position's change on white light digital speckle correlation method are investigated in the case of slant optical axis, and theoretical formula of the error was given. To weaken the influence of image position's change, the reference measurement technology was introduced and a new high-resolution method of measuring in-plane displacement measurement in the case of slant optical axis was given. The static flexibility measurement of object at distance of 2~50 m is accomplished with the maximal relative error of 1.0%, the technology has a better accuracy both in laboratory environment and engineering environment. It demands no circumstance requirements in common optical axis and is especially effective in flexibility measurement of bridge and cloverleaf junction. It also fits for dynamic displacement measurement when a high-speed image card was used. This technology expands digital speckle correlation method's application field.

Key words: applied optics; digital speckle correlation measurement; slant optical axis; flexibility

1 引 言

远距离位移和位移场测量是一项有诸多工程应用背景的研究课题,例如桥梁和立交桥的静载荷、高层建筑桩基静载下沉测试等,以往可以采用的测量方法有位移传感器测试法、加速度计法、激光干涉仪法、全站仪测试法和全球定位系统(GPS)技术等^[1,2]。全站仪测试法需要昂贵的高精密全站仪才能达到高精度测量要求,全球定位系统技术处于发展中,经常采

用的电测法需要现场架设空中支架,电动千分表固定于桥梁与支架之间,但是如果桥下是河流或交通要道,空中支架就无法搭建,给测量带来很大的不便,另一方面由于支架的稳定性和地面沉降的影响使得测量结果会产生误差。光测法中的激光干涉仪法对环境有一定的要求。激光散斑相关法是同光路干涉,测量面内位移对环境要求并不象干涉仪那样高,并且激光散斑斑点灰度对比度高,易于进行运算,但由于激

作者简介: 陈大庆(1971~),男,江苏兴化人,讲师,在职硕士研究生,主要从事数字散斑干涉计量、数字散斑相关测量、激光全息的研究工作。

* 通信联系人。E-mail: jhgu@suda.edu.cn

收稿日期: 2004-05-19; 收到修改稿日期: 2004-11-18

光散斑相关性受位移的影响,只能用于微小位移测量^[3]。白光散斑是非相干散斑,测量位移的散斑照相实际上是一种强度随机分布的散斑图的位置相关法^[4],它并不涉及散斑图的产生方式,物体平移时,因成像是线性空不变系统,散斑颗粒形貌不变,故既适用于小位移测量,又适用于大位移测量,应用中以非相干散斑作为首选。远距离测量时,对于较为均匀的被测对象,白光散斑既有利于相关运算,又有利于适应日光照射的工程测量环境。

基于光学成像和数字散斑相关技术,本文提出一种新的光学测试技术。由于光学成像时分两种情况:一是被测量物表面的法线与光学系统的主光轴基本重合,或两者夹角较小,称为共轴系统。二是被测量物表面的法线与光学系统的主光轴夹角较大,称为斜光轴系统。远距离位移共轴相关测量系统原理简洁,易于实现,已有较多应用研究^[5~7],但大桥、立交桥的静载荷特性测量时,一般工程现场情况难以满足共轴测量光路条件,因此研究高精度的斜光

轴光测法十分必要。文中详细分析了远距离斜光轴成像特性,结合白光数字散斑相关测量方法,实现远距离斜光轴测量面内位移。特点是图像采集系统是安置在平稳的地面,测量光路的布置十分方便,对工程现场的环境要求大大降低。测量结果稳定,测量精度与共轴光路相当,可达 0.02 像素。实现了高速采集、存储和处理,可以实时或准实时地获得位移、位移场信息。

2 测量原理

进行数字图像相关运算时假定:白光光源照明物体时,物体表面反射光强 $I(x, y)$ 的分布与物体表面有一一对应关系。据此,可以通过测量物体表面光强的变化来得到物体变形信息。通过对变形前后图像上的相应子区进行相关搜索运算,获得各子区中心在 x, y 方向上的位移 u, v 。

相关运算的公式可表述如下^[8]:

$$C(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}][g(x_i + u, y_i + v) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x_i + u, y_i + v) - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

其中 $f(x_i, y_i)$ 为变形前像的灰度函数, $g(x_i + u, y_i + v)$ 为变形后像的灰度函数, \bar{f} 为 $f(x_i, y_i)$ 的平均值, \bar{g} 为 $g(x_i + u, y_i + v)$ 的平均值, $C(u, v)$ 为互相关系数。

对 CCD 采集的上述灰度图像进行数字散斑相关运算时,如采用双线性插值进行亚像素提取,可以实现 0.01 pixel 亚像素精度。文献[9]又研究了改良的亚像素法,可以达到更高的亚像素精度。但由于 CCD 摄像机在将物面光强离散成数字灰度时的离散误差和采样误差以及数值计算误差等,数字图像方法的实际位移灵敏度为 0.01~0.05 pixel^[10]。

远距离共轴测量时,相对误差可由共轴条件下物像关系求出,成像公式为

$$l_o = \frac{u-f}{f} l_i, \quad (2)$$

式中 u 为物距, f 为焦距, l_o 和 l_i 分别为物和像的长度。远距离时取典型值:焦距 200 mm,物距 10 m,CCD 像元 10 μm ,实测时取测量精度 0.02 pixel,由(2)式可得绝对误差为 0.0125 mm。通过调节光学成像参量,可以控制像元位移在 2 pixel 以上,则相对误差

小于 0.625%。因此远距离共轴测量时绝对误差与物距成正比,其相对误差可控制在小于 1% 以内。但斜光轴成像同时存在像模糊^[11]和成像位置变化的两种影响,测量精度需要重新分析。

2.1 弥散斑的影响

斜光轴成像时光路如图 1 所示。其中 AC 为待测面,为讨论方便取为铅垂面。BB₁ 为光轴, α 为光学系统光轴与水平方向夹角,平面 EF 为过 B 点平

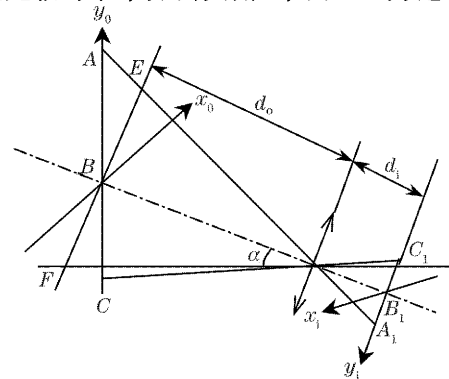


图 1 斜光轴成像系统中空间点平面图

Fig. 1 Plane imaging of space point in slant optical axis system

行于光学系统平面的平面,设光学系统对于 EF 平面准确对焦,则 d_o 和 d_i 分别为其物距和像距。根据文献[11],由于采用斜光轴布置,被测面上的某些区域将不能准确地成像于 CCD 靶面,待测面上 A 点的理想几何像位于靶面之前,而待测面上 C 点的理想几何像位于靶面之后,因此 A, C 点在 CCD 面上由于像模糊将产生弥散斑,其 y 方向大小为

$$\begin{cases} l_A = \frac{2R(-a_{yx} \sin \alpha) f \cos \alpha}{(d_o - f \cos \alpha)(d_o / \cos \alpha + a_{yx} \sin \alpha)}, \\ l_C = \frac{2R(-a_{yc} \sin \alpha) f \cos \alpha}{(d_o - f \cos \alpha)(d_o / \cos \alpha + a_{yc} \sin \alpha)}, \end{cases} \quad (3)$$

其中 a_{yx}, a_{yc} 分别为 B 点相对于 A, C 两点 y 方向距离。即使 A, C 两点相对于 B 点对称分布,也就是 $a_{yx} = a_{yc}$,在 CCD 面上将产生弥散斑大小也不一样,这将对强度相关测量的精度产生影响。在远距离时取典型值: $d_o = 10 \text{ m}, \alpha = 45^\circ, a_x = 0.25 \text{ m}, 2R = 0.05 \text{ m}, f = 0.2 \text{ m}$,计算得 $l_a = 8.8 \mu\text{m}$,约为 1 pixel,实际测量时使 CCD 面上相关点线度达到 15 pixel,则相关点的大小受到 1/15 的影响,同时必须考虑 A, C 两点弥散斑(约 1 pixel)在 CCD 面上长度的相对误差,由(3)式得

$$\epsilon = \frac{2a_{yx} \sin \alpha}{d_o / \cos \alpha - a_{yx} \sin \alpha}, \quad (4)$$

则不同物距下位移的相关运算误差极限最大值为

$$\epsilon_c = \frac{l_c \times \epsilon}{10 \times 15 \times 2} = \frac{l_c \times \epsilon}{300}, \quad (5)$$

代入上述具体测量参量,弥散斑随物距对相关测量的相对误差影响如图 2 所示。

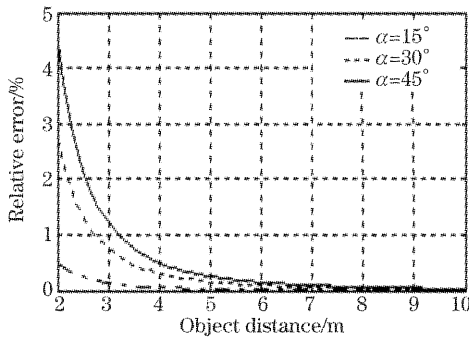


图 2 相对误差与物距的关系

Fig. 2 Dependence of relative error on object distance from 2 m to 50 m

图 2 中,点画线和虚线分别对应 $\alpha = 15^\circ$ 和 30° 的相对误差, $\alpha = 45^\circ$ (实线)时相对误差最大。从图中可以看出,在远距离测量时当物距大于 5 m,相对误差都小于 0.3%,且随物距的增加而下降,所以远距离测量时可以忽略弥散斑对相关测量的精度影响。

2.2 成像位置的影响

由于远距离斜光轴测量时可以忽略弥散斑对相关测量的精度影响,下面仅讨论斜光轴导致的成像位置的影响。从图 1 的几何关系得

$$y_i = \frac{f \cos \alpha}{d_o - f} y_o \frac{1}{1 + (y_o / d_o) \sin \alpha}, \quad (6)$$

其中 f 为焦距, d_o 为物距, y_o 和 y_i 分别为物和像的长度。

远距离时 $(y_o / d_o) \sin \alpha \ll 1$,上式按泰勒级数展开,得

$$y_i = \frac{f \cos \alpha}{d_o - f} y_o \left[1 - \frac{y_o}{d_o} \sin \alpha + \left(\frac{y_o}{d_o} \sin \alpha \right)^2 - \left(\frac{y_o}{d_o} \sin \alpha \right)^3 + \dots \right], \quad (7)$$

略去高阶小量,上式简化为

$$y_i = \frac{f \cos \alpha}{d_o - f} y_o \left(1 - \frac{y_o}{d_o} \sin \alpha \right), \quad (8)$$

(8) 式即为远距离斜光轴成像公式,设物点 y_o 发生位移 dy_o 时,像点 y_i 的位移 dy_i ,将(8)式取微分得

$$dy_i = \frac{f \cos \alpha}{d_o - f} \left(1 - \frac{2y_o}{d_o} \sin \alpha \right) dy_o, \quad (9)$$

由(9)式,物像点的位移关系受 α 的影响,斜光轴成像相关测量时,如不考虑成像位置的影响,将产生相对误差:

$$\epsilon = \frac{1}{[1 - (2y_o / d_o) \sin \alpha] \cos \alpha} - 1, \quad (10)$$

(10) 式中误差随 α 的增大而增大,取 $\alpha \geq 10^\circ$ 时,相对误差都大于 1%。因此斜光轴成像相关测量时,成像位置变化对相关测量精度的影响是主要因素,必须设法消除这一影响。

消除这一影响的常规方法是按照(9)式的成像关系直接测量 dy_o ,但是除了需要测出外,还需知道 f, α, y_o 和 d_o 。只有 dy_i 可由计算机相关搜索精确测出,而 f, α, y_o 这些量实际测量时是难以严格测出的。所以这一方法无法实现高精度相关测量。

2.3 测量方法

根据以上讨论,提出下述参考测量法:在 $y_o = l$ 和 $y_o = -l$ 处设置完全相同的标靶图像,用相关方法测出物面 $2l$ 长在像面上对应的像元素 n 。物受载前后,各采用一幅图像,再对 $y_o = 0$ 的散斑进行相关运算,求出像面上移动的像元素 m ,则可根据下式计算出 dy_o

$$dy_o = m(2l/n), \quad (11)$$

其原理如下,设 $y_o = l$ 和 $y_o = -l$ 对应的像点分别为 $y_{i,l}$ 和 $y_{i,-l}$

$$\begin{cases} y_{i,l} = \frac{f \cos \alpha}{d_o - f} l \left[1 - \frac{l}{d_o} \sin \alpha + \left(\frac{l}{d_o} \sin \alpha \right)^2 - \dots \right], \\ y_{i,-l} = -\frac{f \cos \alpha}{d_o - f} l \left[1 + \frac{l}{d_o} \sin \alpha - \left(\frac{l}{d_o} \sin \alpha \right)^2 - \dots \right], \end{cases} \quad (12)$$

则,斜光轴成像时物像比为

$$\frac{A'C'}{AC} = \frac{y_{i,l} - y_{i,-l}}{2l} = \frac{f \cos \alpha}{d_o - f} \left[1 + \left(\frac{l}{d_o} \sin \alpha \right)^2 \right] \approx \frac{f \cos \alpha}{d_o - f} = M', \quad (13)$$

其中 M' 为远距离时斜光轴成像的物像比,相对于正轴成像物像比,多一个 $\cos \alpha$ 因子.于是,(9)式可以改写为

$$dy_i = M' \left(1 - \frac{2y_0}{d_o} \sin \alpha \right) dy_0, \quad (14)$$

由(14)式可见,如果测量时选取 $y_0 = 0$ 上的图像区域进行相关运算,有

$$dy_0 = \frac{1}{M'} dy_i = \frac{1}{M'} m d_c, \quad (15)$$

其中 d_c 为像元在 y_c 方向上的线度,而(13)式可改写为

$$M' = n d_c / (2l), \quad (16)$$

所以

$$dy_0 = m(2l/n), \quad (17)$$

所以,不计弥散斑的影响,使用(17)式的参考测量法得到的精度与共轴光路相当.远距离时通过选择适当的光学成像参量使用参考测量法,斜光轴测量的相对误差可以控制在理想范围之内.该方法实际上采用了一种平均法,适用于平面物体和成像系统无畸变情况下的测量.如果被测对象凹凸不平或成像系统有畸变,此方法不成立.此时可采用标定法来提高测量精度.对于桥梁位移测量可直接贴平面标靶克服凹凸不平的影响,镜头应采用畸变小的长焦距镜头.

3 位移测量实验结果分析

3.1 实验室环境测量

实验装置如图3所示,用白光光源均匀照明被测物体.物表面上预制标靶点三个,点间距由光栅尺读出为47.78 mm,且使用白底黑色圆点,以提高图像对比度.调节 CCD 支架,使 CCD 成像系统的主光轴与被测物成一较大的仰角(45°),可变焦照相物镜(焦距 $f=70\sim 210$ mm)将物成像在 CCD 靶面上,CCD 将光强信号转换成电信号,经图像卡(CA-MPE-1000黑白图像采集卡,像素为 758 pixel×576 pixel(8 bit)模-数转换后形成数字化灰度图像,存储在帧存储器中.调节

光源位置和镜头光圈读数,并测量系统噪声,使噪声低于3个灰度级,以提高相关计算的精度.其余实验参量取 $d_o=2$ m, $2R=0.05$ m, $f=0.2$ m.此时,弥散斑对相关测量的相对误差小于0.04%,可忽略不计.放大率 0.2018 mm/pixel.表1和图4是斜光轴参考测量法与千分表测量结果的比较.

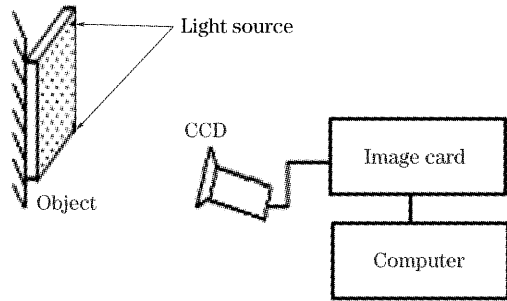


图3 斜光轴测量系统

Fig. 3 Slant optical axis measuring system

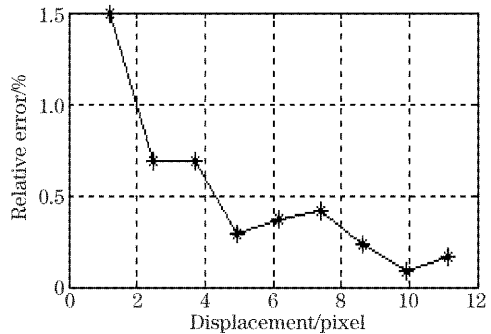


图4 实验室环境下相对误差与位移的关系 (位移范围从 1.22 pixel 到 11.13 pixel)

Fig. 4 Dependence of relative error on displacement from 1.22 pixel to 11.13 pixel on lab circumstance

表1中第一个数据点测量相对误差大于1%,这是因为数据点位移 1.22 pixel,亚像素相关测量灵敏度取 0.02 pixel,则系统误差为 0.02/1.22,即 1.64%。所以该点误差是意料中的事.图4显示,当数据点位移大于2 pixel时,实验室环境测量的相对误差都小于1%,且随物距的增加而减小.可见,为保证测量精度,还需要调节成像系统的放大率,使被测物体的位移在 CCD 靶面上达到 2 pixel 以上.

表 1 2 m 远处的位移测量结果(与千分表进行比较, 测量范围 0~2.5 mm)

Table 1 Displacement measurement result in displacement of 2 m (compared by the micrometer, adjustable range 0~2.5 mm)

Comparison /mm	Measurement /pixel	Measurement /mm	Relative error /%
0.25	1.22	0.24625	1.50
0.50	2.46	0.49653	0.69
0.75	3.69	0.7448	0.69
1.00	4.94	0.9971	0.29
1.25	6.17	1.24536	0.37
1.50	7.40	1.49363	0.42
1.75	8.65	1.74593	0.23
2.00	9.90	1.99823	0.09
2.25	11.13	2.2465	0.16

3.2 工程环境测量

某省立交桥静载运行性能测试,测试地点之一: 20m跨主车道2[#]~3[#]墩跨中,在跨中设置人工散

表 2 立交桥 20 m 远处位移测量结果(与电动千分表比较)

Table 2 Overpass displacement measurement result in displacement of 20 m (compared by the electric micrometer)

Truck weight /T×number	Measurement /pixel	Measurement /mm	Comparison /mm	Relative error /%
15×2	1.82	1.556	1.575	1.2
30×2	3.85	3.290	3.281	0.3
15×1+30×1+15×1	3.82	3.265	3.252	0.4
15×2+30×2+15×2	6.40	5.470	5.488	0.3

表 2 和图 5 都显示,当数据点位移大于 2.5 pixel时,工程环境测量的相对误差都小于 1%,且随物距的增加而减小。与实验室环境(图 4)相比,相对误差有所增加。

在本测量技术中,采用数字图像相关方法,随着物距的增加,系统的绝对误差将增大。但只要插值运算的误差足够小,降低系统的噪声,振动影响被消除,选择合适的光学系统参量使得成像点的位移在 2pixel 以上,系统相对误差完全可以控制在小于 1%。实际斜光轴相关测量时,可以通过适当加大物距以消除弥散斑的影响,以及加大相关点线度和减小物像比来减小测量的系统误差。当物距很大时,测量系统还可能受到空气气流扰动的影响,测量精度会有所下降。

4 结 论

详细分析了物体离轴成像时的像模糊和成像位置变化对白光数字散斑相关法的影响,在难以满足

斑图,散斑图上在 $y_0 = \pm l$ 处有两个完全相同的标记,对标记进行相关运算,得 $n = 468.00$ pixel,已知 $2l = 400$ mm,于是像面上 1 pixel 对应物面 y_0 方向的尺寸为 $2l/n = 0.85470$ mm/pixel。表 2 和图 5 是斜光轴参考测量法与电动千分表对立交桥静载挠度测量结果的比较。

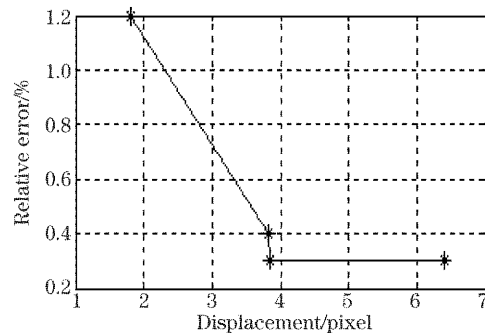


图 5 工程环境下相对误差与位移的关系 (位移范围从 1.82 pixel 到 6.40 pixel)

Fig. 5 Dependence of relative error on displacement from 1.22 pixel to 11.13 pixel on engineering circumstance

共轴测量光路条件的应用背景下,给出了一种新的远距离斜光轴测量面内位移的新方法,得到测量精度可达 0.02 pixel,在 2~50 m 处静载挠度测量,其最大相对误差小于 1%。

该方法对工程现场的环境要求大大降低,特别适用于桥梁、高速公路立交桥的静载挠度测量等工程应用,使用高速图像采集卡时,就可以实现动态位移测量,拓展了数字散斑相关方法在工程测量中的应用范围。该方法使数字散斑相关方法焕发出新的生命力,在工程实际测量方面具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Yuan Ruiping, Li Zhu. Loading test research on bridges on yinhuang project[J]. *J. Shijiazhuang Railway Institute*, 2002, 15(Suppl.): 68~70 (in Chinese)
原瑞平,李 珠.“引黄”工程桥梁荷载试验研究[J]. *石家庄铁道学院学报*, 2002, 15(增刊): 68~70
- 2 Guo Jinjun, Xu Liang, Jiang JianJing. On-line safety monitoring of long span bridge by GPS[J]. *J. GNSS World of China*, 2002, 26(4): 324~332 (in Chinese)
过静珺,徐 良,江见鲸. 利用 GPS 实现大跨桥梁的实时安全监测[J]. *全球定位系统*, 2002, 26(4): 324~332

- 3 Gong Haohan, Liu Cheng, Chen Daqing *et al.*. Relationship between laser speckle correlation and displacement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 211~214 (in Chinese)
龚浩瀚,刘 诚,陈大庆等. 激光散斑相关性和位移的关系研究[J]. 光学学报, 2001, **21**(2): 211~214
- 4 Yang Guoguang. *Modern Optical Measuring and Testing Technique* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997. 246~247 (in Chinese)
杨国光. 近代光学测试技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997. 246~247
- 5 Jin Guanchang, Wu Zhen, Bao Nikengb *et al.*. Digital speckle correlation method with compensation technique for strain field measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, **39**: 457~464
- 6 Ma Shaopeng, Jin Guanchang, Pan Yishan. Study on the white light DSCM method for deformation measurement of rock materials[J]. *J. Experimental Mechnacis*, 2002, **17**(1): 10~16 (in Chinese)
马少鹏,金观昌,潘一山. 白光 DSCM 方法用于岩石变形观测的研究[J]. 实验力学, 2002, **17**(1): 10~16
- 7 Gong Haohan, Jiang Jinhui, Chen Daqing. Displacement measurement by grid digital image correlation [J]. *J. Experimental Mechnacis*, 2000, **15**(2): 246~252 (in Chinese)
龚浩瀚,姜锦虎,陈大庆. 网格数字图像相关方法测量位移场的研究[J]. 实验力学, 2000, **15**(2): 246~252
- 8 Chen Siying, Huang Chenfuang, Duan Zhuping. Digital speckle correlation method and its application on impact deformation measurement[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(6): 735~739 (in Chinese)
陈思颖,黄晨光,段祝平. 数字散斑相关法在高速变形测量中的应用[J]. 中国激光, 2004, **31**(6): 735~739
- 9 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 (in Chinese)
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
- 10 Sun Ping, Wang Haifeng, Zhang Xi *et al.*. Study on three dimensional ESPI and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 840~844 (in Chinese)
孙 平,王海峰,张 熹等. 三维电子散斑干涉技术及其应用研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(7): 840~844
- 11 Pang Xiangyang, Liu Cheng, Zhu Jianqiang. Optical arrangement for portable digital speckle pattern interferometer[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 347~349 (in Chinese)
庞向阳,刘 诚,朱健强. 便携式散斑干涉仪的光路安排[J]. 中国激光, 2004, **31**(3): 347~349
- 12 Peters W. H., Ranson W. F.. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(5): 427~431
- 13 A. Asundi, H. North. White-light speckle method-current trends[J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 1998, **29**: 159~169
- 14 Rui Jiabai, Jin Guanchang, Xu Bingye. A new digital speckle correlation method and its application[J]. *Acta Mechnaca Sinica*, 1994, **26**(5): 599~607 (in Chinese)
芮嘉白,金观昌,徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用[J]. 力学学报, 1994, **26**(5): 599~607
- 15 Jun Zhang, Guanchang Jin, Shaopeng Ma *et al.*. Application of an improved subpixel registration algorithm on digital speckle correlation measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, **35**: 533~542
- 16 Gao Jianxin, Zhou Xin'geng. Resolution analysis of digital image measurement system[J]. *Acta Machanica Solida Sinica*, 1997, **18**(2): 163~166 (in Chinese)
高建新,周辛庚. 数字图像测量系统灵敏度分析[J]. 固体力学学报, 1997, **18**(2): 163~166
- 17 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 (in Chinese)
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