

文章编号: 1001-3806(2009)06-0582-04

## LabVIEW 和 MATLAB 在电子散斑干涉图像处理中的应用

张羽鹏, 王开福\*

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

**摘要:** 为了在散斑测试技术中方便地处理散斑图像, 采用 LabVIEW 和 MATLAB 结合的方法设计了一个简单的电子散斑干涉图像处理系统, 利用 LabVIEW 设计显示界面, 并调用 MATLAB 强大的图像处理功能来对散斑图像进行处理。结果表明, 这种方法处理过的散斑图像增强了散斑条纹的对比度。

**关键词:** 图像处理; 电子散斑干涉; 相位测量; LabVIEW; MATLAB

**中图分类号:** TN911.73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.007

### Application of LabVIEW and MATLAB in ESPI image processing

ZHANG Yu-peng, WANG Kai-fu

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to process conveniently speckle images in speckles measurement, a simple system of electronic speckle pattern interferometry images processing was designed by means of LabVIEW and MATLAB. In this method, LabVIEW was used to design display interface and the powerful image processing functions of MATLAB were invoked to process speckle images. The experimental result shows that the contrast of fringes can be increased by the proposed method.

**Key words:** image processing; electronic speckle pattern interferometry; phase measurement; LabVIEW; MATLAB

### 引言

电子散斑干涉 (electronic speckle pattern interferometry, ESPI) 技术是基于光学计量技术的一种非接触、全场的测量技术, 常用于测量物体的位移。激光束照射在被测物体表面上, 形成激光散斑。采用不同的光路, 可以测量物体的离面位移和面内位移。散斑条纹可直接采集到计算机中进行处理, 省去了传统全息干涉方法定影的麻烦, 在定量测量中应用相移技术, 使得测量精度大为提高<sup>[1-2]</sup>。

对于散斑图像的处理主要就是滤波, 但是在试验中直接得到的散斑图像只是一些非均匀分布的亮斑和暗斑, 所以, 在滤波之前首先要将物体变形前后的散斑图进行相减、相加或者相关的处理, 得到散斑条纹图, 这个散斑的条纹图中包括高频的散斑噪声, 也包裹低频的有用信息; 然后通过滤波的方法滤掉高频的散斑噪声, 保留散斑条纹信息; 最后通过相移法得到条纹的

位相分布, 进而计算出离面位移<sup>[3-5]</sup>。

对于散斑图像的处理完全可以通过 MATLAB 的图像处理功能实现, 但是对于不熟悉的 MATLAB 的人来说想要对散斑图像处理并得到处理结果很难, 因此, 这里采用了 LabVIEW 和 MATLAB 相结合的方法, 通过人性化的界面设计, 再结合 MATLAB 的图像处理功能设计一个简单的散斑图像处理系统<sup>[6-7]</sup>。

### 1 双光束散斑干涉技术

双光束干涉可以用来测量面内位移和离面位移, 常用于测量板的变形和振动、轮胎的无损检测以及人的耳膜在各种声响下的振动。图 1 所示是测量离面位移的散斑干涉光路图。图中物光  $I_o$  和参考光  $I_r$  是由

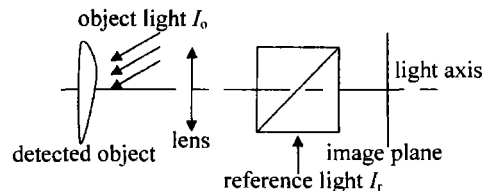


Fig. 1 Double-beam speckle interferometry system

同一光源发出的两束相干光,  $I_o$  照明被测物体表面, 被测物体由成像透镜成像, 经分光棱镜到像面;  $I_r$  由分光棱镜反射到像面, 在像面物光散斑场与光滑参考光干涉形成干涉散斑场<sup>[8-9]</sup>。

物体变形前像面上任一点  $(x, y)$  的光强可表示为:

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目 (M0762-013)

作者简介: 张羽鹏 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事数字图像处理与散斑测量技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: kfwang@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2008-09-10; 收到修改稿日期: 2008-12-25

$$I_1(x, y) = I_0 + I_r + 2\sqrt{I_0 I_r} \cos\phi \quad (1)$$

式中,  $I_0$  和  $I_r$  分别为物光和参考光强度,  $\phi$  是一个随机散斑相位。

当物体某点  $(x, y)$  沿观测方向(与像平面垂直)发生离面  $dz$  的变形后, 将引起  $\Delta\phi$  的相位改变, 这时像面上点  $(x, y)$  的光强为:

$$I_2(x, y) = I_0 + I_r + 2\sqrt{I_0 I_r} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (2)$$

这里采用减模式对变形前后的散斑干涉场图像进行处理, 相减并取绝对值之后点  $(x, y)$  的光强为:

$$I(x, y) = |I_1 - I_2| = 4\sqrt{I_0 I_r} \times \left| \sin \frac{1}{2}(2\phi + \Delta\phi) \right| \times \left| \sin \frac{\Delta\phi}{2} \right| \quad (3)$$

实际情况是  $\Delta\phi$  变化比  $\phi$  变化慢得多, 由(3)式可以看到其有两个相互调制的函数项。第1项变化频率高, 表示散斑噪声; 第2项变化频率低, 表示散斑条纹。当  $\sin(\Delta\phi/2) = 0$  时,  $\Delta\phi = 2k\pi, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , 将出现暗条纹。当  $\sin(\Delta\phi/2) = 1$  时,  $\Delta\phi = (2k + 1)\pi, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , 将出现亮条纹。故在对散斑图像处理时, 都是滤除高频的散斑噪声, 保留低频的散斑条纹信息。

## 2 散斑条纹图像的处理

### 2.1 散斑条纹图的滤波处理

滤波处理针对的是散斑条纹图, 常用的滤波方法主要是空域滤波和频域滤波<sup>[10]</sup>。空域滤波实际上就是在图像中借助模板对图像邻域进行操作。虽然空域滤波有很多种, 但是都是利用模板的卷积实现的。卷积操作是让每一个输出像素取值为输入像素邻域内像素值的加权之和, 具体的权值通过卷积核也就是滤波器进行定义。空域滤波常用的方法是均值滤波和中值滤波。均值滤波是一种线性滤波方式, 它是对输出像素领域进行平均化操作, 再将平均值作为输出像素的灰度, 均值滤波会使图像的细节模糊, 易造成边缘模糊, 不利于后期的相位解包裹处理。中值滤波是一种非线性信号处理方法, 最早应用于1维信号处理技术中(时间序列分析), 后来应用于2维图像平滑中。在一定条件下可以克服线性滤波器如最小均方滤波、平均值滤波等带来的图像细节模糊, 而且对于滤除脉冲干扰及图像扫描噪声最为有效。但对于一些细节多, 特别是点、线尖顶部的图像不宜采用中值滤波方法。

频域滤波方法顾名思义就是先将待处理图像变换到频域, 然后在频域内进行滤波处理, 去掉高频噪声, 最后在变换回空域图像。由于离散傅里叶变换收敛速度慢, 变换需要计算复数, 在数据的描述上相当于实数的两倍。而离散余弦变换是用一组不同频率和幅值的余弦函数近似表示一幅图像, 实际上它是傅里叶变换

的实数部分。所以, 本系统采用的是离散余弦变换的频域滤波方法。变换后的图像经过巴特沃斯低通滤波器(因为它是一种平滑滤波器, 通带平坦, 没有明显的振铃现象, 包含了高频分量, 减少了散斑图像模糊, 有利于相位解包裹处理)滤波后的图像再经过离散余弦反变换, 得到滤除噪声后的散斑条纹图, 具体的 MATLAB 代码如下所示:

```
%2 维离散余弦变换
I14 = dct2(I1, 800, 800);
% 设计巴特沃斯低通滤波器, n 为滤波器阶数, D0
为截止频率
[ row, col ] = size(I14);
for k = 1 : 1 : row
for l = 1 : 1 : col
D1(k, l) = sqrt((k^2 + l^2));
H(k, l) = 1 / (1 + (sqrt(2) - 1) * ((D1(k, l) /
D0)^(2 * n)));
end
end
% 图像通过滤波器
I15 = (I14. * H);
%2 维离散余弦反变换
F1 = idct2(I15);
```

### 2.2 相移法

在 ESPI 中实现相移, 可分为时间相移和空间相移。实现时间相移的位相调制方法主要是利用压电陶瓷、相移器、光纤相移器、液体相移器、空气相移器等精确及有规律改变光程产生相移。相移法的原理是: 在物体变形过程中通过改变参考光路的位相多次拍摄散斑图, 通过减模式运算获得散斑条纹图位相分布。这类方法要求至少有3幅或以上的带有相移的条纹图<sup>[5]</sup>。

相移技术以条纹图中的余弦函数的相位为测量对象, 通常是利用对已知相移后(通常是在参考光波中导入线性变化的相位)的被测光波采样后获得的光强分布进行处理以求得相位值。

当两波面相遇发生干涉时, 干涉条纹图被摄像机存储为数字图像, 其光强表示为:

$$I_n = I_0(1 + \gamma \cos\phi) \quad (4)$$

式中,  $I_n$  是第  $n$  次相移的干涉图中一点的光强,  $I_0$  是背景光强分布,  $\gamma$  是条纹调制度,  $\phi$  是被测相位, 即干涉图中被测点处两波面的相位差。(4)式中未知数过多, 只知道某点光强  $I_n$  的情况下无法求得被测相位  $\phi$ , 一般情况下, 需要在条纹相位上附加一个已知相移量来增加方程数, 使方程数大于或等于未知量来解出相位值, 而这个已知相位量需要移相器提供, 此时干涉

条纹图的光强表示为:

$$I_n = I_0[1 + r\cos(\phi + \delta)] \quad (5)$$

式中,  $\delta$  是可控的附加相位调制项, 称为相移步长, 它是随时间变化的, 即不同相移量是在不同时刻引入的。当使用可控的相移装置使  $\delta$  步进变化时, 利用几个不同相位下测到的强度  $I_n$  便可解算出被测相位  $\phi$ 。

如果每次改变相位角  $\pi/2$ , 相移步长分别为  $0, \pi/2, \pi$  时, 得到干涉条纹图的光强可表示为:

$$I_1 = I_0[1 + r\cos(\phi + 0)] = I_0(1 + r\cos\phi) \quad (6)$$

$$I_2 = I_0[1 + r\cos(\phi + \frac{\pi}{2})] = I_0(1 - r\sin\phi) \quad (7)$$

$$I_3 = I_0[1 + r\cos(\phi + \pi)] = I_0(1 - r\cos\phi) \quad (8)$$

由三角函数性质推导出:

$$\phi = \arctan[(I_1 + I_3 - 2I_2)/(I_1 - I_3)] \quad (9)$$

MATLAB 代码如下所示:

```
%3步相移计算得到 -π/2 到 π/2 的相位分布
```

```
P = atan((F1 + F3 - 2 * F2) ./ (F1 - F3));
```

### 2.3 相位解包裹

在经过对散斑条纹图进行滤波降噪、相位计算之后, 得到了相位的主值图, 也就是包裹的相位图。因为相移公式中反正切函数的值域是  $(-\pi/2, \pi/2)$ , 它还没有形成直观的连续相位图, 不能直接用于位移分析, 必须将条纹图包裹的相位连接成光滑曲面, 这时相位主值才恢复到相位值, 这个连续化的过程称为相位解包裹<sup>[8]</sup>。

设  $\phi(x, y)$  是包裹相位值,  $\varphi(x, y)$  是真实相位值, 则有:  $\phi(x, y) = \varphi(x, y) + 2n(x, y)\pi$  (10) 相位解包裹目的是确定正确的整数  $n(x, y)$ , 在相应点上加上(或减去)  $2\pi n$ , 得到某点的真实相位值, 进而得到一幅连续光滑的解包裹相位图。本系统通过 MATLAB 工具箱提供的相位解包裹函数进行解包裹计算, 具体 MATLAB 代码如下所示:

```
%利用 unwrap 解包裹处理
```

```
UP = unwrap(2 * rot90(P))/2;
```

```
UP = unwrap(2 * rot90(UP))/2;
```

```
UP = rot90(UP, 2);
```

在通过相位的解包裹运算求得连续的相位分布后, 得到物体变形的真实相位  $\varphi$ , 然后可求得离面位移  $w(x, y)$ 。当入射光垂直于被测面时, 有:

$$w(x, y) = \frac{\lambda\varphi}{4\pi} \quad (11)$$

式中,  $\lambda$  为激光的波长,  $\varphi$  为变化的真实相位值。

## 3 系统软件设计

系统通过采用 LabVIEW 和 MATLAB 混合编程的

方法实现, 利用 LabVIEW 设计操作和显示界面, 并通过 MATLAB Script 节点调用 MATLAB 进行图像的处理。MATLAB Script 节点实际上是通过 ActiveX 控件与 MATLAB Server 进行通信的, 调用 MATLAB 函数或者命令实质上是将 MATLAB 当作一个 ActiveX 服务器, 并建立 ActiveX 通道, 然后将这个函数或者命令通过 ActiveX 通道发送给 MATLAB, 由 MATLAB 在后台执行。通过 MATLAB Script 节点实现散斑图像处理系统的软件流程如图 2 所示, 这里采用离散余弦变换后巴特沃斯低通滤波的处理方法, 具体过程如下所述。

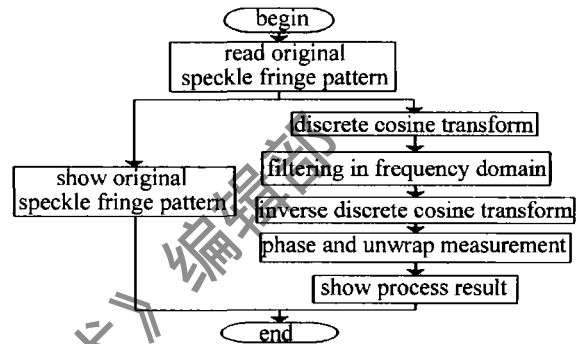


Fig. 2 Flow chart of the system software

首先, 用 LabVIEW 设计显示界面, 实现原始图像的读取和显示, 具体的框图程序如图 3 所示。Read

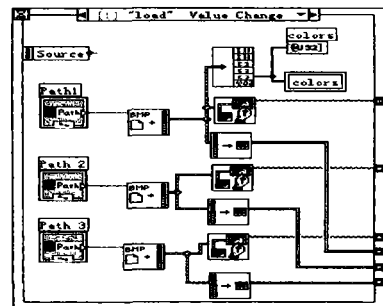


Fig. 3 Load image

BMP File 子VI用于读取图像文件, 然后通过 Draw Flattened Pixmap 子VI和显示控件 Picture 显示在计算机屏幕上。Unbundle 函数用于对图像数据 image data 解包得到调色板变量并存储在 color 中, 即读出图像的调色板信息, 将其设为局部变量供显示处理后的图像时使用。Unflatten Pixmap 子VI把 image data 转化为 8 位的 2 维数组, 传递给 MATLAB Script 节点进行图像处理。

其次, 通过调用 MATLAB Script 节点, 在后台实现离散余弦变换、巴特沃斯低通滤波、离散余弦反变换, 得到滤除噪声后的散斑条纹图, 框图程序如图 4 所示。MATLAB Script 节点的参量传递可通过添加输入/输出完成, 在节点边框上单击鼠标右键, 在弹出菜单中选择“Add Input”或“Add Output”就添加上了输入/输出节点, 该节点的数据类型是可以选择的, 其右键弹出菜单中的“Choose Date Type”用于完成这个操作, 这里选

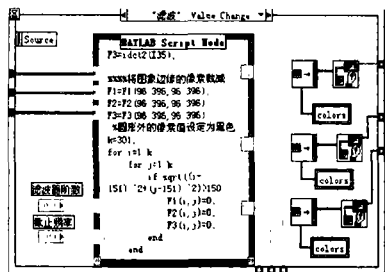


Fig. 4 Filtering in frequency domain

择 2-D Array of Real。在框图程序中,3 幅相移散斑条纹图通过“Input”传送给 MATLAB Script 节点中,图像信息分别赋给  $L_1, L_2$  和  $L_3$ , 滤波处理后,分别存在  $F_1, F_2$  和  $F_3$  中经“Output”节点输出显示。显示部分通过 Flatten Pixmap 节点将图像矩阵打包成簇,生成 image date(图像数据包),然后通过 Draw Flattened Pixmap 节点在 LabVIEW 的前面板的显示控件 Picture 中显示。注意 Draw Flattened Pixmap 节点在使用时调色板一定要与需要显示图像的格式对应,否则图像无法正确显示,这里局部变量 colors 里面放置的是前面图像读入时的调色板。

最后,对频域滤波后的散斑图进行 3 步相移计算得到散斑条纹图的位相分布,并解包裹运算得到连续的位相分布,框图程序如图 5 所示,也是通过 MATLAB Script 节点调用 MATLAB 程序实现的。

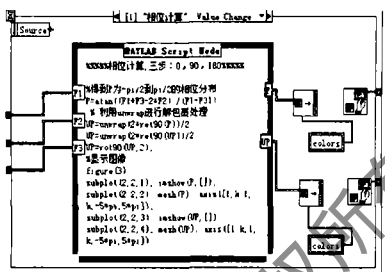


Fig. 5 Phase-shifting calculation

在 LabVIEW 中显示原始图形和处理后的图形都存在着图像尺寸过大而显示窗口太小的问题。这里通过属性节点中的 Zoom Factor 来解决,根据试图比例的控制按钮可以方便地控制图像以原图像的一定比例显示出来,具体的程序框图如图 6 所示。

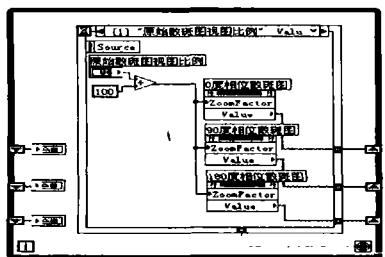


Fig. 6 Image display

### 4 试验结果

实验中相移步长分别取  $0, \pi/2, \pi$ , 被测对象是一

块半径为 26mm、厚度为 3mm 的铝板,周边固支,在其上任取一个区域均匀加载,试验光源是功率为 30mW, 波长为 632.8nm 的 He-Ne 激光器,得到的试验结果如图 7 和图 8 所示。

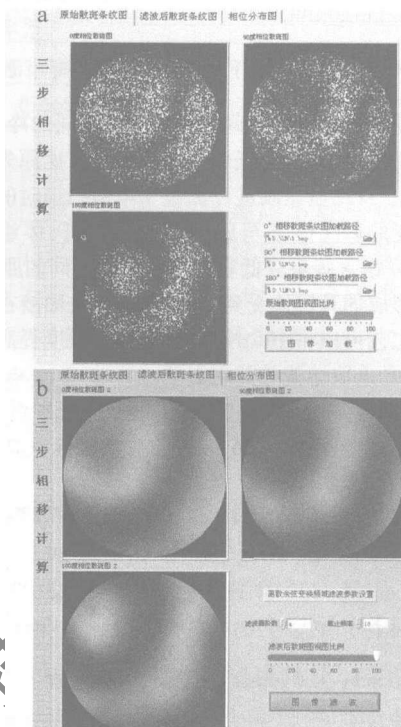


Fig. 7 Comparison between original and processed speckle fringe patterns

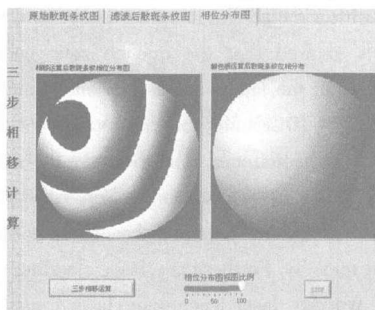


Fig. 8 Speckle phase distribution

### 5 结论

电子散斑干涉技术是在多学科的基础上发展起来的现代光测技术,在很多领域得到了广泛的应用。近几年来,许多学者致力于电子散斑测试技术的研究,使得散斑测试的理论日益成熟,如何将理论转化到实践,设计出散斑图像的处理系统是个亟待解决的问题。Lab VIEW 和 MATLAB 提供了一个可行的方法。

本系统是基于 MATLAB Script 节点设计的,主要实现散斑条纹图像的滤波、相位和解包裹运算。试验结果表明,系统能满足基本的图像处理需要。但是系统的运行不能完全脱离 MATLAB 环境,运行时占用大量的计算机资源,如何能够使系统在完全脱离

(下转第 589 页)

化曲线如图7所示。根据之前的组织分析,在搭接区

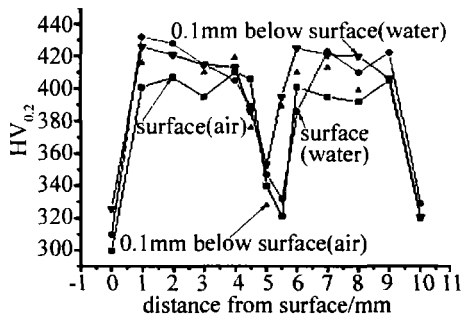


Fig. 7 The microhardness on surface and subsurface of lap zone under air and water-cooling condition

的马氏体由于激光重复加热,又形成了马氏体,其硬度下降不大;而在搭接区附近的软化区,前一道扫描形成的马氏体受到回火作用,在原始组织较低的碳含量基础上,原先固溶在马氏体中的碳析出,形成了回火索氏体,进一步降低了低碳马氏体的硬度。在距离表面0.1mm处测的显微硬度曲线,发现其与表面硬度变化类似。

### 3 结论

(1)在相同的热输入时,水冷时由于基体传热更快,其宽度和深度都比空冷时要小。

(2)激光作用区大致分为3层:第1层为表面完全淬硬层,主要是低碳板条马氏体,且马氏体组织由表向内逐渐变小;第2层为过渡区,主要是形成细小的低碳板条马氏体组织与未转变的索氏体甚至屈氏体;第3层为高温回火区,形成回火索氏体组织和屈氏体。

(3)空冷条件下,功率为4kW时,硬化层内形成的马氏体尺寸较小,且含有少量的未转变的索氏体;随着激光功率的增大,马氏体组织的尺寸增大且数量增多。

(4)在两种不同冷却条件下,基本硬度变化曲线

趋势基本一致。对于其表面硬度较低,而后又上升的是因为表面温度较高,碳扩散较快的原因;软化区的硬度由于激光重新扫描导致的回火而下降。

(5)由于10CrNiMo钢的碳和合金元素含量较低,激光相变硬化工艺可以将其表面硬度提高100HV~150HV左右,且表面保持很好的韧性,若想进一步提高其表面硬度,还需采取熔覆等其它工艺。

### 参 考 文 献

- [1] ZHANG F J, BU D X, ZHANG G D, *et al.* Ultra-narrow gap gas-shield metal arc welding of 980 steel [J]. *Electric Welding Machine*, 2006 (5): 51-54 (in Chinese).
- [2] LI T D, WANG Y, HE Q K, *et al.* Study on microstructure and performance of 45 steel treated by multi-time laser transformation hardening [J]. *China Surface Engineering*, 2007, 20 (2): 33-37 (in Chinese).
- [3] CHAO M J, DU Y D, LIANG E J, *et al.* Investigation of laser surface hardening for mould-cutting roller [J]. *Laser Technology*, 2003, 27 (6): 500-503 (in Chinese).
- [4] XU Z W, HUANG Zh, RU A, *et al.* Law of microstructural formation of low carbon steel in laser melting process and heating transformation of the melted microstructure [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2003, 28 (10): 22-25 (in Chinese).
- [5] MA K, YANG Y L, WANG Ch Sh, *et al.* Effect of laser hardening technical parameters on hardened depth of 40Cr steel [J]. *Laser Technology*, 2002, 26 (4): 262-263 (in Chinese).
- [6] WU G, SONG G M, HUANG W J. Influence of laser processing parameters on the case-depth and the hardness [J]. *Laser Technology*, 2007, 31 (4): 163-165 (in Chinese).
- [7] LI J Ch. Research on optimization of controlling of laser heat treatment [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 155-160 (in Chinese).
- [8] MIKOVIC T, SCHULZE V, LOHE D, *et al.* Influence of heating rate, cooling rate and number of pulses on the microstructure of AISI 4140 after short-time-hardening [J]. *International Journal of Materials Product Technology*, 2005, 24 (1/4): 207-230.
- [9] (上接第585页)
- [10] MATLAB的环境下运行是下一步将要解决的问题。
- [1] BUTTERS J N, LEENDERTZ J A. Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology [J]. *Opt & Laser Technol*, 1971, 3 (1): 26-30.
- [2] CHENG H Y, LUO Q M, ZENG S, *et al.* Modified laser speckle imaging method with improved spatial resolution [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2003, 8 (3): 559-564.
- [3] WANG K F, TIEU A K, LI E B. Comprehensive influence of in-plane displacement, double-aperture orientation and wedge-shearing direction on slope fringe formation in speckle shearing interferometry [J]. *Journal of Modern Optics*, 2003, 50 (9): 1365-1372.
- [4] WANG K F, TIEU A K. Influence of in-plane displacement on slope fringe formation in electronic speckle shearing interferometry [J]. *Opt Commun*, 2003, 224 (13): 45-49.
- [5] WANG K F, TIEU A K. Volume-grating phase-shifting digital speckle pattern interferometry used for measurement of out-of-plane displacement field [J]. *Opt & Laser Technol*, 2004, 36 (2): 117-120.
- [6] LIN G, WANG L X, ZHANG L J. LabVIEW 8.2 programme and application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 6-25 (in Chinese).
- [7] ZHANG L K. MATLAB 7.0 introduction and conversance [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2006: 391-433 (in Chinese).
- [8] YU J W. A system of image processing based on ESPI [J]. *Information Technology*, 2003, 27 (4): 41-43 (in Chinese).
- [9] CHEN H P. Research on speckle interferometry technology and image processing system [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Technology, 2004: 1-45 (in Chinese).
- [10] LUO J H, FENG P. Application of MATLAB 7.0 in image processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 188-200 (in Chinese).