

# 基于数字散斑的弯管残余应力测量系统的误差分析

陈涛 刘检华 张天

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要** 针对基于数字散斑相关法(DSCM)的残余应力测量系统,分析了影响系统精度的主要误差因素,并根据各个误差因素的形成原理,提出了减少或去除误差的方法。通过实验数据的对比,验证了误差因素对测量系统的影响,同时验证了所给出的减少误差的方法的可行性,为基于数字散斑相关法的测量系统的误差分析提供了有益的参考。

**关键词** 测量;误差分析;数字散斑相关法;残余应力;弯管

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP48.111201

## Error Analysis of the Bending Tube Residual Stress Measurement System Based on Digital Speckle Correlation Method

Chen Tao Liu Jianhua Zhang Tan

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** In view of the bending tube residual stress measurement system based on digital speckle correlation method (DSCM), the main error elements are analyzed comprehensively. According to the theory of the error elements, the methods to reduce the errors are proposed. At the end, the error elements and the methods which reduce the errors are verified through an experiment. It is a useful reference to the similar measure system based on the digital speckle correlation method.

**Key words** measurement; error analysis; digital speckle correlation method; residual stress; bending tube

**OCIS codes** 120.6150; 100.2000; 110.2960; 110.6150

### 1 引言

目前,管路系统在航空航天、船舶、汽车以及锅炉等领域内应用非常广泛。但是,目前对导管数控弯曲过程中产生的回弹、起皱、横截面畸变等成形缺陷的形成规律还缺乏深入研究<sup>[1]</sup>。同时,导管弯曲成形后普遍存在着残余应力,这种导管在弯曲加工后产生的残余应力不仅影响着导管弯曲加工中回弹补偿量的确定,同时在使用中也会降低弯管的力学性能,增大管路系统的失效可能。因此,对于弯管残余应力的测量和研究是十分重要的。

数字散斑相关法(DSCM)不需要光学干涉条纹处理,具有光路相对简单、非接触、高精度、可得到全场位移、适用测试的对象范围广、对测量环境无特别要求等优点<sup>[2]</sup>,能够广泛应用于测量能使材料或结构的外表面发生形变的物理量上,例如位移、应变等。这使得其在机械、土木、材料、生物、医学等诸多领域获得了极其广泛的应用<sup>[3~9]</sup>。针对DSCM技术的诸多优点,本文提出一种基于数字散斑相关法的弯管残余应力测量系统,并重点对测量系统的误差进行了分析。

本文首先简要介绍了基于散斑相关法的弯管残余应力测量系统及其关键算法,然后系统地分析了影响测量系统精度的误差因素,并且针对这些误差因素,提出了减少系统误差、提高测量精度的方法。最后通过实验证明了这些方法的可行性。

**收稿日期:** 2011-06-22; **收到修改稿日期:** 2011-07-25; **网络出版日期:** 2011-09-30

**基金项目:** 国家自然科学基金(50805009)资助课题。

**作者简介:** 陈涛(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: ctiself@yahoo.com.cn

**导师简介:** 刘检华(1977—),男,博士,副教授,主要从事虚拟装配和虚拟现实等方面的研究。E-mail: jeffliu@bit.edu.cn

## 2 基于散斑相关法的弯管残余应力测量系统

测量系统的基本原理为:在弯管的待测区域外表面喷涂散斑后,在待测点处打孔以释放弯管内残余应力,并记录下打孔前后的区域的散斑图像,其后利用数字散斑相关法求解得出孔周围的变形量,再使用一定的算法由变形量计算出弯管内的残余应力。

图1显示了测量系统的硬件组成,其可分为成像单元和控制单元两部分。成像单元的主要功能为将被测物体的表面散斑分布情况记录为灰度图像;控制单元的主要功能为控制成像单元的移动、相机控制和图像的存储等。测量系统的软件部分是运用 VC++ 语言自行开发的一套散斑图像分析软件(DIAS)。

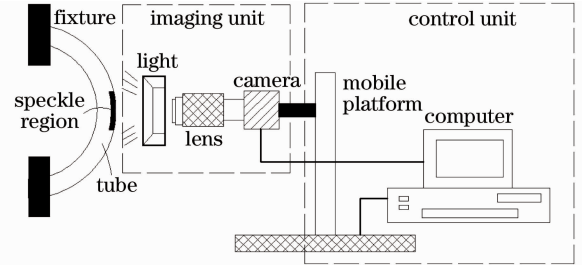


图1 测量系统硬件示意图

Fig. 1 Hardware diagram of the measurement system

## 3 位移应力转换算法

由于使用数字散斑相关法只能直接获得残余应力释放导致物体表面变形产生的计算点的位移量,而为了能够获得弯管内残余应力的值,就需要通过一种位移应力转换算法来将测得的位移量转换为残余应力值。现有的根据位移求解应变的算法是通过计算点与周围点位移的偏导来获得应变值<sup>[3]</sup>,这种算法适合应变场比较均匀且需要观察全场应变的情况。根据应变片测量的原理,本文给出了一种新的算法。

根据弹性力学的应力应变关系,推导出了一一种适用于弯管弯曲处外表面的残余应力转换算法,其原理如图2所示,其中1为弯管弯曲处受拉外表面,2为喷涂了散斑的待测区域,C为开孔处中心点,以C为原点建立直角坐标系和极坐标系,直角坐标系的X、Y方向分别于弯管的轴向、环向对齐。

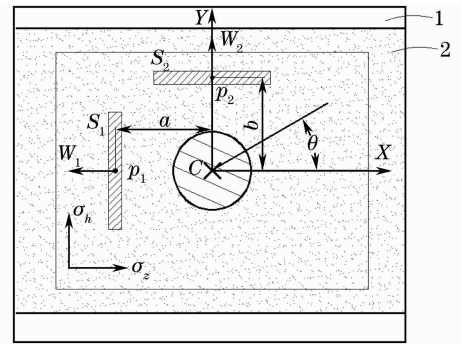


图2 位移应力转换算法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the displacement-stress conversion algorithm

由于可认为开孔操作对于无穷远处没有影响,所以P点处由于应变产生的位移W就可表示为从P到 $\infty$ 的应变 $\epsilon$ 的积分,则轴向和环向上的位移可建立如下关系:

$$\begin{cases} W_z = \int_a^{\infty} \epsilon_z dr = \frac{1}{E} \int_a^{\infty} (\sigma_{sz} - \mu \sigma_{sh}) dr \\ W_h = \int_b^{\infty} \epsilon_h dr = \frac{1}{E} \int_b^{\infty} (\sigma_{sh} - \mu \sigma_{sz}) dr \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $a$ 、 $b$ 为计算点到孔中心 $C$ 的距离, $\epsilon_z$ 、 $\epsilon_h$ 为两方向上的应变, $\sigma_{sz}$ 、 $\sigma_{sh}$ 为在极坐标系下的轴向释放应力, $\sigma_{sh}$ 、 $\sigma_{sz}$ 为在极坐标系下的环向释放应力, $E$ 为材料的弹性模量, $\mu$ 为材料的泊松比。

又由弹性力学和材料力学可知,图2中轴向和环向的释放应力 $\sigma_z$ 、 $\sigma_h$ 与 $C$ 处残余应力 $\sigma_z$ 、 $\sigma_h$ 之间有如下关系:

$$\begin{cases} \sigma_{sz} = -\frac{\sigma_z + \sigma_h}{2} \cdot \frac{R^2}{a^2} + \frac{\sigma_z - \sigma_h}{2} \left( \frac{3R^4}{a^4} - \frac{4R^2}{a^2} \right) \\ \sigma_{sh} = \frac{\sigma_z + \sigma_h}{2} \cdot \frac{R^2}{a^2} - \frac{\sigma_z - \sigma_h}{2} \cdot \frac{3R^4}{a^4} \\ \sigma_{sz} = -\frac{\sigma_z + \sigma_h}{2} \cdot \frac{R^2}{b^2} - \frac{\sigma_z - \sigma_h}{2} \left( \frac{3R^4}{b^4} - \frac{4R^2}{b^2} \right) \\ \sigma_{sh} = \frac{\sigma_z + \sigma_h}{2} \cdot \frac{R^2}{b^2} + \frac{\sigma_z - \sigma_h}{2} \cdot \frac{3R^4}{b^4} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $R$  为开孔的半径。联立(1)、(2)式,即可求解出轴向和环向的残余应力  $\sigma_z$ 、 $\sigma_h$  为

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{(D_1 + D_2)W_z + (T_2 - T_1)W_h}{D_1 T_2 + T_1 D_2} \cdot E \\ \sigma_h = \frac{(D_2 - D_1)W_z + (T_2 + T_1)W_h}{D_1 T_2 + T_1 D_2} \cdot E \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  分别为

$$D_1 = -\frac{R^2}{b}(1 + \mu), D_2 = \frac{R^4}{b^3}(1 + \mu) - \frac{4R^2}{b}, \quad (4)$$

$$T_1 = -\frac{R^2}{a}(1 + \mu), T_2 = \frac{R^4}{a^3}(1 + \mu) - \frac{4R^2}{a}. \quad (5)$$

## 4 测量误差分析

本文根据误差产生的阶段将测量系统的误差分为图像误差和算法误差两大类。图像误差定义为由于运动或成像原理导致成像单元所获得的图像与实际情况之间的偏差,例如成像单元的移动导致的平移误差。算法误差定义为以图像为输入,在对图像的处理过程中所使用的处理算法给系统测量引入的误差,例如数字散斑相关法的计算误差。图3显示了测量系统的误差模型,下面将逐个分析影响测量系统精度的各个主要误差因素,并相应地提出减少误差的方法。

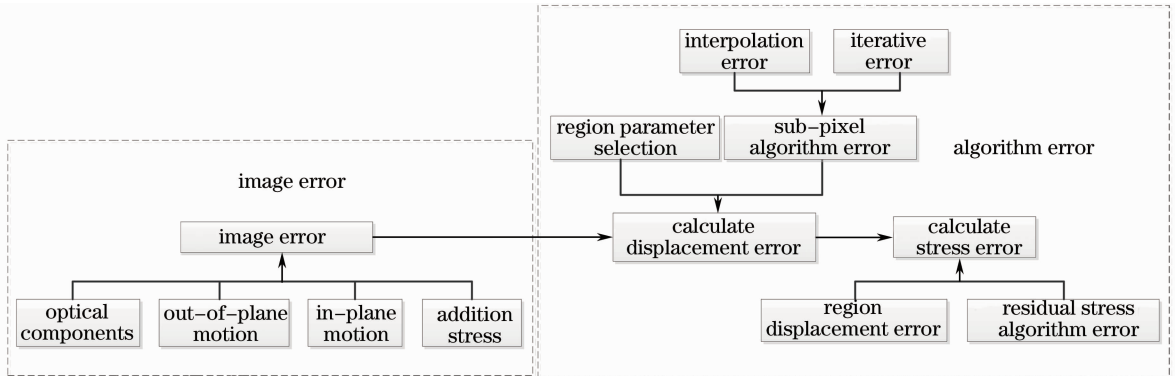


图3 系统误差模型

Fig. 3 Error model of measurement system

### 4.1 光学元件的误差

由 CCD 的成像原理可知,两幅图像记录的像素移动的精度与 CCD 的分辨率和拍摄的范围有关。分辨率越高,成像区域范围越小,则两幅图像能够记录的像素移动的精度也越高。但实际变形过程中可能发生细小的位移变化,其不能被反映在变化前后的两幅图片上,产生位移数据丢失,给测量系统引入了误差。而 CCD 分辨率的提升会导致相机价格的大幅增加,因此在实际测量过程中可通过缩小成像范围来提高测量系统图像的精度。

同时由于相机在成像过程中受到电磁干扰会在图像中产生噪声干扰,这些噪声干扰下的正常散斑的灰度给系统引入了误差,因此需要使用一定的手段来减少这些噪声的影响,当前最常用的就是使用小波减噪<sup>[10,11]</sup>。

### 4.2 曲面成像的影响

测量系统成像单元所拍摄的对象为弯管外表面的一块区域,其实际为一个曲面,但由于测量系统成像单元的视场集中于开孔区域,视场范围小,区域内曲面的曲率很小,可将其假设为平面来进行处理。这一假设给系统带来一定的原理误差,且弯管的直径越大,误差越小。

### 4.3 平面运动误差

由图1可知,成像单元在拍摄应力变化前后散斑图像的过程中发生过平移运动,由于控制单元中的平移台本身有重复定位误差,所以不可避免地会给成像单元所成的图像带来面内的平移误差。同时,虽然有夹具

夹持,但是由于钻孔操作产生的振动也可能使弯管发生位置偏移。

为了消除平移误差的影响,测量系统在使用上文所提的位移应力转换算法时,在孔的对称位置选取两个相同的计算区域。将在同一个方向上的两个区域中心点的位移值相减,即可消去在该方向上的面内运动引入的平移误差。因此针对上文中提出的位移应力转换算法,需使用两个区域的位移差值作为应力求解的输入。平面运动误差修正原理图如图4所示。其中,区域 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 分别为沿弯管轴向和环向上的4个对称小区域,设图中所示的位置为 $S_1$ 、 $S_2$ 沿弯管的轴向, $S_3$ 、 $S_4$ 沿弯管的环向。4个区域的中心点的位移为 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ ,则在轴向的位移差为 $\Delta W_{tz} = W_2 - W_1$ ,环向的位移差为 $\Delta W_{tz} = W_3 - W_4$ ,最终结果变为

$$\begin{cases} \sigma'_z = \sigma_z/2 \\ \sigma'_h = \sigma_h/2 \end{cases} \quad (6)$$

#### 4.4 离面位移误差

为了使弯管内的残余应力得以释放,就需要对弯管待测点处钻孔操作。由图1可知,钻孔操作的施力方向平行于相机光轴的方向,极有可能导致弯管试件在钻孔时发生离面位移。如使用双目测量系统,则可以测量出这一离面位移的实际值<sup>[12,13]</sup>从而消除这一误差的影响,而对于本文所提的单目测量系统,就需要通过一定的方法对这一离面位移进行消除。

离面位移误差模型如图5所示,其中 $S$ 为实际尺寸, $S_1$ 、 $S_2$ 为 $S$ 在图像中的映射。根据相机的小孔成像原理,在没有发生表面形变的情况下,由于线段 $S$ 的离面运动而在图像中产生的误差 $\Delta P$ 可表示为

$$\Delta P = S_1 - S_2 = \left(\frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_2}\right) \times a \times \frac{b_1}{a} \times S_1 = C_{lm} S_1 \quad (7)$$

在实际测量过程中,将上节所选取的两个对称区域在图中的间隔作为线段长 $S$ ,线段 $S$ 既发生变形又发生离面运动,则实际离面运动总误差 $\Delta P_{lm}$ 可认为是原长度 $S$ 产生的离面误差 $\Delta P$ 与线段变形量 $\Delta S$ 产生的离面误差 $\Delta P_b$ 之和。其中,线段变形量 $\Delta S$ 为图像中在未发生离面运动的两区域的位移差。

$$\Delta P_{lm} = \Delta P + \Delta P_b = C_{lm}(S + \Delta S), \quad (8)$$

又由于

$$\Delta S = S_t - \Delta P_{lm} = S_t - C_{lm}(S + \Delta S)$$

则有

$$\Delta S = \frac{S_t - C_{lm} S}{1 + C_{lm}}, \quad (9)$$

式中 $S_t$ 为根据变形前后两幅散斑图使用数字散斑相关法计算得到的两区域位移的差值,其中包含了离面误差,且 $S_t$ 、 $S$ 均已知。由于应力释放导致的变形在远离孔时急剧减小,所以可以认为在散斑图像的4个边缘区域不受应力释放变形的影响,而在一次离面运动中,系数 $C_{lm}$ 相同,所以可以通过计算同方向上两个边缘区域的位移差值来求解系数 $C_{lm}$ 的值,其原理如图6所示。

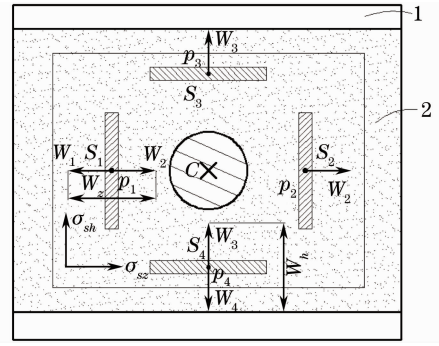


图4 平面运动误差修正原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the plane motion error amendment

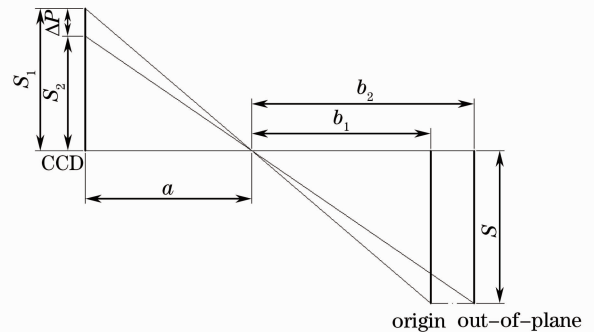


图5 离面位移误差原理图

Fig. 5 Schematic diagram of out-of-plane motion error

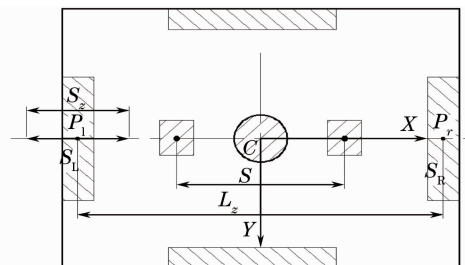


图6 离面位移修正原理图

Fig. 6 Schematic diagram of out-of-plane motion error amendment

轴向两个边缘区域  $S_R$ 、 $S_L$  的位移差为  $S_{Lz}$ ，其在图中的间隔为  $L_s$ ，认为其线段变形量  $\Delta S = 0$ ，可求解出系数  $C_{lm}$ ，再将其代入(9)式，即可获得弯管在轴向和环向的实际变形量分别为

$$\begin{cases} \Delta W_z = \frac{\Delta W_{Lz} - C_{lm} S_z}{1 + C_{lm}} \\ \Delta W_h = \frac{\Delta W_{Lh} - C_{lm} S_h}{1 + C_{lm}} \end{cases}, \quad (10)$$

式中  $\Delta W_{Lz}$ 、 $\Delta W_{Lh}$  分别为轴向和环向上两区域的位移差值， $S_z$ 、 $S_h$  为轴向和环向上两区域的间隔， $\Delta W_z$ 、 $\Delta W_h$  为修正了离面误差的两个方向上的位移差，可将其代入(3)式中，获得最终考虑离面位移误差和面内位移误差的残余应力计算公式：

$$\begin{cases} \sigma'_z = \frac{\sigma_z}{2} = \frac{E}{2(1 + C_{lm})} \frac{(D_1 + D_2)(\Delta W_{Lz} - C_{lm} S_z) + (T_2 - T_1)(\Delta W_{Lh} - C_{lm} S_h)}{D_1 T_2 + T_1 D_2} \\ \sigma'_h = \frac{\sigma_h}{2} = \frac{E}{2(1 + C_{lm})} \frac{(D_2 - D_1)(\Delta W_{Lz} - C_{lm} S_z) + (T_2 + T_1)(\Delta W_{Lh} - C_{lm} S_h)}{D_1 T_2 + T_1 D_2} \end{cases}, \quad (11)$$

式中  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $D_1$  和  $D_2$  的定义见(4)、(5)式。

#### 4.5 附加应力影响

开孔时由于刀具切削金属引起孔边塑性挤压产生的附加塑性变形，也会对结果带来误差。试验表明，随着测量点离开孔中心距离的增大，这一附加塑性变形会急剧减小<sup>[14]</sup>。由于工程上对这一误差的试验测定已十分成熟，本文所提系统参考了工程中现有的应变花和附加应变的关系来选取计算区域在散斑图中的位置，从而获得对应的附加应变量，用于最终结果的修正。如果测量系统是用于测量同批大量管件时，为了获得更加准确的结果，应通过试验来标定这一附加应力的值。

#### 4.6 变形位移求解误差

使用 DSCM 计算位移的误差可分为两个部分：整像素位移计算误差和亚像素位移计算误差。整像素位移计算阶段，由于灰度图像能够精确记录一个像素点的位置信息，DIAS 软件使用相关公式(12)式和十字搜索算法<sup>[15]</sup>，在图像质量较好的情况下，选取恰当的计算小区域的尺寸后能够使得相关系数  $C_1$  近似为 1，所以整像素位移计算阶段的误差可忽略。

$$C_1 = \frac{\{\sum \sum [(f - \bar{f}) \cdot (g - \bar{g})]\}^2}{\sum \sum (f - \bar{f})^2 \cdot \sum \sum (g - \bar{g})^2}, \quad (12)$$

式中  $f$ 、 $g$  为变形前后计算区域内的灰度函数、 $\bar{f}$ 、 $\bar{g}$  为计算区域内的平均灰度。

亚像素位移计算是数字散斑相关法的主要误差来源。DIAS 软件使用了基于灰度梯度的亚像素搜索算法(IGGA)<sup>[15]</sup>。由 IGGA 算法的原理可知，其误差主要来自于使用的亚像素插值算法误差和为了求解区域灰度超静定方程组所使用的非线性方程组算法误差。同时散斑图像的散斑颗粒尺寸和分布也会影响算法计算的精度；计算所选取的计算点周围小区域尺寸的选择也是影响算法精度的因素之一<sup>[16]</sup>。文献[15]通过使用计算机模拟数字散斑<sup>[17]</sup>进行实验，得出 IGGA 算法的测量精度在 0.01 pixel 左右时，其相对误差为 6%。

#### 4.7 残余应力求解误差

上文所提出的位移应力转换算法，在实际测量过程中，图像中局部一点处的位移值可能由于光源、灰尘等细小因素的影响而发生突变，如果只以一点处的位移作为弯管应力释放产生的变形位移，极有可能与实际位移偏差较大，从而使计算结果失真。所以在测量系统选择一个小的区域的平均位移作为区域中心点的位移，用于提高中心点处位移的精度。

此外，在位移应力转换算法中弯管残余应力状态公式的推导是基于上文提到的将图像中的钻孔区域表面近似成为平面这一假设的，这也会给系统引入一定的原理误差。

## 5 实验验证与分析

为了验证测量系统的测量精度，设计了如下实验。实验使用同一批次直径 25 mm、壁厚为 5 mm、弯曲 180°、弯曲半径为 60 mm 的钢管为测量对象，如图 7 所示。采用相同的加工工艺，使得多次重复实验的数据

具有可比性。使用电测法的测量结果为相对真值,使用的应变片为常用的三向残余应力应变片,电阻为  $119.6 \Omega$ ,灵敏系数为 2.08。实验中钻孔直径均为 1.5 mm,弯管的弹性模量  $E$  均取为 210 GPa,泊松比  $\mu$  为 0.3。图 8 为搭建的用于实验的实际测量系统。



图 7 测量对象实物

Fig. 7 Measuring object

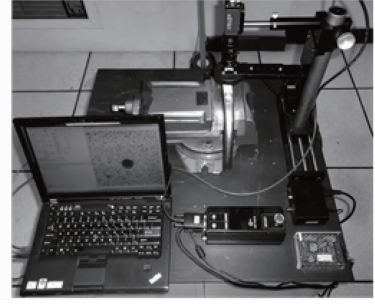


图 8 测量系统实物图

Fig. 8 Measurement system

表 1 列出了使用电测法获得的应变值和残余应力值,其轴向均值为  $\sigma_z = 0.09114$  GPa,环向均值为  $\sigma_h = 0.15535$  GPa。

表 1 电测法测量结果

Table 1 Measuring result of the strain-gage method

	$\epsilon_z$	$\epsilon_h$	$\sigma_z$ /GPa	$\sigma_h$ /GPa
1	-11	-84	0.06968	0.12148
2	-21	-129	0.11260	0.18923
Mean value	-16	-106.5	0.09114	0.15535

图 9 为 DIAS 软件在未考虑图像误差因素的影响时,散斑图像的分析过程。表 2 列出了在未考虑图像误差因素的影响时的系统测量结果。图 10 为考虑了图像误差因素影响的分析过程。表 3 列出了在考虑图像误差因素的影响时的系统测量结果。

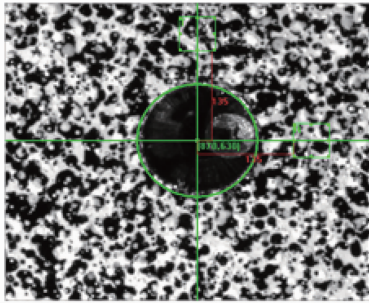


图 9 未考虑图像误差因素的图像分析

Fig. 9 Analysis process without considering image error

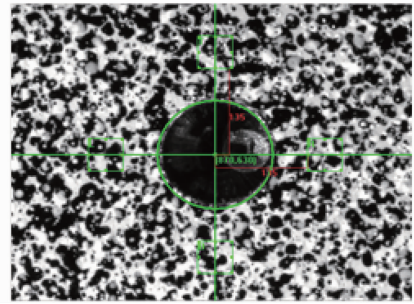


图 10 考虑图像误差因素的图像分析

Fig. 10 Analysis process considering image error

表 2 未考虑图像误差的测量结果

Table 2 Measuring result without considering the image error

	$W_z$ /pixel	$W_h$ /pixel	$\sigma_z$ /GPa	$\sigma_h$ /GPa
1	-0.42	0.82	0.03658	-1.80745
2	0.77	0.85	2.84743	2.95436
3	0.53	-0.06	1.19360	0.44719
4	-0.61	0.49	0.65745	0.09440
Mean value			1.18376	0.42212

从表 2 的数据可以看出,测量系统在未去除图像误差时,测量结果分布杂乱,受误差干扰严重,与表 1 对比可知其测量结果与电测结果相比误差较大。表 1 与表 3 的结果对比可以看出,在去除图像误差后,测量系统结果与电测法测量结果相比,其系统轴向标准差为  $\Delta S_z = 0.012041$  GPa,环向标准差为  $\Delta S_h = 0.016536$  GPa,误差稳定在 0.05 GPa 左右,是可信的。而这一误差亦可参考上文所提出的标定附加应力、

IGGA 算法等改进方法进一步减小误差、提高精度。

表 3 考虑图像误差的测量结果

Table 3 Measuring result considering the image error

	$\Delta W_z/\text{pixel}$	$\Delta W_h/\text{pixel}$	$\sigma_z/\text{GPa}$	$\sigma_h/\text{GPa}$
1	-0.04	0.12	0.05331	0.16058
2	-0.04	0.16	0.07237	0.15457
3	-0.04	0.18	0.07976	0.19222
4	-0.03	0.12	0.05935	0.17079
Mean value			0.066198	0.16954

## 6 结 论

本文针对基于数字散斑相关法的弯管残余应力测量系统,综合分析了影响测量系统精度的主要因素,并针对每个误差因素给出了应对措施。通过实验数据的对比,验证了误差因素对测量系统的影响,同时也验证了所给出的减少误差方法的正确性,为基于数字散斑相关法的测量系统的误差分析提供了有益的参考。

## 参 考 文 献

- 1 E Daxin, Ning Ruxin, Hu Xiping *et al.*. Analysis on the deformation of no-mandrel bending of minor diameter tube[J]. *Die & Mould Industry*, 2006, **32**(1): 23~26  
鄂大辛, 宁汝新, 胡新平等. 小直径管无芯弯曲变形分析[J]. *模具工业*, 2006, **32**(1): 23~26
- 2 Zhang Huaqing, Pu Qi, Dai Xiangjun *et al.*. Measurement of micro-displacement based on digital speckle correlation method[J]. *Journal of Shandong University of Technology*, 2009, **23**(1): 49~52  
张怀清, 蒲 琪, 代祥俊等. 基于数字散斑相关方法的微位移测量[J]. *山东理工大学学报*, 2009, **23**(1): 49~52
- 3 Pei Juanjuan, Ma Kun, Wen Rihui. Digital speckle correlation method used in strain measurement research[J]. *Neijiang Keji*, 2008, **29**(10): 16  
裴娟娟, 马 琨, 温日辉. 数字散斑相关方法用于应变场测量的研究[J]. *内江科技*, 2008, **29**(10): 16
- 4 Tan Yiqiu, Zhang Kui, Wu Sigang *et al.*. Application of digital speckle correlation method to the study of indirect tensile strain of asphalt mixture[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, **41**(9): 56~58  
谭忆秋, 张 魁, 吴思刚等. 应用数字散斑技术的沥青混合料劈裂应变研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, **41**(9): 56~58
- 5 Yang Hong, Yang Hanguo. Artificial speckle in the mechanical properties of the test application[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 1997, (2): 57~61  
杨 红, 杨汉国. 人工散斑在机械性能测试中的应用[J]. *电子机械工程*, 1997, (2): 57~61
- 6 Zhang Huaqing, Pu Qi, Dai Xiangjun *et al.*. Castiron crack tip's evolvment measured by DSCM[J]. *Journal of Shandong University of Technology*, 2010, **24**(1): 30~34  
张怀清, 蒲 琪, 代祥俊等. DSCM 测量铸铁裂纹尖端演化过程[J]. *山东理工大学学报*, 2010, **24**(1): 30~34
- 7 Zhou Jianwei, Wang Zhenlin, Guo Yong. The application of DSCM in measuring the mechanical characteristics of the flexible packing[J]. *Packaging Engineering*, 2004, **25**(1): 9~11  
周建伟, 王振林, 郭 勇. DSCM 变形测定新技术在柔性包装力学性能测定中的应用[J]. *包装工程*, 2004, **25**(1): 9~11
- 8 Chen Lingling, Yang Yinfei, He Ning *et al.*. Residual stress measurement based on electronic speckle pattern interferometry[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, **29**(1): 108~110  
陈玲玲, 杨吟飞, 何 宁等. 基于电子散斑干涉术的残余应力测量[J]. *传感器与微系统*, 2010, **29**(1): 108~110
- 9 Huang Zhenxian, Zhao Ruidong, Sun Ping. 3D shape measurement based on relationship between deformation and shape [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(5): 051201  
黄珍歆, 赵瑞东, 孙 平. 利用变形和形貌的关系测量三维形貌的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(5): 051201
- 10 Yao Xuefeng, Wu Zhen, Jin Guanchang. Wavelet denoising using the digital speckle correlation method[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2001, **41**(4/5): 108~111  
姚学锋, 吴 震, 金观昌. 数字散斑相关法中的小波减噪分析[J]. *清华大学学报*, 2001, **41**(4/5): 108~111
- 11 Wang Zhiyong, Wang Lei, Guo Wei *et al.*. Optimal size of speckle spot in digital image correlation method[J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, **43**(8): 674~678

- 王志勇, 王磊, 郭伟等. 数字图像相关方法最优散斑尺寸[J]. 天津大学学报, 2010, **43**(8): 674~678
- 12 Zhang Dehai, Liang Jin, Tang Zhengzong *et al.*. 3D digital speckle analysis system for dynamic strain measurement in sheet deformation[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2010, **35**(4): 27~31
- 张德海, 梁晋, 唐正宗等. 板料变形三维数字散斑应变测量分析系统研究[J]. 锻压技术, 2010, **35**(4): 27~31
- 13 Wang Hongyou, Si Xinsheng. Three-dimensional body measurement based on optimized electron speckle spectrum[J]. *Journal of Appl. Opt.*, 2010, **31**(2): 263~266
- 王洪有, 司新生. 基于优化电子散斑光谱的三维物体测量研究[J]. 应用光学, 2010, **31**(2): 263~266
- 14 Yin Bingsheng, Zhao Huaipu, Wang Xiaohong. Residual stress determination by mechanical method[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis*, 2007, **43**(12): 642~645
- 印兵胜, 赵怀普, 王晓洪. 机械法测残余应力[J]. 理化检验, 2007, **43**(12): 642~645
- 15 Jin Guanchang, Meng Libo, Chen Junda *et al.*. The progress and application of digital speckle correlation method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2006, **21**(6): 689~702
- 金观昌, 孟利波, 陈俊达等. 数字散斑相关技术进展及应用[J]. 实验力学, 2006, **21**(6): 689~702
- 16 Li Xinzhong, Dai Qin, Wang Xijun *et al.*. Selection of subset size of sub-pixel displacement registration algorithm in digital speckle correlation measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(8): 53~58
- 李新忠, 岱钦, 王希军. 亚像素数字散斑相关测量中计算窗口的选择[J]. 光电工程, 2007, **34**(8): 53~58
- 17 P. Zhou, K. E. Goodson. Sub-pixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation[J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(8): 1613~1620