

# 一种数字图像技术实现应变测量的设计与实验对比

王娟<sup>1</sup>, 卓伟<sup>2</sup>, 马绍惠<sup>3</sup>

(1. 南阳理工学院, 河南 南阳 453002; 2. 郑州大学 软件学院, 郑州 450002;

3. 河南机电高等专科学校, 河南 新乡 453000)

**摘要:** 基于数字图像处理技术设计实现了其在应变测量领域应用, 采用了位移场—牛顿迭代法、应变估计处理进行了理论设计分析; 在铝合金材料的变形测量实验中通过铝合金材料拉伸应变仪记录与数字图像设计方法对比得出: 采用数字图像应变测量与记录仪基本一致, 可以实现应变测量; 构件表面散斑颗粒大小对设计的数字图像应变测量会产生一定的影响; 文中设计的方法不仅实现了应变测量精度的改进, 还提供了一种易于实施、有效的技术手段。

**关键词:** 数字图像处理; 应变测量; 散斑图; 拉伸应变仪

## Design and Experimental Comparison of a Digital Image Technology to Achieve Strain Measurement

Wang Juan<sup>1</sup>, Zhuo Wei<sup>2</sup>, Ma Shaohui<sup>3</sup>

(1. Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473000, China; 2. Software College, Zhengzhou University,

Zhengzhou 450002, China; 3. Henan Mechanical College, Xinxiang 453000, China)

**Abstract:** In this paper, digital image processing techniques is applied in the field of strain measurement, using the displacement field—Newton iterative method, strain estimation process theoretical design analysis, the final completion of the deformation measurement of speckle pattern formation. Tensile strain gauge aluminum material by recording and digital image design in aluminum alloy material deformation measurements in contrast to the experimental results: strain measurement using digital image consistent with the recorder. Strain measurement can be achieved; component surface particle size of digital image speckle strain measurement design will have some impact. The proposed method not only achieve the design of the strain measurement accuracy, also improved to provide an easy to implement, effective techniques.

**Keywords:** digital image processing; strain measurement; speckle pattern; tensile strain gauges

## 0 引言

数字图像处理是指将图像信号转换成数字信号, 采用计算机对信号实现处理的一种过程。在现代数字图像处理及领先的光测技术的条件下, 数字图像测量学应运而生。它是利用对变形前后物体表面的数字图像进行分析之后, 得出被测物表面的变形信息<sup>[1-3]</sup>。然而尽管在 20 世纪 50 年代数字图像处理的概念就被提出, 研究人员利用计算机对图像进行处理以及获取信息的实现依然在测量领域没有得到普遍的商用<sup>[4]</sup>。最近几年, 随着 CCD (电荷耦合元件) 摄像机、图像处理等的技术方法的长足发展, 使得数字图像测量在各个领域都有了一定的应用。散斑 (通常人们把散斑看成是噪声) 作为全息图质量影响的关键元素之一<sup>[5-6]</sup>, 其研究一直以来是图像领域的热点方向<sup>[7-8]</sup>。与此同时散斑测试技术也有了突飞猛进的发展, 其经历了 4 个阶段的发展: 散斑照相法、散斑干涉技术、电子散斑干涉技术 (ESPI) 及数字散斑相关技术 (DSPI)。本文基于数字散斑技术应用位移场—牛顿迭代法、应变估计处理实现了应变测量的

设计, 通过实验验证了数字图像处理的优势与正确性, 这一设计的方法不仅实现了应变测量精度的改进还提供了一种易于实施、有效的技术手段。

## 1 数字图像处理变形测量的理论设计

### 1.1 测量的原理

DSPI 主要用于测量物体的微小变化量, 这里需首先采集参考光波和变化前的光波, 设记录平面为  $X-Y$  平面, 参考光波和变化前的物光波复振幅分布分别为  $E_r$  和  $E_{01}$ 。

$$E_r(x, y) = A_r e^{-i\varphi_r(x, y)} \quad (1)$$

$$E_{01} = A_0 e^{-i\varphi_0} \quad (2)$$

这里  $A_r, A_0$  分别为参考光与初始物光的振幅。设物体对光波不产生吸收, 变化物光波与初始物光波具有相同的实振幅, 仅仅附加一个变化了的位相  $\Delta\varphi(x, y)$ , 则变化物光波  $E_{02}$  为

$$E_{02}(x, y) = A_0 e^{-i[\varphi_0 + \Delta\varphi(x, y)]} = E_{01} e^{-i\Delta\varphi(x, y)} \quad (3)$$

物体变化前采集的光强分布为:

$$I_1(x, y) = |E_r(x, y) + E_{01}|^2 = I_r + I_{01} + 2(I_r I_{01})^{\frac{1}{2}} \cos[\varphi_0 - \varphi_r(x, y)] \quad (4)$$

$I_r, I_{01}$  分别为参考光与原始物光的光强。物体变化后采集的光强分布为:

$$I_2(x, y) = |E_r(x, y) + E(x, y)|^2 = I_r + I_{01} + 2(I_r I_{01})^{\frac{1}{2}} \cos[\varphi_0 - \varphi_r(x, y) - \Delta\varphi(x, y)] \quad (5)$$

收稿日期: 2014-01-26; 修回日期: 2014-04-08。

基金项目: 2011 年河南省教育厅科学技术研究重点项目 (12A520018)。

作者简介: 王娟 (1979-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事人工智能与计算机应用技术方向的研究。

将式 (17) 减去式 (18) 可以得到相关条纹光强分布  $\Delta I(x, y)$

$$\Delta I(x, y) = I_1 - I_2 = 2(I_r I_{o1})^{\frac{1}{2}} \{ \cos[\varphi_0 - \varphi_r(x, y)] - \cos[\varphi_0 - \varphi_r(x, y) - \Delta\varphi(x, y)] \} = 4(I_r I_{o1})^{\frac{1}{2}} \sin[\varphi_0 - \varphi_r(x, y) + \frac{1}{2}\Delta\varphi(x, y)] \sin[\frac{1}{2}\Delta\varphi(x, y)] \quad (6)$$

本次设计为一维测量, 最佳适用理论为离面位移测量理论。

### 1.2 应变估计的处理

众所周知, 对于材料的力学性能测试以及材料的结构应力计算里, 应变场是描述材料性能的最明显的指标参数。对位移进行微分处理, 也即: 若位移梯度能够利用 Newton-Raphson、遗传算法运算处理, 就能有应变场。想要将离散位移数据里的噪声滤除得更彻底一些, 以及获得更好的平滑性, 应试图将函数进行拟合合成二维一次多项式。此时, 经拟合的位移场是:

$$u(m, n) = a_0 + a_1 m + a_2 n$$

$$v(m, n) = b_0 + b_1 m + b_2 n \quad (7)$$

其中:  $m, n = -M$ ,  $M$  是局部位移场中各数据点的局部坐标。 $a_0, \dots, b_2$  是需要求出的拟合多项式系数。 $u(m, n)$ 、 $v(m, n)$  是离散位移数据点。经过拟合之后, 可求得系数  $a_0, b_2$  后, 小变形后的应变分量, 以下列公式作运算:

$$\epsilon_m = \frac{\partial u}{\partial m} = a_1; \quad \epsilon_n = \frac{\partial v}{\partial n} = b_2;$$

$$\gamma_{mn} = \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{\partial v}{\partial m} = a_2 + b_1 \quad (8)$$

面向边界点、孔洞、裂纹附件区域, 因某些位置位移数据里含有的有效数据点的个数, 比  $(2M+1) \times (2M+1)$  要小, 当要对系数矩阵  $\mathbf{M}$  以及位移向量  $u(m, n)$ 、 $v(m, n)$  进行运算时, 这些无效的数据点不予考虑。这样一来, 就只需求解 3 个未知数。所以, 应变计算窗口中的有效数据点只需多于 3 个。一般情况下, 应变计算窗口的范围是在  $11 \times 11 - 21 \times 21$  点之间, 所以, 按照上述方式进行处理, 可行性较高。

## 2 铝合金材料的变形测量实验

### 2.1 散斑设计处理

想要获得较高的相关系数, 就要提高数字图像相关方法的精确度。就需要在试件表面制作人工散斑。制斑技术在数字图像相关测试过程是非常关键的技术组成部分。对于制斑技术的处理的好坏, 关系到最终的测试结果。制造人工散斑, 先将被测试件的表面做抛光打毛, 有精细结构。接着试件表面涂漆, 和摄像机同轴方向的光照明, 可以有非常明显的反差。衡量人工散斑的优劣, 关键是要看散斑的大小以及灰度对比程度这两个指标参数。在实际实验里, 要寻找到一种合适的随机散斑方案。这样得到的散斑不仅可以达到相机的分辨率要求, 能够采集到较高质量的数字散斑图像, 而且还让其对计算相关的较为灵敏, 可以得到较高精度的数据。通常情况下, 较小、高对比度的散斑图会更加便于提升计算精度。若图像里有较大的斑点出现, 就不便于提升运算精度。

### 2.2 单向拉伸试验

材料在受到外力载荷时, 所表现出的变形及破坏的特性, 即是材料的力学性能。其主要参数指标有: 强度、硬度、韧性以及疲劳强度等。一般在常温、静载下拉伸试验是确立材料力学性能的最基本试验。采用该实验可测得材料在最初受力一直

到破坏失效整个过程里的拉伸曲线, 应力与应变之间的关系曲线即是  $\sigma \sim \epsilon$  曲线, 如图 2 所示。根据曲线特征一般划分成 4 个阶段研究材料力学性能。4 个阶段分别为: 弹性阶段、屈服阶段、强化阶段及颈缩阶段。

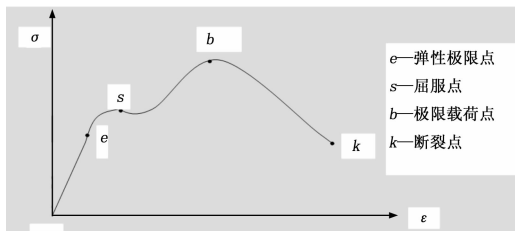


图 1 应力应变曲线过程

这里的材料屈服表现出很突出的塑性变形, 然而零件的塑性变形会对机器正常运行有一定的影响。因此, 屈服强度  $\sigma_s$  是反映强度的一个关键参数。一般由塑性材料做成的构件, 在拉断之前就有了变形, 而不是之前的形状以及尺寸。此时, 就无法正常工作。因此, 对元件进行检测有无变形, 是非常关键的环节。试件外层用黑、白两色漆制作为随机散斑, 见图 2。

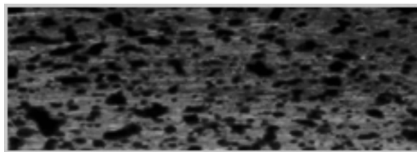


图 2 经喷漆处理后的试件表面图像

采用铝合金的构件, 其弹性模量  $E = 72 \text{ GPa}$ , 弹性强度  $\sigma_p = 140 \text{ MPa}$ 。处于弹性阶段时, 应力和应变的关系:

$$F = \sigma_p \times A = E \times \epsilon$$

这里的构件的截面积用  $A$  来表示, 应变用  $\epsilon$  表示。这里使用的铝合金的材料, 处于弹性阶段中, 可以承受的拉力最大值  $1680 \text{ N}$ 。此时, 若拉力是  $100 \text{ N}$ , 相应的应变值是  $115.7 \times 10^{-6}$ 。

### 2.3 实验结果分析

把采集出的图像通过使用软件作处理。最后将计算的结果和应变仪或引伸计所记录的数据对比, 即是该方法的相对运算精度。相关函数、亚像素位移运算方式等多方面都会影响数字图像相关方法的最终数据结果。依照前面对模拟散斑图的分析, 这里选  $41 \times 41 \text{ pixels}$  的子区, ZNSSD 相关函数做计算。在第一组实验, 使用引伸计记录构件在拉伸时的位移。伸长量和最初长度的比值, 就得到其应变值。把数字图像相关法算出的最终数据结果与位移值、应变值作对比, 见图 3。

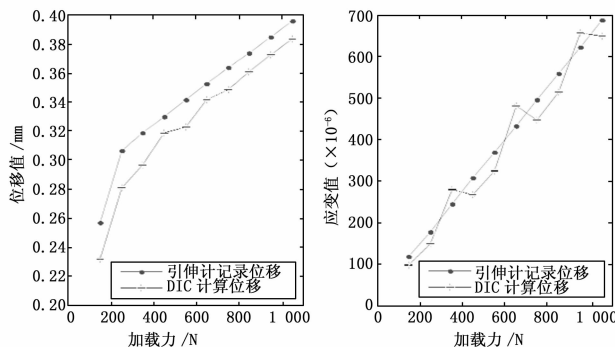


图 3 引伸计记录值与数字图像的对比

第二组实验是在构件的后表面安上应变片, 通过使用应变仪可以获得其在拉伸的过程里的应变值。应变仪获得的应变值和数字图像相关方法计算应变值, 其对照的结果如图 5 所示。

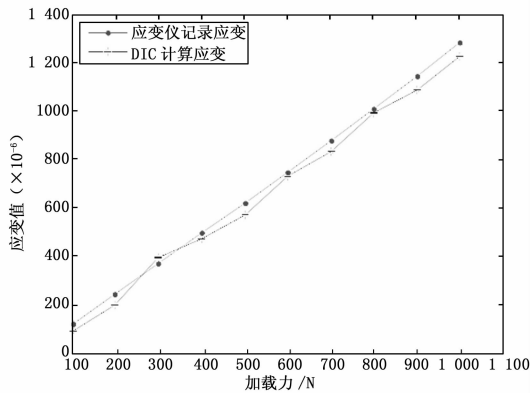


图 4 应变值实验的对比

由图 3、4 的图中结果可知, 采用数字图像相关方法运算得到的数据, 和采用引伸计测量的位移以及应变值, 进行对比基本相似。两种方法得出的应变值是呈现上升的走向, 上述数据表明了设计的数字图像应变测量是可选的, 精确度方面误差较小。

2.4 实验误差分析

在实验里, 被测构件的散斑颗粒大小以及其不完全垂直、表面有些区域反光等多方面因素, 都可能是误差出现的原因。想要更便于观察最终运算数据结果受散斑颗粒大小的影响程度, 在构件的外层喷上漆, 从而形成随机散斑。控制喷头和构件间距离, 以控制散斑形成的大小。散斑大小不一样的构件做一样的拉伸试验, 试验的环境以及参数都一样, 这样就可以比较出散斑大小影响精度的程度。现在经过喷漆, 随意地形成了几组大小不一的散斑颗粒: 34.83、57.69、118.84、171.62、191.41、349.3、1 174.77 (单位是平方像素)。将这几组构件做一样的拉伸试验, 每次均增加 120 N, 以对照两种不同方法的相对误差。这样即可得出散斑大小影响实验的程度, 可以为后面要做的其他测试实验, 给出最优散斑大小的参考依据。当散斑颗粒为 350.23 平方像素时, 采用应变仪与数字图像相关两种方法得出的应变值的相对误差, 见图 5。

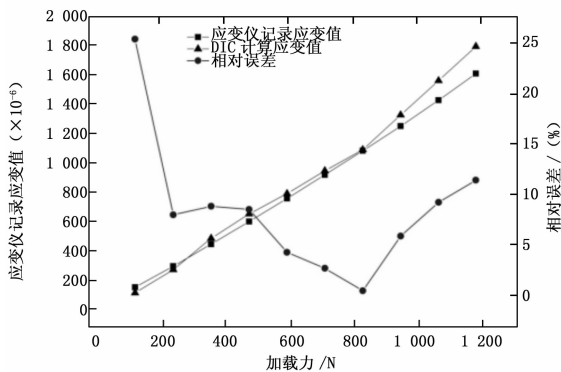


图 5 散斑大小 350.2 平方像素时的应变对比与相对误差

在别组的构件都做一样的实验, 可以知晓散斑大小不一样, 会有相对误差, 此时均去绝对值。见表 1。由表 1 可知, 散斑颗粒如果过大或者是过小, 都会有较大的运算误差。也反映了构件表面散斑颗粒大小与最终的运算精度有着较大的影响。虽散斑较大, 较易观察数据; 但会引起有相对误差存在。由误差结果可知, 目前设计的系统对于较大的散斑应用还存在一定的局限性, 但相对于传统的应变仪的测量已经有了明显的改进。

表 1 实验计算值的对比

设计的加载力	位移	Dic 位移	应变	Dic 应变
300	0.26	0.23	150×10 <sup>-6</sup>	130×10 <sup>-6</sup>
600	0.35	0.35	400×10 <sup>-6</sup>	350×10 <sup>-6</sup>
800	0.37	0.37	480×10 <sup>-6</sup>	460×10 <sup>-6</sup>
1200	0.45	0.40	720×10 <sup>-6</sup>	700×10 <sup>-6</sup>

3 结论

在如今的测量技术中, 由于数字图像相关方法自身具有较为独特的性质, 所以在测量应用领域中占据着非常重要的地位。文中研究的数字图像应变测量方法, 无论是从理论的角度, 还是在实际应用的方面, 都有着一定的社会意义以及价值。此方法有着明显的优势, 能够解决其他测量方法不能实现的问题。而因现今, 高空间及时间分辨率的图像采集设备不断地出现, 该方法还将应用于新的研究领域较为方便。文中以铝合金构件做拉伸试验, 在提高精度的处理方法上, 实现了一些易于实施、有效的技术手段。

参考文献:

- [1] Li J Y, Lau A, Fok A S L. Application of digital image correlation to full-field measurement of shrinkage strain of dental composites [J]. Journal of Zhejiang University—Science A (Applied Physics & Engineering), 2013, 01: 1-10.
- [2] Dian L, Lin J P, Min J Y, et al. Necking of Q&P steel during uniaxial tensile test with the aid of DIC technique [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 03: 448-453.
- [3] Deformation field around the stress induced crack area in sandstone by the Digital speckle correlation method [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2009, 03: 661-672.
- [4] Park J H, Kang D J, Shin M S, et al. Easy calibration method of vision system for in-situ measurement of strain of thin films [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, S1: 243-249.
- [5] A Brief Review and Prospect of Experimental Solid Mechanics in China [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2010, 06: 498-548.
- [6] Digital Speckle Correlation Method Improved by Genetic Algorithm [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2003, 04: 366-373.
- [7] A New Method for Constructing Digital-Strain-Field-Images from Moire Patterns [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 1990, 01: 16-22.
- [8] Smith L M. Whole field strain measurement of high strength steel under plain strain condition [J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2011, S1: 320-324.