

数字图像相关中的裂纹变形测量方法

付白强¹, 王立忠^{1,2}, 张振¹, 赵建博², 马时凯¹, 韩红亮¹

(1. 新疆大学机械工程学院, 830046, 乌鲁木齐;

2. 西安交通大学机械制造与系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了解决传统数字图像相关法(DIC)对变形较大的裂纹边缘测量时出现的裂纹底色导致匹配相关性差、测量精度低的问题,提出一种引入高斯加权系数的裂纹边缘变形测量方法。该方法首先根据灰度梯度平方和比较算法自动调节匹配子区的高斯中心点位置;然后,通过恒定位移填充模拟试验确定高斯加权系数中高斯标准差的适用范围;最后,对传统 DIC 的相关系数进行高斯加权,得到新的相关系数。将所提方法与传统 DIC 方法和种子点方法分别应用于数字散斑模拟图像的刚体平移试验和 Q235 试件单向拉伸试验,测量开裂过程中图像的位移,结果表明:传统 DIC 测量方法不能得到完整的裂缝边缘区域的位移场,而所提方法能够准确测量出完整的裂缝区域的位移变化;传统 DIC 方法的测量精度仅为 0.05 像素,而所提方法的测量精度可达到 0.01 像素;所提方法在高斯标准差为 1~6.5 像素范围内具有最佳的匹配精度。

关键词: 数字图像相关法;高斯加权;裂纹边缘;位移场

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202110020 **文章编号:** 0253-987X(2021)10-0174-10



OSID 码

A Measurement Method of Crack Deformation in Digital Image Correlation

FU Baiqiang¹, WANG Lizhong^{1,2}, ZHANG Zhen¹, ZHAO Jianbo²,
MA Shikai¹, HAN Hongliang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor matching correlation and low measurement accuracy caused by crack bottom color in traditional digital image correlation (DIC) method when measuring crack edge with large deformation, a measurement method of crack edge deformation based on Gaussian weighting coefficient is proposed. Firstly, the position of the Gaussian center in the matching sub-region is automatically adjusted according to the gray gradient sum of squares comparison algorithm. Then, the application scope of Gaussian standard deviations in Gaussian weighting coefficient is determined by constant displacement filling simulation experiment. Finally, a new correlation coefficient is obtained by Gaussian weighting the correlation coefficient of traditional DIC. The proposed method, the traditional DIC method and the seed point method are applied to the rigid body translation experiment of the digital speckle simulation image and the uniaxial tensile experiment of the Q235 specimen, respectively, to measure the displacement of

the image during the cracking process. The results show that the traditional DIC method cannot get the complete displacement field of the crack edge area, but the proposed method can accurately measures the displacement variation of the complete crack area. The accuracy of the traditional DIC method is only 0.05 pixels, while the measurement accuracy of the proposed method can reach 0.01 pixels, and it has the best matching accuracy in the Gaussian standard deviation range from 1 to 6.5 pixels.

Keywords: digital image correlation method; Gaussian weighting; crack edges; displacement field

在实际工程中,裂纹变形场的测量对于衡量材料的性能是非常重要的,测量材料裂纹的大小以及延伸方向是质量检验中的关键环节^[1]。

常见的测量物体裂纹方法有:接触式测量和非接触式测量。接触式测量常用引伸计方法,但引伸计只能对待测物件某个较小的区域位置进行测量,不能测量得到裂纹延伸的方向和裂纹区域的位移场变化^[2]。非接触式测量有激光三角法、莫尔投影法^[3]和数字图像相关法^[4-5]等,前两者方法对光照条件和测量平台要求较为严苛,在不满足条件时其测量效率和精度会受影响,而后者数字图像相关法(DIC)在测量时对环境的要求相对较低,并且能够测量小而连续的位移。然而,在实践中,通常会遇到较大的不连续的位移场(如裂缝的出现)^[6],针对此问题,潘兵等人提出一种将整像素位移搜索和基于微区统计性质的亚像素位移梯度算法,能够精确的测量得到位移变化数据,但在测量较大变形区域时精度不高^[7]。Chen 等人首次将散斑技术应用到拉伸试验中进行测量,但测量结果精度不高^[8],张尧等人用 DIC 方法测量模拟散斑的位移变化试验,发现测量结果与理论位移变化一致^[9],孙强等人在爆炸载荷作用下用 DIC 测量裂缝,得出爆炸加载条件下脆性材料裂纹扩展随能量的释放呈循环阶梯式递减排展^[10]。俞海等人将数字梯度敏感法应用在静态断裂力学试验中,得到裂纹尖端区域的局部变形场和断裂特性^[11]。刘纲等人提出修正的自适应十字模式搜索法进行整像素位移解算^[12],但其方法测量需要物体变形是连续的,不适用于测量裂缝因突变产生的变形。廖健等人采用 DIC 方法计算得到全场位移和应变数据,在此基础上分析得到了水平位移场及应变场,通过与传统位移计所得到的位移数据进行对比,验证了该方法的有效性^[13]。

上述文献使用 DIC 方法计算针对的是小而连续的位移变化情况。在实际工况中,试件变形较大时则需要采用 DIC 大子区半径进行匹配,但因试件变形大而导致的裂纹底色会大大降低 DIC 的匹配

精度甚至无法完成裂纹区域的匹配。因此,本文针对降低裂纹底色等边缘影响匹配的问题,提出一种基于大匹配半径的 DIC 粗匹配改进方法,以高斯加权过后的数字图像相关系数作为新的相关系数,根据灰度梯度平方和比较算法自动调节高斯中心点的位置,通过模拟试验得到高斯标准差的区间范围,以此增加散斑区域匹配权重,降低裂纹底色区域的匹配权重,减小裂纹底色对匹配的影响。通过模拟试验和拉伸试验验证本文所提方法的有效性,结果表明,本文所提方法相比较传统 DIC 匹配方法精度更高,拉伸试验结果表明本文方法能够匹配传统 DIC 方法匹配失败的裂纹区域。

1 裂纹边缘变形的数字图像相关法

1.1 传统的数字图像相关法

数字图像相关法(DIC)是对变形前的散斑图像(基准图像)和变形后的散斑图像(变形图像)进行匹配^[14-18]的一种方法,匹配区域的相似程度通过预先定义的数学标准(相关系数)来衡量,根据搜索算法来寻找选用的相关系数取得最大时的区域,原理如图 1 所示。

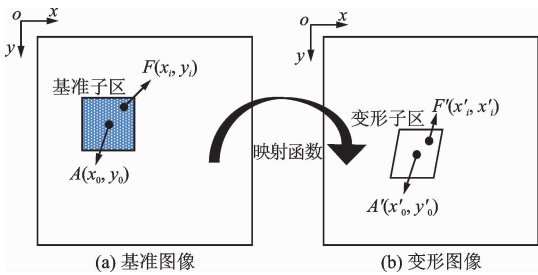


图 1 数字相关法原理图

Fig. 1 A principle diagram of digital correlation method

采用数字相关法中的搜索算法求取相关系数最大值通常有两个过程:首先,进行整像素搜索即为粗匹配过程,以基准图像中的基准点 $A(x_0, y_0)$ 为中心,取边长为 $(2M+1)$ 像素的矩形方框作为计算子区,通过相应的搜索方法计算变形图像中多个点的

相关系数,选择相关系数最大值对应的搜索点作为 $A(x_0, y_0)$ 的匹配点 $A'(x'_0, y'_0)$,此匹配过程为数字图像相关法的粗匹配;然后求取 A' 点与 A 点之间的像素差值即为 u 和 v 方向上的位移,获得整像素级的位移分量;最后,在整像素搜索结果的基础上进行细化,即亚像素搜索。

$A(x_0, y_0)$ 移动到 $A'(x'_0, y'_0)$,期间经过平移、旋转和拉伸,因此要考虑点的位移量和导数项,导数项表示变形后的坐标变化,其变化关系如下

$$\begin{aligned} x' &= x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ y' &= y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{aligned} \quad (1)$$

式中: u 和 v 分别为基准子区中心点 A 变形后 x 方向上的位移和 y 方向上的位移。

传统 DIC 常用的两个相关系数为归一化互相关系数和归一化最小距离平方和系数^[19],表达式如下

$$C_{NCC} = \sum_{i=-M_j}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) g(x'_i, y'_j)}{f \bar{g}} \right] \quad (2)$$

$$C_{NSSD} = \sum_{i=-M_j}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)}{\bar{f}} \right]^2 \quad (3)$$

式中: C_{NCC} 和 C_{NSSD} 分别为归一化互相关系数和归一化最小距离平方和系数; $f(x_i, y_j)$ 和 $g(x'_i, y'_j)$ 分别为位移前后对应点的灰度值; $\bar{f}$ 和 $\bar{g}$ 分别为参考图像和变形图像对所选子区内每个像素灰度平方求和后,再计算其算术平方根后的结果,计算公式如下

$$\bar{f} = \sqrt{\sum_{i=-M_j}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)]^2} \quad (4)$$

$$\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M_j}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j)]^2} \quad (5)$$

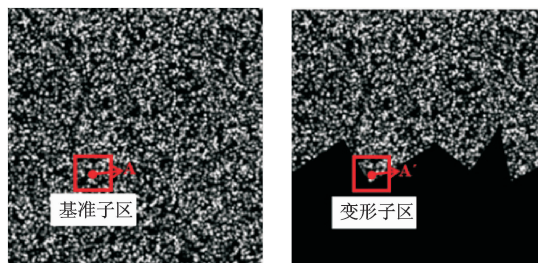
1.2 加权相关系数的 DIC 匹配

为了提高粗匹配的搜索精度,本文提出一种高斯加权的数字图像相关法,本文方法是对传统 DIC 法中的相关系数引入高斯加权系数,合理地分配匹配权重,提高了搜索精度。

图 2 为形成裂纹前后子区变形情况。变形子区图像是基于 OpenCV 视觉处理开源软件库对基准子区进行图像处理得到的裂纹图。图 2a 中,基准子区未形成裂纹,而在图 2b 变形图像中已经形成裂纹,此时变形子区中会有一部分变为裂纹底色,从而会影响后续相关系数匹配的精度。

针对上述问题,本文在传统 DIC 粗匹配的基础上,提出用高斯加权后的传统相关系数作为新的相关系数,并根据灰度梯度平方和算法自动选取最佳

的高斯中心点,合理地分配匹配权重以减小裂纹底色和变形给匹配带来的影响。



(a) 基准子区

(b) 变形子区

图 2 形成裂纹前后子区情况图

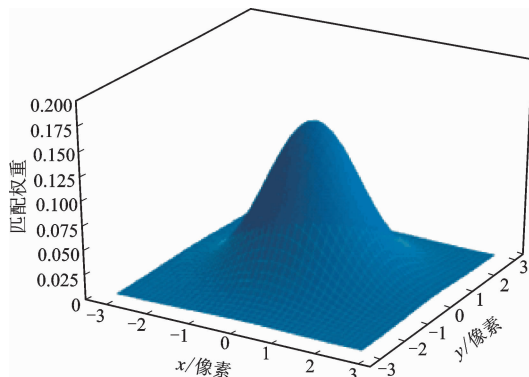
Fig. 2 A diagram of subregions before and after crack formation

1.2.1 相关系数加权法 传统的相关系数对于变形子区的每个像素的权重大小都相同,当裂纹区域时变形子区有一半为裂纹底色,会严重影响匹配精度,本文引入了高斯加权系数,在子区大小不变的条件下,合理地分配子区中各个区域的匹配权重,虽然选择小的子区在一定程度上能够减小裂纹底色对匹配的影响,但子区尺寸过小将不能提供足够的图像信息。为了在 DIC 中实现可靠的相关性分析,子区的大小应该足够大,这样子区才能包含一个足够显著的强度模式,以区别于其他子区^[20]。高斯加权系数的计算公式如下

$$\lambda(x, y) = \frac{\exp\{-(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 / 2s^2\}}{2\pi s^2} \quad (6)$$

式中: $\lambda(x, y)$ 为子区中不同像素点的加权系数; (x, y) 为子区中任意像素点的图像坐标; (x_0, y_0) 为高斯中心点的图像坐标; s 为高斯分布标准差。

高斯加权系数的三维曲面是一个钟形曲面,如图 3 所示。高斯加权系数中的参数 s 为高斯分布标准差,高斯标准差越大的曲面越平滑,越小越陡峭,距离高斯中心点越远的点的灰度值权重越小。



(a) $s=5$

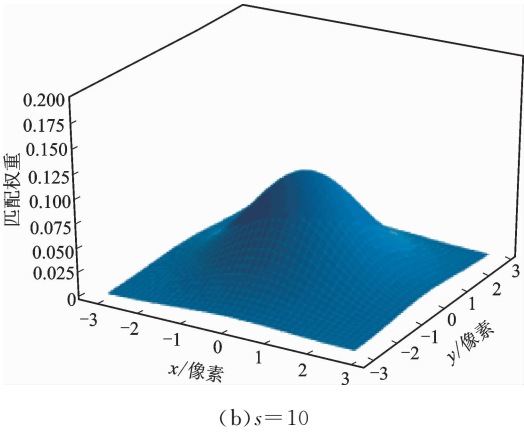


图 3 高斯加权系数的三维图像

Fig. 3 A three-dimensional image of Gaussian weighting coefficient

高斯加权系数可以与归一化互相关系数和归一化最小距离平方和系数进行结合,形成高斯加权归一化相关系数 C_{GNCC} 和高斯加权归一化最小距离平方和系数 C_{GNSSD} ,表达式如下

$$C_{GNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \{ [\lambda(x_i, y_j) f(x_i, y_j)] \cdot [\lambda(x_i, y_j) g(x'_i, y'_j)] / \overline{\lambda f} \overline{\lambda g} \} \quad (7)$$

$$C_{GNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \{ [\lambda(x_i, y_j) f(x_i, y_j)] / \overline{\lambda f} - [\lambda(x_i, y_j) g(x'_i, y'_j)] / \overline{\lambda g} \}^2 \quad (8)$$

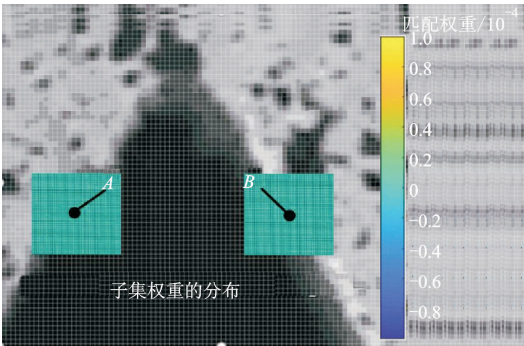
式中: $\overline{\lambda f}$ 和 $\overline{\lambda g}$ 为两个变量乘积的平均值,其计算公式如下

$$\overline{\lambda f} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [\lambda(x_i, y_j) f(x_i, y_j)]^2} \quad (9)$$

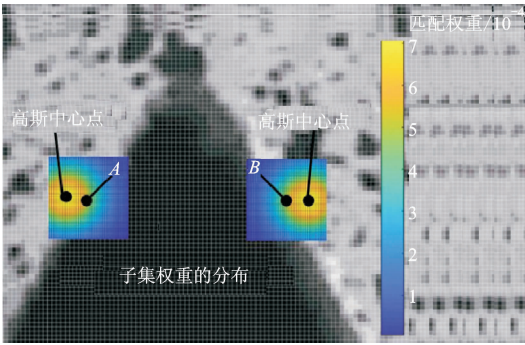
$$\overline{\lambda g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [\lambda(x_i, y_j) g(x'_i, y'_j)]^2} \quad (10)$$

图 4a 为高斯中心点周围匹配权重的分布图。由图可见,当高斯中心点在试件上时,会使相关系数在试件上的权重增加,从而提高匹配精度。

1. 2. 2 自动调整高斯中心点位置 传统 DIC 法对



(a)传统系数未加权



(b)高斯加权系数

图 4 相关系数权重分布图

Fig. 4 A principle diagram of weight distribution

变形子区匹配时,其相关系数对子区内的每个像素点取相同的匹配权重值,较大的裂纹底色会严重影响其匹配精度。如图 5a 所示,为了确保高斯中心点在非裂纹底色区域,本文方法提出将变形子区平均划分为 4 个区域,以灰度梯度平方和(SSG)最大区域的中心作为高斯中心点。

在对变形子区匹配时,匹配的子区半径大小没有变化,离高斯中心点近的非裂纹底色区域匹配权重远远大于距离远的裂纹底色区域匹配权重,降低了裂纹底色对变形子区匹配时的影响,提高了对变形子区的匹配精度。为了减少计算量,对 SSG 求平方根,公式如下

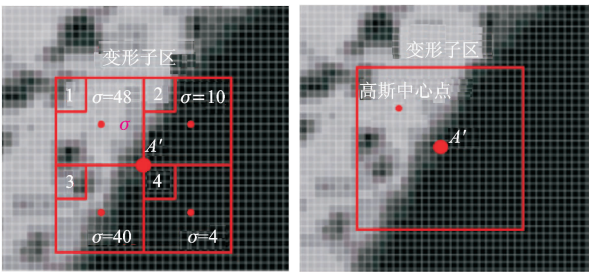
$$\sigma = \sqrt{x_{SSG}^2 + y_{SSG}^2} \quad (11)$$

$$X_{SSG} = \sum_{i=-M}^{M-1} \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f(x_{i+1}, y_j)]^2 \quad (12)$$

$$Y_{SSG} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^{M-1} [f(x_i, y_j) - f(x_i, y_{j+1})]^2 \quad (13)$$

式中: X_{SSG} 为区域的 x 方向的灰度梯度平方和; Y_{SSG} 为区域的 y 方向的灰度梯度平方和。

如图 5a 所示的变形子区,分区后的 4 个区域中,



(a)变形子区分区

(b)高斯中心点位置

图 5 高斯中心点位置的选定原理

Fig. 5 Position of selected Gaussian center point

区域1的 σ 最大,此区域中心点作为高斯中心点,如图5b所示。

1.3 恒定位移的裂纹填充模拟

为验证上述方法是否能减小裂纹底色对匹配精度的影响和求出适用的高斯标准差大小的范围,本文提出了一种恒定位移的裂纹填充模拟方法。图6为本文方法的模拟试验流程。

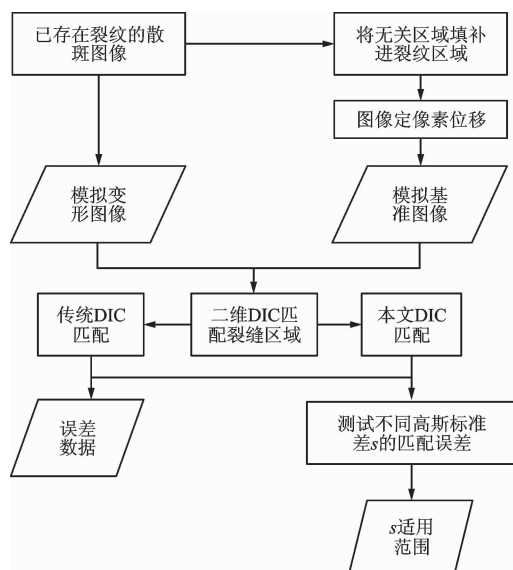
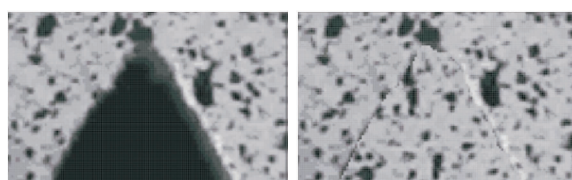


图6 本文方法的模拟试验流程图

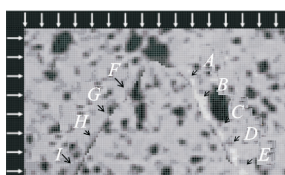
Fig. 6 A flow chart of simulation experiment

以图7a裂纹边缘图作为模拟测量对象,基于OpenCV图像处理的方法,将图中裂纹底色用不相干的灰度区域填充,如图7b所示;然后,将图7b向 u 和 v 方向分别移动8个像素形成图7c。



(a) 裂纹边缘图

(b) 像素填补图



(c) 整像素位移图

图7 图像处理过程

Fig. 7 Image processing process

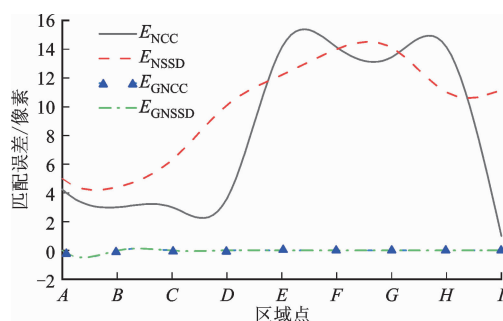
以图7c模拟未形成裂纹时的基准图像,图7a模拟形成裂纹后的变形图像,取9个点(A~I点)作为匹配点,对两张图像分别进行本文方法和传统

DIC方法匹配。测量出的像素位移值与标准值做比较,得出误差。误差计算公式如下

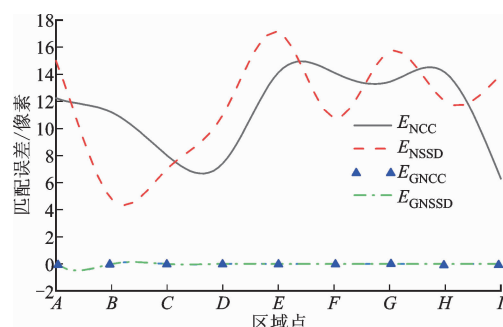
$$E_m = \sqrt{(u_m - u)^2 (v_m - v)^2} \quad (14)$$

式中: u_m 和 v_m 分别为实际测得的 u 方向和 v 方向的位移值; E_m 为位移误差值。

令 E_{NCC} 和 E_{NSSD} 分别表示为传统DIC方法的归一化互相关系数误差和归一化最小距离平方和系数误差, E_{GNCC} 和 E_{GNSSD} 分别表示为本文方法的归一化互相关系数误差和归一化最小距离平方和系数误差。子区半径 M 的大小分别选15和20像素,高斯分布标准差 s 设定为3.5像素,根据灰度梯度平方和比较算法自动调节匹配子区的高斯中心点位置。传统方法与本文方法匹配误差如图8所示。



(a) $M=15$ 像素



(b) $M=20$ 像素

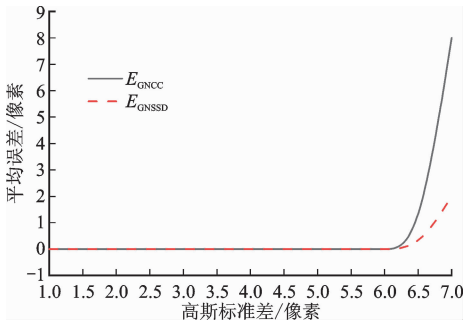
图8 匹配误差图

Fig. 8 A diagram of Matching error

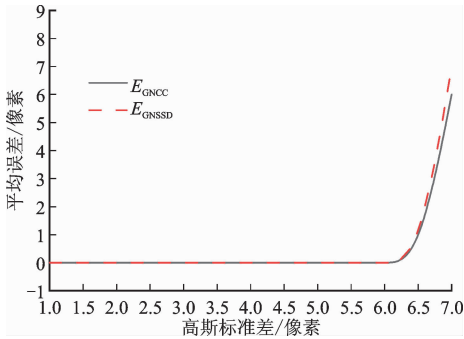
由图8可以得到两种方法的匹配误差。 $M=15$ 像素时, E_{NCC} 和 E_{NSSD} 的平均误差为7.85像素和9.79像素; $M=20$ 像素时 E_{NCC} 和 E_{NSSD} 的平均误差为11.224像素和11.937像素,而 E_{GNCC} 和 E_{GNSSD} 的平均误差都接近像素。粗匹配误差大于7像素表明匹配失败,通过模拟结果得出,本文方法比传统DIC匹配方法更加精确。

下一步,确定高斯标准差 s 的适用范围。 M 分别设为15和20像素,以0.5为差值,计算 $s=1$ 像素 $\sim s=7$ 像素阶段内的平均误差,结果如图9

所示。



(a) $M=15$ 像素



(b) $M=20$ 像素

图 9 不同高斯标准差的误差图

Fig. 9 Error diagrams of different Gaussian standard deviations

由图 9 可知, s 在 1~6.5 像素范围内都能够消除裂纹底色的影响, 准确匹配裂纹边缘区域。由于每种裂纹的形成有不同的变形情况, 且此模拟场未加入变形因素, 因此具体 s 的设置应根据试验效果适当调小。

2 试验方案

为了验证本文方法在真实试验中是否有效, 选用 Q235 试件进行拉伸试验。验证位移变化的测量精度, 一般是与引伸计结果作对比, 但由于引伸计只能得到其标距内的平均应变, 且标距范围较大, 因此, 无法测量得到裂缝边缘的微小位移, 所以本文方法采用精度较高的种子点方法进行精度对比。

选取传统匹配算法无法匹配出的区域用本文方法和种子点方法同参数匹配, 匹配结果与种子点匹配方法结果^[21]对比。本文所用的 XTDIC 测量系统包含种子点匹配算法, 图 10 为对比验证流程图。

2.1 裂纹变形测量视觉测量系统

本文对裂纹边缘测量的设备是由西安交通大学自主研发的 XTDIC 变形测量系统和一台小型拉伸机, 本文在 XTDIC 变形测量系统中增加了高斯加

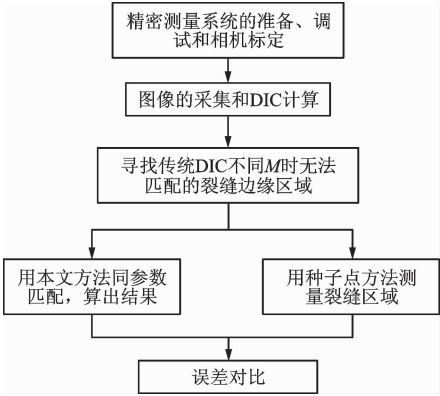


图 10 对比验证流程图

Fig. 10 A flow chart of precision comparison

权模块。前期测量准备的过程有试件的散斑喷涂、试件缺口的制备、器材的布置, 之后进行相机的标定和图像的采集, 最后, 对采集到的图像进行三维 DIC 匹配。

此试验系统可以设置传统测量方法和种子点匹配测量方法, 传统测量方法的相关系数可用归一化最小距离平方和相关系数, 本文方法的相关系数选用加权后的归一化最小距离平方和系数。

拉伸试验设备如图 11 所示, 本文所采用的 DIC 测量系统主要包括两台 CCD 工业相机(相机型号为 Basler acA1920-40 μm)、一台固定三脚架、LED 补光灯、同步控制箱、高性能计算机。采用的相机分辨率为 $1\,920 \times 1\,200$ 像素, 成像尺寸为 $128\text{ mm} \times 96\text{ mm}$, 每个像素对应的物理量为 0.067 mm , 拉伸部分主要需要一台精密拉伸机。测量时, 首先由测量系统进行标定和采集, 后开启拉伸机拉伸试件。



图 11 拉伸试验设备图

Fig. 11 Drawing of tensile test equipment

3 试验结果分析与讨论

3.1 试验试件制备

试验采用 Q235 钢板试件, 如图 12 所示, 长度为 75 mm , 厚度 1 mm , 宽度 20 mm , 试件的平行长度中间处用手持砂轮磨出约宽 1 mm 深 3 mm 的凹槽, 便于拉伸试件时在此处出现裂纹。为增加灰度

特征,用哑光的黑、白漆先后喷涂。

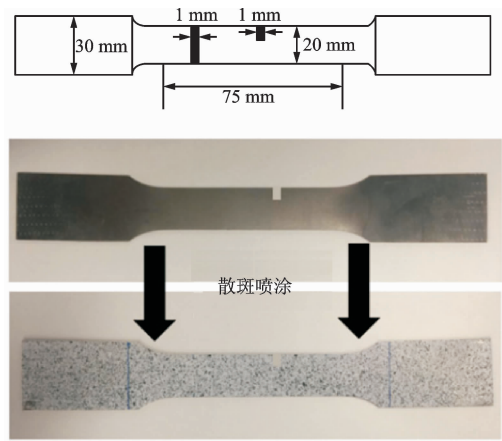


图 12 试件图
Fig. 12 Specimen diagram

3.2 试验参数

本文相机标定用的是系统自带的标定方法。拉伸机的工作原理是下方固定,向上恒定速度拉伸,拉伸过程 LED 灯为常亮状态,试验参数如表 1 所示。

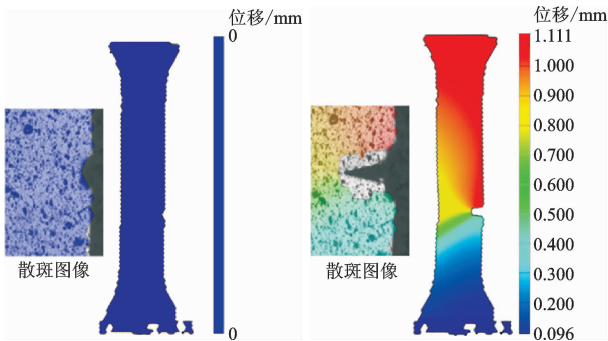
表 1 试验参数

Table 1 Experimental parameter

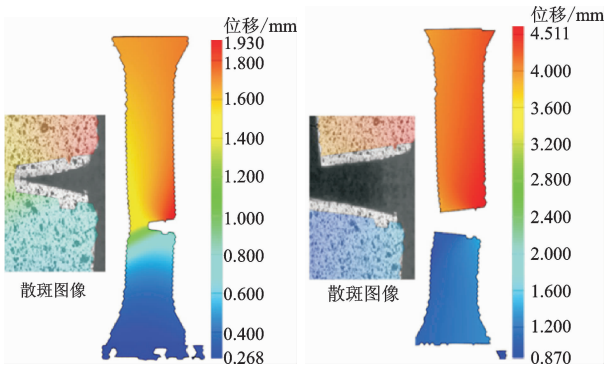
参数	数值
幅面大小/像素	128×96
采集速度/(帧·s ⁻¹)	10
步长	8
拉伸机拉伸速度/(mm·min ⁻¹)	1

拉伸试验中,将制备好的试件固定在拉伸机下方,拉伸机将试件向上以恒定速度拉伸,在拉伸过程中,试件的裂口处逐渐形成裂纹,此时,在测量系统中的云图会形成一条裂缝,然后试件最终被拉断。

图 13 为软件测量位移云图的过程,散斑图像为 XTDIC 系统拍摄的部分图像,位移云图为 XTDIC 系统计算所得的图像。以图 13a 为基准图像,后采集的每张图像分别与此图像进行传统的 DIC 方法匹配,设置的子区半径大小为 6 像素。



(a)拉伸状态 1 (b)拉伸状态 2



(c)拉伸状态 3 (d)拉伸状态 4

图 13 软件测量的位移云图($M=6$ 像素)

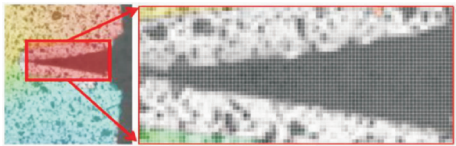
Fig. 13 Software displacement measurement cloud map ($M=6$ pixels)

由图 13 中云图分布可知,裂纹边缘上部分区域位移较大,最高达到 4.511 mm,裂纹边缘下部分区域位移为 1 mm 左右。由于裂缝区域的变形较大,云图并没有覆盖到裂纹边缘,根据裂纹区域的匹配结果可得:传统 DIC 方法在裂纹边缘 10~20 像素区域不能匹配成功。

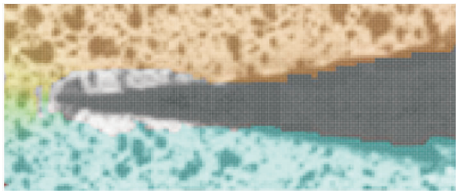
接下来单独选取第 3 个状态,用大子区半径的传统方法和本文方法分别匹配,验证本文方法的精度。

3.3 本文方法的匹配精度验证

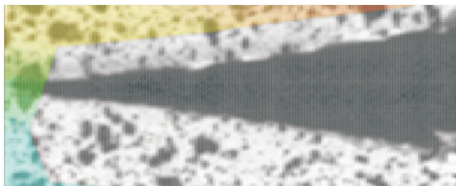
图 14 为 M 取不同值时 3 种方法可视化后的匹配结果,图中散斑黑白区域表示为匹配失败的区域,彩色区域为匹配成功的区域。由图可见,小子区相



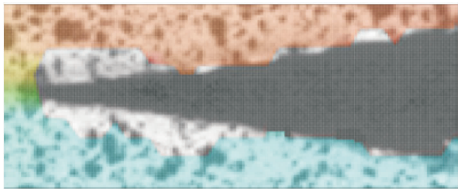
(a) $M=15$ 像素时传统方法



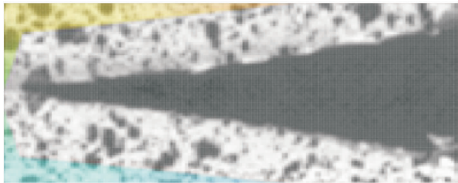
(b) $M=15$ 像素时本文方法



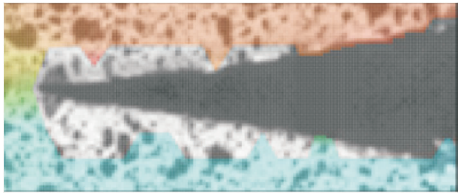
(c) $M=20$ 像素时传统方法



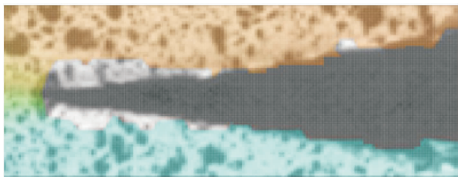
(d) $M=20$ 像素时本文方法



(e) $M=35$ 像素时传统方法



(f) $M=35$ 像素时本文方法



(g) $M=15$ 像素时种子点匹配方法

图 14 M 取不同值时 3 种方法的匹配结果

Fig. 14 Matching results of three methods for different values of M

比较于大子区有更高的匹配精度。

进一步验证本文方法的精度。由于引伸计只能测量试件在标距范围内的平均位移,而裂缝边缘的位移变化远远大于其他区域,因此,引伸计的测量结果不能准确反映裂缝边缘的位移变化。因此,将本文方法与种子点方法作精度对比。2 种方法的精度对比步骤如下。

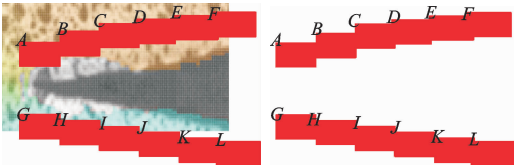
(1)选图 13 的拉伸状态 1 作为基准图像,拉伸状态 3 作为变形图像,取 M 分别为为 15、20 和 35 像素。用测量系统中的传统 DIC 方法匹配,结果如图 14a、14c、14e 所示。

(2)本文方法对两状态的图像进行匹配,取 M 分别为 15、20 和 35 像素,对相关系数取加权后的归一化最小距离平方和系数,根据灰度梯度平方和的比较算法自动寻找高斯中心点,设高斯标准差

$s=3.5$ 。

(3)用种子点匹配方法根据经验对子区半径大小遍历调试,找到最好的匹配结果图($M=15$),如图 14g 所示,然后以此图作为与本文方法的比较基准,验证本文方法的精度。

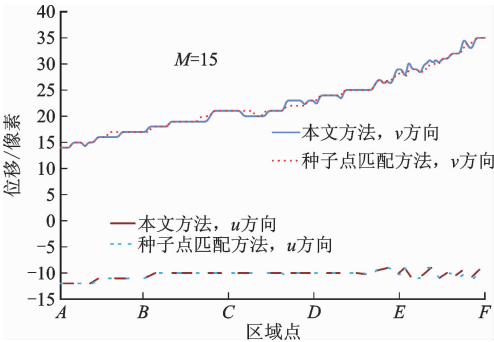
取 $M=15$ 像素,使用本文方法与种子点方法分别对裂纹边缘的 $A\sim L$ 区域匹配,结果如图 15 所示。从图 15 中裂纹底色区域上下两边各取 6 个区域(这 12 个区域为传统 DIC 匹配失败的区域),然后采用本文方法和种子点匹配方法分别对这 12 个区域匹配并进行精度对比。本文方法与种子点方法分别测量出这 12 个区域在 u 方向和 v 方向上的位移量,测量得到本文方法和种子点方法在 u 和 v 方向上的位移偏差值在 0.5 像素左右,试验结果如图 16 所示。



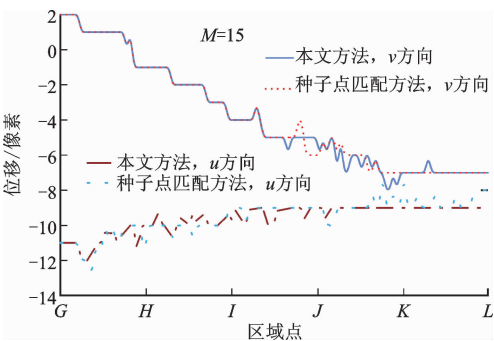
(a) 本文方法区域 (b) 种子点方法区域

图 15 本文方法与种子点方法区域对比图

Fig. 15 A regional comparison diagram of the proposed method and the seed point method



(a) $A\sim F$ 区域点匹配位移结果



(b) $G\sim L$ 区域点匹配位移结果

图 16 匹配点 u 、 v 位移图

Fig. 16 Displacements of matching points u and v

之所以选取种子点匹配方法与本文方法进行对比,是因为种子点匹配方法在测量大变形试件位移时,其精度能到 0.05 像素^[21],因此,本文方法以它匹配的结果为真值进行对比。种子点匹配方法虽然可以求出精确的裂缝位移值,但是与匹配半径的选取有很大关系,匹配半径调整一般在 10~50 像素范围内,为取得较好匹配结果需要多次的调整参数,而本文方法匹配半径恒定选取 15 像素,只需选取合适的高斯标准差,选取范围一般在 2~7 内,调整次数较少,因此,本文方法调整参数的次数远少于种子点匹配方法。

4 结 论

针对传统数字图像相关法(DIC)对变形较大的裂纹边缘测量时出现的裂纹底色导致匹配相关性差、测量精度低的问题,本文提出了一种以高斯加权后的相关系数作为新的相关系数,根据变形子区中划分区域的灰度梯度平方和的大小自动调整高斯中心点位置,然后用模拟试验法得到高斯标准差大小的适用范围的方法。模拟对比和试验分析的结果表明:传统 DIC 方法不能完全测量得到裂缝边缘区域的位移场,而本文方法能够准确测量出传统 DIC 方法匹配失败的区域;传统 DIC 方法的精度仅为 0.05 像素,而本文方法的测量精度可达到 0.01 像素。

参考文献:

- [1] 王娜. 采用 DIC 研究岩石-混凝土界面裂缝扩展过程 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2016: 10-20.
- [2] 李彦豪. 数字图像相关方法(DIC)在材料力学实验中的应用研究 [D]. 福建厦门: 厦门大学, 2019: 5-25.
- [3] ZHANG Z, ZHANG D, PENG X. Performance analysis of a 3D full-field sensor based on fringe projection [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42(3): 341-353.
- [4] 程振进, 王全保, 陈吉安. 基于混合遗传算法的数字图像相关方法 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 710-717.
CHENG Zhenjin, WANG Quanbao, CHEN Ji'an. Digital image correlation method based on hybrid genetic algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 710-717.
- [5] 陈志新, 梁晋, 郭成. 数字散斑相关法在变形测量中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7): 1480-1485.
CHEN Zhixin, LIANG Jin, GUO Cheng. Application of digital speckle correlation method in deformation measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1480-1485.
- [6] LUO Zhilei, HU Xu, WANG Linlin, et al. Measurement of large, discontinuous displacement from digital images [J]. *Strain*, 2020, 56(4): e12349.
- [7] 潘兵, 续伯钦, 谢惠民, 等. 面内位移测量的基于梯度的数字图像相关方法 [J]. *光学技术*, 2005, 31(5): 643-647.
PAN Bing, XU Boqin, XIE Huimin, et al. In-plane displacement measurement by gradient-based digital image correlation [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(5): 643-647.
- [8] CHEN Zhixin, LIANG Jin, ZHANG Dehai, et al. Speckle technique applied to precise measurement of strain [C]//2010 International Conference on Computer Engineering and Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: V2533-V2536.
- [9] 张尧. 基于数字图像相关法的断裂研究与数值模拟 [D]. 北京: 清华大学, 2016: 10-30.
- [10] 孙强, 李雪东, 姚腾飞, 等. 基于 DIC 的爆炸加载下脆性材料裂纹扩展规律的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(10): 31-41.
SUN Qiang, LI Xuedong, YAO Tengfei, et al. Experimental study on crack propagation of brittle materials based on DIC under explosive loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(10): 31-41.
- [11] 俞海, 郭荣鑫, 夏海廷, 等. 数字梯度敏感法在静态断裂力学实验中的应用 [J]. *激光技术*, 2014, 38(5): 627-631.
YU Hai, GUO Rongxin, XIA Haiting, et al. Digital gradient sensing measurement applied in static fracture mechanics experiments [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(5): 627-631.
- [12] 刘纲, 李孟珠, 蒋伟, 等. 古建筑彩绘梁整像素位移自适应搜索解算方法 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(11): 106-113.
LIU Gang, LI Mengzhu, JIANG Wei, et al. Adaptive search algorithm method of whole-pixel deformation for ancient building painted beams [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47(11): 106-113.
- [13] 廖健, 章红梅, 陈杨. 基于数字图像相关法(DIC)的剪力墙破坏过程分析 [J]. *结构工程师*, 2019, 35(3): 83-90.
LIAO Jian, ZHANG Hongmei, CHEN Yang. Analysis of the shear wall failure process based on DIC method [J]. *Structural Engineers*, 2019, 35(3): 83-90.
- [14] CHEN Z X, LIANG J, GUO C. The research of

- speckle technique in deformation measurement fields [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 201/202/203: 1998-2002.
- [15] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2244-2253.
- TANG Zhengzong, LIANG Jin, XIAO Zhenzhong, et al. Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2244-2253.
- [16] 王立忠, 汪耀, 梁晋, 等. 高速三维数字图像法测量手机跌落全场应变 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(9): 2174-2180.
- WANG Lizhong, WANG Yao, LIANG Jin, et al. Measurement of full-field strain in cell phone dropping test by high-speed 3D digital image correlation method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(9): 2174-2180.
- [17] 朱飞鹏, 龚琰, 白鹏翔, 等. 基于数字图像相关的光学引伸计应变测量精度研究 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1061-1069.
- ZHU Feipeng, GONG Yan, BAI Pengxiang, et al. Study on strain measurement accuracy of optical extensometers based on digital image correlation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1061-1069.
- [18] 胡慧然, 但西佐, 赵琪涵, 等. 数字图像相关中的散斑区域自动提取研究 [J]. *中国光学*, 2019, 12(6): 1329-1337.
- HU Huiran, DAN Xizuo, ZHAO Qihan, et al. Automatic extraction of speckle area in digital image correlation [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1329-1337.
- [19] PAN B, XIE H, WANG Z. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(28): 5501-5509.
- [20] PAN Bing, XIE Huimin, WANG Zhaoyang, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7037-7048.
- [21] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 大变形测量数字图像的种子点匹配方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(11): 51-55.
- TANG Zhengzong, LIANG Jin, XIAO Zhenzhong, et al. Digital image correlation method based on seed point for large deformation measurement [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(11): 51-55.

(编辑 刘杨)