

文章编号: 1001-4888(2022)05-0629-09

# 基于形态学预处理的数字图像相关方法研究\*

赵杰<sup>1</sup>, 孙伟<sup>1</sup>, 徐中达<sup>1</sup>, 李国健<sup>2</sup>, 李训涛<sup>1</sup>, 余崇民<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 航空学院, 江苏南京 210016; 2. 上海国核电站运行服务技术有限公司, 上海 200233)

**摘要:** 当利用数字图像相关方法计算含孔洞结构空边的位移与应变时, 往往需要消除孔洞中的背景噪声, 以减小对边缘计算的影响。在边缘检测过程中, 散斑边缘和孔洞边缘的灰度梯度均呈突变特征, 常会出现误将散斑边缘错判为小孔洞边缘的情况。本文提出一种基于形态学填充的图像预处理方法, 该方法利用形态学操作填充散斑空隙, 可避免将散斑图像边缘错误检测为小孔洞图像边缘。该方法仅对孔洞内部背景噪声等无效区域进行标记裁剪与图像分割。通过数值图像模拟与 3D 打印试件拉伸实验, 验证了该方法对孔洞边缘测量的精度。实验结果表明, 基于形态学填充的图像预处理方法能够有效消除孔内背景噪声的影响, 并在相关函数计算过程中避免非散斑区域的参与。

**关键词:** 数字图像相关; 多孔洞结构; 形态学; 图像预处理; 图像分割

**中图分类号:** O348; TP301      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-191

## 0 引言

在核承压容器设计中, 不可避免地要在蒸汽发生器管板或稳压器下封头位置开孔或接管, 含孔洞结构在不同的载荷作用下(内压、弯矩、轴力、温度等)会产生局部应力并伴随着很高的应力集中<sup>[1]</sup>。针对多孔结构的孔边应力集中问题, 普遍采用的方法是有限元仿真分析法与数值分析法<sup>[2]</sup>。但是通过这些方法开展应力评定是保守和不尽合理的, 且不能完全反映物体在实际变形中的形态与应力分布, 因此开展实验研究将有十分重要的价值。

数字图像相关方法(Digital Image Correlation, 简称 DIC)作为一种基于计算机视觉原理的、非接触、全场测量的光学计算方法, 自 20 世纪 80 年代被提出<sup>[3]</sup>后, 便得到了理论的迅速发展工程的广泛应用<sup>[4]</sup>。利用 DIC 对多孔洞结构进行精确测量时, 由于孔洞内分布着大量无效的背景噪声<sup>[5]</sup>, 所以为了能准确定位图像中的孔洞边缘, 需要剔除无效区域, 并提取图像边缘信息以进行后续相关匹配计算。而在边缘定位过程中, 散斑边缘和孔洞边缘都存在着灰度梯度的突变, 所以很容易出现散斑边缘被误检测为孔洞边缘的情况。这就要求在进行 DIC 计算前需要对图像进行必要的图像去噪与分割等预处理<sup>[6]</sup>。胡慧然等<sup>[7]</sup>采用 Laplacian 算子对图像进行预处理后, 再基于二阶梯度熵函数对散斑区域与轮廓背景的连通区域进行分割。与孔洞结构类似, 王乐乐等<sup>[8]</sup>引入数学形态学方法对含气泡图像孔洞区域进行填充, 实现图像分割, 得到了气泡的特征参数与分布规律。在算法方面, 对于无散斑但随试件变形的缺陷区域, 潘兵等<sup>[9]</sup>提出对圆孔或缺陷等无效区域进行预先标记的方法, 通过局部位移场最小二乘拟合计算区域边界, 以完成对位移场与应变场的测量; 王得成等<sup>[10]</sup>提出一种自适应深度图像孔洞填充与

\* 收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-10-13

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0102103)

通信作者: 孙伟(1980-), 女, 博士, 副教授。主要从事现代光学测试方法的理论与应用方面的研究。Email: nancysun@nuaa.edu.cn

优化算法,通过填充缺失孔洞、抑制深度图像噪声,以改善深度图像的质量;张永帅等<sup>[11]</sup>利用全卷积神经网络提取焊缝特征信息,通过融合低层与高层特征信息来补充焊缝边缘的特征信息;Sun等<sup>[12]</sup>利用互补散斑模式,使试件接触边缘呈现强烈的灰度对比,以减小形函数不匹配的影响,定位精度更高。但上述方法或操作均比较复杂,或需要人工干预,或破坏散斑边缘区域,或降低图像的边缘散斑信息量,而工业测量中,需要快速得到精确的无损散斑信息载体,所以对散斑区域的提取以及背景分割就显得尤为重要。

针对以上情况,本文提出一种形态学填充方法(Morphological Fill Method, MFM),该方法利用组合多元抗噪形态学算子对散斑图像进行填充,再对孔洞内部无效区域进行标记裁剪,避免相关运算中孔洞内部图像的参与,从而提高相关函数匹配度与数据计算精度。文中首先介绍该方法的基本原理,接下来通过模拟散斑图实验和光测与电测的对比拉伸实验进行比较并验证算法,最后得到多孔板全场测量数据。

## 1 DIC 基本原理

DIC 首先利用数字成像设备获取物体在不同载荷状态下的数字图像,然后选定以计算点为中心的子区图像,通过对不同时间链中所采集的图像子区进行最大相关函数匹配,比较变形前后图像子区的位置变化来获得各点的位移与应变信息。二维 DIC 原理图如图 1 所示。

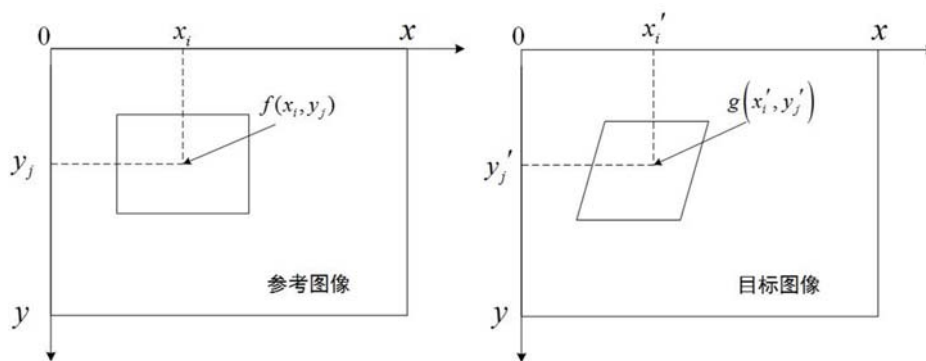


图 1 二维 DIC 原理图

Fig. 1 The schematic of two-dimensional digital image correlation

通常,将采集到的变形前图像称为参考图像,变形后的图像称为目标图像。在参考图像中以  $f(x_i, y_j)$  为待测点,选取一个大小为  $(2M+1) \times (2N+1)$  的参考子区,通过相关函数来衡量变形前后子区的相似程度。常用的标准化互相关函数公式<sup>[13]</sup>为

$$C_{\text{NCC}}(p) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N f(x_i, y_j) \cdot g(x'_i, y'_j)}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N f^2(x_i, y_j) \cdot \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N g^2(x'_i, y'_j)}} \quad (1)$$

式中:  $C_{\text{NCC}}(p)$  为变形前后图像之间的相关系数;  $M$  和  $N$  分别为子区的长度与宽度;  $f(x_i, y_j)$  和  $g(x'_i, y'_j)$  分别为参考图像和目标图像中子区内各点的灰度值。

## 2 形态学填充法的原理与步骤

### 2.1 原理

在采集的不同时间历程图片中,孔洞内的背景区域在不断发生变化。使用标准化互相关函数(NCC)对图像进行匹配计算时,背景环境一个细微的变化就可能对匹配算法的结果产生较大的影响,轻则造成干扰,重则会导致匹配的错误<sup>[14]</sup>。

形态学填充法首先采用多元形态学算子组合对散斑图像进行填充操作,再对孔洞内图像进行剔除并将像素值标记为零,以确保试件在变形过程中孔内背景始终保持不变。在相关函数的计算中,对孔洞

内像素值为零的数据不参与运算的具体证明<sup>[13]</sup>如下：

$$\begin{aligned}
 C_{NCC} &= \frac{\sum_{i=-M_j=-N}^M \sum_{j=-N}^N f(x_i, y_j) \cdot g(x'_i, y'_j)}{\sqrt{\sum_{i=-M_j=-N}^M \sum_{j=-N}^N f^2(x_i, y_j) \cdot \sum_{i=-M_j=-N}^M \sum_{j=-N}^N g^2(x'_i, y'_j)}} \\
 &= \frac{\left[ \sum_{(x_i, y_j) \in S_w \cap S'_w} f(x_i, y_j) \cdot g(x'_i, y'_j) + \sum_{(x_i, y_j) \in S_w \cap S'_b} f(x_i, y_j) \cdot g(x'_i, y'_j) \right] + \left[ \sum_{(x_i, y_j) \in S_b \cap S'_w} f(x_i, y_j) \cdot g(x'_i, y'_j) + \sum_{(x_i, y_j) \in S_b \cap S'_b} f(x_i, y_j) \cdot g(x'_i, y'_j) \right]}{\sqrt{\left[ \sum_{(x_i, y_j) \in S_w} f^2(x_i, y_j) + \sum_{(x_i, y_j) \in S_b} f^2(x_i, y_j) \right] \cdot \left[ \sum_{(x'_i, y'_j) \in S'_w} g^2(x'_i, y'_j) + \sum_{(x'_i, y'_j) \in S'_b} g^2(x'_i, y'_j) \right]}} \\
 &= \frac{\sum_{(x_i, y_j) \in S_w \cap S'_w} f(x_i, y_j) \cdot g(x'_i, y'_j)}{\sqrt{\sum_{(x_i, y_j) \in S_w} f^2(x_i, y_j) \cdot \sum_{(x'_i, y'_j) \in S'_w} g^2(x'_i, y'_j)}} \tag{2}
 \end{aligned}$$

式中： $S_w$  与  $S_b$  分别为预处理前图像中含有散斑信息的区域与孔洞内的无效区域； $S'_w$  与  $S'_b$  分别为预处理后的两个对应区域。 $S_w \cap S'_w$  表示相关函数计算过程中参考图像和目标图像都不为零的区域(均为散斑区域),其他三个区域的表达形式类似。对于  $S_w \cap S'_w$  之外的三个区域,因均含有灰度值为零的孔洞区域,所以在计算的过程中这些区域的贡献为零。式(2)表明,在理想情况下,将孔洞内的无效区域全部清除并标记为零后,无效背景区域在相关函数的计算中并不参与运算,因此相关函数的数值只与前景的散斑图案有关。

在相关函数的计算中,基于孔洞内像素值为零的数据不参与运算的原则,采用真实拉伸实验中线性阶段采集的变形前后图像,比较预处理前后的参考图像与变形图像相关函数的变化规律(图 2)。

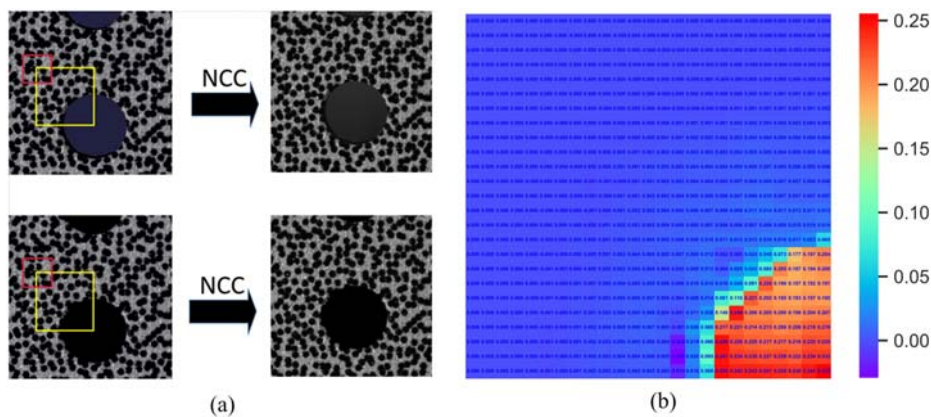


图 2 图像预处理前后的相关函数计算结果图:(a)预处理前后的参考和变形图像;(b)相关函数差值表

Fig. 2 The correlation function calculation result graph: (a) before and after the pre-processing of the image and the reference and deformation image; (b) correlation coefficient difference table

图 2(a)为从真实拉伸实验中所截取的带有孔洞的图像局部,其中左上、右上、左下、右下方的图分别为原参考图像、原变形图像、预处理后的参考图像、预处理后的变形图像,大方框区域为相关函数插值表所选取的计算区域,小方框为所选取的计算子区大小。使用式(1)的 NCC 相关计算公式分别计算两幅参考图像所选小方框内所有点的相关函数,计算过程中,选择的计算子区大小为  $51\text{pixel} \times 51\text{pixel}$ ,步长为  $4\text{pixel}$ 。比较预处理后图像计算出的相关函数数值表与处理前的数值表,并将对应位置的数据相减,得到不同子区的相关函数差值表,如图 2(b)所示。图 2(b)中左上方数据皆为零,说明在形态学填充预处理操作前后并不会改变孔洞外散斑区域的灰度分布,故相减结果显示为零。而随着计算子区向右下方移动,数值开始出现变化,并且随着所包含孔洞区域的增加,相关函数的改善程度也随之增强,当子区完全移动到孔洞内时,表现出的差异最为明显,如图 2(b)中右下角的区域所示。以上结果表明,在孔洞边缘的定位计算中,预处理后的图像在进行相关函数的匹配计算时要优于处理前的图像。清除孔洞内区域的操作不但不会对图像匹配造成影响,还可以提高相关函数在孔洞边缘亚像素定位测量中的精

度<sup>[15]</sup>。这一预处理方法在求解相关函数的全局极值时,会在目标图像中搜索匹配出与参考子区相关性最好的目标子区。

## 2.2 步骤

在进行 DIC 计算的过程中,图像的背景噪声往往会干扰图像边缘信息,不利于边缘的精确定位与孔边应变场的计算。图 3 是通过常规 DIC 计算得到的试件在竖直方向上的局部应变图,从图中明显可以观察到,图像的背景噪声透过孔洞发出杂乱背景光,孔洞内部分布着由背景噪声所产生的无效的应变数据。故需要对孔洞结构内的无效区域进行滤除,只保留有效的准确数据。

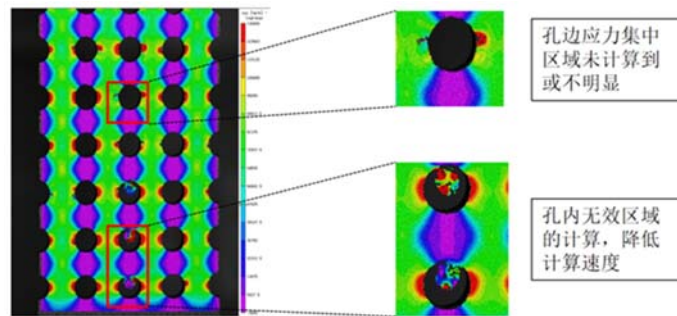


图 3 多孔洞板  $y$  方向应变云图

Fig. 3 The strain cloud map of porous hole plate in the  $y$  direction

对于多孔板型试件,利用形态学填充法对图像进行预处理的具体步骤如下:

(1) 自适应阈值二值化处理: 使用 Otsu 自适应阈值处理方法<sup>[16]</sup>计算每个像素点周围邻域的加权平均值以获得阈值,并使用该阈值对当前像素点进行二值化处理,二值化后的图像如图 4(b)所示。自适应阈值二值化主要适用于处理明暗差异较大的灰度图像。

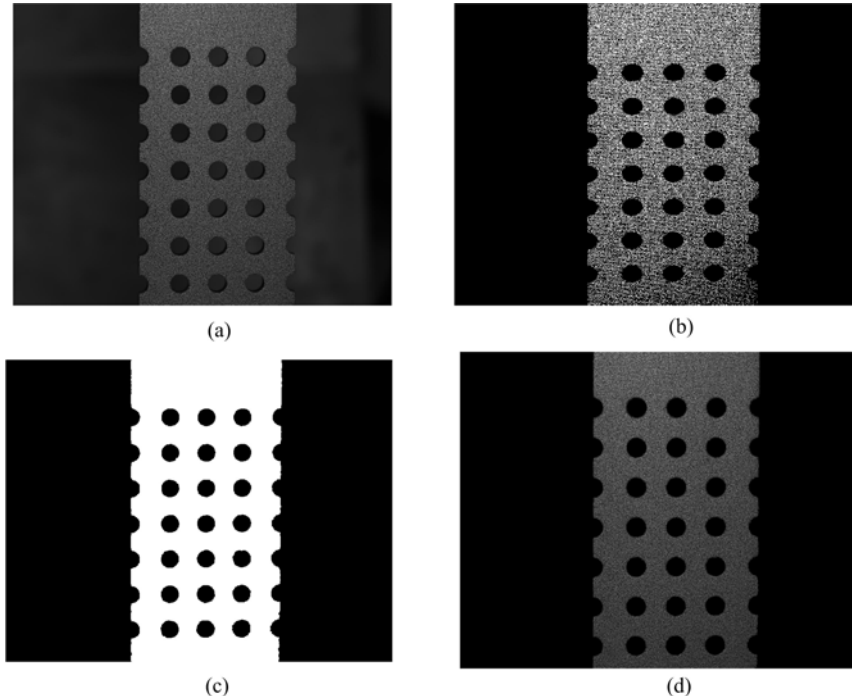


图 4 图像预处理过程: (a)原始图像; (b)自适应二值化图像;  
(c)形态学操作后二值图像; (d)MFM 法处理后图像

Fig. 4 Image preprocessing: (a)original image; (b)adaptive binary image;  
(c)morphological operation image; (d)MFM processed image

(2) 多元抗噪型形态学操作: 在二值化后的图像中,由于颗粒状散斑之间存在大小不一的空隙,所以需要组合运用腐蚀与膨胀算子<sup>[8]</sup>。腐蚀与膨胀时,均使用大小相同、权重相同的正方形结构体元素,

具体大小需要依据散斑颗粒的大小及孔洞的大小共同决定。大尺寸的腐蚀卷积算子在加快散斑间空隙填充速度的同时,也会造成孔洞边缘细节的缺失。建议选择尺寸较小的结构体元素进行多次迭代,直至图 4(b)中的散斑区域无空隙为止。通过多次腐蚀操作可将散斑之间的空隙全部填充,对腐蚀后的图像再做反向膨胀处理。为避免对散斑区域图像造成破坏,反向膨胀时的迭代次数较之前腐蚀操作减少 1 次,如此便可在不破坏散斑区域的基础上,最大限度地消除孔内无效区域。在图 4(c)中可以看到检测到的清晰的整体轮廓边缘。在形态学填充操作过程中,腐蚀算子起到抑制噪声和填充散斑之间细小空隙的作用,膨胀算子则起到去除边界附近非散斑区域像素的作用。

(3) 图像卷积:将完成数学形态学操作后的二值化图像与原图像做卷积。该操作可在不改变试件表面散斑像素分布的基础上,仅对背景和孔洞中的无效区域进行滤除,完成图像分割后即可得到背景清晰干净的处理后图像,如图 4(d)所示。

相较于常用的边缘检测方法,如 Sobel 边缘检测、Canny 边缘检测、水平集边缘检测<sup>[17]</sup>等方法,MFM 方法不仅操作简便,而且适用于 DIC 中对散斑空隙的处理。当使用 MFM 对原图像进行预处理后,需要将操作后的二值化图像(如图 4(c)所示)与原图像做卷积。二值化图像中散斑位置处数值均为 1,因此卷积并不会改变散斑区域的像素值;二值化图像中孔洞内的数值均为 0,因此图像卷积操作只会对孔洞内的像素区域进行分割,并不会改变散斑区域的灰度分布。

### 3 实验验证

#### 3.1 亚像素平移模拟实验

为验证 MFM 方法的有效性,本节通过基于亚像素频域平移的方法对其进行验证<sup>[18]</sup>。具体的验证步骤如下:

(1) 模拟带有孔洞的数字化散斑图像,在孔洞内部添加不同信噪比的高斯噪声,如图 5 所示。

(2) 对带有孔洞的数字化散斑图像,通过频域方法平移,生成 10 幅平移散斑图,相邻两幅图的平移量为 0.1pixel,一共平移 1 个像素。用 DIC 分别计算原始图像和 MFM 法预处理后图像的位移场。

(3) 计算位移场误差。将步骤(2)中计算的平均位移与预先施加的位移进行比较,计算均值误差和标准差,如图 6 所示。

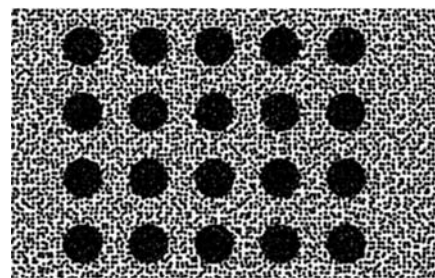


图 5 带有噪声的多孔洞数字化散斑图像

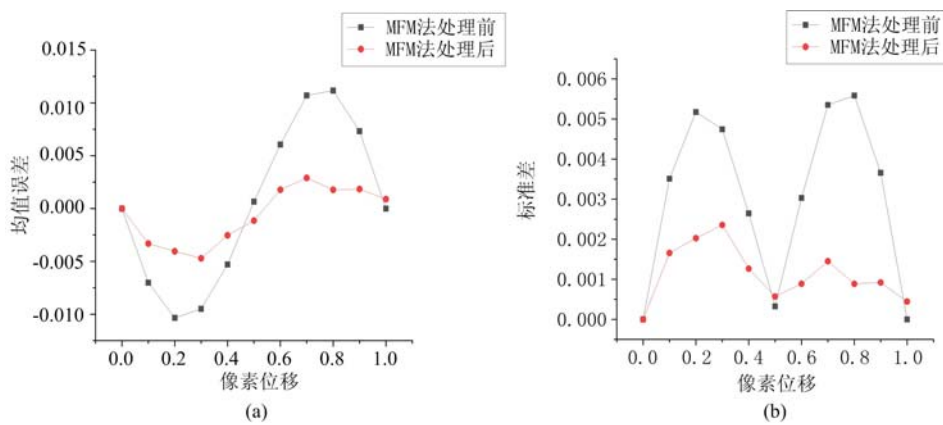


图 6 处理前后的误差图:(a)均值误差;(b)标准差

Fig. 6 The error graph: (a) mean error; (b) standard deviation before and after processing

值误差与标准差均明显小于处理前的,其中最大误差减小了 60%。图 6 中亚像素平移数值模拟实验的

结果表明了利用 MFM 方法对图像进行预处理的有效性。

### 3.2 电测与光测对比实验验证

为验证真实环境中本文方法的可靠性,对基于 3D 打印的孔洞试件进行单向拉伸实验。试件中孔洞的管束排布方式采用长方形管束边缘开孔型,孔桥减弱系数为 0.5。打印的试件尺寸如图 7 所示。

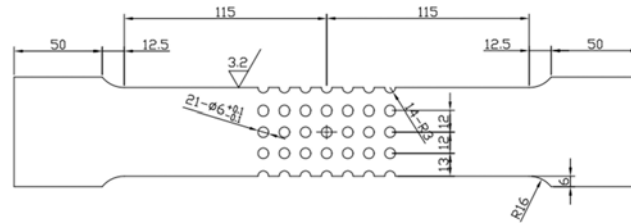


图 7 多孔板试件尺寸图(单位:mm)

Fig. 7 The size of the multi-hole plate test (unit: mm)

在进行实验测量之前,需要在试件表面制作散斑。本文实验采用日本 Mimaki UV(UJF-A3HG)打印机(图 8),在平板试件上快速打印优化设计好的高精度数字散斑<sup>[19]</sup>。附着在试件表面的散斑场质量稳定、精度可控,散斑点的打印精度可以达到  $50\mu\text{m}$ 。

本文实验首先将表面制备好数字化散斑的样品固定在 MTS 万能材料拉伸机上,将 Vic-3D 非接触式全场应变测量系统的镜头直接置于试件正面,调整两个镜头到样品之间的距离,使相机的分辨率得到充分利用(图 9)。然后通过圆心间距为 10mm 的圆点型标定靶确定两相机之间的相对位置,标定得到两相机相对夹角为  $25^\circ$  左右,两个相机到试件的距离为 800mm 左右,图像大小为  $4096\text{pixel}\times 3000\text{pixel}$ 。在室温下以  $0.5\text{mm}/\text{min}$  的加载速率单向加载,实验过程中,考虑到试件在各个变形阶段的变形速率不同,所以在不同的阶段,设定不同的采集速率,前 5min,采集速率为每秒 2 张,后面的阶段采集速率则为每 2 秒 1 张,直到试件样品被拉断为止。



图 8 数字化散斑打印机

Fig. 8 Digital speckle printer

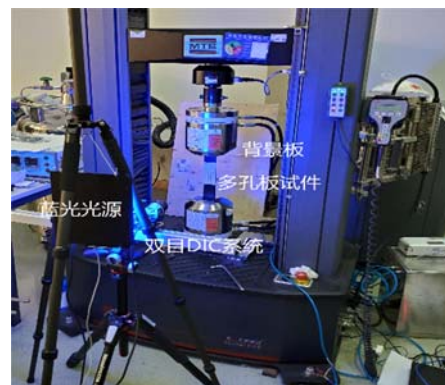


图 9 非接触全场应变测量系统

Fig. 9 Non-contact full field strain measurement system

在 3D 打印试件背面孔边处粘贴平面应变片,将采集得到的图像进行 MFM 法的批量化预处理,记为原始图像与预处理后图像 2 组。选择与应变片前后同一点附近的应变数据,通过 DIC 分别计算 2 组数据,并与应变片测量数据进行比较。计算与电测数据的均值误差<sup>[20]</sup>,得到的结果如图 10 所示。

实验结果表明,MFM 法处理后,光测应变数据更加接近于电测法,其均值误差也明显小于处理前的,再次验证了 MFM 法可提高应变场的测量精度。

对经过图像形态学预处理后的图像,计算其在  $y$  方向的线应变以及面内切应变<sup>[21]</sup>,其各方向应变云图如图 11 所示。

由图 11 可见,经过 MFM 法预处理后的应变云图中,孔内噪声明显消失,应变云图更加平滑。另

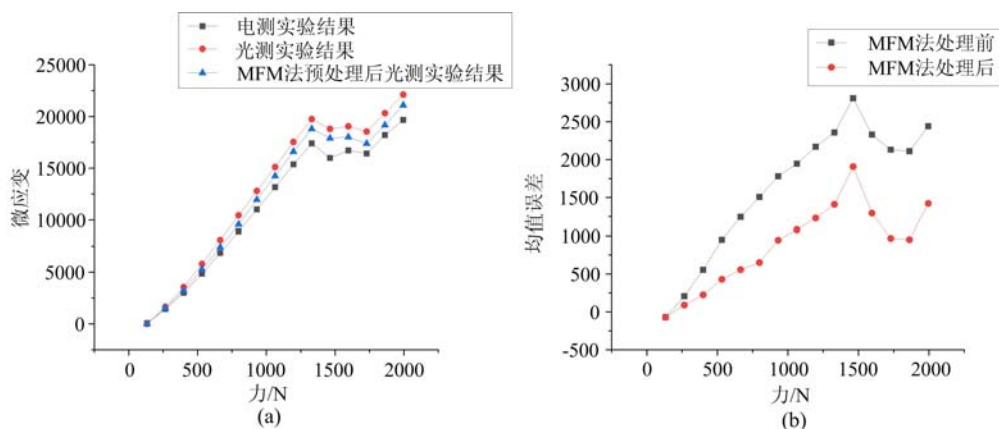


图 10 电测与光测实验对比验证结果图：(a)电测、光测与 MFM 法处理后应变数据图；  
(b)MFM 法处理前后光测实验与电测实验结果均值误差图

Fig. 10 The comparison and verification results of the electrical and photometric experiments:  
(a) the strain data graph after the processing of the electrometric, photometry and MFM methods;  
(b) the mean error graph of the photometric experiments and the results of the electrometric experiments before and after the MFM processing

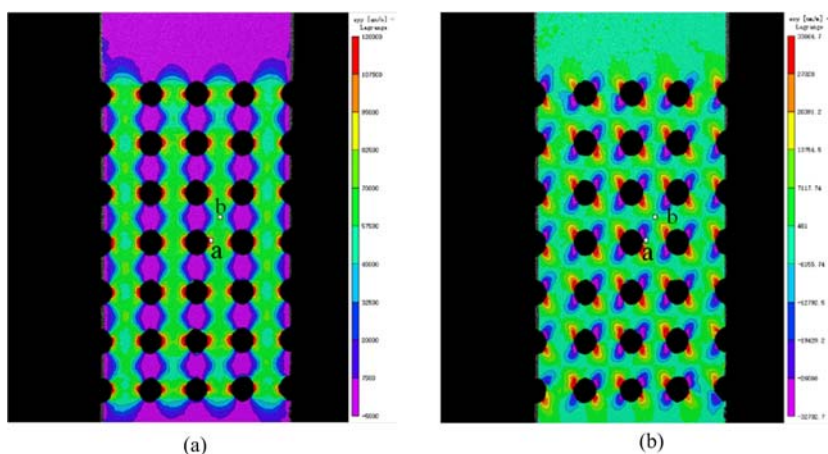


图 11 MFM 法处理后的试件全场应变云图：(a) y 方向应变；(b)切应变

Fig. 11 Full-field strain cloud map after MFM treatment: (a) strain in y direction; (b) shear strain

外,在图 11 中,选择不同位置的 a 点、b 点,比较在经过 MFM 预处理前后两点的力-应变曲线,如图 12 所示,发现 MFM 处理后的应变曲线,无论是 a 点还是 b 点都比 MFM 法处理之前的更加平滑,充分说明了 MFM 法的有效性。

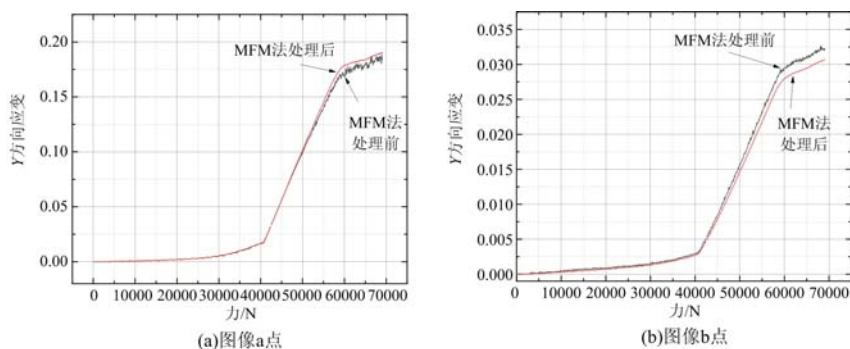


图 12 MFM 法处理前后多孔板力-应变曲线

Fig. 12 Force-strain curve before and after image pre-processing

## 4 结论

针对多孔洞结构孔内的背景噪声会影响位移与应变场计算的情况,本文提出了基于形态学预处理的数字图像相关方法(DIC)。通过对孔洞内部背景噪声等无效区域进行标记裁剪与图像分割,以消除背景噪声,同时可提高孔洞边缘计算精度。通过数字散斑模拟与3D打印试件的拉伸验证实验,证明了该图像预处理方法有着良好的去孔洞背景效果,并可提高应变计算精度。对多孔板的拉伸实测结果表明,使用形态学图像处理方法可得到更接近孔洞真实边缘的三维位移场与应变场分布,计算后的数据有明显的滤噪效果,且对孔洞边缘的测量结果也更为精确。本文提出的预处理方法不仅适用于单向拉伸实验的变形场,对于较复杂的弯曲、扭转等变形场进行计算分析时,该方法依然适用。

### 参考文献:

- [1] 盛朝阳,路燕,高晨,等. ASME规范的设计安全系数及调整因素[J]. 核安全, 2019, 18(1):13-16 (SHENG Zhaoyang, LU Yan, GAO Chen, et al. Safety factor and its adjustment factors in design of ASME code[J]. Nuclear Safety, 2019, 18 (1):13-16 (in Chinese))
- [2] 陈富强,金志江. 高参数减压阀含多孔板热应力的数值分析[J]. 化工进展, 2019, 38(S1):19-26 (CHEN Fuqiang, JIN Zhijiang. Numerical analysis of multi-hole plate thermal stress in high-parameter relief valves[J]. Chemical Progress, 2019, 38(S1):19-26 (in Chinese))
- [3] Chu T C, Ranson W F, Sutton M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics[J]. Experimental Mechanics, 1985, 25(3):232-244.
- [4] 孙伟,何小元,Quan C,等. 基于数字图像相关的三维刚体位移测量方法[J]. 光学学报, 2008, 28(5):894-901 (SUN Wei, HE Xiaoyuan, Quan C, et al. Three-dimensional rigid body displacement measurement based on digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5):894-901 (in Chinese))
- [5] Bing P. Bias error reduction of digital image correlation using Gaussian pre-filtering[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(10):1161-1167.
- [6] 方江静,陈巨兵,孙晨. 基于DIC的渐开线直齿轮接触变形实验研究[J]. 实验力学, 2021, 36(5):571-580 (FANG Jiangjing, CHEN Jubing, SUN Chen. Experimental study on contact deformation of involute spur gear based on DIC[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(5):571-580 (in Chinese))
- [7] 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. Study on automatic extraction of scattered areas in digital image correlations[J]. China Optics, 2019, 12(6):1329-1337 (in Chinese))
- [8] 王乐乐,雍晓东,李然,等. 图像处理技术在气泡特性研究中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(S2):188-192 (WANG Lele, YONG Xiaodong, LI Ran, et al. Application of image processing technology in the study of bubble characteristics[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44 (S2): 188-192 (in Chinese))
- [9] 潘兵,谢惠民,续伯钦,等. 应用数字图像相关方法测量含缺陷试样的全场变形[J]. 实验力学, 2007, 22(3):379-384 (PAN Bing, XIE Huimin, XU Boqin, et al. Full-field deformation measurement of specimen with discontinuity using digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(3):379-384 (in Chinese))
- [10] 王得成,陈向宁,易辉,等. 基于自适应联合双边滤波的深度图像空洞填充与优化算法[J]. 中国激光, 2019, 46(10):294-301 (WANG Decheng, CHEN Xiangning, YI Hui, et al. Hole filling and optimization algorithm for depth images based on adaptive joint bilateral filtering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10):294-301 (in Chinese))
- [11] 张永帅,杨国威,王琦琦,等. 基于全卷积神经网络的焊缝特征提取[J]. 中国激光, 2019, 46(3):28-35 (ZHANG Yongshuai, YANG Guowei, WANG Qiqi, et al. Weld feature extraction based on fully convolutional networks[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3):28-35 (in Chinese))
- [12] Sun C, Zhou Y, Chen J, et al. Measurement of deformation close to contact interface using digital image correlation and image segmentation[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(8):1525-1536.



- [13] Pan B, Xie H, Wang Z. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(28):5501.
- [14] Pan B, Xie H, Wang Z, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10):7037–7048.
- [15] Lu H, Cary P D. Deformation measurements by digital image correlation; implementation of a second-order displacement gradient[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(4):393–400.
- [16] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 2007, 9(1):62–66.
- [17] Canny J F. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6):679–698.
- [18] Pan B, Lu Z, Xie H. Mean intensity gradient; an effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(4):469–477.
- [19] 陈振宁. 数字散斑场优化及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2018 (CHEN Zhenning. Digital speckle field optimization and its application research[D]. Nanjing: Southeastern University, 2018 (in Chinese))
- [20] Harvent J, Coudrin B, Brethes L, et al. Shape measurement using a new multi-step stereo-DIC algorithm that preserves sharp edges[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(1):167–176.
- [21] Pan B, Wang Z, Lu Z. Genuine full-field deformation measurement of an object with complex shape using reliability-guided digital image correlation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2):1011.

## Study on the method of digital image correlation based morphological pre-processing

ZHAO Jie<sup>1</sup>, SUN Wei<sup>1</sup>, XU Zhongda<sup>1</sup>, LI Guojian<sup>2</sup>, LI Xuntao<sup>1</sup>, SHE Chongmin<sup>1</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics School, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2. Shanghai National Nuclear Power Plant Operation Service Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

**Abstract:** When the displacement and strain of the edge of the porous structure are calculated using digital image correlation methods, it is often necessary to eliminate the background noise in the hole to reduce the impact on the edge calculation. However, the grayscale gradients of both the speckle edge and hole edge are abruptly changed during edge detection, so it is easy to misjudge the speckle edge as a small hole edge. In this paper, a morphological filling based image preprocessing method is proposed. This method uses morphological manipulation to fill speckle voids, which can avoid the detection of speckle image edges being misdetected as small hole image edges. The method only labels trimming and image segmentation of invalid regions such as background noise inside the hole. It also shows that eliminating the background noise improves the computational accuracy of the hole edges. The feasibility of this method is verified by numerical simulation experiments with 3D printed porous specimens. The experimental results show that the proposed image preprocessing method can effectively eliminate the influence of the background noise in the hole, avoid the calculation of the non-speckle regions, effectively improve the accuracy of the pore edge displacement and strain calculation, and realize the accurate measurement of the displacement and strain of the porous structure.

**Keywords:** digital image correlation; porous structure; morphology; image pre-processing; image segmentation