

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417327

3D 打印碳纤维复合材料件缺陷识别方法研究^{*}

张嘉宁¹ 韩凤霞^{1,2} 王红军^{1,2,3} 刘淑聪^{1,2} 汪俊⁴

(1. 北京信息科技大学机电工程学院 北京 100192; 2. 高端装备智能感知与控制北京市国际科技合作基地 北京 100192;
3. 北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192 4. 南京航空航天大学机电工程学院 南京 210016)

摘要: 3D 打印碳纤维增强复合材料构件常见缺陷包括裂纹、气泡、脱粘和分层等。然而,传统的红外热图处理技术存在边缘模糊、“伪影”等问题,并未充分利用像素值在时间维度上的信息。因此,提出了一种基于时序信息的自适应中值滤波算法。结合当前像素在时间维度上的变化信息,利用 z-score 离群值去除法,判断当前像素在一定时间维度内是否异常,从而减少噪声污染。实验证明:该算法与小波分解去噪、张量主成分分析等方法相比,信噪比指数平均高出 6.155 dB,边缘保持良好。此外,使用半高宽测量法、最大类间差法和高斯拉普拉斯算子量化了缺陷,实验表明碳纤维含量和激励时间影响缺陷量化的精度。

关键词: 3D 打印复合材料;红外图像;基于时序信息的自适应中值滤波

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on defect identification method for 3D printed carbon fiber composite structural components

Zhang Jianing¹ Han Fengxia^{1,2} Wang Hongjun^{1,2,3} Liu Shucong^{1,2} Wang Jun⁴

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;
2. Beijing International Science cooperation Base of High-end Equipment Intelligent Perception and control, Beijing 100192, China;
3. Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Common defects in 3D printed carbon fiber reinforced composite components include cracks, bubbles, delamination, and layering issues. However, traditional infrared thermography processing techniques face problems such as edge blurring and artifacts, and they do not fully utilize the temporal information of pixel values. Therefore, this paper proposes an adaptive median filtering algorithm based on temporal information. By combining changes in the current pixel over time and using the z-score outlier removal method, the algorithm assesses whether the current pixel is anomalous within a specific time frame, thereby reducing noise interference. Experimental results demonstrate that this algorithm achieves an average signal-to-noise ratio that is 6.155 dB higher than methods such as wavelet denoising and tensor principal component analysis, while maintaining good edge definition. Additionally, defects were quantified using the half-width measurement method, maximum inter-class variance method, and Gaussian Laplacian operator. The experiments indicate that the content of carbon fiber and the excitation time significantly affect the accuracy of defect quantification.

Keywords: 3D printing of composite materials; infrared images; adaptive median filtering based on time series information

0 引言

3D 打印碳纤维增强复合材料具有高比强度和比刚度、耐高温、耐腐蚀、重量轻,广泛应用于建筑工程、医疗健康、

石油、风力发电和航空航天等各个领域^[1-4]。然而,在 3D 打印过程中,材料受到打印温度、打印层厚度、扫描间距、堆叠方式和纤维走向等工艺参数影响,可能产生孔隙、气泡、脱粘和纤维断裂等缺陷,例如,纤维与树脂基体之间未充分

收稿日期:2024-11-10

* 基金项目:航空航天结构力学及控制国家重点实验室开放课题(MCMS-E-0423K01)项目资助

浸渍或铺层间界面不充分扩散融合造成的孔洞;不同的材料逐层堆叠方式会影响复合材料的微观结构形式、纤维体积含量以及孔隙率,从而影响其宏观力学性能。这些缺陷导致零件在使用过程中加速产生疲劳裂纹、引起应力集中、大幅降低物理性能等问题,严重影响生产、生活的安全,甚至造成严重的安全事故^[5-6]。因此,对复合材料零件进行无损检测十分必要。

无损检测技术可分为红外检测、超声检测、液体渗透检测、磁粉检测和声发射检测等^[7-8]。红外检测技术相对于其他检测方法具有成本低,效率高的优势,是常用的检测方法。红外热成像的激励源通常有闪光灯、激光、卤素灯、超声、涡流等等;据外部热源不同,可分为光激励红外热成像技术、超声激励红外热成像技术和电磁激励红外热成像技术等类型^[9];根据激励方式不同,可分为脉冲红外热成像技术、锁相红外热成像技术、周期函数红外热成像技术和波红外热成像技术等等。

在采集红外热图像的过程中,由于电子设备、加热不均匀等影响^[10],红外热像仪捕捉到的图像往往包含大量噪声,如高斯噪声、白噪声、椒盐噪声等,这些噪声会严重影响到缺陷的可识别性。因此许多学者对如何去除噪声展开大量研究,图像去噪成为一项关键的技术^[11]。自适应中值滤波是一种有效处理椒盐噪声的方法,但是当椒盐噪声浓度过高时,去噪效果大大降低,当中值点与真实像素点的偏差越来越大,甚至有可能取到噪声点,导致图像中较多细节被误判为椒盐噪声。针对自适应中值滤波的不足,王帅等^[12]通过对去噪过程中增加一个限制条件,得到图像邻域灰度中值的基础上,使灰度最大值与最小值之差大于灰度中值,实验结果表明,改进后的自适应中值滤波有着更好的去噪效果。张永飞等^[13]提出一种基于自适应中值滤波的各向异性扩散滤波的图像去噪算法,能够在去除椒盐噪声同时利用各向异性扩散去除高斯噪声,还可以保留更多的轮廓细节信息。王野等^[14]提出了一种改进的自适应中值滤波的降噪方法,即在自适应增加窗口的同时分割滤波窗口,并对分割后窗口进行多次中值计算,实验结果证明改进后的方法的良好性能。但是,红外检测中采集的图像是随着时间变化的,上述方法并没有涉及时间维度上的信息,一定程度上影响着缺陷检测。Li 等^[15]改进了自适应中值滤波算法,对高比率区域和低比率区域使用不同的滤波窗口,在尽可能保护雷达回波图像细节的基础上,将干扰点的灰度值替换为自适应窗口中像素点的中值。Liu 等^[16]提出了一种用于时变图信号中脉冲噪声的自适应加权中值滤波器。它使用联合相关对时变图信号进行去噪,可以根据节点信息是否被噪声破坏来调整滤波窗口和节点权重。Wei 等^[17]提出了一种基于标准差的自适应中值滤波器,滤波器窗口的大小,会根据中心在蝙蝠翼效果范围内的位置进行调整,以消除使用数字全息术进行阶梯微观结构测量中的蝙蝠翼效应。Jin 等^[18]提出一

种基于像素梯度的新型自适应迭代中值滤波器,利用热红外相机成像原理去除图像脉冲噪声。根据相机的调制传递函数(MTF)计算原始图像的最大像素梯度,并建立相应的像素梯度集合;随后,计算原始图像和相应的像素梯度过滤图像的梯度权重均方根误差(GWRMSE)集,并确定最佳像素梯度为 GWRMSE 集高斯分布最大值对应的像素梯度。最后,根据图像中脉冲噪声的密度和复杂性确定所提滤波器的自适应窗口大小和迭代次数。Song 等^[19]针对超声射频信号的干扰噪声,提出了一种改进的自适应加权中值滤波方法。首先,采用扩展边缘点的方法确定边缘像素点进行过滤;其次,平均值用于替换被认为是噪声点的中值;最后,进行加权平滑处理。Ha 等^[20]提出了一种改进的自适应中值滤波算法,根据所提算法中有效像素与中心像素的距离来确定滤波器窗口大小,可以避免在窗口扩展过程中浪费像素重复排序。其次,改进后的算法仅从窗口内的有效像素中获取中值,有效削弱了对噪声点的干扰。但是,上述改进的的算法并未直接应用于红外无损检测领域,且通常利用单张图片的数据信息,并未结合时间维度内的变化信息,而在红外无损检测中采集的红外热图是一个随时间变化的图像序列,图像序列信息有待进一步挖掘。

本研究提出了一种基于时序信息的自适应中值滤波算法,提取当前像素在一定时间维度内的像素值变化信息,通过 Z-score 离群点去除法判断当前像素是否为异常值,将异常值输出为当前噪声像素时间维度上一定邻域内的平均值。实验证明,在碳纤维含量为 50% 和 90% 的两个试件上成功检测出预设值的缺陷,且该算法去噪后图像的信噪比 SNR 指数均高于自适应中值滤波、张量主成分分析法、小波分解降噪等。此外,使用最大类间方差法、半高宽测量法和高斯拉普拉斯算子对缺陷进行分割和尺寸测量,发现在相同的激励条件下,试件碳纤维含量越高,热传导能力越大,测出的缺陷尺寸误差越大。

1 红外热成像及图像增强理论

3D 打印碳纤维增强材料的热导率与碳纤维含量直接相关,而导电性能则取决于基体材料的特性。同时,激励源和激励方式对检测效果也起着举足轻重的作用,本文所采用技术路线包括红外热图像采集、图像增强及缺陷量化,如图 1 所示。

1.1 激励源和激励方式

在红外无损检测中,激励源通常包括激光、超声波、电涡流和卤素灯等。激光激励源存在着成本高、操作复杂和危险性高等不足,超声波激励源无法对导电材料进行检测,电涡流激励源无法对非导电材料进行检测,而卤素灯不仅适用于导电和非导电材料的检测,而且还拥有高能输出、热效率高、环境适用性强和安全性高等优点成为最常用的激励源。使用卤素灯作为热激励源,对被检测物体进行加热,

利用红外热像仪采集物体表面的热分布图像,通过分析所采集的红外热图检测物体表面或内部是否存在裂纹或其他缺陷。红外热图采集系统如图2所示。

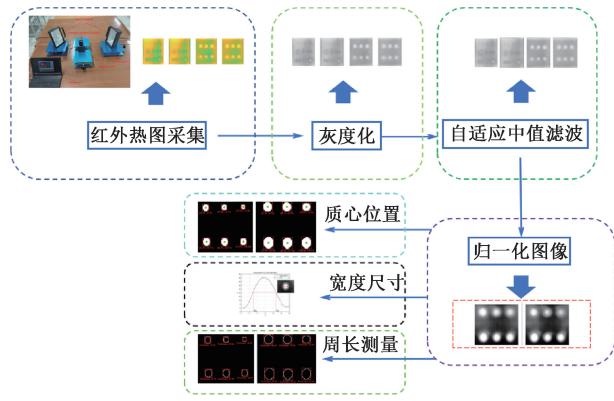


图1 技术路线

Fig. 1 Technical roadmap

激励方式包括持续激励、瞬时脉冲激励、长脉冲激励、正弦波激励、方波激励和三角形激励等等,其激励函数如图3所示。根据被测复合材料构件的结构和材料特性,选择合适的激励方式,对被测试件进行激励。使用红外热像

仪记录材料表面在加热及冷却过程中的温度变化信息(当材料内部存在裂纹、空洞或其他类型缺陷时,会导致热量传导的不连续性,造成在材料表面形成特定的温度分布差异),最后得到材料内部的缺陷信息。该技术以其独特的检测优势,在航空航天、工业检测、能源领域等多个重要领域展现出广泛的应用前景。

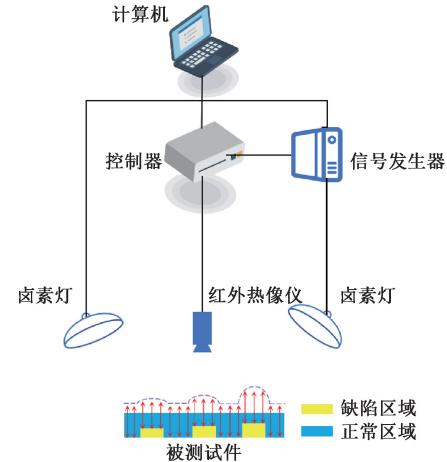


图2 主动红外热成像系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of active infrared thermal imaging system

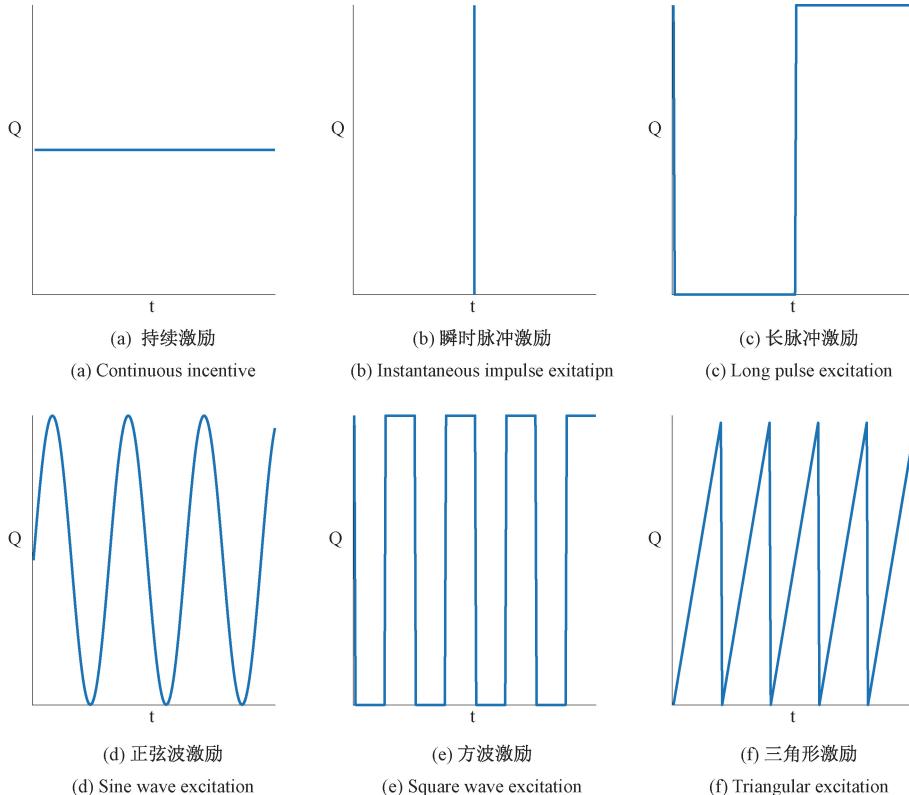


图3 激励方式

Fig. 3 Incentive methods

1.2 卤素灯功率的选择

卤素灯功率为 W , 发光效率为 P_h , 则辐射热功率 P_h 为:

$$P_h = W\eta_f \quad (1)$$

卤素灯的光束角为 θ , 被辐射物体与光源的距离为 l , 假设光束在空间中遵循朗伯特分布, 则沿光束方向上的辐射强度 I 可近似表示为:

$$I = \frac{P_h}{\pi l^2(1 - \cos(\theta/2))} \quad (2)$$

若被辐射物体的辐射面面积为 A , 且全部位于光束内, 考虑被辐射物体的表面反射率 β , 则物体实际受到的能量 P' 为:

$$P' = \beta I A = \beta \frac{P_h A}{\pi l^2(1 - \cos(\theta/2))} \quad (3)$$

考虑其他损耗率 η_e , 有效热流密度 q_e 为:

$$q_e = \frac{\eta_e P'}{A} \quad (4)$$

材料温度方程 $u(x, t)$ 可表示为:

$$u(x, t) = U_0 + \frac{q_e}{2\rho c \sqrt{\pi\alpha t}} e^{-\frac{x^2}{4\alpha t}} \quad (5)$$

$u(x, t)$ 为材料温度, $\alpha = k/\rho c$ 为热扩散系数, k 为热导率, ρ 为密度, c 为比热容。

考虑到在激励过程中热源对碳纤维的损害, 假设材料表面允许的最大温度为 T , 即:

$$u|_{x=0} = U_0 + \frac{q_e}{2\rho c \sqrt{\pi\alpha t}} \leq T \quad (6)$$

因此, 在检测时, 卤素灯的最大功率为:

$$W \leq \frac{2\pi\rho cl^2(T - U_0)((1 - \cos(\theta/2))\sqrt{\pi\alpha t}}{\beta\eta_e\eta_f} \quad (7)$$

1.3 基于时序信息的自适应中值滤波

自适应中值滤波(adaptive median filtering, AMF)是一种去除椒盐噪声性能良好的图像处理技术, 根据图像的特性动态调整滤波窗口的大小, 在去除噪声的同时保持图像边缘和细节的效果, 其流程图如图 4 所示。

随着椒盐噪声浓度的增加以及噪声不确定性的存在, 导致中值点与真实像素点的偏差越来越大, 导致图像中较多细节被误判为椒盐噪声, 自适应中值滤波性能逐渐降低。常规自适应中值滤波在处理图像时仅仅是对单张图片进行滤波处理, 并没有考虑到像素值在时间维度的信息, 在主动式红外无损检测中, 红外热像仪采集的热图信息在时间维度上是不断变化的, AMF 判断当前像素需要替换为中值时并未考虑中值与实际值的偏差, 一定程度上影响图像质量。因此, 提出了一种结合时序信息的改进方法。

在 AMF 基础上, 当判定当前像素点为噪声点时, 提取该像素点在前、后 3 个单位时间内的像素值变化信息, 利用 z-score 离群点去除法判定当前点的像素值在 7 个单位

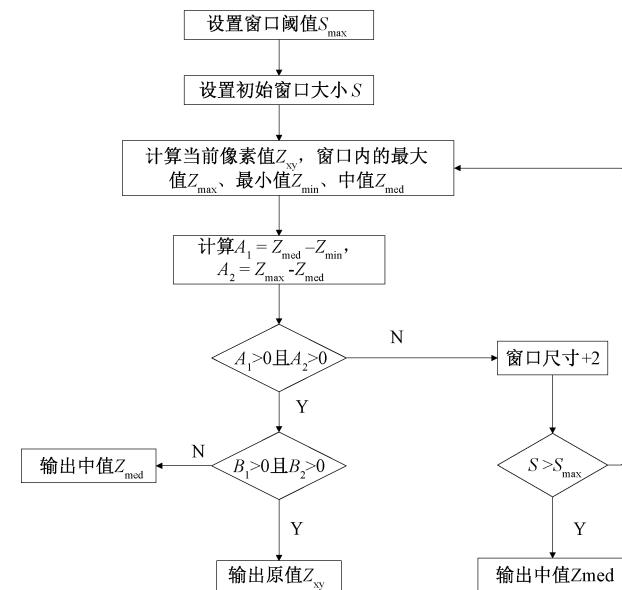


图 4 自适应中值滤波流程图

Fig. 4 Flow chart of adaptive median filtering

时间内的离群程度 Z , 即获取当前 t 时刻像素点所在的 7 个像素序列, 为 $p_{t-3}, p_{t-2}, p_{t-1}, p_t, p_{t+1}, p_{t+2}, p_{t+3}$, 计算 p_t 的离群程度 Z , 即:

$$Z_t = \frac{p_t - \mu}{\sigma} \quad (8)$$

μ 为序列的均值, σ 为序列的标准差。

离群阈值 TH 设定为:

以 $p_{t-3}, p_{t-2}, p_{t-1}, p_t, p_{t+1}, p_{t+2}, p_{t+3}$ 为中心的序列, 计算出各自分别对应的离群程度 $Z_{t-3}, Z_{t-2}, Z_{t-1}, Z_t, Z_{t+1}, Z_{t+2}, Z_{t+3}$, 得出离群阈值 TH 为:

$$TH = \frac{Z_{t-3} + Z_{t-2} + Z_{t-1} + Z_t + Z_{t+1} + Z_{t+2} + Z_{t+3}}{7} \quad (9)$$

若离群程度 Z 大于或等于所设定阈值, 输出当前像素值为该像素点在此刻与前、后一个单位时间内的像素值之和的均值; 若离群程度 Z 小于阈值, 则说明该时刻像素值为正常像素, 输出原值; 同理, 当滑动窗口尺寸大于最大窗口尺寸时, 转入上述操作。这样以来, 能够结合当点的不同时刻的像素值的变化信息来滤除噪声。该方法的原理图如图 5 所示。

2 实验系统

2.1 卤素灯激励红外热成像检测装置

3D 打印碳纤维复合材料构件缺陷检测装置, 如图 6 所示。

该实验系统由控制器、卤素灯和红外热像仪等组成。卤素灯的功率为 500 W, 红外热像仪的分辨率为 480×640 , 焦距为 11.35 mm, 采样频率为 50 Hz。

2.2 3D 打印碳纤维试件

本研究采用两种碳纤维含量的复合材料试件进行检

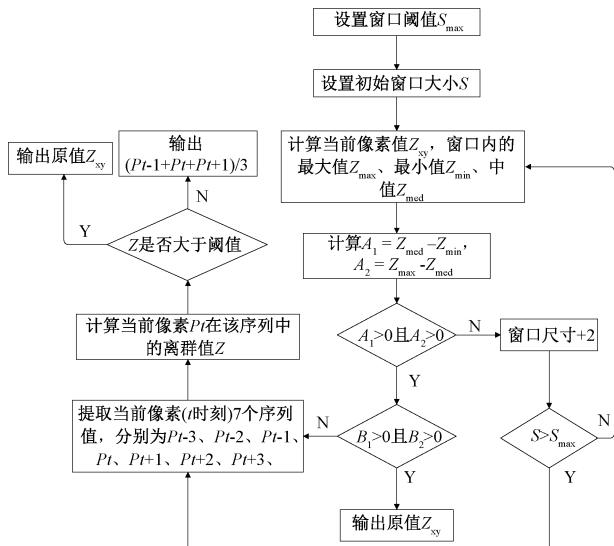


图5 基于时序信息的自适应中值滤波

Fig. 5 Adaptive median filter based on temporal information

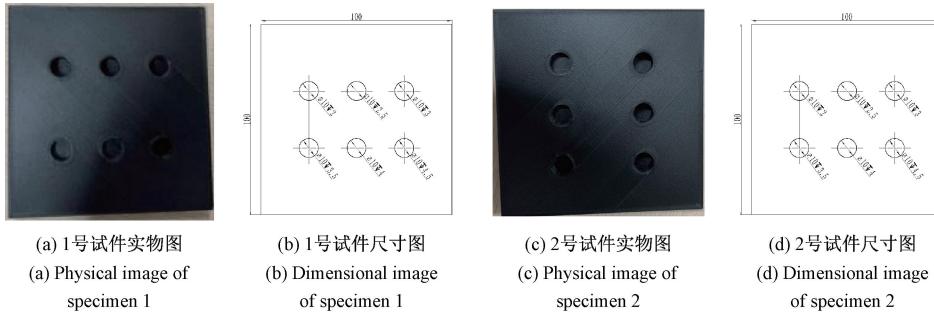


图7 试件尺寸图

Fig. 7 Dimension diagram of test piece

3 实验和结果分析

3.1 红外热图采集

卤素灯功率为 500W，激励方式为长脉冲激励，分别对 1 号试件和 2 号试件进行激励和热图采集。

图 8(a) 和(b) 是两个试件的灰度图，长脉冲激励 15 s，选取第 650 帧的图像。

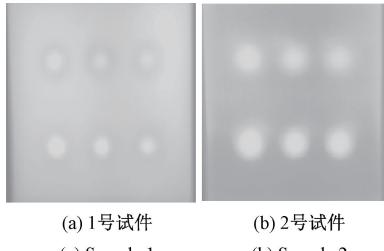


图8 原始红外热图

Fig. 8 Original infrared thermogram

3.2 降噪处理

从所采集的红外热图序列中挑选最清晰的图片作为

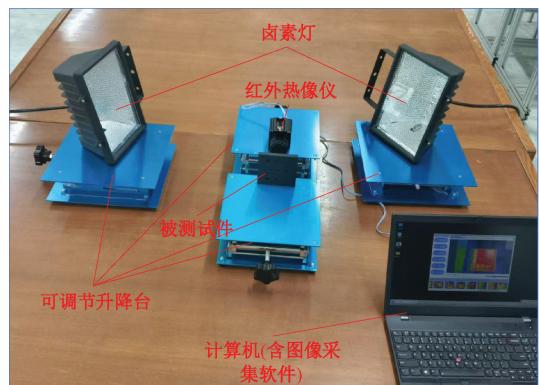


图6 主动式红外无损检测实验平台

Fig. 6 Active infrared non-destructive testing experimental platform

测，分别称为 1 号试件和 2 号试件。1 号试件由含有 50% 的连续碳纤维，2 号试件含有 90% 连续碳纤维。两个试件外观和尺寸完全相同，试件尺寸图如图 7 所示。两个试件上均设 6 个 $\varphi 10$ mm 的孔，其深度分别为 2、2.5、3、3.5、4 和 4.5 mm。

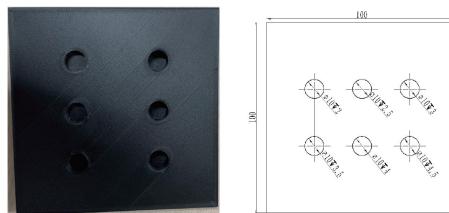


图9 缺陷识别结果对比

处理的样本，图 9 中，“原图”列第 1 行至第 4 行的图片选自 1 号试件，激励时间为 5、10、15 和 20 s 情况下选取的第 650 帧；“原图”列第 5 行至第 8 行的图片选自 2 号试件，激励时间为 5、10、15 和 20 s 情况下选取的第 650 帧。本文算法 (adaptive median filtering based on time series information, AMFTSI) 的处理效果与自适应中值滤波 (AMF)、张量鲁棒主成分分析法 (tensor robust principal component analysis, TRPCA)、离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT) 和文献 [21] 中的算法做了对比分析，这些算法处理后的图片对比如图 9 所示。

从图 9 可以看出，AMF、TRPCA、DWT 算法使图像边缘模糊；PCA 算法使图像亮度大大降低；AMFTAI 和文献 [21] 算法保持了清晰地边缘和细节，但是在视觉上并没有明显差别，因此需要客观的评价指标来衡量各算法图像处理的效果。

3.3 处理效果的评价

采用信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 作为评价指标，它描述了图像中有用信号强度与噪声强度之间的比例关系。信噪比越高，表示图像中的信号成分越强，噪声成

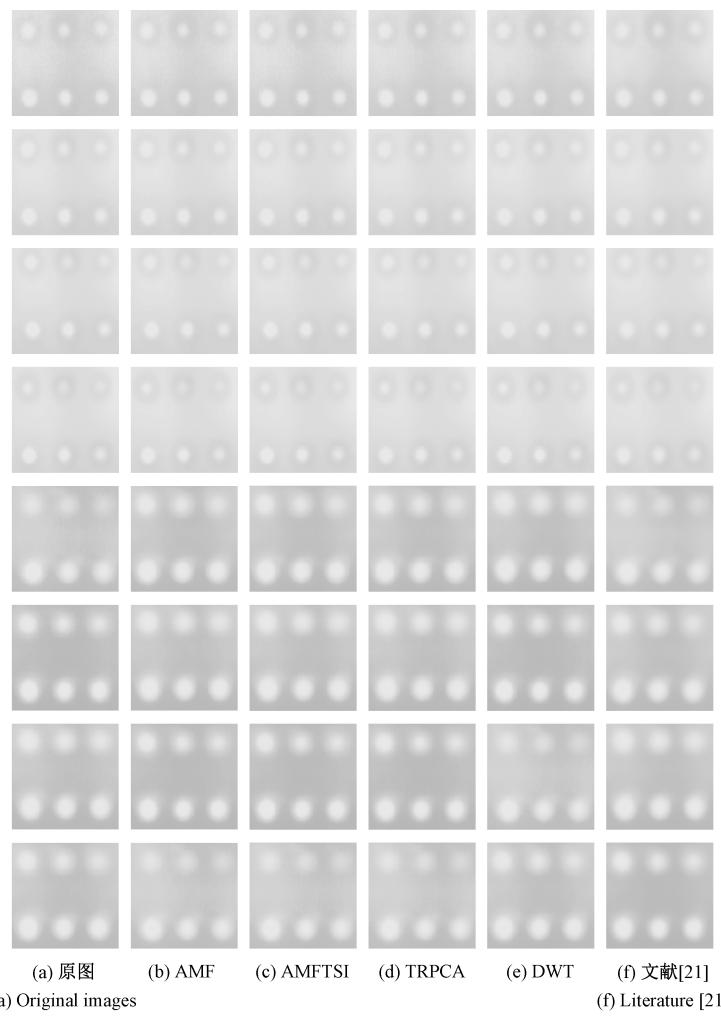


图 9 原图与不同图像增强对比分析

Fig. 9 Comparative analysis of original image and different image enhancements

分相对较弱,图像质量通常越好。信噪比的定义为:

$$10 \cdot \lg \left[\frac{\sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} f(x, y)^2}{\sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} (f(x, y) - \hat{f}(x, y))^2} \right] \quad (10)$$

$f(x, y)$ 表示原始的信号/图像, $\hat{f}(x, y)$ 则表示处理后的信号/图像。

根据信噪比定义,经过不同方法处理后的图像的信噪比如表 1 和 2 所示,其折线图如图 10 所示。

由表 1、2 和图 10 数据可知,本文提出的 AMFTSI 方法在这两个试件上的表现都是最优的。AMFTSI 方法在 1 号试件上的表现良好,SNR 指数平均数为 54.43 dB,平均数分别高出 AMF、TRPCA、DWT 和文献[21]算法 9.90%、5.85%、12.06% 和 16.45%;在 2 号试件中,AMFTSI 的 SNR 指数平均数为 54.87dB,平均数分别高出 AMF、TRPCA、DWT 和文献[21]算法 12.5%、10.49%、16.52% 和 19.31%。

表 1 1 号试件 SNR 指数

Table 1 SNR index of specimen No. 1

处理方法	1	2	3	4
AMF	44.03	49.51	52.17	53.41
AMFTSI	52.84	54.18	55.18	55.83
TRPCA	45.51	51.19	53.72	54.24
DWT	42.82	48.00	51.04	52.92
文献[21]	41.41	47.15	49.50	49.89

表 2 2 号试件 SNR 指数

Table 2 SNR index of specimen No. 2

处理方法	5	6	7	8
AMF	46.70	47.98	49.42	51.17
AMFTSI	55.04	51.94	53.46	59.02
TRPCA	48.01	48.49	50.54	51.86
DWT	44.87	45.09	46.78	50.74
文献[21]	44.18	46.85	46.16	47.49

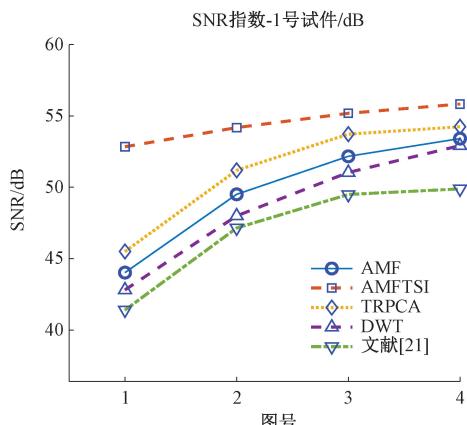
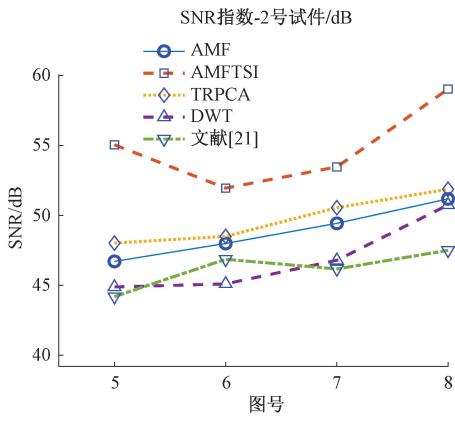
(a) 1号试件SNR指数
(a) SNR index of specimen No.1(b) 2号试件SNR指数
(b) SNR index of specimen No.2

图 10 不同处理方法的 SNR 指数对比

Fig. 10 Comparison of SNR indices for different processing methods

4 缺陷的定量测量

缺陷的定量测量主要用于评估材料的完整性和安全性,通过确定质心位置和大小,可以准确识别和定位材料内部的缺陷和严重程度,有助于发现并纠正生产工艺中的问题。

4.1 缺陷数量及位置

两个试件均有 6 个直径为 10 mm 的孔洞缺陷,在零件图纸上,缺陷的质心位置如图 11 所示,单位为像素。

以经过 AMFTSI 处理并归一化后的两个例图为为例,采用最大类间方差法(Otsu)分割出缺陷,然后利用 regionprops 函数获得缺陷的质心位置。

使用预测坐标点与实际坐标点的欧式距离来衡量误差,可得到图 12(a) 中的误差为:7.729 8(个像素),图 12(a) 中的误差为:8.048 2(个像素)。

4.2 缺陷大小的测量

1) 缺陷的宽度测量

在红外热图像中,通常采用半高宽测量法测量缺陷的尺寸,即手动或自动绘制一条通过缺陷中心的直线,提取

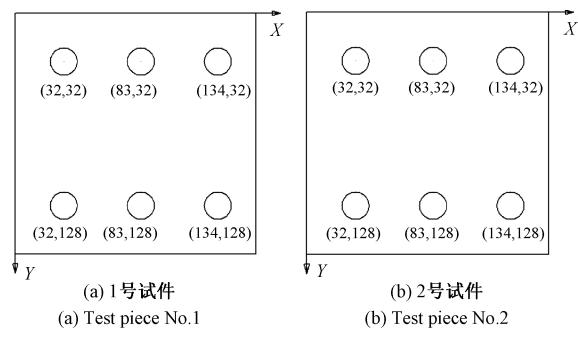


图 11 试件质心坐标

Fig. 11 Coordinates of the center of mass of the specimen

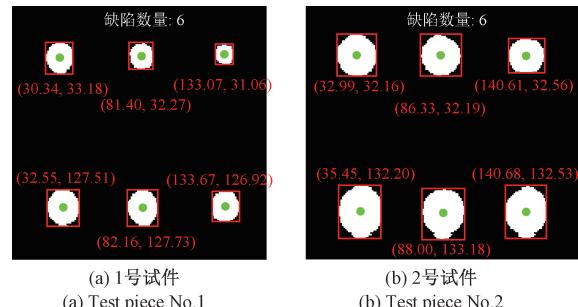


图 12 缺陷质心坐标预测

Fig. 12 Prediction of defect centroid coordinates

直线上所包含的像素值,找到与这些数据的最佳拟合曲线,使用 Savitzky-Golay 滤波算法(SG 算法)对提取的温度空间曲线进行平滑处理,在滤波后的温度空间曲线上,找到曲线的峰值,并确定峰值一半对应的两个位置(x_1 和 x_2),这两个位置之间的距离即为缺陷的半高宽,如图 13 所示。根据半高宽($x_2 - x_1$)和单位像素的实际物理距离(单位为 m),计算出缺陷的物理尺寸:

$$D = (x_2 - x_1) \times m \quad (11)$$

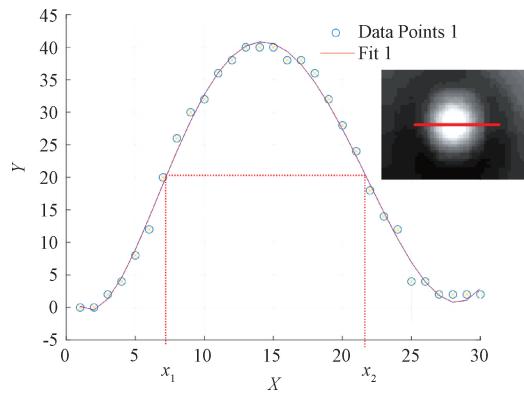


图 13 半高宽测量法原理图

Fig. 13 Schematic diagram of half width measurement method

本研究使用的红外热像仪分辨率为 480×640 ,试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,测得 1 号试件在图像中所占像素为 $220 \text{ pixel} \times 220 \text{ pixel}$,2 号试件在图像中所占像素为 $257 \text{ pixel} \times$

257 pixel, 1 号试件所对应比例尺为 $m_1 = 0.4545 \text{ mm/pixel}$, 2 号试件所对应比例尺为 $m_2 = 0.3922 \text{ mm/pixel}$ 。

图 14 展示了 1 号试件和 2 号试件例图中所绘制通过缺陷中心的直线。1 号试件与 2 号试件均有 6 个直径为 10 mm 的孔洞缺陷, 缺陷 1、缺陷 2、缺陷 3、缺陷 4、缺陷 5 和缺陷 6 距表面的距离分别为 3、2.5、2、1.5、1 和 0.5 mm。

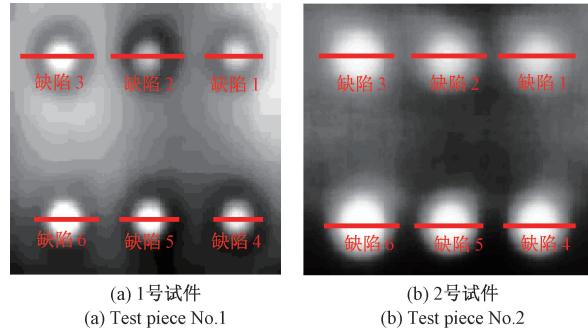


图 14 通过缺陷质心的直线

Fig. 14 A straight line passing through the defect centroid

依次对 1 号试件和 2 号试件的缺陷 1、缺陷 2、缺陷 3、缺陷 4、缺陷 5 和缺陷 6 所对应的画线取出像素值, 并在 MATLAB 中使用 polyfit 函数进行曲线拟合, 再利用 findpeaks 函数找到所有峰值, 接着返回每个峰值对应的半高宽, 最后测得数据如表 3 所示。

表 3 半高宽法对缺陷宽度的测量结果

Table 3 Measurement results of defect width using the half width method

缺陷序号	半高宽 (试件 1)	测量尺寸 (试件 1)	半高宽 (试件 2)	测量尺寸 (试件 2)
1	16	7.2720	32	12.5504
2	18	8.1810	30	11.7660
3	23	10.4535	31	12.1582
4	15	6.8175	31	12.1582
5	18	8.1810	30	11.7660
6	22	9.9990	34	13.3348

注: 半高宽单位为 pixel; 测量尺寸单位为 mm

从表 3 中可知, 1 号试件尺寸平均误差为 15.18%, 2 号试件尺寸平均误差为 22.89%, 这说明在同一时刻获取的图像中, 由于 2 号试件的碳纤维含量较大, 热扩散效率较高, 导致 2 号试件缺陷测量的平均误差要大于 1 号试件缺陷测量的平均误差。

2) 缺陷的边缘测量

利用高斯拉普拉斯(Laplacian of Gaussian, LOG)边缘检测算子提取缺陷边缘, 估计缺陷的实际周长。LOG 边缘检测是一种在计算机视觉和图像处理中常用的边缘检测技术。结合了高斯平滑和拉普拉斯算子来检测图像中的边缘, 检测步骤为: 首先使用高斯滤波器对原始图像进行平滑处理, 以减少噪声并保留图像的边缘特征; 在高斯平

滑之后, 应用拉普拉斯算子来计算图像的二阶导数, 检测图像中的快速强度变化; 最后, 通过阈值处理、边缘细化和边缘连接等提取完整的边缘。

上述操作, 提取的边缘长度单位为像素, 需要乘以两试件相应的比例尺得到实际尺寸。应用 LOG 边缘提取算子, 得到缺陷的边缘如图 15 所示。

由此测得 1 号试件和 2 号试件各个缺陷的实际周长如表 4 所示。

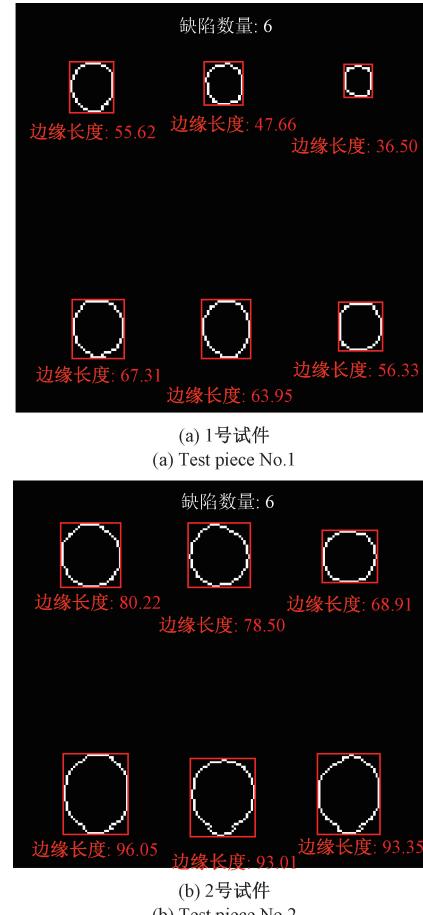


图 15 缺陷周长预测

Fig. 15 Estimation of defect perimeter

表 4 缺陷的测量周长

Table 4 Measurement perimeter of defects

缺陷序号	半高宽 (试件 1)	测量尺寸 (试件 1)	半高宽 (试件 2)	测量尺寸 (试件 2)
缺陷 1	36.50	16.5893	68.91	27.0265
缺陷 2	47.66	21.6615	78.50	30.7877
缺陷 3	55.62	25.2793	80.22	31.4623
缺陷 4	56.33	25.6020	93.35	36.6119
缺陷 5	63.95	29.0653	93.01	36.4785
缺陷 6	67.31	30.5924	96.05	37.6708

注: 半高宽单位为 pixel; 测量尺寸单位为 mm

从表 4 可以看出, 缺陷 1~6 的测量周长均呈逐渐增大的势态, 实际上所有缺陷均为直径为 10 mm 的圆形孔洞, 所以理想的测量周长应为 31.415 9 mm, 缺陷 1 至缺陷 6 距表面的深度分别为 3、2.5、2、1.5、1 和 0.5 mm, 由 1 号试件的测量结果可知, 缺陷距离表面越近, 则测得的结果越精确。由 2 号试件的测量结果可知, 除 3 号缺陷之外, 其他缺陷的测量周长均与实际周长有较大误差, 最大误差达到 6.254 9 mm。由于 2 号试件的碳纤维含量较高(碳纤维含量为 90%), 热传导效率较高, 2 号试件热扩散速度大于 1 号试件, 导致 2 号试件的缺陷区域与正常区域的温差减小速度要大于 1 号试件, 因此在相同激励条件、同一时刻的图像上测量缺陷的周长, 2 号试件缺陷的测量周长多大于实际周长; 而 1 号试件的碳纤维含量较低(碳纤维含量为 50%), 热传导效率较低, 距离表面较深的缺陷区域与周围正常区域的温差较小, 导致缺陷测量周长要远小于实际周长。

5 结 论

在自适应中值滤波的基础上, 提出了一种基于时序信息的自适应中值滤波, 该方法结合当前像素在某一时刻的时间维度的信息, 利用 z-score 离群点去除法判断当前像素是否为异常值, 将异常值替换为当前像素在该时刻前、后一个单位时间内的均值, 有利于降低输出值与实际值的误差, 对比了该方法与 AMF、TRPCA、DCT 等算法在处理后图像的信噪比(SNR)指数, 结果表明本文提出的方法在 SNR 指数均高于其他方法。在 MATLAB 环境下采用 Otsu 阈值分割算法对缺陷进行分割, 进而利用 regionprops 函数确定缺陷的质心位置。结果表明, 1 号试件和 2 号试件的缺陷位置预测误差分别为 7.729 8 像素和 8.048 2 像素; 采用半高宽测量法, 手动绘制缺陷中心直线以获得空间像素曲线, 测得 1 号试件尺寸平均误差为 15.18%, 2 号试件为 22.89%; 利用 LOG 边缘检测算子提取缺陷边缘, 由于碳纤维含量不同导致的热传导效率差异, 在同一时刻, 1 号试件的测量周长误差随缺陷深度增加而增大, 而 2 号试件则相反, 即缺陷越接近表面, 测量误差越大。

参考文献

- [1] 丛超男, 朱文清, 刘俊杰, 等. 纤维增强复合材料弹道极限速度理论与数值模型研究进展[J]. 科学通报, 2024, 69(22): 3238-3251.
- [2] CONG CH N, ZHU W Q, LIU J J, et al. Advances in analytical and numerical models for ballistic limits of fiber-reinforced composites[J]. Scientific Bulletin, 2024, 69(22): 3238-3251.
- [3] 徐亚军, 向红星, 钟勉, 等. 碳纤维复合材料不同深度缺陷的太赫兹检测研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 58-63.
- [4] XU Y J, XIANG H X, ZHONG M, et al. Research on THz detection of CFRP with different depth defects[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(8): 58-63.
- [5] 郭雪吟, 周伟, 马连华, 等. 含缺陷纤维复合材料热老化后变形与损伤破坏声发射行为[J]. 电子测量技术, 2022, 45(14): 172-178.
- [6] GUO X Y, ZHOU W, MA L H, et al. Acoustic emission behavior of deformation and damage of composite materials with defective fibers after thermal aging[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(14): 172-178.
- [7] 张苏嘉, 苏益凡, 周伟, 等. 碳纤维拉索缺陷的电磁层析成像有限元仿真[J]. 电子测量技术, 2024, 47(8): 86-92.
- [8] ZHANG S J, SU Y F, ZHOU W, et al. Finite element simulation of electromagnetic tomography for defects in carbon fiber cables [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(8): 86-92.
- [9] 牛静宜, 鲁思伟, 张倍宁, 等. 变组分复合材料 3D 打印工艺中机器学习算法对工艺参数预测有效性研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(21): 263-274.
- [10] NIU J Y, LU S W, ZHANG B N, et al. Study on the effectiveness of machine learning algorithms for process parameter prediction in 3D printing process of variable-component composites [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(21): 263-274.
- [11] 曲亚林, 宁宁, 焦婷, 等. 超声检测在复合材料挖补修理结构缺陷检测中的应用[J]. 无损检测, 2024, 46(3): 1-4.
- [12] QU Y L, NING N, JIAO T, et al. Application of ultrasonic testing in the detection of scarf-repaired composite structures [J]. Non destructive testing, 2024, 46(3): 1-4.
- [13] 钟翼龙, 张晓凤, 刘祎斌, 等. 填装材料 CT 图像中脱粘缺陷识别与深度测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(1): 178-186.
- [14] ZHONG Y L, ZHANG X F, LIU Y B, et al. Identification and depth measurement of debonding defects in CT images of packing materials[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(1): 178-186.
- [15] 于正慧, 张志杰, 陈昊泽, 等. 基于平面电容传感器的复合材料缺陷检测研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 7-12.
- [16] YU ZH H, ZHANG ZH J, CHEN H Z, et al. Research on composite defect detection based on planar capacitance sensor [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(2): 7-12.

- [9] 刘颖韬, 郭广平, 曾智, 等. 红外热像无损检测技术的发展历程、现状和趋势[J]. 无损检测, 2017, 39(8): 63-70.
LIU Y T, GUO G P, ZENG ZH, et al. The development history, status and trends of infrared thermographic nondestructive testing [J]. Non-Destructive Inspection, 2017, 39(8): 63-70.
- [10] 周林鑫, 余飞鸿. 图像降噪算法的 FPGA 实现方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 135-140.
ZHOU L X, YU F H. FPGA implementation methods of image denoising algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(24): 135-140.
- [11] 杨昆, 杜瑀, 钱武侠, 等. 基于多尺度上下文信息融合的条件生成对抗神经网络用于低剂量 PET 图像去噪[J]. 电子测量技术, 2021, 44(7): 74-81.
YANG K, DU Y, QIAN W X, et al. Conditional generative adversarial network based on multi-scale contextual information fusion for low-dose PET image denoising [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(7): 74-81.
- [12] 王帅, 刘光宇, 曹禹, 等. 改进自适应中值滤波算法的图像去噪研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 43-48.
WANG SH, LIU G Y, CAO Y, et al. Research on image denoising technology based on adaptive median filter [J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2022, 50(6): 43-48.
- [13] 张永飞, 邓辉. 一种基于自适应中值滤波的各向异性扩散滤波的图像去噪算法[J]. 装备制造技术, 2023(11): 18-22.
ZHANG Y F, DENG H. An image denoising algorithm based on adaptive median filtering and anisotropic diffusion filtering [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(11): 18-22.
- [14] 王野, 李钦奉, 齐继阳. 基于改进自适应中值滤波的图像降噪方法[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(6): 112-115.
WANG Y, LI Q F, QI J Y. Image denoising method based on improved adaptive median filter [J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(6): 112-115.
- [15] LI N, LIU T, LI H. An improved adaptive median filtering algorithm for radar image co-channel interference suppression [J]. Sensors, 2022, 22(19): 7573.
- [16] LIU SH D, NI H Y, ZHONG Y, et al. Adaptive weighted median filtering for time-varying graph signals [J]. Signal, Image and Video Processing, 2025, 19(1): 1-7.
- [17] WEI J S, WU J J, WANG CH. Standard-deviation-based adaptive median filter for elimination of batwing effects in step microstructure measurement using digital holography [J]. Sensors, 2024, 24(18): 5928.
- [18] JIN X, WANG Y. Pixel gradient-based adaptive iterative median filter for image impulse noise removal [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2024, 43(3): 421-435.
- [19] SONG Y Q, LIU J. An improved adaptive weighted median filter algorithm [C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019, 1187(4): 042107.
- [20] HA R, LIU P Y, JIA K B. An improved adaptive median filter algorithm and its application [C]. Twelfth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, November 21-23, 2016, Kaohsiung, Taiwan, Springer International Publishing, 2017: 179-186.
- [21] GUO Q, ZHANG C M, ZHANG Y F, et al. An efficient SVD-based method for image denoising [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2015, 26(5): 868-880.

作者简介

张嘉宁,硕士研究生,主要研究方向为复合材料无损检测。

E-mail: 2023020089@bistu.edu.cn

韩凤霞(通信作者),高级实验师,博士,主要研究方向为复合材料无损检测及智能制造与数字孪生技术相关领域。

E-mail: hanfengxia@bistu.edu

王红军,教授,主要研究方向为高端装备智能感知与机电系统监控监测等。

E-mail: wanghongjun@bistu.edu.cn

刘淑聪,副教授,主要研究方向为高端装备智能感知、故障诊断与智能运维等。

E-mail: liushucong@bistu.edu.cn

汪俊,教授,主要研究方向为数字化检测技术与装备、计算机视觉与图形学等。

E-mail: wjun@nuaa.edu.cn