

# 往复式涡流 C 扫描行间错位图像复原校正方法 在项目制教学中的应用

汪步云<sup>1,2</sup>, 程 军<sup>1,2</sup>, 梁 艺<sup>1,2</sup>

(1. 安徽工程大学 人工智能学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 芜湖安普机器人产业技术研究院, 安徽 芜湖 241007)

**摘要:** 在高频涡流检测系统往复式扫描检测过程中, 由于存在奇偶行间错位而引起图像模糊现象, 针对这一问题, 在 C 扫描高频涡流检测系统基础上, 分析了往复式涡流扫描行间错位的成因, 设计了一种自适应维纳滤波的图像复原校正算法; 该算法可有效地处理复原带电线电缆狭缝裂纹以及碳纤维复合材料编织纹理的扫描图像, 解决了高频往复式扫描的奇偶行间错位而引起的图像模糊失真问题, 通过实验比较了不同图像, 分别运用包括自适应维纳滤波复原校正等 4 种算法, 复原处理图像的 PSNR 计算值分别是 24.918 dB、22.932 6 dB、23.712 6 dB 和 24.821 8 dB, 实验结果表明所设计的算法对峰值信噪比处理性能有较大提升, 验证了其可行性与可靠性; 该算法既融合了单程隔行扫描的涡流成像结果准确性, 又具备往复式逐行扫描成像速度快效率高的特点; 上述检测方法亦在项目制教学中得到的推广和应用。

**关键词:** 涡流检测; C 扫描成像; 图像复原; 维纳滤波; 峰值信噪比

## Research on Interline Dislocation Image Restoration Correction Method Based on Reciprocating Vortex C Scan System for Experiment Teaching

WANG Buyun<sup>1,2</sup>, CHENG Jun<sup>1,2</sup>, LIANG Yi<sup>1,2</sup>

(1. School of Artificial Intelligence, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China;

2. Institute of Technology robotics industry, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** According to the high frequency eddy current testing system based on C-scan, the image blur phenomenon caused by the mismatch between odd and even rows in the reciprocating scanning detection, the image restoration and correction algorithm of adaptive Wiener filtering are designed, and that the causes based on the misalignment between lines are analyzed. The algorithm can effectively process and restore the scan images which the slit and cracks are in the energized wires or braided texture of carbon fiber composites. Moreover, the algorithm can effectively solve the high frequency reciprocating scan parity inter-row fuzzy image distortion caused by misalignment of problem. The feasibility and reliability of the proposed method are verified by comparing the peak signal-to-noise ratio processed by different image restoration algorithms. According to the four algorithms including adaptive Wiener filter restoration and correction are used respectively, the PSNR calculated values of the restored images were 24.918 dB, 22.932 6 dB, 23.712 6 dB and 24.821 8 dB, respectively. Experimental results show that the performance of PSNR processing can be greatly improved by the proposed algorithm. Also, the feasibility and reliability are verified. The effective fusion one-way interleaved eddy current imaging results are accurate, reciprocating progressive scan imaging speed characteristics of high efficiency. The proposed method has also been popularized and applied in project-based teaching.

**Keywords:** eddy current testing; C scanning imaging; image restoration Wiener filtering; peak signal to noise ratio

## 0 引言

针对带电线电缆、复合材料或者钢板等工件, 工程中往往需要无损伤检测, 得到被检测工件的裂缝、裂纹或纹理图像。涡流检测作为无损检测的一种手段, 易于实现自动化、效率高等特点, 多年来在金属以及碳纤维复合材料等

导电构件的表面和近表面损伤检测中得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。利用涡流法对大面积的实际结构件检测时, 大多通过表面 C 扫的方式完成扫描并成像<sup>[4]</sup>。

涡流探测采用 C 扫描, 一般分为两种模式, 其一是单程隔行扫描, 这种扫描方式对对被测工件扫查, 显而易见是仅在去程完成被测工件扫描, 而没有在回程过程中运用

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-03-11。

基金项目: 国家自然科学基金(61741101); 省级质量工程“安徽工程大学机器人现代产业学院”; 安徽省高等学校省级教学示范课“光电技术”; 安徽工程大学教研重点项目(2021jyxm15); 安徽工程大学一流研究生课程“现代控制理论”(2021ylkc001); 教育部产学研合作协同育人项目(202002018050); 安徽工程大学教研项目(课程思政 2021jyxm76)。

作者简介: 汪步云(1984-), 男, 湖北云梦人, 博士, 副教授, 主要从事机器人信息感知方向的研究。

引用格式: 汪步云, 程 军, 梁 艺. 往复式涡流 C 扫描行间错位图像复原校正方法在项目制教学中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 216-221, 228.

涡流探头扫描。相比于第一种扫描方式, 往复式逐行扫描充分利用了扫描路径的去程及回程, 从检测效率角度看, 这种是较为理想的检测手段<sup>[5]</sup>。

一般地, 探头在由电机组成的驱动机构完成运动。在往复式逐行扫描过程中, 由于去程、回程导致的电机正反转过程的位置不一致, 即电机编码器输出的 A、B 和 Z 相位脉冲的初始位置不一致, 这会带来传动系统在同步运动过程中出现错位, 即奇数行与偶数行的无法同步信息, 相邻两行之间的脉冲采样不一致, 导致扫描呈现的图像中纵向或横向的像素出现行间错位, 扫描图像因此而出现模糊和失真现象。

由于往复式扫描效率高, 但容易产生像素奇偶行间错位现象, 既兼顾其效率高的优点, 也克服其错位确定, 确定往复式扫描图像错位校正算法在复合检测中的应用则显得尤为重要。针对上述问题, 相关学者提出了序贯相似度检测方法、最大互信息量和形态学梯度预估法等多种算法<sup>[6-9]</sup>。相关学者采用上述方法, 主要是通过扫描成像后的图像灰度、对比度变化等信息完成错位校正, 这些方法大多仅适用分辨率很高的扫描成像, 如光学信息图像。对应地, 涡流检测得到的扫描成像, 分辨率较低, 上述大多算法不适用于涡流错位图像。因此, 需要从涡流检测图像错位机理入手, 结合图像校正算法, 通过建立错位图像的退化模型, 修正得出原始图像, 进而消除奇偶行间错位, 补偿图像模糊带来的失真。据此, 通过 LabVIEW 完成运动控制及数据采集, 通过 Matlab 完成软件算法开发程序, 在此基础上, 设计实现了一套 LabVIEW 与 Matlab 混合编程的涡流检测系统, 所开发系统亦可集成化实现, 在项目制教学中得到了应用。

## 1 行间错位成因分析

往复式高频涡流检测系统设计如图 1 所示, 分为上位机、下位机以及探头运动装置, 3 个部分组合集成一套完整的涡流检测系统。

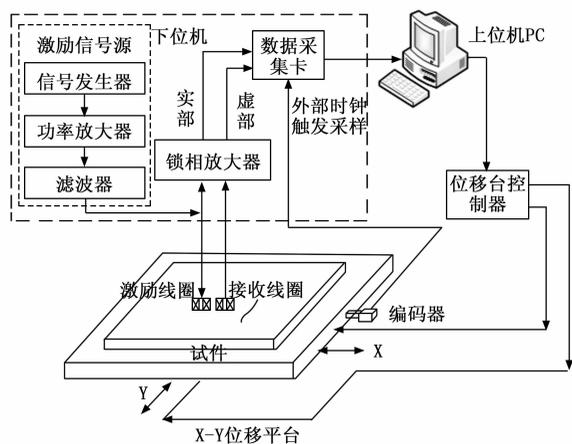


图1 高频涡流检测扫描成像实验装置

下位机包括激励信号源、锁相放大器和数据收集卡。其中, 激励信号源通过信号发生器、功率放大器和滤波器

组成。其中, 信号发生器最高可输出 20 MHz 的正弦波, 经功率放大和滤波后便可用于涡流探头的激励。采用锁相放大器对接收线圈信号进行解调, 提取扫描成像中的损伤信息, 同时, 以光电编码器的脉冲为信息采集的触发信号, 有效提高了运动信息采集的同步性。

探头运动装置主要包括承载被测件的 X、Y 位移工作台和位移台控制器, 用以实现相对探头拖动的高精度运动控制。一般的, 将发射—接收型探头固定于位移工作台上, 将被测工件固定于位移平台表面, 而且相对尺寸保持在探头检测范围内, 由此来实现探头对一块面积区域的扫描<sup>[10]</sup>。

上位机采用 PC 机实现数据采集和处理。探头在往返扫描过程中, 探头上的感应线圈得出的电压信号产生变化, 在单位时间内由下位机采集后直接送至上位机, 电压信号的变化以强度变化同步显示。利用 LabVIEW 软件实现对位移台的运动控制、激励信号的幅值频率设定、信号的采集存储显示。

对于往复扫描过程, 往往需要同步连续采集。探头在一个自由度上实现水平运动时, 需要经历一次加速、匀速和减速阶段, 每一次运动均是从起点连续运动至终点。加速运动阶段与匀速扫描阶段相比, 单位时间内系统探头的运动距离比匀速运动时作动距离小, 若采用等时间间隔的采样脉冲, 在两个相邻的采样周期内, 系统探头扫描被测工件的作动距离不相等, 这会导致探头在空间实际运动位置与采样信息不一致的情况<sup>[5]</sup>, 这往往会带来同步误差积累, 并以此带来探测图像上的错位或者是重影, 是往复式涡流扫描的问题所在。

此外, 位移台运动的检测往往通过 X 轴或 Y 轴上的电机转速检测的, 实现的方法多是通过检测运动轴上电机的编码器实现的。一般地, 位移台轴端联轴器与电机同轴旋转。因此, 通过电机编码器的输出脉冲, 作为检测系统采集数据的触发时钟, 可以解决采样点与空间实际位置不匹配的问题。

根据编码器的原理可知, 在加速和减速阶段, 输出脉冲宽度变化规律为速度越小, 脉冲宽度越宽; 速度越大则输出脉冲宽度越窄。而探头在每个脉冲内运动的距离可以理解为速度的积分, 这相当于编码器在输出每一个脉冲周期内保证了探头运动的距离相等, 进而解决了相邻两个采样脉冲内, 探头运动距离不一致而引起的数据采样点与空间实际位置不对应的问题。这种方式不仅能够提高探头的扫描速度, 还能实现系统的同步运动采集, 是一种理想的控制方式。

对照图 2, 进一步阐述上述原理。从图 2 (a) 可以看出, 与图 2 (b) 的单程隔行扫描路径相比, 往复式逐行扫描首先在 X 轴快速完成一个正程扫描, 而后在 Y 轴实现一个步长的回程扫描, 回程扫描完成后, Y 轴再次完成一个运动步长。完成该正程和回程扫描即为一个周期。

但是, 在往复扫描过程中, 发射—接收型探头从开始扫描到运动端点停止, 这个运动过程往往有外界干扰, 包括位移平台的随机振动、机械回差和电流噪声等, 这会带

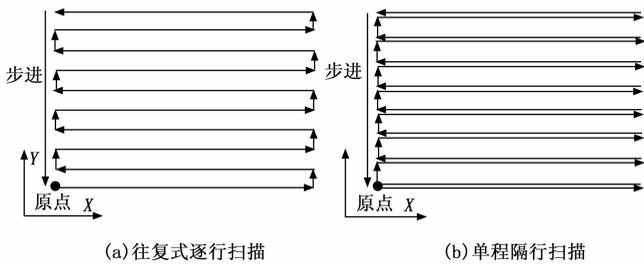


图 2 涡流探头 C 扫描路径

来探头扫描成像出现奇数行和偶数行的重复位置不匹配，这亦是往复式涡流扫描和成像造成重影或错位的根本原因。

探头的起始位置发生随机偏移而造成图像错位。根据图 2 阐述的原理，为了克服这一问题，需实现运动采集数据的同步。采用编码器的 A 相，输出上升沿作为采集数据的触发时钟。编码器正反转时输出脉冲如图 3 所示。一般地，对电机输出采用 A、B 和 Z 三相脉冲输出，实现电机的输出转速和正反转识别。位移台上的驱动电机在拖动探头时，编码器的输出脉冲在起始相位难以保证一致，这也会让系统扫描成像后，像素的奇数行和偶数行采样信息与位置无法对应，导致扫描图像的行间信息错位，造成往复式扫描涡流成像较为模糊，为后续检测和高精度复原带来很大的困难。

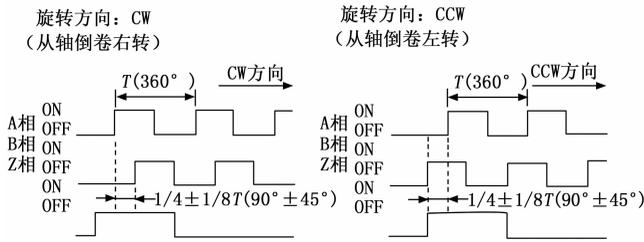


图 3 编码器输出脉冲

## 2 图像复原校正算法

本节将通过几组实验，验证文中提出的自适应维纳滤波的图像复原校正算法。分别针对不锈钢板裂缝、CFRP 碳纤维复合材料编织纹理图像开展检测，通过实验结果进一步说明算法的适用性。

如图 4 所示，以不锈钢板裂缝检测为例，304 不锈钢板厚度 5 mm，表面加工出宽度 0.2 mm、深度分别为 1 mm 和 2 mm 的两条裂缝，扫描区域为  $0 < X < 120 \text{ mm}$ ， $0 < Y < 60 \text{ mm}$ ，X 方向步长设为 120 mm，Y 方向步长设为 0.3 mm，采用图 1 中所示的发射—接收型探头，激励信号频率 2 MHz，锁相放大器增益为 14 dB。采用图 1 所示的小尺寸发射—接收型探头，得到的涡流成像图像更加聚焦，分辨率显著提高，可以得出更加丰富的纤维纹路信息。

如图 5 所示，针对不锈钢板的裂缝，运用涡流探头单程隔行扫描得到常规扫描图像，采用同一检测硬件检测系统，得到往复式扫描的模糊图像。对比图 4 所示的 304 不锈

钢板的损伤条纹，由成像结果可以看出，单程扫描成像质量较高，裂纹成像清晰明确；往复式涡流扫描成像错位严重，钢板实际的裂缝部位呈现锯齿状且轮廓模糊，扫描成像对损伤定位和识别带来不利影响。

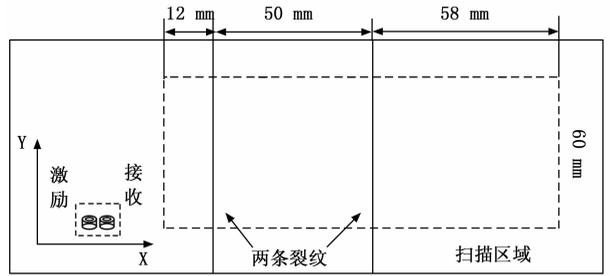
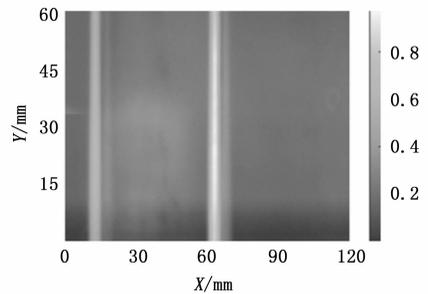
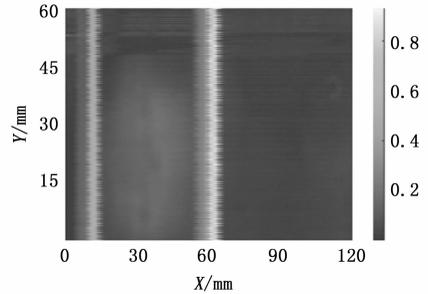


图 4 不锈钢板示意图



(a) 单程隔行扫描图像



(b) 往复式逐行扫描的错位模糊

图 5 涡流扫描检测对比图

上述问题，可设计一种维纳滤波自适应方法，修正像位错位误差。维纳滤波 (Wiener filtering) 复原算法也被称为最小均方误差滤波方法。在得到涡流检测成像之后，将完成图像退化，这个过程可看作是在模糊核的干扰下，由原来清晰检测成像转变为图像模糊退化的过程<sup>[11]</sup>。

图像修正是图像退化的逆过程。运用估计模糊核，完成图像退化，最终得到复原图像。如图 6 所示，涡流检测成像的图像退化及复原的全过程<sup>[12]</sup>。同时，涡流检测成像及复原一直伴有噪声干扰，是一个近似平稳的随机过程。通过计算涡流往复检测成像与复原图像中的像素均方误差，且取均方误差为最小值，此时从理论上可以任务图像复原效果最好，最接近被测工件的原始扫描成像。

因此，上述问题，可以在软件算法中，加入数据平滑与误差处理的过程，如加入维纳滤波处理图像采样的数据均方根误差，其均方误差表达式为<sup>[12]</sup>：

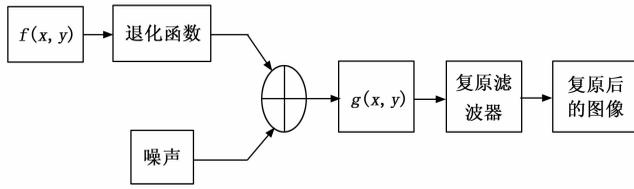


图 6 图像退化复原模型

$$e^2 = E[(f(x, y) - \hat{f}(x, y))^2] \quad (1)$$

式 (1) 中,  $E[*]$  为数学期望,  $f(x, y)$  是原始标准图像估计, 在涡流系统中, 一幅碳纤维的纹路图像可用  $f(x, y)$  来表示,  $\hat{f}(x, y)$  为复原后的图像估计,  $e^2$  为均方差。

此外, 上述数据多是在时域内表达, 为进一步拓宽到频域领域, 更好地表达图像退化的建模过程, 往往需要用到在频率内的表达。图像退化模型在频域的表达式为:

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v) \quad (2)$$

因此, 将上述滤波算法与图像退化处理过程相结合, 对扫描图像实现退化、滤波和复原, 其具体流程如图 6 所示, 即通过得到的扫描图像的像素值  $f(x, y)$ , 在时域内实现退化函数建模, 由于检测过程噪声影响, 得到加权函数, 进而得到  $g(x, y)$ , 在频域内通过复原滤波器进一步处理后, 得到扫描成像复原后的图像。此外, 输出信号的函数特征与探头中线圈的尺寸和结构有关。

通过计算构造维纳滤波函数得:

$$\hat{F}(u, v) = \frac{1}{H(u, v)} \frac{\|H(u, v)\|^2}{\|H(u, v)\|^2 + K} G(u, v) \quad (3)$$

PSNR 为峰值信噪比, 该参数可反映复原处理前后的图像失真程度, PSNR 越小表示图像失真程度越高, 其表达式为<sup>[13]</sup>:

$$PSNR = 10 \ln \frac{255^2}{MSE} \quad (4)$$

其中:  $G(u, v)$  为模糊函数的频谱,  $H(u, v)$  为退化函数,  $\|H(u, v)\|^2$  为  $H(u, v)$  模的平方,  $\hat{F}(u, v)$  是复原图像后的频谱,  $K = S_n(u, v)/S_f(u, v)$  为信噪功率比的倒数,  $S_f(u, v)$  表示原始图像的频谱,  $S_n(u, v)$  表达噪声图像功率谱。

维纳滤波算法的处理结果, 其可靠性取决于噪声与原始检测成像的比值, 用常数  $K$  来代替。  $K$  值的静态估计不利于操作, 亦也不便于引出准确的修正方向。因此, 通过引入  $K$  值的自适应维纳滤波算法, 动态优化  $K$  值, 给出最佳检测成像的修正结果, 其中采用信噪比 PSNR 参数确定适应度函数。具体的程序执行流程如图 7 所示。

上式中的 MSE 反映的是复原图像与原始涡流往复检测图像之间的均方误差, 图像复原结果越好, 则 MSE 值越小, 其表达式如下:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2 \quad (5)$$

其中:  $M$ 、 $N$  分别为涡流检测成像的长、宽参数,  $f(x, y)$ 、 $\hat{f}(x, y)$  分别为扫描成像的原始未退化图像、复原图像在  $(x, y)$  处的像素值。

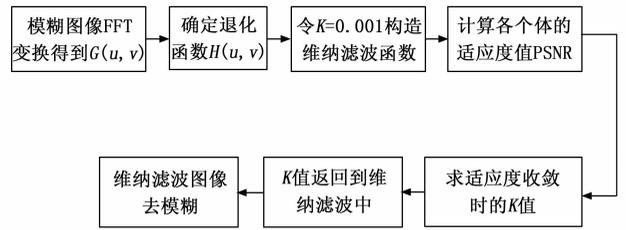
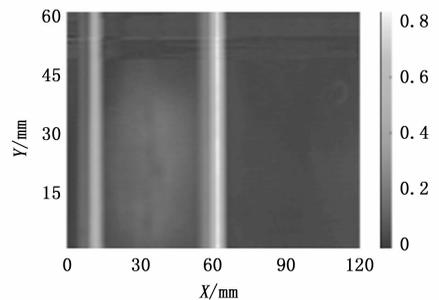


图 7 自适应维纳滤波算法的去模糊流程图

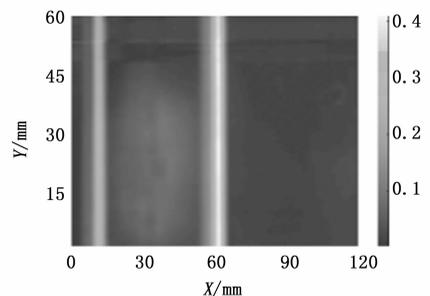
### 3 图像复原校正结果

在设计往复式 C 扫描涡流检测系统, 采用 Matlab 编写自适应维纳滤波校正算法, 处理错位模糊像位误差。上位机主要实现数据采集及其运动控制, 采用 LabVIEW 编写。为了使错位算法更好地嵌入到本系统中, 采用联合编程的方式, 将 Matlab 与 LabVIEW 上位机互联运行, 在 Matlab 中的 Script 脚本节点内调用图像处理函数, 实现图像数据的自动化处理。

运用维纳滤波处理复原后图像如图 8 (a) 所示, 涡流成像中的裂纹锯齿得到了明显改善, 但图像中存在的两条裂纹仍然有较多毛刺, 复原结果不够理想。进一步, 如图 8 (b) 所示, 该图是基于自适应维纳滤波去模糊的修正结果, 检测成像的两条裂纹光滑清晰, 图像背景斑点和噪点较少, 图像复原处理状况较好。同时, 该方法能在 0.1 s 时间内 500 × 500 像素图像的校正, 将空间分辨率提高 1 倍以上, 峰值信噪比 PSNR 最高可达 25 dB 左右。



(a) 维纳滤波: PSNR=23.0243



(b) 自适应维纳滤波算法: PSNR=24.9180

图 8 维纳滤波及其自适应算法复原对比图

针对 PSNR 自适应动态调参的复原结果, 既要保证参数自适应调整的快速迭代, 又要保证参数的收敛速度, 因此将迭代与收敛相结合, 需要合理匹配迭代参数与收敛

终止值。结合实际情况，将终止迭代次数可以设置大于迭代计算次数。如图 9 所示。可以设置迭代参数为 15，终止参数为 30。初始迭代时，PSNR 参数上升较快（此时，设置为 1~5），之后，适应度 PSNR 的值上升缓慢（此时，设置为 6~15），在大于 20 次迭代后，PSNR 变化甚小。适应度 PSNR 的值也需要与 K 值相对应。因此，可将适应度与 K 值相匹配，一般可设置在线性增长区间。

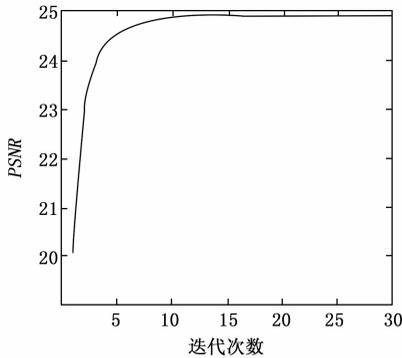


图 9 PSNR 随迭代次数的变化曲线

在此基础上，针对碳纤维增强树脂基复合材料（CFRP）检测开展第二组实验，进一步验证上述往复式扫描图像复原校正算法。

CFRP 是以树脂为基体，以碳纤维为增强体制成的复合材料，作为一种新型材料，CFRP 应用范围非常广泛。因采用导电碳纤维作为增强材料，与其他无损检测技术相比，利用涡流法开展无损检测，电涡流检测更适合用于 CFRP 制造过程中半成品的在线检测。

第二组对象是四向碳纤维复合材料（CFRP）板，铺层方式为  $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ]$ ，试件表面光滑无损伤。复合材料板是通过多层连续碳纤维/环氧树脂预浸料加温加压制备而成，单根纤维直径  $7\ \mu\text{m}$ ，预浸料厚度  $0.125\ \text{mm}$ ，不同角度表示铺层中纤维的取向。

采用图 1 所示的往复式涡流检测系统，通过高频扫描，得出有错位模糊的检测图像。其中，扫描区域设置为： $0 < X < 120\ \text{mm}$ ， $0 < Y < 60\ \text{mm}$ ，位移台的步长在 X 方向设置为  $120\ \text{mm}$ ，Y 方向设定为  $0.3\ \text{mm}$ ，采用发射—接收型的方形探头，设置激励信号激励电压  $7\ \text{V}_{\text{pp}}$ 、增益为  $26\ \text{dB}$ 、频率为  $10\ \text{MHz}$ 、灵敏度为  $20\ \text{mV}$ ，具体扫描范围如图 10 所示。分别利用自适应维纳滤波、最佳规则化滤波<sup>[14]</sup>、LR 迭代最佳复原<sup>[15]</sup>和迭代盲去卷积最佳处理<sup>[16-17]</sup>四种算法对其进行复原，其复原效果对比如图 11 和图 12 所示。

如图 11 所示，第二组实验的处理对象是具有丰富纤维纹理的三向板，由检测成像可看出，复合板中的碳纤维纹理呈间隔排列。正常图像与错位模糊图像具有明显区别，由于在像素单元上的错位，导致图像错位模糊，具体表现在纹理特征不够清晰，背景模糊，图像存在噪声点，边缘不够清晰，这些在图像退化处理时会带来更多处理误差，一方面会对往复式扫描系统的硬件提出更高要求，另一方面提高了复原处理算法和参数调整难度。

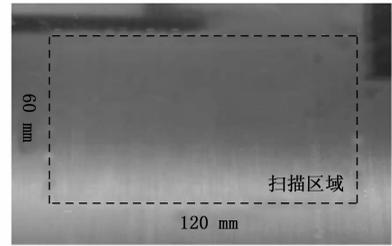
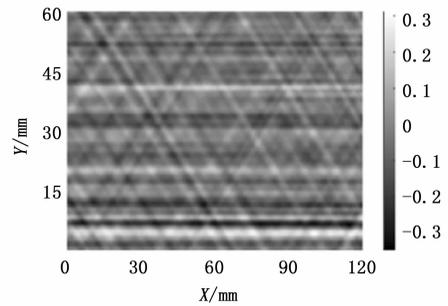
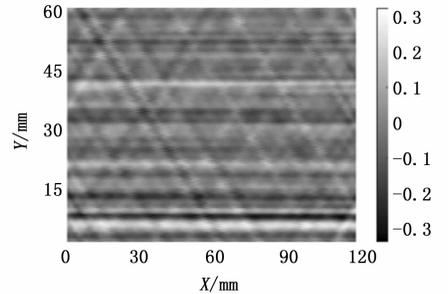


图 10 三向碳纤维板实物图



(a) 正常图像



(b) 错位模糊图

图 11 CFRP 涡流检测图像

如图 12 所示，针对往复式涡流 C 扫描系统，得到的扫描图像，分别运用自适应维纳滤波、最佳规则化滤波、LR 迭代最佳复原和迭代盲去卷积最佳处理 4 种算法，在完成图像退化、滤波和复原处理后，得到的复原图像。经过公式 (4) 计算出 4 种算法的 PSNR 分别是  $24.918\ \text{dB}$ 、 $22.9326\ \text{dB}$ 、 $23.7126\ \text{dB}$  和  $24.8218\ \text{dB}$ 。对比四种算法处理复原的检测成像，四种算法均明显改善了碳纤维涡流往复式检测成像的错位模糊问题，但图像背景与碳纤维的细节方面仍有差异。

如图 12 (a) 所示，与原始图像对比，自适应维纳滤波的复原效果较好，在图像的细节，清晰度和纹理等方面是最接近的。

如图 12 (b) 所示，最佳规则化滤波的复原效果明显不如图 12 (a)，图像出现了多个噪点，图像背景模糊，纹理不清晰。

如图 12 (c) 所示，LR 迭代最佳复原图像在放大后，边缘细节有所欠缺。

图 12 (d) 所示，运用迭代盲去卷积最佳复原方法，完好地复原了图像中碳纤维的错位，从复原结果来看也能辨

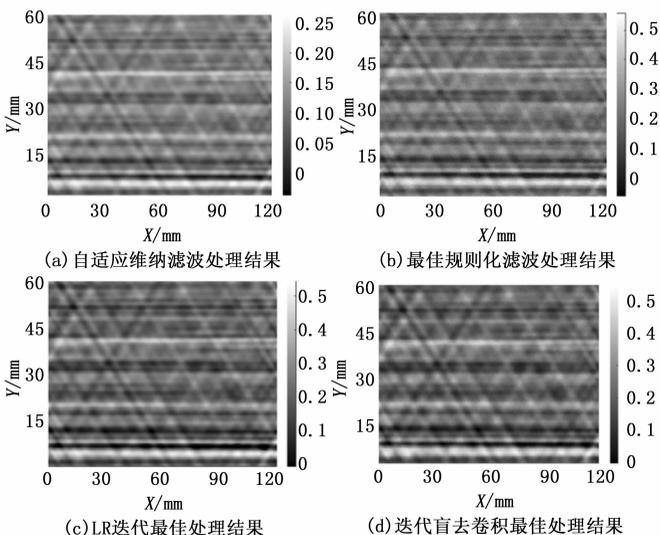


图 12 各算法图像复原效果对比图

认出更多的有效信息, 复原结果接近退化的原始图像。

通过对比上述两组实验, 维纳滤波与迭代盲去卷积复原效果较好, 具有更高的主观评分, 这与 *PSNR* 的计算结果是一致的。通过 *PSNR* 自适应复原算法, 可检测 CFRP 铺层和纤维纹理缺陷, 可实现高精度成像, 较好地给出复合材料的缺陷表达。

此外, 对比涡流检测成像的图 11 和用四种处理方法复原处理得出的图 12 可以看出, 往复式涡流检测可表达裂纹的像素值变化, 同时可得复合板的纹路分布和三个纤维方向, 也与验证了所构建的检测系统的可行性, 体现了发射—接收型探头的高分辨率, 根据所检测纹理成像的情况来看, CFRP 面板内的电导率产生变化, 但这一变化也很小, 可以通过更换涡流探头, 提高其自调零特性, 增强抗干扰能力, 进一步提高分辨率, 进而可最大程度地还原出分层板中的微观损伤和分层位置, 得出更为理想的检测效果。

#### 4 结束语

针对往复式涡流扫描系统存在行间错位, 导致检测图像模糊的问题, 在有限提升硬件系统检测精度的情况下, 采用 Matlab 开发的自适应维纳滤波的图像复原校正算法, 通过与 LabVIEW 实现上位机下的运动控制相匹配, 完成上下位机的联合控制, 在线实现 C 扫描, 解决了高频往复式扫描的奇偶行间错位而引起的图像模糊失真问题, 该算法既融合了单程隔行扫描的涡流成像结果准确性, 又具备往复式逐行扫描成像速度快效率高的特点。

通过对往复式高频涡流成像行间错位的形成原因进行分析, 对原始图像以及错位模糊图像进行空间域表征, 根据涡流检测系统模型, 从图像复原角度对错位图像进一步展开研究, 对维纳滤波算法做出改进, 开发出自适应维纳滤波算法, 得到复原算法的最佳复原效果。为了验证自适应维纳滤波的可靠性, 引入了包括最佳规则化滤波法、LR

迭代复原法和迭代盲去卷积复原法, 并对几种复原算法的复原效果进行比较和评价。

由于去 CFRP 涡流检测造成纹路和缺陷图像重叠在一起, 给材料中缺陷的识别造成一定困难, 此外还需考虑如何降低离散频谱的混叠程度, 或把这种混叠完全解开, 可使其对应的空间域的空间分辨率得到改善, 如何有效地提取 CFRP 中纤维纹路和缺陷的耦合信号特征, 提高对复合材料中缺陷的检测效率, 这也是需要进一步有待解决的问题。

除此之外, 上述所提及的检测方法亦在项目制教学中得到的推广和应用, 设计了 LabVIEW 与 Matlab 混合编程的涡流检测系统, 使错位校正算法与上位机软件实现集成化, 将其用于碳纤维复合材料的涡流检测, 提高了检测效率和图像分辨率, 所设计的检测流程在项目制教学中得到了充分运用, 效果明显。

#### 参考文献:

- [1] 任吉林、林俊明. 电磁无损检测 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] GUESMIM, HARZALLAH S, KOUZOU A. New non-destructive testing approach based on eddy current for crack orientation detection and parameter estimation [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2021, 67 (4): 431–451.
- [3] 李超, 张志杰, 韩宁, 等. 基于 GMR 传感器的金属表面缺陷检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (1): 59–65.
- [4] 刘波, 罗飞路, 侯良洁. 涡流阵列检测修正 C 扫描成像技术研究 [J]. 传感技术学报, 2011, 24 (8): 1172–1177.
- [5] 程军, 李晴, 游勇, 等. 基于 LabVIEW 的电涡流检测二维连续同步扫查系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (9): 42–47.
- [6] 张小雷. 电气设备谐波干扰性检测与评估方案 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (3): 266–271.
- [7] HE Z H, SUI X M, JIN G F, et al. Distortion correction method based on angular spectrum algorithm for holographic display [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15 (11): 6162–6169.
- [8] 秦小云, 苏丹, 贾新月, 等. 自适应激光共焦高速扫描显微成像错位校正算法 [J]. 光学学报, 2019, 39 (1): 409–418.
- [9] 王璐, 王文, 戴佳宁. 变电运维中电力信息故障处理的方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (10): 50–54.
- [10] ANGANI C S, RAMOS H G, BASKARAN P, et al. Lift-off point of intersection feature in transient eddy-current oscillations method to detect thickness variation in stainless steel [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52 (6): 1–8.
- [11] 杜苗苗, 杨灿美. 一种维纳滤波图像复原算法的 k 值快速估计 [J]. 微电子学与计算机, 2015, 25 (8): 45–47, 53.
- [12] JAE C Y, CHANG W A. Image restoration by blind-Wiener filter [J]. IET image processing, 2014, 8 (12): 815–823.

(下转第 228 页)