

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210792

基于环形统计矢量阈值加权的上表面开口裂纹横波全跨全聚焦成像*

陈明¹, 陈尧¹, 肖树坤², 卢超¹, 李秋锋¹

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 江西洪都航空工业集团有限责任公司 南昌 330063)

摘要: 为了有效抑制非目标模式反射体回波伪影, 本文提出环形统计矢量阈值(CSVT)加权的上表面开口裂纹横波全跨全聚焦成像技术。利用延时信号构建环形统计矢量(CSV), 并根据 Weibull 分布确定伪影噪声的 CSV 值范围后, 通过阈值将其剔除得到 CSVT 因子。研究表明, 在 32~64 阵元有效孔径范围内, 非目标模式反射体回波伪影噪声的 CSV 值范围在 0.2~0.4 之间, TT-TT 模式(目标模式)下的上表面缺陷回波 CSV 值接近于 1。因此, 阈值处理后的 CSVT 因子值可有效保留缺陷的权重因子, 同时抑制绝大多数非目标模式反射体伪影及相位随机分布的噪声。相比于横波全跨 TFM 成像, CSVT 加权后的铝块 TFM 成像图中, 上表面-45°~45°人工刻槽下尖端的裂纹信噪比提升范围为 7.7~14 dB。

关键词: 环形统计矢量阈值; 超声; 全跨; 全聚焦; 上表面开口裂纹

中图分类号: TG115.28 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Shear wave full-skip total focusing method of upper surface-breaking cracks based on circular statistic vector threshold weighting

Chen Ming¹, Chen Yao¹, Xiao Shukun², Lu Chao¹, Li Qiufeng¹

(1. Key Laboratory of Non-Destructive Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Corporation Limited, Nanchang 330063, China)

Abstract: To effectively suppress the artifacts of reflector echo with non-goal mode, this article proposes a full-skip total focusing method (FSTFM) imaging technology weighted by circular statistic vector threshold (CSVT) for surface-breaking cracks. The circular statistical vector (CSV) is established from the delayed signal. Then, the range of CSV value for the artifacts is determined by using Weibull distribution. After that, the CSVT factor is obtained by eliminating the artifacts with the threshold. Research shows that, in the effective elements range of 32~64, the CSV value of noise for artifacts of reflector echo with non-goal mode is 0.2~0.4, and the CSV value of surface-breaking cracks with TT-TT mode (goal mode) is close to 1. Therefore, the value of CSVT factor after threshold processing can effectively retain the weight factor of the defect, and suppress the most artifacts of reflector with non-goal mode and the noise with random phase distribution. Compared with full skip TFM imaging with shear wave, in the CSVT-TFM image for artificial notch orientation within -45° to 45°, the signal-to-noise ratio for artificial notch tip on the upper surface of the aluminium block is improved by range of 7.7~14 dB.

Keywords: circular statistic vector threshold; ultrasonic; full-skip; total focusing method; upper surface-breaking cracks

0 引言

全聚焦成像(total focusing method, TFM)是一种基于全矩阵捕捉(full matrix capture, FMC)的超声后处理成

像技术^[1]。与常规超声相控阵检测技术相比,TFM^[2-3]具有更高的对比度与成像分辨率,被称为超声成像的“黄金法则”^[4]。近年来,在传统 TFM 成像的基础上,衍生出了多模(multi-mode, MM)TFM 成像技术^[5-6],常规 TFM 的直接模式被推广至半跨(half skip, HS)和全跨模式(full

收稿日期:2022-11-26 Received Date: 2022-11-26

* 基金项目:国家自然科学基金(62161028,12064001,51705232)、江西省省自然科学基金重点项目(20212ACB204014)资助

skip, FS)。研究表明,由于不同波形的球面波在试件底面存在反射/折射,因此 FMC 信号中存在数十种半跨和全跨模式的缺陷信号。与传统直接模式 TFM 相比,多模 TFM 成像能够提供更丰富的成像模式,以满足复杂取向的面积型缺陷表征需求^[7-8]。因此,多模 TFM 成像可根据裂纹位置、取向与构件形状选择裂纹表征能力更强的成像模式,目前已广泛应用于无损检测领域的裂纹评价^[9-10]。

在实际工业无损检测中,在应力腐蚀开裂、循环载荷等服役工况的影响下,管道、钢轨等构件易出现上表面开口裂纹^[11]。然而,受焊缝余高或装配结构^[12]等限制,通常需要采用斜楔块耦合进行二次波 TFM 成像。目前,上表面开口裂纹的斜入射二次波多模 TFM 成像尚处于探索阶段。前期调研发现:全跨模式对上表面裂纹更为敏感,考虑到横波具有更高的成像分辨率,因而本文选择全跨 TT-TT 模式斜入射 TFM 作为上表面裂纹成像方法。

在斜入射 FMC 信号采集过程中,由于耦合界面的声透射能量损失与横波扩散衰减,导致 TT-TT 模式 TFM 图像中裂纹回波幅值和信噪比较低^[13]。与幅值类成像相比,相位相干类成像^[14]是一种利用阵列回波信号相位一致性反映缺陷信息的技术,其最大特点为不依赖于信号回波能量。因此,当相位相干类成像与 TFM 成像技术结合后,缺陷特征受声能衰减的影响显著弱化^[15]。目前,相位相干类成像已作为一种缺陷信噪比增强技术,能够有效抑制电噪声、结构噪声等非反射体回波噪声,并在 TFM 成像中初步得到了应用^[13,16]。然而,单一模式的 TFM 成像始终存在侧壁与裂纹的多模式伪影等非物理缺陷指示^[17-18]。由于上述多模式伪影来自于固有反射体,推测其相位一致性程度高于非反射体回波噪声。因此,对于单一模式的 TFM 成像,相位相干类成像应用于多模 TFM 成像后,上述非目标成像模式的反射体伪影难以像非反射体回波的随机噪声那样被有效抑制,严重影响裂纹的有效评价。因而,寻求一种有效的抑制非目标模式反射体伪影的技术,有助于进一步推动多模 TFM 在裂纹检测与评价方面的应用。

然而,值得一提的是,在诸多去伪影技术^[19-20]中,Prado 等^[21]利用延时信号的瞬时相位评估非反射体回波噪声,并设计了一种瞬时相位的阈值,将非反射体回波噪声与裂纹信号进行分离,提供了一种阈值去伪影的解决方案。除此之外,作为另一种度量方式,信号的瞬时相位的单位合矢量也可以反映噪声与裂纹的信息^[22-24]。

针对上表面开口裂纹的 TT-TT 模式 TFM 成像特点,本文提出环形统计矢量阈值(circular statistic vector threshold, CSVT)加权的 TFM 成像技术。实施 TT-TT 模式 TFM 成像延时后,利用延时信号构建环形统计矢量(circular statistic vector, CSV)。然后,根据非反射体回波

噪声与非目标模式反射体伪影的 CSV 值的 Weibull 分布特征,确定非目标模式反射体伪影的 CSV 阈值后,将其剔除得到 CSVT 因子。最后,利用 CSVT 因子的动态加权实现 TT-TT 模式的 TFM 图像处理。为验证所提方法的有效性,以铝块的上表面 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 人工刻槽为研究对象,在分析 CSVT 因子影响因素的基础上,形成了非目标模式反射体伪影 CSV 阈值确定方法。通过信噪比对 CSVT 加权后的上表面缺陷的 TT-TT 模式 TFM 成像质量进行了评价。

1 理论分析

1.1 TT-TT 模式全聚焦成像

图1为全跨模式全聚焦成像的声束路径,根据成像区域 (x, z) 的起始点 O 建立坐标系 xOz , x 轴与耦合界面平行, z 轴沿坐标原点指向深度方向;第 m 号发射阵元的坐标位置为 (x_m, z_m) ($m=1, 2, \dots, M$),第 n 号接收阵元的坐标位置为 (x_n, z_n) ($n=1, 2, \dots, M$),相邻两阵元的中心间距为 d ,第1号阵元距离耦合界面的高度为 D ,楔块的角度为 β ;对于全跨模式全聚焦成像,当第 m 号阵元激励超声波,第 n 号阵元接收信号时,需要考虑声束在试块底面的反射。坐标点 $T(x_{T1}, 0)$ 与 $R(x_{R1}, 0)$ 分别表示发射球面波与接收球面波在楔块耦合界面的折射点, $T_h(x_{T2}, h)$ 与 $R_h(x_{R2}, h)$ 分别表示发射球面波与接收球面波在工件底面的反射点, $P(x, z)$ 表示感兴趣区内的像素点。试件表面长度为 L 的线条表示取向为 θ 的表面开口裂纹。

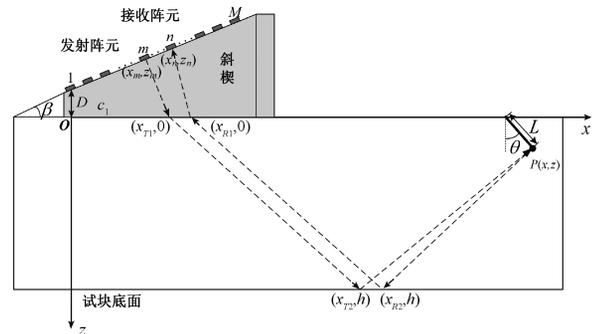


图1 全跨模式全聚焦成像的声束路径

Fig. 1 The beam path of full-skip total focusing method

全跨模式全聚焦的成像的流程具体如下:首先依次激励各阵元对上表面开口裂纹进行扫查,FMC采集的信号规模为 $M \times M \times RF(x, z)$;再利用延时矩阵对FMC信号进行插值处理,得到延时处理后的信号 $S_{mn}(x, z)$;最后,利用式(3)对 $S_{mn}(x, z)$ 进行叠加成像,实现全跨模式全聚焦成像。

当第 m 号阵元激励超声波, 球面波经入射点 $T(x_{T1}, 0)$ 从楔块介质在工件中传播, 在工件底面 $T_h(x_{T2}, h)$ 发生发射/折射后, 传播到像素点 $P(x, z)$, 计算得到发射阵元 m 到像素点 $P(x, z)$ 的飞行时间 $\tau_T(x, z)$:

$$\tau_T(x, z) = \frac{\sqrt{(x_m - x_{T1})^2 + z_m^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x_{T1} - x_{T2})^2 + h^2} + \sqrt{(x_{T2} - x)^2 + (h - z)^2}}{c_s} \quad (1)$$

式中: $x_m = d(m-1) \cos \beta$, $z_m = d(m-1) \sin \beta + D$, 楔块的声速为 c_1 , 工件的横波声速为 c_s 。

对于全跨模式 (TT-TT) 全聚焦成像, 散射体回波从像素点 $P(x, z)$ 到接收阵元 n 的飞行时间为 $\tau_R(x, z)$:

$$\tau_R(x, z) = \frac{\sqrt{(x_n - x_{R1})^2 + z_n^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x_{R1} - x_{R2})^2 + h^2} + \sqrt{(x_{R2} - x)^2 + (h - z)^2}}{c_s} \quad (2)$$

据此, 计算得到发射阵元 m 激励的超声波, 经散射体 $P(x, z)$ 反射并被接收阵元 n 接收的飞行时间 $\tau_{mn}(x, z)$, 再对所有阵元采集到的 *FMC* 信号进行延时叠加处理, 得到感兴趣区内的各像素点值 $I(x, z)$:

$$I(x, z) = \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M S_{mn}(\tau, x, z) \quad (3)$$

式中: $S_{mn}(\tau, x, z)$ 为延时矩阵 $\tau_{mn}(x, z)$ 处理后各像素点的像素值。

1.2 Weibull 取阈值的环形统计矢量加权成像

作为一种数据统计方法, 环形统计 (circular statistic, CS)^[25] 利用样本数据的平均单位合矢量表征样本数据的集中程度。在此基础上, 利用各通道信号的瞬时相位的平均单位合矢量反映信号的相位一致性, 并据此分配权重因子。具体如下: 首先, 利用式 (4) 提取延时处理后各像素点值 $S_{mn}(\tau, x, z)$ 的瞬时相位 $\varphi_{mn}(x, z)$:

$$\varphi_{mn}(x, z) = \arctan \frac{h[S_{mn}(x, z)]}{S_{mn}(x, z)} \quad (4)$$

式中: $h[\]$ 表示 Hilbert 计算表达式。

在此基础上, 利用式 (5) 计算 $\varphi_{mn}(x, z)$ 的环形统计矢量值 $CSV(x, z)$:

$$CSV(x, z) = \frac{1}{M^2} \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M [\cos^2 \varphi_{mn}(x, z) + \sin^2 \varphi_{mn}(x, z)]^{1/2} \quad (5)$$

对于上表面开口裂纹, 图 2(a) 中最右侧的矩形框内为裂纹影像。除此之外, TFM 成像图中存在其他成像模式的裂纹伪影与多次底波, 如图 2(a) 中的最左侧的 3 个矩形框所示, 干扰裂纹的识别。由于其他模式的裂纹信

号具有一定的相干性, 其相干程度高于相位随机分布的非反射噪声, 如图 2(b) 的小矩形框所示。

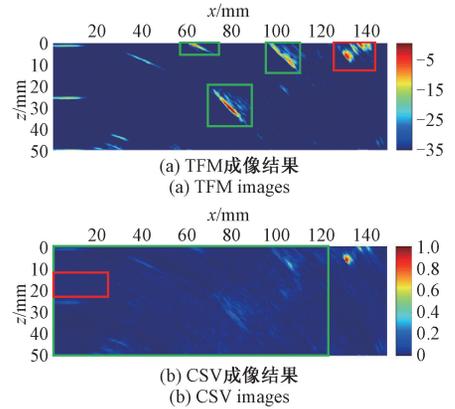


图2 裂纹成像结果

Fig. 2 Crack images

本文结合 TFM 成像与延时信号的环形统计矢量值 *CSV* 的成像结果, 将上述噪声分为两类。一类为电噪声与晶粒散射引起的非反射体回波噪声; 另一类为多模式底面回波与多模式裂纹伪影等非目标模式反射体伪影噪声。

在分析非目标模式反射体伪影噪声的 *CSV* 分布时, 计算区域的变化将影响非反射体回波噪声的 *CSV* 样本规模。为了避免计算区域的变化进一步对非目标模式反射体伪影噪声的 *CSV* 分布的影响, 本文利用 Weibull 函数依次对非反射体回波噪声与非目标模式反射体伪影噪声的环形统计矢量值的分布进行拟合, 并依次取两类噪声的阈值, 最后利用非目标模式反射体伪影噪声的 *CSV* 阈值对延时信号 $S_{mn}(\tau, x, z)$ 进行处理, 得到阈值处理的环形统计矢量值 (circular statistic vector threshold, CSVT)。

具体处理流程如下:

1) 利用式 (5) 计算成像区域内各像素点的环形统计矢量值 $CSV(x, z)$;

2) 在步骤 1) 的基础上, 选取非反射体回波噪声区域的环形统计矢量值 CSV_{noise} , 选取的区域大小为 $9 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 如图 2(b) 中的小矩形框所示。

3) 根据式 (9) 统计分析 CSV_{noise} 的分布, 在此基础上, 利用式 (10) ~ (11) 计算 CSV_{noise} 的阈值 T_{noise} ;

4) 与步骤 2) 类似, 选取非目标模式反射体伪影噪声区域的环形统计矢量值, 再截取高于 T_{noise} 的部分, 得到仅含有非目标模式反射体伪影噪声的 CSV_{cs} 。选取的区域大小为 $50 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$, 如图 2(b) 中的大矩形框所示;

5) 与步骤 3) 类似, 统计非目标模式反射体伪影噪声的 CSV_{cs} 分布, 在此基础上, 利用式 (10) ~ (11) 计算 CSV_{cs} 的阈值 T_{cs} ;

6) 在步骤 1) 和 5) 的基础上, 利用式 (12) 截取 $CSV(x, z)$ 中高于阈值 T_{cs} 的部分, 得到 CSV_T 因子;

根据上述两类噪声的柱状分布特性, 选择使用双参数 Weibull 函数分析两类噪声的分布拟合情况。首先, 利用最大似然估计^[26]求解双参数 Weibull 分布函数的两个特征参数。由于双参数 Weibull 分布的样本数据为感兴趣区内的环形统计矢量 $CSV(x, z)$, 其样本点数为 $n = x \times z$, 其似然对数函数可写为:

$$L = \sum_{i=1}^n \left(\log \left(\frac{1}{\eta^\beta \beta} CSV_i^{\beta-1} \right) \right) + \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{\eta^\beta} CSV_i^\beta \right) \quad (6)$$

式中: $1/(\eta^\beta)$ 与 β 的最大似然估计由 L 的导数导出。它们满足以下方程:

$$\frac{dL}{d\frac{1}{\eta^\beta}} = \sum_{i=1}^n \frac{\beta CSV_i^{\beta-1}}{\frac{1}{\eta^\beta} \beta CSV_i^{\beta-1}} - \sum_{i=1}^n CSV_i^\beta = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dL}{d\beta} = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{1}{\eta^\beta} CSV_i^{\beta+1} + \beta CSV_i^\beta \log CSV_i}{\frac{1}{\eta^\beta} \beta CSV_i^{\beta-1}} - \sum_{i=1}^n CSV_i^\beta = 0 \quad (8)$$

通过式 (7)、(8) 可求得形状因子 β 与缩放因子 η 。据此, 得到环形统计矢量 $CSV(x, z)$ 样本的概率密度 (probability density function, PDF) 函数 $f(CSV(x, z), \beta, \eta)$:

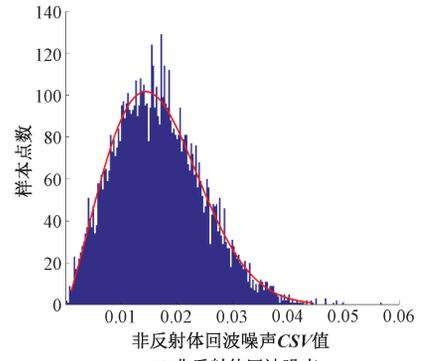
$$f(CSV(x, z), \eta, \beta) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{CSV(x, z)}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{CSV(x, z)}{\eta} \right)^\beta} \quad (9)$$

在此基础上, 得到 Weibull 函数的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF):

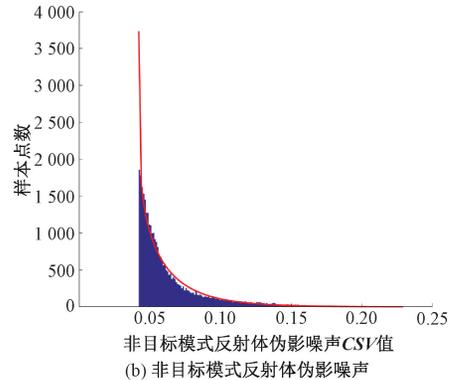
$$F(CSV(x, z)) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{CSV(x, z)}{\eta} \right)^\beta \right\} \quad (10)$$

利用双参数 Weibull 分布的概率密度函数分别对两类噪声进行拟合, 拟合结果如图 3 所示, 图中的曲线表示 Weibull 函数拟合曲线。其中, 非反射体回波噪声与非目标模式反射体伪影噪声的数据样本分别为处理流程步骤 2)、4) 中的 CSV_{noise} 与 CSV_{cs} 。利用 QQ 图来检验环形统计矢量 CSV 的拟合情况与拟合的可靠性。以 Weibull 分布的分位数为横坐标, 非反射体回波噪声和非目标模式反射体伪影噪声的环形统计矢量值 CSV_{noise} 与 CSV_{cs} 的分位数为纵坐标绘制如图 4 所示 QQ 图。由图 4 可知从 QQ 图上可以大致看出, 绝大多数数据点分布在直线的周边位置处, 此时可以认为非反射体回波噪声与非目标模式反射体伪影噪声信号服从 Weibull 分布。

当置信度为 99.73% 时, 此时可以认为绝大多数样本分布在置信区间 $[0, CSV_{F=99.73\%}(x, z)]$ 内。因此, 选取

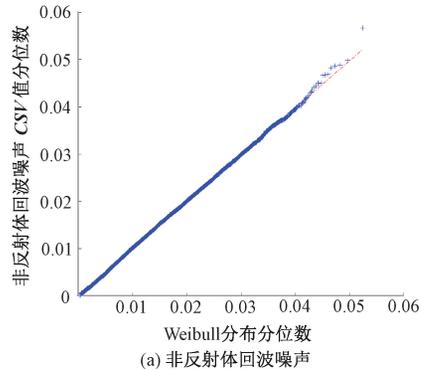


(a) The noise with random phase distribution

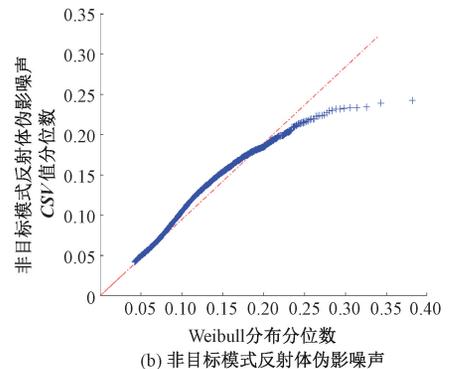


(b) Artifacts of reflectors echo with non-goal mode

图 3 CSV 的柱状分布及 Weibull 函数拟合
Fig. 3 Cylindrical distribution of CSV and Weibull fitting



(a) The noise with random phase distribution



(b) Artifacts of reflectors echo with non-goal mode

图 4 CSV 值的 Quantile-Quantile 图
Fig. 4 Quantile-Quantile plot of CSV values

置信度为 99.73%, 即 $F(\mathbf{CSV}(x, z)) = 99.73\%$ 时, 根据式(9)与(10)可以求解得到 $\mathbf{CSV}_{F=99.73\%}(x, z)$, 即环形统计矢量的阈值 T :

$$T = \eta(-\ln(1 - F(\mathbf{CSV}(x, z))))^{\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

由于非反射体回波噪声的环形统计矢量值 $\mathbf{CSV}_{noise}(x, z)$ 与非目标模式反射体伪影噪声的环形统计矢量值 $\mathbf{CSV}_{cs}(x, z)$ 均服从双参数 Weibull 分布, 因此根据式(10)即可分别计算得到两类噪声的阈值 $T_{noise}(x, z)$ 与 $T_{cs}(x, z)$ 。再利用阈值 $T_{cs}(x, z)$ 对成像区域内的延时信号的环形统计矢量 $\mathbf{CSV}(x, z)$ 进行处理, 得到阈值处理后的环形统计矢量因子 \mathbf{CSV}_T :

$$\mathbf{CSV}_T = \begin{cases} \mathbf{CSV}(x, z), & \mathbf{CSV}(x, z) \geq T_{cs} \\ 0.001, & \mathbf{CSV}(x, z) < T_{cs} \end{cases} \quad (12)$$

对于所有通道的信号, 像素点 $P(x, z)$ 处的 \mathbf{CSV} 值越大, 表示该点的相位一致性程度更好; 当 \mathbf{CSV} 值接近 1 时, 表示点 (x, z) 为一处相位相干性较强的散射体; 当 \mathbf{CSV} 值在 $0 \sim T_{noise}$ 之间时, 表示 (x, z) 为一处相位相干性较差的非反射体回波噪声信号; 当 \mathbf{CSV} 值在 $T_{noise} \sim T_{cs}$ 之间时, 表示 (x, z) 为多模式伪影等非目标模式反射体伪影噪声。

最后利用 \mathbf{CSV}_T 因子对分别各像素点值 $I(x, z)$ 相乘, 得到最终的加权成像结果 $I_{\mathbf{CSV}_T}(x, z)$:

$$I_{\mathbf{CSV}_T}(x, z) = I(x, z) \times \mathbf{CSV}_T \quad (13)$$

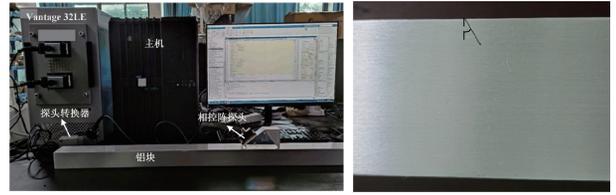
利用信噪比 (signal to noise rate, SNR) 评价 \mathbf{CSV}_T -TFM 成像与 TFM 成像的裂纹表征能力。首先利用选取的裂纹影像区域内的最高幅值作为裂纹幅值 I_{signal} , 再利用相同大小区域内的非反射体回波噪声的最高幅值作为噪声幅值 I_{noise} 。由此, 计算得到裂纹影像的信噪比 $\text{SNR}^{[6]}$:

$$\text{SNR} = 20 \lg \frac{I_{signal}}{I_{noise}} \quad (14)$$

2 实验信号采集

如图 5(a) 所示为实验所用的全聚焦成像系统, 主要由 Vantage 32LE 信号采集系统、超声相控阵探头及信号采集连接器组成。利用配置 N55S 斜楔块的 5L64-0.6×10 的相控阵探头对铝制试块的上表面裂纹进行 TFM 成像。

其中, 楔块的角度为 36.5° , 楔块的声速为 $2\,337\text{ m/s}$, TT-TT 模式全聚焦成像的参数如表 1 所示。铝块的尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 210\text{ mm}$, 铝介质的纵波声速为 $6\,300\text{ m/s}$, 铝介质的横波声速为 $3\,100\text{ m/s}$ 。利用铝块的上表面人工刻槽模拟裂纹, 刻槽长度 L 均为 10 mm , 刻槽宽度为 0.4 mm , 刻槽取向 θ 分别为 -45° 、 -30° 、 -15° 、 0° 、 15° 、 30° 、 45° , 如图 5(b) 所示。



(a) 信号采集系统
(a) Signal acquisition system
(b) 铝制试块
(b) Aluminum block

图 5 实验设备及试块

Fig. 5 Experimental equipment and test blocks

表 1 相控阵探头及成像参数

Table 1 Parameters of phased array probe and imaging

参数名	数值
阵元数	64
晶片宽度/mm	0.55
晶片间距/mm	0.6
晶片长度/mm	10
探头频率/MHz	5
采样频率/MHz	19.23
成像分辨率/mm	0.3×0.1

为了得到阈值处理后的延时信号 $S_{mn}(\tau, x, z)$ 的环形统计矢量因子 \mathbf{CSV}_T 。首先, 利用配置 N55S 楔块的 5L64-0.6×10 探头分别对取向角度为 -45° 、 -30° 、 -15° 、 0° 、 15° 、 30° 、 45° 的上表面开口刻槽进行 FMC 信号采集, 得到 64×64 组 $S(\tau, x, z)$ 信号。其次, 根据式(4)、(5)提取感兴趣区域 (x, z) 的环形统计矢量值 $\mathbf{CSV}(x, z)$, 再利用双参数 Weibull 函数依次对非反射体回波噪声的环形统计矢量值 \mathbf{CSV}_{noise} 的分布进行拟合; 然后, 利用式(11)对 \mathbf{CSV}_{noise} 取阈值 T_{noise} , 在此基础上, 得到只含有非反射体回波噪声的环形统计矢量值 \mathbf{CSV}_{cs} , 同样利用式(11)对 \mathbf{CSV}_{cs} 取阈值 T_{cs} ; 最后通过阈值 T_{cs} 对感兴趣区域的环形统计矢量值 $\mathbf{CSV}(x, z)$ 进行处理, 得到阈值处理后的环形统计矢量因子 \mathbf{CSV}_T 。

3 结果与分析

3.1 阵元数对阈值的影响

对于真实散射体的 FMC 信号, 经某种目标成像模式的延时处理后, 对于该模式下所有通道的信号, 散射体信号的相位一致性程度较高。受声束路径与波形的影响, 其他模式裂纹信号的相位一致性较差。因此, 对于目标成像模式 (TT-TT) 下裂纹信号的环形统计矢量 $\mathbf{CSV}(x, z)$, 当阵元数变化时, 散射体信号在 TT-TT 模式下仍然保持较高的 \mathbf{CSV} 值, 而其他非目标模式下裂纹信

号的环形统计矢量 CSV 值波动较大,如式(5)所示。因此,本节进一步讨论了阵元数对阈值 T_{noise} 、 T_{cs} 的影响。

如图 6 所示为不同阵元数与裂纹取向的阈值,其中图 6(a)、(b)分别为非反射体回波噪声的阈值 T_{noise} 与非目标模式反射体伪影噪声的阈值 T_{cs} 的变化曲线。受裂纹取向的影响,非反射体回波噪声阈值 T_{noise} 的波动范围一般为 0.04,非目标模式反射体伪影噪声阈值 T_{cs} 的波动范围一般为 0.15。

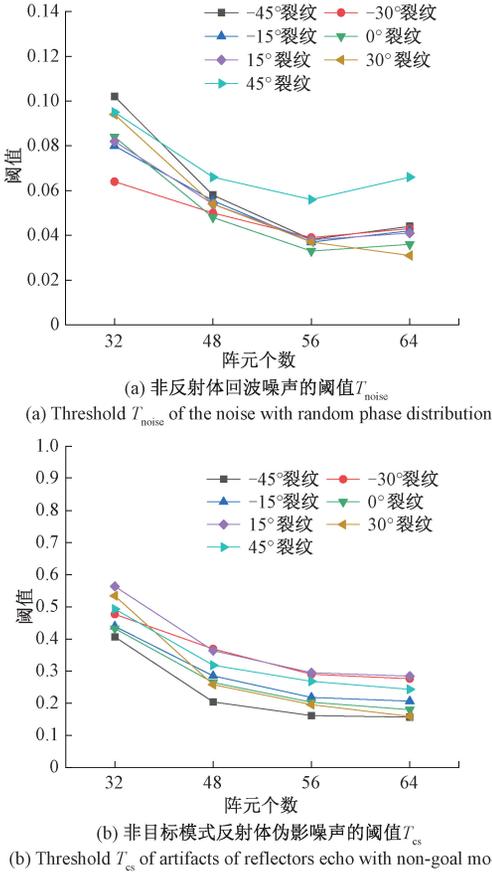


图 6 不同阵元数与取向裂纹的阈值

Fig. 6 Threshold of different array elements and oriented cracks

当阵元数增加时,裂纹取向对阈值的影响逐渐减小。对于非反射体回波噪声与非目标模式反射体伪影噪声的阈值而言,随着阵元数增加,阈值 T_{noise} 与 T_{cs} 逐渐变小,并趋于稳定。且非反射体回波噪声的阈值 T_{noise} 始终小于非目标模式反射体伪影噪声的阈值 T_{cs} ;当阵元数为 64 时,非反射体回波噪声的阈值 T_{noise} 一般在 0.05 左右,非目标模式反射体伪影噪声的阈值 T_{cs} 一般在 0.2~0.4 以内。因此,可以通过阈值 T_{noise} 与 T_{cs} 将非反射体回波噪声、非目标模式反射体伪影噪声与 TT-TT 模式裂纹信号区分开。另外,当阵元数较小时,虽然非反射体回波噪声与非目标模式反射体伪影噪声的阈值较大,但 TFM 成像

与 CSVT-TFM 成像的图像质量较低,且阈值 T_{noise} 与 T_{cs} 受裂纹取向的影响较大。

3.2 阈值 T_{cs} 处理后的成像结果

为了验证阈值 T_{cs} 处理后的 CSV 因子成像及 CSVT-TFM 成像的有效性,本节分别对取向为 -45° 、 -30° 、 -15° 、 0° 、 15° 、 30° 、 45° 的裂纹进行 TT-TT 模式 TFM 成像。图 7、8 分别为 $-45^\circ \sim 0^\circ$ 与 $15^\circ \sim 45^\circ$ 裂纹的成像结果,其中,TFM、 CSV 、 CSV 、CSVT-TFM 分别表示 TFM 幅值成像结果、 CSV 因子成像结果、 CSV 因子成像结果、CSVT-TFM 成像结果。TFM 成像与 CSVT-TFM 成像的动态显示范围为 35 dB, CSV 因子成像与 CSV 因子成像以实际因子值 0~1 进行显示。

对于取向为负角度的裂纹,球面波前主要与裂纹尖端产生交互作用。在 TFM 图像上,裂纹影像主要表征为尖端衍射回波与裂纹根部的端角回波,且深度 25 与 50 mm 位置普遍存在多次底波影像,如图 7(e) 中的最右侧的矩形框所示。以 -30° 裂纹为例,TFM 成像图还存在多处近似裂纹的其他模式裂纹伪影,即非目标模式反射体伪影噪声。其幅值强度与裂纹尖端影像接近,容易对裂纹表征造成干扰,如图 7(e) 中最左侧的 3 个矩形框所示。

根据图 7(f),非目标模式反射体伪影噪声的 CSV 值较大,一定程度地干扰裂纹的表征。对于取向为 0° 的裂纹,在原始 TFM 成像图中,裂纹下尖端衍射回波影像幅值较低,如图 7(m) 中的矩形框所示。且根据裂纹根部反射回波与裂纹下尖端衍射回波影像对裂纹进行表征时,容易对裂纹取向的表征造成误判。如图 7(n) 所示, CSV 因子成像图中仍然存在较多的多模式伪影,对裂纹的识别存在一定地干扰。

对于取向为正角度的裂纹,N55S 楔块耦合的球面波前与裂纹面产生近似的镜面反射。以 45° 裂纹为例,在 TFM 幅值成像图中,该取向裂纹的全貌可以被完全表征,如图 8(i) 所示。但 TFM 与 CSV 因子成像图中也普遍存在多模式伪影等非目标模式反射体伪影噪声,干扰裂纹的表征。以 15° 裂纹为例,非目标模式反射体伪影噪声的幅值较高,且其 CSV 值也较大,容易造成缺陷的误判,如图 8(a)、(b) 所示。

经阈值 T_{cs} 处理后,对于取向为负角度与 0° 的裂纹, CSV 因子成像图中几乎仅含有裂纹尖端影像。以 -15° 裂纹为例,与 CSV 因子成像相比,经阈值 T_{cs} 处理后, CSV 因子成像不仅增强了裂纹下尖端影像的表征能力,同时抑制了大部分多模式伪影等非目标模式反射体伪影噪声,如图 7(i)~(l) 所示。对于取向为正角度的裂纹,改进的 CSVT 因子成像图中几乎仅含有裂纹全貌的影像。以 30° 裂纹为例,与原始 CSV 因子成像相比,经阈值 T_{cs} 处理后, CSV 因子成像不仅增强了裂纹全貌的表

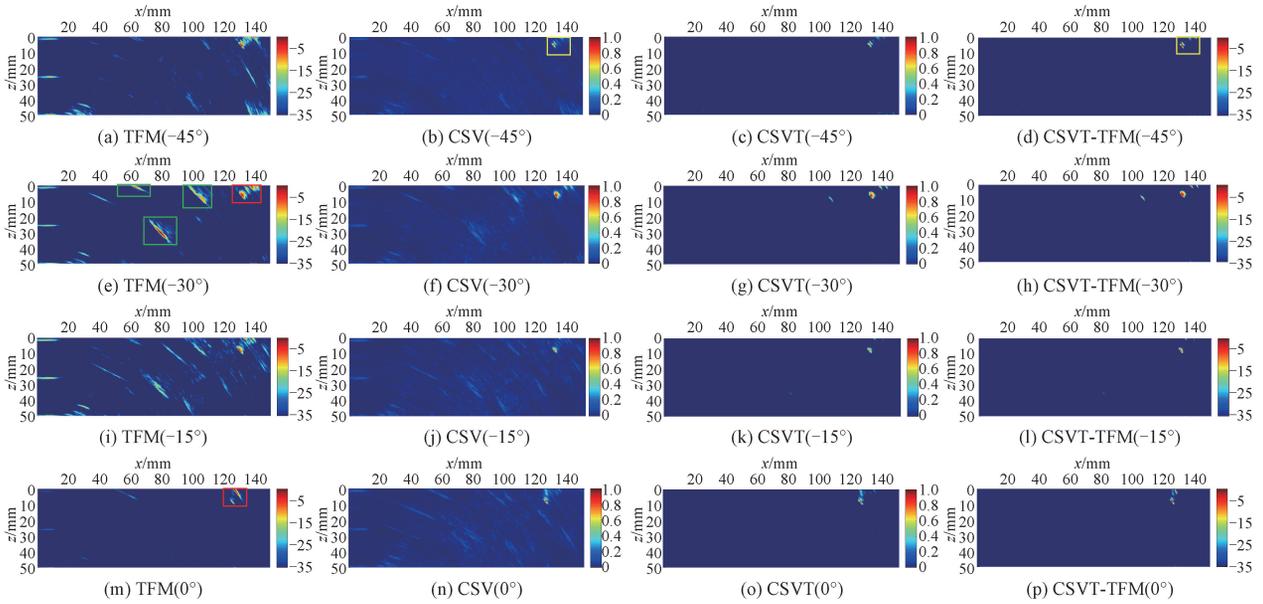
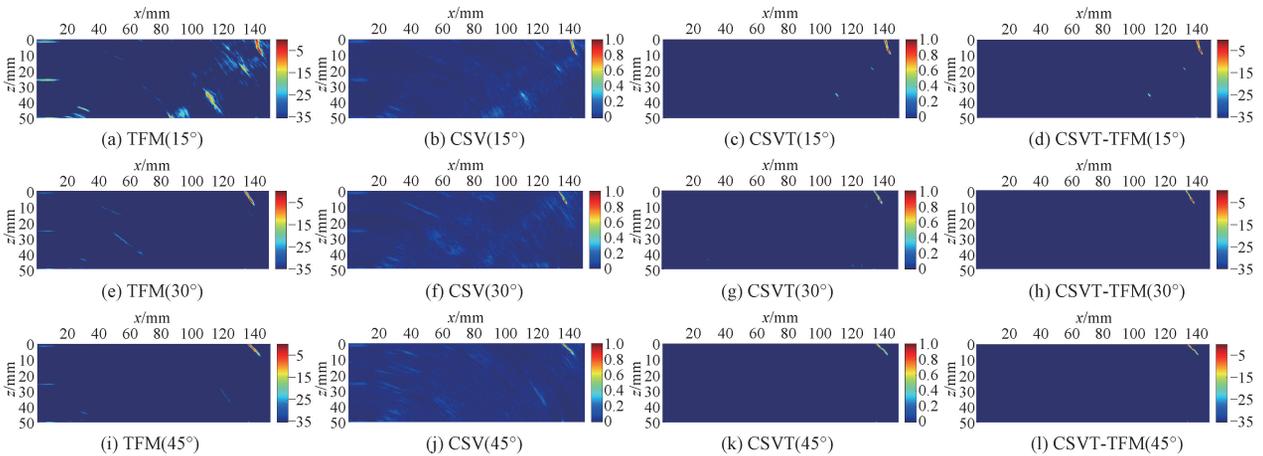
图7 $-45^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 裂纹的成像结果Fig. 7 Ultrasound images of $-45^{\circ} \sim 0^{\circ}$ cracks

图8 正角度裂纹的成像结果

Fig. 8 Ultrasound image of crack with positive orientation angle

征能力,同时抑制了几乎所有的多模式伪影,且 CSVT-TFM 成像图中仅含有裂纹全貌影像,如图 8(i)~(l)所示。

为了进一步评估 CSVT 因子加权成像对裂纹信噪比的提升程度。本节根据式(14)分别计算 TFM 成像与 CSVT-TFM 成像图中 7 种取向裂纹的信噪比,统计结果如图 9 所示。其中,裂纹信噪比的计算区域如图 7(b)、(d)中的矩形框所示。由图 9 可知 CSVT 加权后的图像信噪比增强范围在 7.7~14 dB 之间,取阈值后 CSVT 加权对成像质量有较为明显提升。

除了环形统计矢量 CSV 因子之外,CF、SCF、PCF 等因子^[13]都可以识别与区分非反射体回波噪声信号与反

射体回波信号,并且以符号或百分比等数值的形式进行体现;在与 Weibull 函数等类似的统计工具结合之后,根据非反射体噪声与非目标模式反射体噪声等不同特征信号的物理规律与统计结果,也可以设计成类似抑制非目标模式反射体伪影的加权因子,具备构建阈值加权因子的潜质。经过加权成像处理之后,CF、SCF、PCF 等因子也将起到抑制非目标模式反射体伪影噪声的作用。但目前多模成像方面,利用阈值加权因子抑制非目标模式反射体伪影噪声的方法尚未见报道。为了抑制非目标模式信号引起的伪影干扰,本文在文献[21]对噪声信号的相位信息取阈值的基础上,利用 Weibull 函数进一步探究

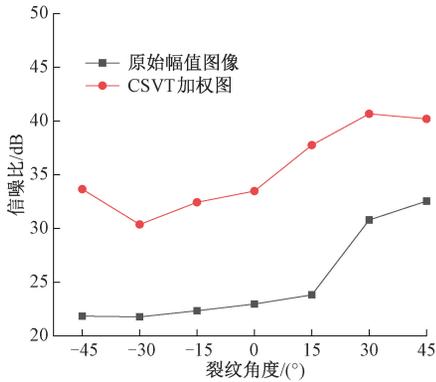


图9 不同取向裂纹的信噪比

Fig. 9 The SNR of cracks for different orientation

了非反射回波噪声与非目标模式反射体伪影噪声信号的CSV值的分布情况。在此基础上,本文提出在单一模式的相位相干加权成像情况下,针对非目标模式的反射体伪影设计阈值加权因子,以达到抑制非目标模式反射体伪影噪声的效果。

4 结 论

不同于电噪声、结构噪声等相位随机分布的非反射体回波噪声,非目标模式反射体回波伪影来自于缺陷、侧壁等固有反射体,在延时信号中其相位一致性高于等非反射体回波噪声,仅因不同模式下TFM延时法则的改变无法直接去除单一模式TFM成像的反射体伪影。本文根据非目标模式反射体伪影的相位特性,利用Weibull分布确定非目标模式反射体伪影噪声的CSV值分布范围。实验结果表明,非目标模式反射体伪影的CSV值一般在0.2~0.4范围内,非反射体回波噪声的CSV值在0.1以下,而目标模式(TT-TT)的裂纹影像的CSV值接近于1;相比于横波全跨模式(TT-TT)的TFM成像,CSV T加权后的铝块TFM成像结果中,上表面 $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 人工刻槽下尖端的裂纹信噪比提升范围为7.7~14 dB。上述结果表明,平均合矢量阈值加权可有效保留上表面缺陷的幅值,同时可以抑制绝大多数非目标模式反射体伪影及相位随机分布的噪声。此外,平均合矢量阈值加权的适用范围不仅限于TT-TT模式,还能够推广至其他模式的TFM成像乃至平面波成像,有望进一步提升超声多模式成像的检测能力,使其进一步发挥优势。

参考文献

[1] RABE U, PUDOVIKOV S. Application of the total focusing method for quantitative nondestructive testing of anisotropic welds with ultrasound [J]. *Technisches Messen: Sensoren, Gerate, Systeme*, 2020, 87(6):

438-450.

- [2] 金士杰,刘晨飞,史思琪,等. 基于全模式全聚焦方法的裂纹超声成像定量检测[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(1): 183-190.
JIN SH J, LIU CH F, SHI S Q, et al. Quantitative crack detection by ultrasonic imaging with the full-mode total focusing method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(1): 183-190.
- [3] PING Z, SHOUGOU Y, YUXIANG D, et al. Multiwave total focusing method for full-matrix imaging using ultrasonic phased array [J]. *Materials Evaluation*, 2021, 79(12): 1179-1188.
- [4] DA T, LISHUAI L, YANXUN X, et al. An optimized total focusing method based on delay-multiply-and-sum for nondestructive testing [J]. *Ultrasonics*, 2023, 128(7): 106881.
- [5] EWAN N, EHSAN M, SUMANA, et al. Dual-tandem phased array method for imaging of near-vertical defects in narrow-gap welds [J]. *NDT & E International*, 2023 135(7): 102808.
- [6] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D, et al. Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method [J]. *NDT & E International*, 2010, 43(2): 123-133.
- [7] SAINI A, FELICE M V, FAN Z, et al. Optimisation of the half-skip total focusing method (HSTFM) parameters for sizing surface-breaking cracks [J]. *NDT & E International*, 2020, 116: 1-11.
- [8] FIDAHOUSSEN A, CALMON P, LAMBERT M, et al. Imaging of defects in several complex configurations by simulation-helped processing of ultrasonic array data [C]. *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2010, 1211(1): 847-854.
- [9] JIN S, WANG C, LIU S, et al. Simulation on qualitative detection of defects with multi-mode total focusing method [C]. *2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)*, IEEE, 2018: 127-131.
- [10] JIN S J, LIU C F, SHI S Q, et al. Profile reconstruction and quantitative detection of planar defects with composite-mode total focusing method (CTFM) [J]. *NDT & E International*, 2021, 123(9): 102518.
- [11] MUHAMMAD W, MILOS D. External corrosion of oil and gas pipelines: A review of failure mechanisms and predictive preventions [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 100: 467-489.
- [12] FENG L, QIAN X. Enhanced sizing for surface cracks in welded tubular joints using ultrasonic phased array and image processing [J]. *NDT & E International*,

- 2020, 116, 102334.
- [13] CAMACHO J, ATEHORTUA D, CRUZA J F, et al. Ultrasonic crack evaluation by phase coherence processing and TFM and its application to online monitoring in fatigue tests [J]. *Ndt & E International*, 2018, 93: 164-174.
- [14] CHEN M, XIONG Z H, JING Y. Secondary interface echoes suppression for immersion ultrasonic imaging based on phase circular statistics vector [J]. *Sensors*, 2023, 23(3): 1081.
- [15] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Comparison of ultrasonic array imaging algorithms for nondestructive evaluation [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2013, 60(8): 1732-1745.
- [16] 冒秋琴, 陈尧, 张柏源, 等. 相位环形统计矢量对提高全聚焦成像质量的影响 [J]. *声学学报*, 2020, 45(6): 913-21.
MAO Q Q, CHEN Y, ZHANG B Y, et al. Enhancing effect of phase circular statistics vector for improvement imaging quality of ultrasonic total focusing method [J]. *Acta Acustica*, 2020, 45(6): 913-921.
- [17] ZHANG J, BARBER T, NIXON A, et al. Investigation into distinguishing between small volumetric and crack-like defects using multi-view total focusing method images [C]. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2017, 1806(1): 040003.
- [18] CHAO Y P, PENG S, ZHI X W, et al. The evaluation of ultrasonic FMC/TFM on real fatigue cracks [C]. 2019 Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), IEEE, 2019: 11-15.
- [19] PORTZGEN N, GISOLF D, VERSCHUUR D J. Wave equation-based imaging of mode converted waves in ultrasonic NDI, with suppressed leakage from nonmode converted waves [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2008, 55(8): 68-80.
- [20] IAKOVLEVA E, CHATILON S, BREDIF P, et al. Multi-mode TFM imaging with artifacts filtering using CIVA UT forwards models [C]. *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, 2014.
- [21] PRADO V T, HIGUTI R T, KITANO C, et al. Instantaneous phase threshold for reflector detection in ultrasonic images [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2014, 61(7): 1204-1215.
- [22] 陈尧, 孔庆茹, 卢超, 等. 超声相干平面波复合成像的环形统计矢量加权 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(10): 264-273.
CHEN Y, KONG Q R, LU CH, et al. Circular statistics vector weighting for ultrasound coherent plane wave compounding [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(10): 264-273.
- [23] CHEN Y, XIONG Z, KONG Q, et al. Circular statistics vector for improving coherent plane wave compounding image in Fourier domain [J]. *Ultrasonics*, 2022, 128: 1-14.
- [24] HUANG J, CHEN M, KONG Q, et al. Phased array ultrasonic sector scan imaging of helicopter damper bolts based on vector coherence factor [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(19): 1-13.
- [25] PEWSEY A, NEUHUSER M, RUXTON G D. *Circular statistics in R[M]*. UK: Oxford University Press, 2013.
- [26] ADAM A M, EL-DESOUKY B S, FAROUK R M. Modified weibull distribution for biomedical signals denoising [J]. *Neuroscience Informatics*, 2022, 2(1): 1-10.

作者简介



陈明, 2021 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为南昌航空大学硕士研究生, 主要研究方向为超声成像检测及超声后处理成像。

E-mail: chenming0232@foxmail.com

Chen Ming received his B. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2021. He is currently a graduate student at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic imaging detection and ultrasonic post-processing imaging.



李秋锋 (通信作者), 2008 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现在为南昌航空大学教授, 主要研究方向为声学检测及信号处理。

E-mail: qiufengli@nuaa.edu.cn

Li Qiufeng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2008. He is currently a professor and a master advisor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include acoustic detection and signal processing.