

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306427

基于相同传播距离路径的兰姆波无基准损伤概率成像

陈晓^{1,2} 戴杰¹

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044; 2. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044)

摘要:针对兰姆波损伤概率成像需要参考基准的问题,提出了一种基于相同传播距离的兰姆波无基准损伤概率成像算法。首先求解每条路径上信号的功率谱密度,然后将相同传播距离路径上的功率谱密度值进行分组,将每组的功率谱密度最大值对应的路径视为无损路径,并与同组的其他功率谱密度值进行比较,构建损伤指数,最后结合损伤概率成像算法来识别损伤位置。结果显示,该无基准损伤概率成像算法对检测区域内多种类型损伤定位成像的相对误差在6%以内,能够对缺陷进行准确的定位成像。

关键词: 兰姆波; 相同传播距离; 功率谱密度; 无基准; 概率成像

中图分类号: TP15 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.20

Lamb wave baseline-free damage probability imaging based on same propagation distance path

Chen Xiao^{1,2} Dai Jie¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To address the problem that Lamb wave damage probability imaging requires a baseline signal, a baseline-free damage probability imaging algorithm for Lamb waves based on the same propagation distance is proposed. Firstly, the power spectral density of the signal on each path is solved, then the power spectral density values on the paths with the same propagation distance are grouped, the path corresponding to the maximum value of the power spectral density in each group is regarded as a non-damaging path, and compared with other power spectral density values in the same group to construct a damage index, and finally the damage probability imaging algorithm is combined to identify the damage location. The results show that this baseline-free damage imaging algorithm is capable to accurately localize defects within 6% relative error for localizing multiple types of damage within the inspection area.

Keywords: Lamb wave; same propagation distance; power spectral density; baseline-free; probability imaging

0 引言

在薄板状结构传播的所有波中,兰姆波凭借其灵敏度高和检测范围广等诸多优势成为薄板结构健康检测领域中的首选,可以对多种类型的损伤,如分层、裂纹和腐蚀等缺陷实现快速的检测。在基于兰姆波的结构健康检测中,通常是将传感器布置在需要检测的材料表面,然后通过激励接收兰姆波信号,得到散射信号,最后通过开发

的信号处理技术来对目标结构进行缺陷的检测、定位和损伤评估。因此开发兰姆波损伤检测和定位方法在工程检测中具有重要的意义^[1-4]。

损伤散射信号的获取是损伤检测和定位的基础。在目前已有的损伤检测和定位的信号处理技术中,大多数都是通过几何定位法、飞行时间法、模式识别等方法来确定损伤的位置。孔琼英等^[5]研究了强噪声下碳纤维复合材料疲劳损伤成像研究,利用局部加权散点平滑算法对希尔伯特变换后的噪声信号包络进行平滑处理,通过无

损情况和有损情况下的飞行时间获得损伤因子,结合损伤概率成像方法实现材料内部疲劳损伤定位成像。然而由于兰姆波信号的多模态和频散特性,针对散射信号飞行时间的提取存在很大的难度,使成像的定位精度大打折扣。Su 等^[6]提出了基于希尔伯特能谱和兰姆波层析成像的复合层板损伤检测,利用希尔伯特能谱计算有损和无损信号之间的差值确定损伤因子,结合概率成像技术实现损伤的位置成像,避免了复杂反射信号的提取过程。然而,在实际的缺陷检测过程中,由于噪声、环境条件、材料结构等外界因素的影响,有损和无损信号无法保持高度的一致性。

Kannusamy 等^[7]提出了一种基于兰姆波的精细时间反转方法,能够较好地预测损伤位置。常俊杰等^[8]研究了基于虚拟时间反转的空气耦合超声板材腐蚀缺陷概率损伤成像,成功显示了缺陷的位置和形状,同时一定程度上区分了缺陷的深度。Gorgin 等^[9]研究了一种无基线损伤识别技术,采用 A0 模式,验证了无基线方法在未测量温度下验证损伤位置的有效性。Jagadeeshwar 等^[10]提出了基于统计的无基线方法,使用稀疏采样和基于密度的噪声应用空间聚类技术来识别和定位复合材料结构的分层。Sun 等^[11]提出了基于对称路径的无基准损伤成像方法,通过将圆形阵列中的对称路径进行分组构造损伤指数,并结合损伤概率成像方法对缺陷进行定位成像。虽然以上方法避免了无损信号的提取,但是在实际的检测过程中较为繁琐,并且受兰姆波频散特性的影响,缺陷检测成像效率不高,而且基于对称路径的无基准损伤成像方法在圆心位置附近还存在盲区。

针对以上存在的问题,本文提出了基于相同传播距离路径的无基准损伤概率成像方法,通过将阵列中相同传播距离的路径划分为同一组,然后求解对应路径上散射信号的功率谱密度并构建对应路径上的损伤指数,并结合损伤概率成像技术对缺陷进行定位成像,能够有效的提高缺陷检测成像的效率,且无需考虑信号的频散特性,大大降低了缺陷检测成像的难度。与此同时,为了解决基于此方法的圆形阵列存在盲区的问题,本文加以改进,采用矩形阵列,确保定位精度的同时还解决了盲区的问题。

1 无基准损伤检测原理

目前的基于兰姆波的损伤概率成像技术都是通过比较有损信号和无损信号之间的差异性来进行损伤定位成像。但是在实际检测的过程中,经常会遇到周边环境的变化等问题,存在不确定性因素,从而导致无损板材和待检测板材无法保证高度的一致性。与此同时,在两块板材上进行信号的激励与收集,无疑会增加检测的工作量

和工作难度。而无基准损伤检测技术,顾名思义,抛开了无损信号的检测,大大降低了检测过程中环境因素对检测效果的影响,同时只需在待检测板材上采集损伤信号大大降低了检测的工作量,提高了检测的效率。

本文所提出的无基准损伤检测技术主要是基于相同传播距离路径之间的损伤信号的比较。其中矩形阵列的路径图如图 1 所示。

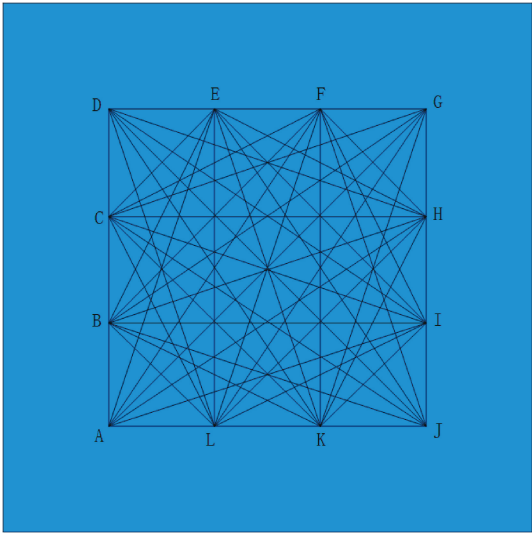


图 1 矩形阵列路径图
Fig. 1 Rectangular array path diagram

通过该路径图可以发现矩形阵列的 54 条路径中总共存在 8 组相同距离的路径。因此,本文将矩形阵列的所有路径分为 8 组,如表 1 所示。

表 1 矩形阵列相同传播距离路径分组
Table 1 Rectangular arrays of identical propagation distance path groups

第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组	第 8 组
AB	CE	BE	AE	AF	AG	BF	CH
BC	FH	CF	CG	BG	DJ	EI	FK
CD	IK	EH	DH	DI		HL	BI
DE	BL	FI	FJ	EJ		CK	EL
EF		HK	GK	GL			
FG		IL	AI	AH			
GH		BK	BJ	CJ			
HI		CL	DL	DK			
IJ			BH				
JK			CI				
KL			EK				
AL			FL				

从路径分组的表格中不难看出,当损伤位于检测区域的中心位置附近时,BH、CI、EK、FL 这 4 条路径为损伤路径,相同组的 AI、BJ、CG、DH、AE、DL、DH、FJ、JK 为无损路径,因此可以突出损伤路径信号的差异性,从而达到损伤检测的目的。

2 无基准损伤概率成像

与图像处理算法^[12-20]不同,兰姆波损伤概率成像算法是基于椭圆路径分析的技术,通过对比路径的损伤信号和无损信号的差异性来判定路径中是否存在损伤^[21],原理如图 2 所示。从图中可以看出,颜色越深的地方越靠近传感器对的直接路径,表明损伤存在的概率越大;颜色越浅的地方离直径路径越远,表明损伤存在的概率越小。当距离超过一定的阈值之后,就认为该路径不存在损伤。与此同时,该算法不需要考虑兰姆波的多模式频散现象^[22],这极大的降低了成像的难度。

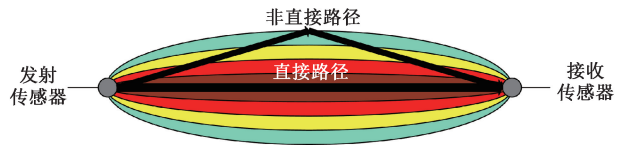


图 2 椭圆路径原理

Fig. 2 Schematic diagram of the elliptical path

该算法是基于路径分析的成像技术,需要比较路径之间的信号差异性,从而构建算法中所需要的损伤指数。信号的功率谱密度能够反映信号能量随频率变化的特性,当信号与缺陷相互作用时,信号在中心频率点的功率谱密度值会产生相应的变化^[22]。因此,本文采用信号的功率谱密度值来构建路径的损伤指数。根据帕塞伐尔定理,如果信号 $x(t)$ 的傅里叶变换为 $F(\omega)$,则其功率谱密度 $P(\omega)$ 的计算公式如式(1)所示:

$$P(\omega) = \int_0^{+\infty} F(\omega)^2 d\omega \tag{1}$$

损伤指数 Di 的计算公式定义为:

$$Di_{ij} = 1 - \frac{P_{ij}}{\max(p_i)} (i = 1, 2, \cdots, 8) \tag{2}$$

其中, P_{ij} 代表第 i 组的第 j 条路径。

空间分布函数为:

$$W_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} + \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}} \tag{3}$$

(x, y) 为像素点的坐标, (x_j, y_j) 为第 j 个传感器的坐标, (x_i, y_i) 为第 i 个传感器的坐标。

由于椭圆区域存在一定的边界范围,故令:

$$R_{ij}(x, y) = \begin{cases} W_{ij}(x, y), W(i, j) < \beta \\ 0, \text{其他} \end{cases} \tag{4}$$

其中, β 是椭圆最外围的阈值,不同的阈值代表不同大小的椭圆区域,本文将其设置为 0.025。成像公式:

$$P(x, y) = \sum Di_{ij} * R_{ij}(x, y) \tag{5}$$

其中, $P(x, y)$ 代表点 (x, y) 处的像素值。

3 实验分析

对兰姆波在钢板中的传播进行分析是整个实验研究的前提,因此本文基于有限元仿真软件构建钢板的有限元模型,尺寸为 1 000 mm×1 000 mm×1 mm,结构材料的参数如表 2 所示。

表 2 钢板的材料参数

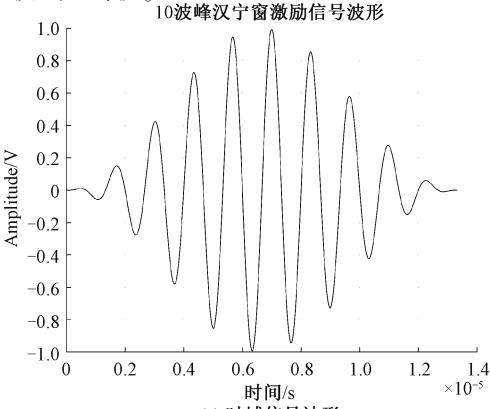
Table 2 Material parameters of steel plates

材料	密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
钢	7 850	210	0.3

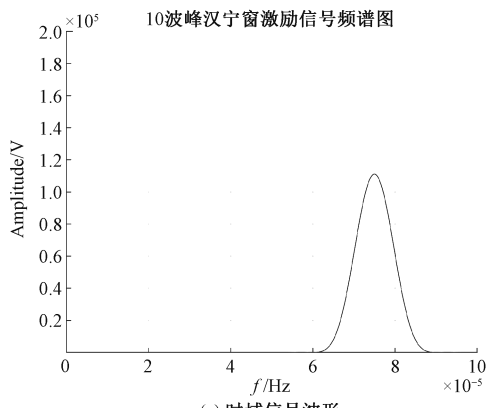
本文选择由汉宁窗调制的激励信号,其表达式如式(6)所示:

$$A = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi f_c t}{n} \right) \right) \sin(2\pi f_c t) \tag{6}$$

其中, f_c 代表中心频率 750 kHz; n 代表周期数 10 周期。激励信号时域和频域波形如图 3 所示。在仿真软件中选的激励方式均为单侧激励,这样有限元模型中的信号为多模式兰姆波。



(a) 时域信号波形
(a) Time domain signal waveforms



(a) 时域信号波形
(a) Time domain signal waveforms

图 3 750 kHz 汉宁窗调制的 10 周期激励信号
Fig. 3 10-cycle excitation signal with 750 kHz
Hanning window modulation

建立模型如图 4 所示。

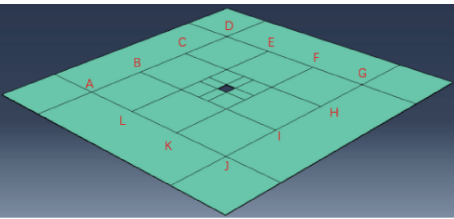


图 4 矩形阵列中心缺陷模型

Fig. 4 Rectangular array centre defect model

提取路径 AE、AI、BH 的信号进行分析。其中 AE、AI 为健康路径,BH 为损伤路径,其时域信号和功率谱密度曲线如图 5 和 6 所示。

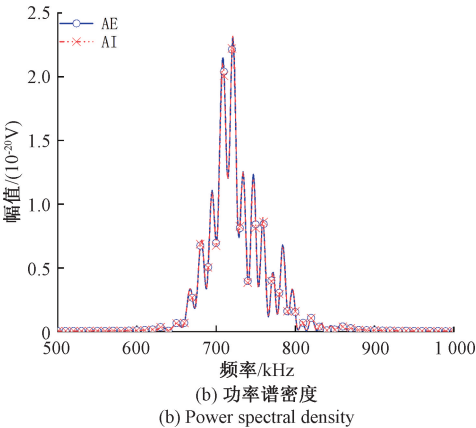
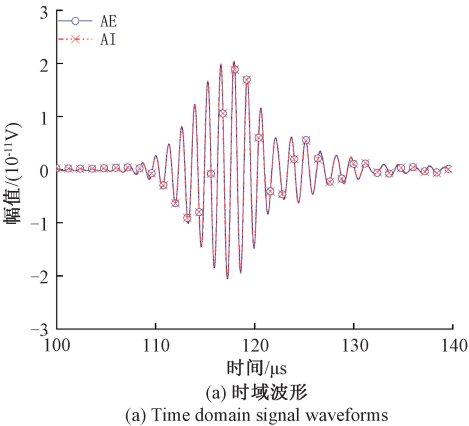


图 5 中心缺陷 AE-AI 路径信号比较

Fig. 5 Comparison of AE-AI path signals for central defects

从图 5 和 6 中的比较可以明显看出健康路径之间信号重合度较高,无明显差异,而健康路径和损伤路径之间的差异性明显。因此根据表 2 的路径分组,结合式(2)求解了第 4 组损伤指数,损伤指数柱状图如图 7 所示。其中 BH、CI、EK、FL 为损伤路径,其余为健康路径,从柱状图可以明显看出,损伤路径的损伤指数 D_i 明显高于其他健康路径,因此验证了矩形阵列检测中心位置附近损伤

的能力。

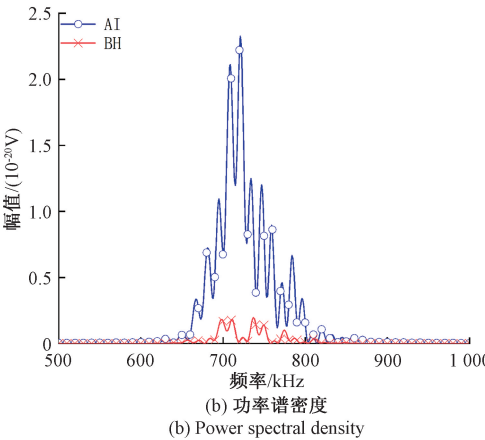
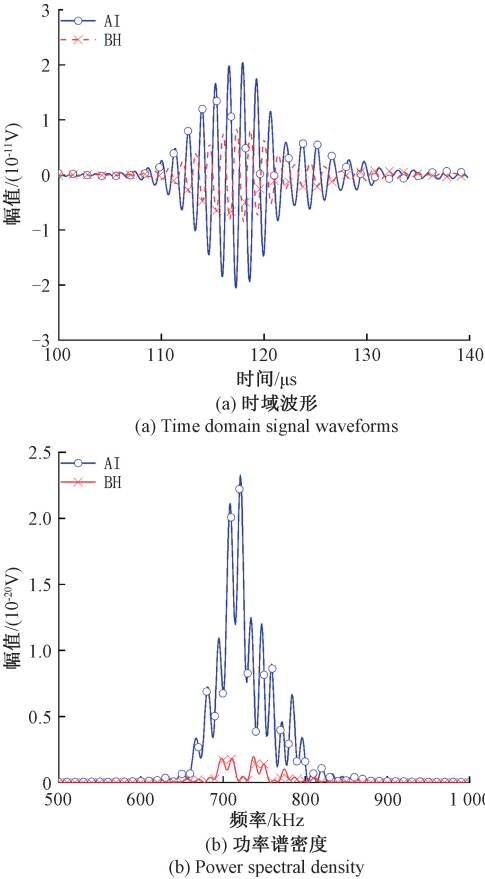


图 6 中心缺陷 AI-BH 路径信号比较

Fig. 6 Comparison of central defect AI-BH path signals

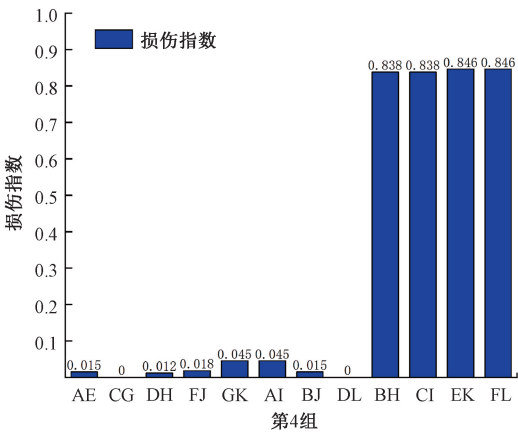


图 7 中心缺陷-第 4 组损伤指数

Fig. 7 Central defect-Group IV damage index

根据损伤指数之间的差异性,结合式(5),对缺陷的定位成像图如图 8 所示。图像中显示缺陷的中心位置位于点(0,0)出,与设置的缺陷中心位置吻合,体现了该阵列对检测中心位置缺陷的有效性。

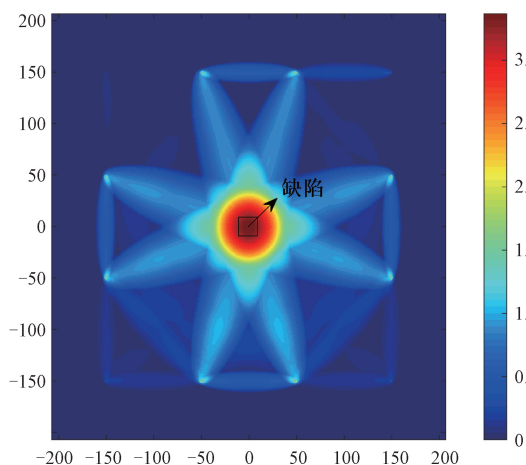


图8 矩形阵列中心位置缺陷定位成像

Fig. 8 Imaging of defect localization at the center of a rectangular array

针对矩形阵列还设置了非中心位置缺陷,模型如图9所示。

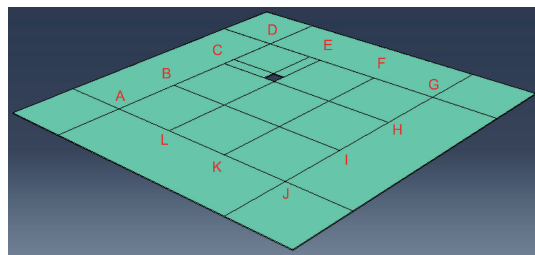


图9 矩形阵列非中心位置缺陷仿真模型

Fig. 9 Simulation model of a rectangular array of non-centrally located defects

其中 BI、FK 为健康路径,CH 为损伤路径,其时域信号和功率谱密度曲线如图10和11所示。同样从图10和11中的比较可以明显看出健康路径之间信号重合度较高,无明显差异,而健康路径和损伤路径之间的差异性明显。因此根据表2的路径分组,本文结合式(2)求解了第7组和第8组的损伤指数,损伤指数柱状图如图12所示。

从损伤指数柱状图中可以看出,第7组中的损伤路径BF和第8组中的损伤路径CH、EL的损伤指数明显高于其他健康路径的损伤指数,因此结合成像公式可以对矩形阵列中非中心位置缺陷实现定位成像,结果如图13所示。图中缺陷的中心位置位于点(-57,57)处,与设置的缺陷中心位置(-60,60)的绝对误差为3 mm,相对误差为5%,可以实现对缺陷的准确定位成像。

为了验证该方法对多缺陷的检测能力,建立了双缺陷的模型,如图14所示。

根据仿真结果,本文提取路径BF、CK、EI的信号

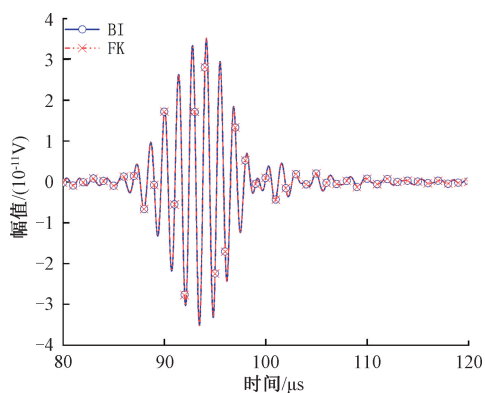
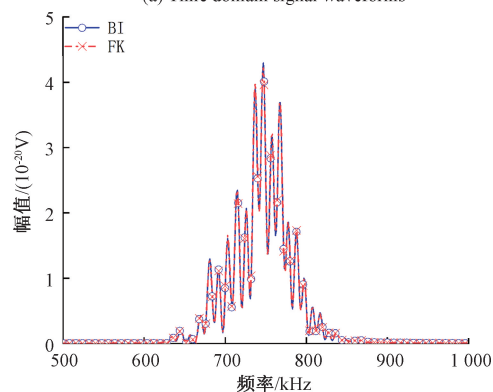
(a) 时域波形
(a) Time domain signal waveforms(b) 功率谱密度
(b) Power spectral density

图10 非中心缺陷BI-FK路径信号

Fig. 10 Non-central defective BI-FK path signal

进行分析。其中CK、EI为健康路径,BF为损伤路径,其时域信号和功率谱密度曲线如图15和16所示。

从图15和16中的比较可以明显看出健康路径之间信号重合度较高,无明显差异,而健康路径和损伤路径之间的差异性明显。因此根据表2的路径分组,本文观察第6组和第7组的损伤指数。损伤指数柱状图如图17所示。

从损伤指数柱状图中可以看出,第6组中的损伤路径DJ和第7组中的损伤路径BF、HL的损伤指数明显高于其他健康路径的损伤指数,因此结合成像公式可以对矩形阵列中的双缺陷实现定位成像,成像结果如图18所示。

成像结果显示左上方缺陷的中心位置位于点(-63,64)处,与设置的缺陷中心位置(-60,60)的绝对误差为4 mm,相对误差为6%;右下方缺陷的中心位置位于点(63,-64)处,与设置的缺陷中心位置(60,-60)的绝对误差为4 mm,相对误差为6%,可以实现对缺陷的准确定位成像。

然而在实际情况下,待检测板存在的缺陷通常是非穿透型的,因此本文还构建了矩形阵列的非穿透型缺陷

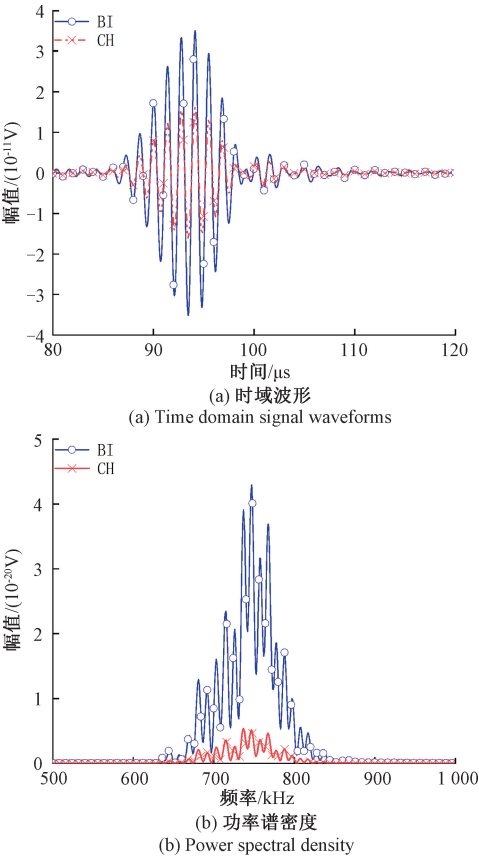


图 11 非中心缺陷 BI-CH 路径信号
Fig. 11 Non-central defective BI-CH path signal

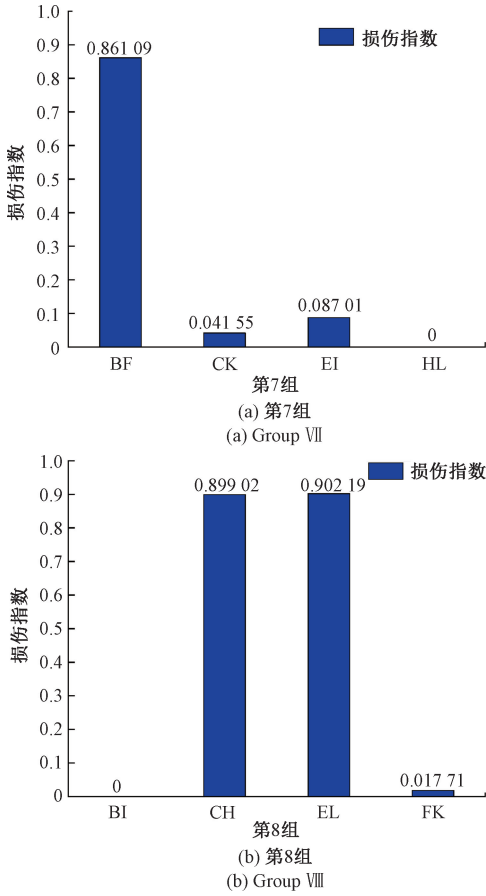


图 12 非中心缺陷损伤指数
Fig. 12 Non-central defect damage index

的模型,如图 19 所示。

根据仿真结果,本文提取路径 BF、CK、EI 的信号进行分析。其中 CK、EI 为健康路径,BF 为损伤路径,其时域信号和功率谱密度曲线如图 20 和 21 所示。

同样从图 20 和 21 中的比较可以明显看出健康路径之间信号重合度较高,无明显差异,而健康路径和损伤路径之间的差异性明显。因此根据表 2 的路径分组,观察第 5 组和第 6 组的损伤指数,损伤指数柱状图如图 22 所示。

从损伤指数柱状图中可以看出,第 5 组中的损伤路径 DI 和 DK 和第 6 组中的损伤路径 DJ 的损伤指数明显高于其他健康路径的损伤指数,因此结合成像公式可以对矩形阵列中的非中心位置缺陷实现定位成像,成像结果如图 23 所示。成像结果显示缺陷的中心位置位于点 $(-28,28)$ 处,与设置的缺陷中心位置 $(-30,30)$ 的绝对误差均为 2 mm,相对误差为 6%,可以实现对缺陷的准确定位成像。

4 结 论

本文提出了基于相同传播距离路径的兰姆波无基准

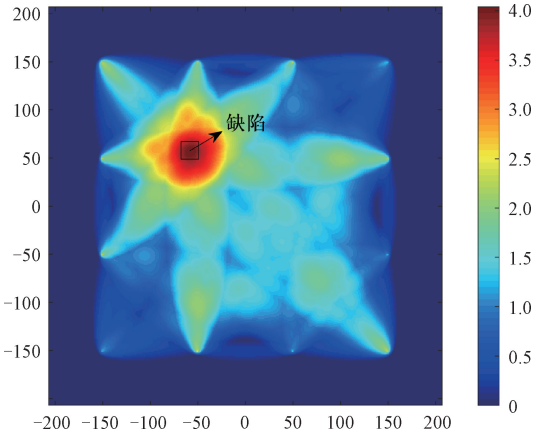


图 13 非中心位置缺陷定位成像
Fig. 13 Non-centrally located defect localization imaging

损伤概率成像方法。利用有限元仿真软件建立相应的仿真模型,通过汉宁窗激励 10 周期、中心频率为 750 kHz 的兰姆波信号获得每条路径上的响应信号。通过求解每条路径上的功率谱密度来构建损伤指数,并结合损伤概率成像方法来检测损伤位置。结果显示,基于矩形阵列,

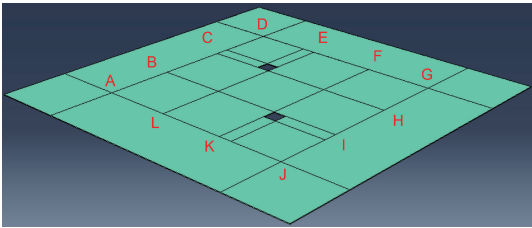


图 14 双缺陷仿真模型
Fig. 14 Double defect simulation model

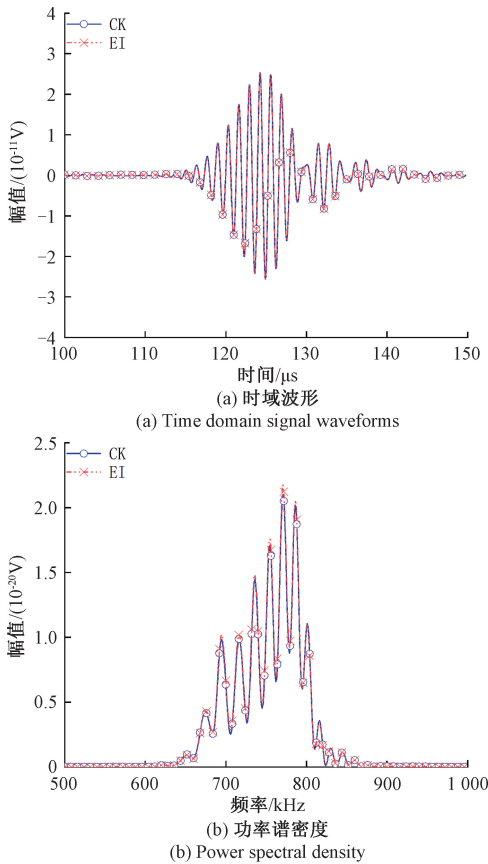


图 15 双缺陷 CK-EI 路径信号

Fig. 15 Double defective CK-EI path signal

并分别对中心缺陷、非中心单缺陷、双缺陷,以及非穿透型的缺陷分别进行了损伤概率成像,都实现了缺陷检测的目标。在图像处理时可以考虑图像去噪等^[23-25]处理,结合深度学习、机器学习等其他智能算法^[26-35]来进一步提高缺陷图像的精度。

参考文献

[1] 陈晓,倪龙. 用分数阶微分实现时频重叠多模式兰姆波的模式分离[J]. 声学学报, 2020, 45(2): 205-214.
CHEN X, NI L. Mode separation for multimode Lamb waves overlapped in time and frequency domains by using

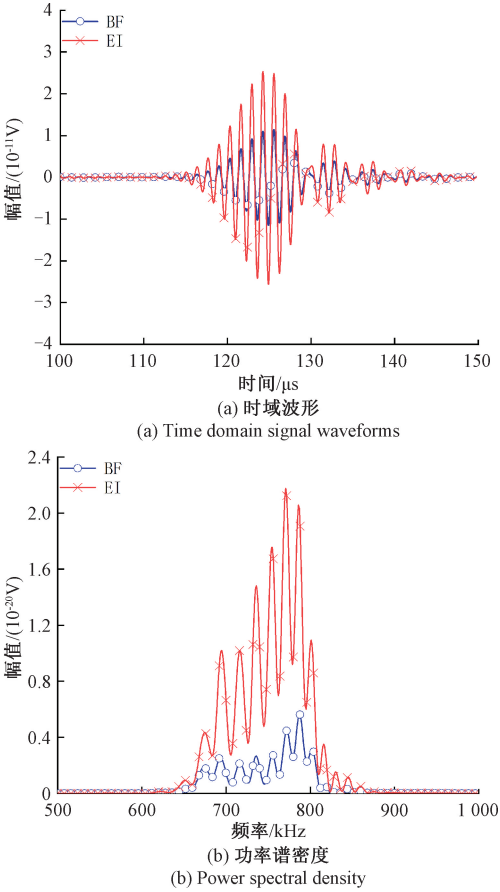


图 16 双缺陷 BF-EI 路径信号

Fig. 16 Double defective BF-EI path signal

fractional differential[J]. Acta Acustica. 2020, 45(2): 205-214.
[2] 倪龙,陈晓. 基于频散补偿和分数阶微分的多模式兰姆波分离[J]. 物理学报, 2018, 67(20): 406-415.
NI L, CHEN X. Mode separation for multimode Lamb Waves based on dispersion compensation and fractional differentiation[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(20): 406-415.
[3] 陈晓,汪陈龙. 基于赛利斯模型和分数阶微分的兰姆波信号消噪[J]. 物理学报, 2014, 63(18): 282-290.
CHEN X, WANG CH L. Noise suppression for Lamb wave signals by tsallis mode and fractional-order differential[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(18): 282-290.
[4] 朱妍妍,陈晓. 超声兰姆波检测电路板缺陷的有限元仿真研究[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(6): 1371-1376.
ZHU Y Y, CHEN X. Finite element simulation research on ultrasonic Lamb wave defect detection[J]. Computer & Digital Engineering, 2022, 50(6): 1371-1376.
[5] 孔琼英,邓为权. 强噪声下碳纤维复合材料疲劳损伤

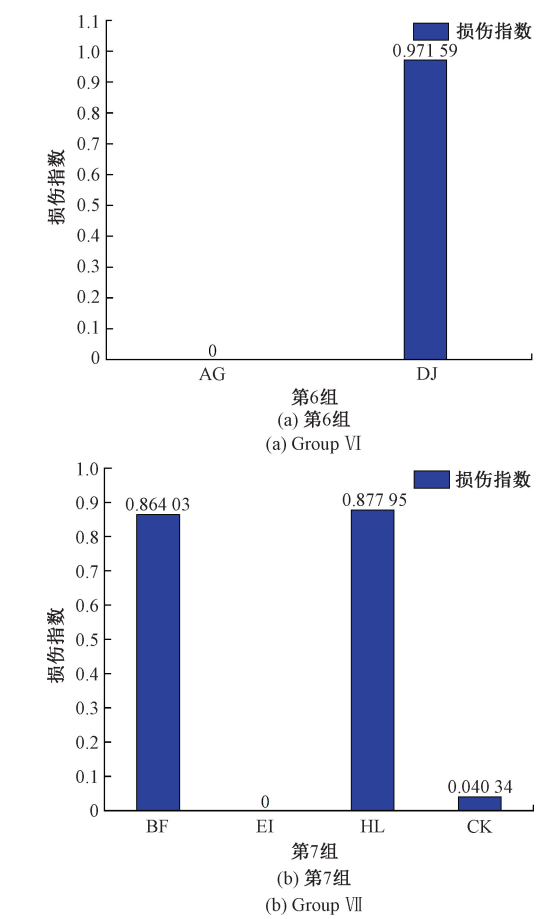


图 17 矩形阵列双缺陷损伤指数

Fig. 17 Rectangular array double defect damage index

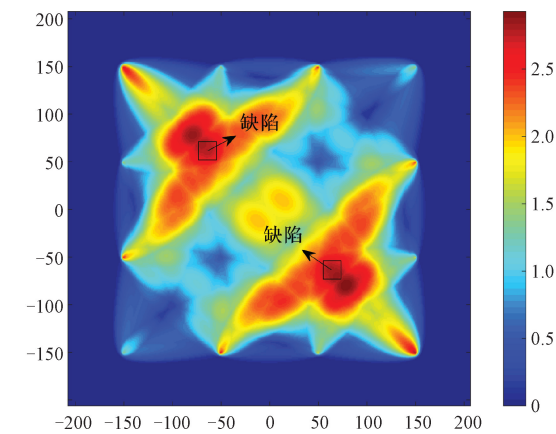


图 18 双缺陷定位成像图

Fig. 18 Double defect localisation imaging map

概率成像方法研究[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(9):1450-1457.

KONG Q Y, DENG W Q. Research on fatigue damage probability imaging method for carbon fiber composites under strong noise [J]. Mechanical Science and

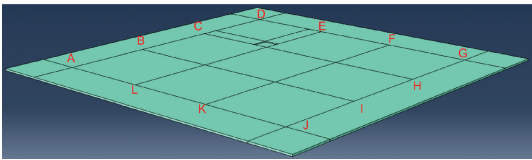


图 19 非穿透型仿真模型

Fig. 19 Non-penetrating simulation model

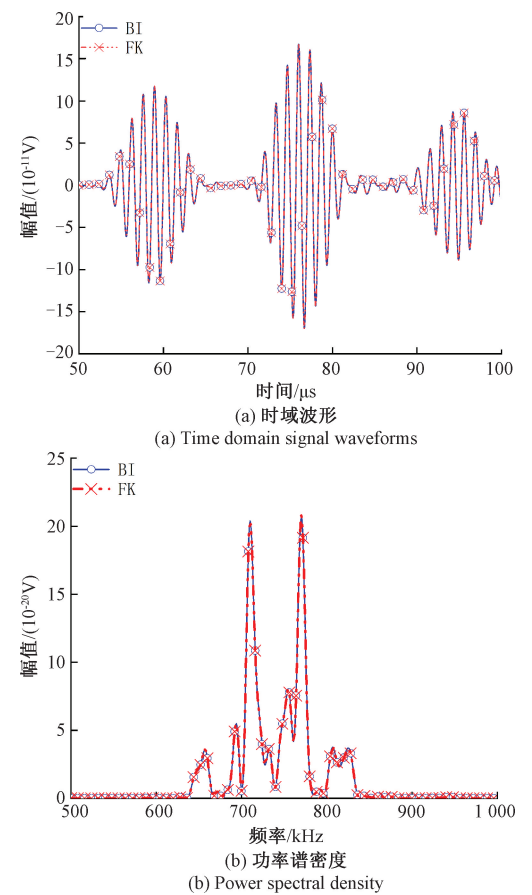


图 20 非穿透型缺陷 BI-FK 路径信号

Fig. 20 Non-penetrating defective BI-FK path signal

Technology, 2022, 41(9):1450-1457.

[6] SU C, JIANG M, LIANG J, et al. Damage identification in composites based on Hilbert energy spectrum and Lamb wave tomography algorithm [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(23): 11562-11572.

[7] KANNUSAMY M, KAPURIA S, SASMAL S. Accurate baseline-free damage localization in plates using refined Lamb wave time-reversal method [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(5): 055044.

[8] 常俊杰, 吴中权, 徐洋. 基于虚拟时间反转的空气耦合超声板材腐蚀缺陷概率损伤成像[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 148-153.

CHANG J J, WU ZH Q, XU Y. Probabilistic damage

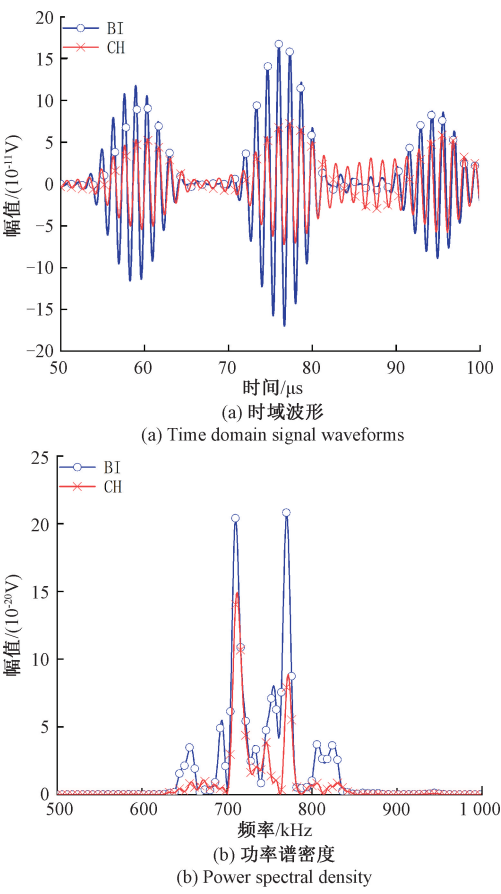


图 21 非穿透型缺陷 BI-CH 路径信号

Fig. 21 Non-penetrating defect BI-CH path signal

imaging of corrosion defects in air-coupled ultrasonic plates based on virtual time reversal [J]. Electronic Measurement Technology, 2022,45(2):148-153.

[9] GORGIN R, WANG Z. Baseline-free damage imaging technique for Lamb wave based structural health monitoring systems [J]. Smart Structures and Systems, 2021, 28(5): 689-698.

[10] JAGADEESHWAR T L, KALYANI S, RAJAGOPAL P, et al. Statistics-based baseline-free approach for rapid inspection of delamination in composite structures using ultrasonic guided waves [J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(6): 2719-2731.

[11] SUN H, ZHANG A, WANG Y, et al. Baseline-free damage imaging for metal and composite plate-type structures based on similar paths [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(4): 1550147719843054.

[12] 孙超文,陈晓. 基于多尺度特征融合反投影网络的图像超分辨率重建 [J]. 自动化学报, 2021, 47(7): 1689-1700.

SUN CH W, CHEN X. Multiscale feature fusion back-

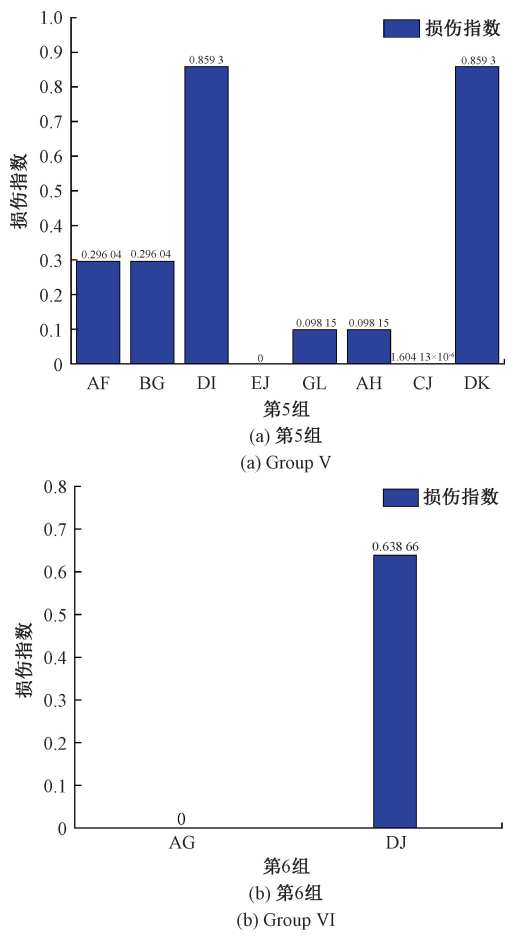


图 22 非穿透型缺陷损伤指数

Fig. 22 Non-penetrating defect damage index

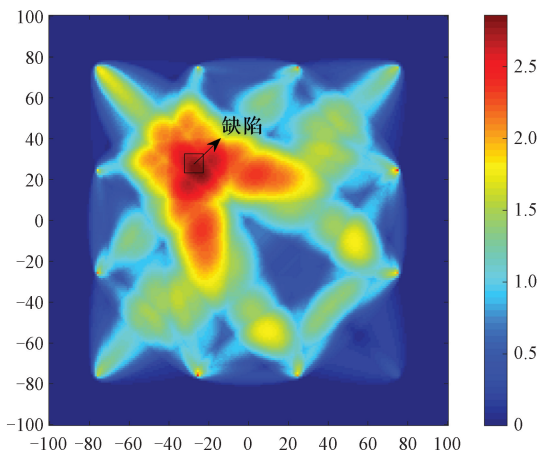


图 23 矩形阵列非穿透型缺陷定位成像

Fig. 23 Rectangular array non-penetrating defect localisation imaging

projection network for image super-resolution [J]. Acta Automatica Sinica, 2021,47(7):1689-1700.

[13] 徐晓庆,陈晓. 基于有效位平面面的遥感图像码率控

- 制算法[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(3): 236-239.
- XU X Q, CHEN X. Rate control algorithm for remote sensing images based on number of validated bit planes[J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(3): 236-239.
- [14] 朱娟, 陈晓. 改进胶囊网络的有序重叠手写数字识别方法[J]. 激光杂志, 2019, 40(7): 43-46.
- ZHU J, CHEN X. Improved capsule network for recognition of orderly overlapped handwritten numerals [J]. Laser Journal, 2019, 40(7): 43-46.
- [15] 胡春杰, 陈晓, 陈霞. 基于改进广义 Arnold 映射的多混沌图像加密算法[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 144-149.
- HU CH J, CHEN X, CHEN X. Multi chaotic image encryption algorithm based on improved generalized Arnold mapping [J]. Packaging Engineering, 2017, 38(3): 144-149.
- [16] 胡春杰, 陈晓, 郭银. 基于多混沌映射的光学图像加密算法[J]. 激光杂志, 2017, 38(1): 110-114.
- HU CH J, CHEN X, GUO Y. Optical image encryption algorithm based on multi chaotic maps [J]. Laser Journal, 2017, 38(1): 110-114.
- [17] 郭妍, 陈晓, 任晓晔. 一种优化随机森林模型的室内定位方法[J]. 激光杂志, 2018, 39(10): 70-74.
- GUO Y, CHEN X, REN X Y. Location fingerprint algorithm based on random forest [J]. Laser Journal, 2018, 39(10): 70-74.
- [18] 沈千里, 陈晓. 一种新型目标图像去模糊方法[J]. 电视技术, 2016, 40(6): 17-21.
- SHEN Q L, CHEN X. A new type of the target image deblurring method [J]. Video Engineering, 2016, 40(6): 17-21.
- [19] 陈鑫, 陈晓, 沈千里, 等. 基于 PBBShift 的 ROI 编码方法[J]. 电子技术应用, 2015, 41(4): 159-162.
- CHEN X, CHEN X, SHEN Q L, et al. Region of Interest coding method based on PBB Shift [J]. Computer Technology and its Applications, 2015, 41(4): 159-162.
- [20] 陈鑫, 陈晓, 蔡婷婷. 基于 SPIHT 算法的 ROI 编码研究[J]. 软件, 2015, 36(2): 112-117.
- CHEN X, CHEN X, CAI T T. Research on ROI coding based on SPIHT algorithm[J]. Software, 2015, 36(2): 112-117.
- [21] LEE Y, CHO Y. Defect imaging enhancement through optimized shape factors of the rapid algorithm based on guided wave beam pattern analysis[J]. Sensors, 2021, 21(12): 4029.
- [22] SU C, BIAN H, JIANG M, et al. Research on composites damage identification based on power spectral density and lamb wave tomography technology in strong noise environment [J]. Composite Structures, 2022, 289: 115466.
- [23] 沈千里, 陈晓, 支亚京, 等. 一种新的人脸图像去噪算法[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(11): 133-136.
- SHEN Q L, CHEN X, ZHI Y J, et al. A new algorithm of face image denoising[J]. Transducer and Microsystem Technologies. 2015, 34(11): 133-136.
- [24] 支亚京, 陈晓, 蔡婷婷. 单通道时频重叠高斯调幅通信信号盲分离方法[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(1): 204-208.
- ZHI Y, CHEN X, CAI T. Blind separation method of single channel time-frequency overlapped Gauss amplitude modulation signals [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(1): 204-208.
- [25] 徐畅, 陈晓, 季仟亿. 基于稀疏编码的 Shearlet 域图像去噪[J]. 激光杂志, 2017, 38(10): 96-100.
- XU CH, CHEN X, JI Q Y. Shearlet domain image denoising via sparse coding [J]. Laser Journal, 2017, 38(10): 96-100.
- [26] 任晓晔, 陈晓, 郭妍. 基于 Fluent 和 LSTM 神经网络的超声波测风仪阴影效应补偿研究[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(7): 89-98.
- REN X Y, CHEN X, GUO Y. Shadow effect compensation of ultrasonic wind measurer [J]. Computer Applications and Software. 2019, 36(7): 89-98.
- [27] 陈晓, 杨瑶. 融合注意力机制的 BiLSTM 网络实现无创血压测量[J]. 电子测量技术, 2022, 45(23): 59-65.
- CHEN X, YANG Y. Noninvasive blood pressure measurement based on BiLSTM network with attention mechanism [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(23): 59-65.
- [28] 任晓晔, 陈晓, 郭妍. 超声波测风换能器对风速的影响研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(7): 118-124.
- REN X Y, CHEN X, GUO Y. Study on the influence of ultrasonic wind transducer on wind speed [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(7): 118-124.
- [29] 陈晓, 毛焯炳. ADS-B 技术在低空空域安全中应用的现状与展望[J]. 电子测量技术, 2022, 45(20): 61-67.
- CHEN X, MAO Y B. Status and prospect of ADS-B technology application in low-altitude airspace security [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(20): 61-67.
- [30] 韩鹏飞, 陈晓. 基于 MFCC-IMFCC 和 GA-SVM 的鸟声识别[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(11): 393-399.
- HAN P F, CHEN X. Bird sound recognition based on

- MFCC-IMFCC and GA-SVM[J]. Computer Systems & Applications, 2022, 31(11): 393-399.
- [31] 陈晓, 荆茹韵. 单图像超分辨率方法综述[J]. 电子测量技术, 2022, 45(9): 104-112.
- CHEN X, JING R Y. A review on single image super-resolution [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(9): 104-112.
- [32] 陈霞, 陈晓, 邹胜男. 基于正态检验的室内定位算法[J]. 激光杂志, 2017, 38(3): 41-45.
- CHEN X, CHEN X, ZOU SH N. Indoor location algorithm based on normality[J]. Laser Journal, 2017, 38(3): 41-45.
- [33] 邹胜男, 陈晓, 陈霞. 基于改进的 UKF 算法的室内测距定位[J]. 激光杂志, 2017, 38(4): 61-65.
- ZOU SH N, CHEN X, CHEN X. Indoor location based on improved UKF algorithm[J]. Laser Journal, 2017, 38(4): 61-65.
- [34] 陈晓, 杨瑶. 基于长期递归卷积网络的无创血压测量[J]. 电子测量技术, 2022, 45(4): 139-146.
- CHEN X, YANG Y. Noninvasive blood pressure measurement based on long-term recursive convolution network[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(4): 139-146.
- [35] 杨瑶, 陈晓. 基于神经网络的说话人识别实验设计[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(9): 38-41, 50.

YANG Y, CHEN X. Experimental design for speaker recognition based on neural networks[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(9): 38-41, 50.

作者简介



陈晓 (通信作者), 2003 年于西安交通大学获得博士学位, 现为南京信息工程大学教授, 主要研究方向为现代电子系统统计、信号与信息处理、图像处理、成像等。

E-mail: chenxiao@nuist.edu.cn

Chen Xiao (Corresponding author)

received Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2003. Now he is a professor at Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interests include modern electronic system design, signal and information processing, image processing, imaging, etc.



戴杰, 2021 年于南京信息工程大学获得学士学位, 现为南京信息工程大学电子与信息工程学院硕士研究生, 主要研究方向为超声信号处理等。

E-mail: 1332509132@qq.com

Dai Jie received his B. Sc. degree from

Nanjing University of Information Engineering in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in the School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Engineering. His main research interest includes ultrasonic signal processing, etc.