DOI: 10.3901/JME.2020.24.024

板中超声导波弧形合成孔径阵列 多帧满秩成像检测*

朱新杰¹ 邓明晰² 蔡淑娟¹ 蒋亮¹ 王睿鹏¹

(1. 北方民族大学材料科学与工程学院 银川 750021;

2. 重庆大学航空航天学院 重庆 400044)

摘要: 超声导波合成孔径阵列作为一种基本的成像方式, 其“一发多收”阵列多帧满秩成像具有重要意义。针对板中超声导波弧形合成孔径阵列, 运用波幅矩阵和渡时矩阵对弧形阵列接收孔径进行分析讨论, 在依次变换发射阵元情况下, 研究弧形合成孔径阵列多帧满秩成像和全帧满秩成像。研究结果显示, 弧形合成孔径阵列多帧满秩成像可用以表征成像检测区域内散射体信息, 弧形阵列自然焦点处多帧满秩图像灰度值基本一致, 全帧满秩图像信噪比得到了不同程度增大。由于阵列阵元“边缘效应”, 阵列边缘阵元所对应的满秩图像背景灰度值增大约 50%, 全帧满秩图像对比度增大约 200%。成像检测试验验证了成像原理的可行性, 表明板中超声导波弧形合成孔径阵列多帧满秩成像可有效表征待检区域声场散射信息, 研究工作可为深入开展超声导波非规则阵列成像检测研究与应用提供重要基础。

关键词: 超声导波; 弧形合成孔径阵列; 接收矩阵; 多帧满秩成像检测

中图分类号: TB553

Multi-frames Imaging Detection of Full Rank for Arc Synthetic Aperture Array of Ultrasonic Guided Waves in Plates

ZHU Xinjie¹ DENG Mingxi² CAI Shujuan¹ JIANG Liang¹ WANG Ruipeng¹

(1. School of Materials Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021;

2. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: The synthetic aperture array of ultrasonic guided waves is a important imaging method, which multi-frames imaging detection of full rank is of great significance. Aiming at the arc synthetic aperture array of ultrasonic shear horizontal (SH) guided waves in plates, the receiving aperture of arc synthetic aperture array are analyzed by using the amplitude matrix and the flight time matrix. Under the condition of transforming the transmitting array elements in turn, the multi-frames imaging of full rank and whole-frame full rank imaging of the arc synthetic aperture array are all discussed. The research results show that the multi-frames imaging of full rank of arc synthetic aperture array could be used to characterize the scattering information in the testing area, the gray value of the multi-frames images of full rank at the natural focus of arc synthetic aperture array are according with each other, and the signal-to-noise ratio of the whole-frame image of full rank is increasing. Due to the "edge effect" of the array element, the background gray value of the images corresponding to the array edge element increases by about 50%, and the contrast value of the whole-frames image of full rank increases by about 200%. The imaging detection experiment verifies the feasibility of the imaging principle, which shows that the multi-frame full rank image of arc synthetic aperture array for ultrasonic guided waves in plates could characterize the scattering information of the area to be examined, and the research work proposed would provide an important basis for the further research and application of irregular array imaging detection of ultrasonic guided waves in plates.

Key words: ultrasonic guided waves; arc synthetic aperture array; receiving matrix; multi-frames imaging detection of full rank

* 国家自然科学基金(11574399, 11834008, 11474361)和中国博士后科学基金特别(2016T90984) 资助项目。20191213 收到初稿, 20200622 收到修改稿

0 前言

在无损检测与无损评价领域中,常常使用超声阵列进行成像检测^[1-2]。在对板材进行超声导波合成孔径阵列成像检测中,影响成像检测的因素很多,其中阵列型式、发射孔径与接收孔径等阵列因素至关重要^[3-4]。阵列中特定阵元(换能器)之间信号“一发一收”方式是单一阵元信号的发射接收方式。阵列中阵元之间信号“一发多收”方式是指同一阵元发射声波信号、多个阵元接收其反射回波信号,其发射孔径由一个发射阵元构成,接收孔径由多个阵元构成,这是合成孔径成像阵列信号的基本发射接收方式^[2]。根据声波叠加原理,当发射孔径、接收孔径的阵列信号为更为复杂的“多发多收”方式时,其多通道成像信号可分解为若干个“一发多收”阵列信号的特定组合。可见,作为合成孔径阵列一种基本的成像方式,超声导波“一发多收”合成孔径阵列成像在无损检测中具有重要意义与价值。

在合成孔径阵列成像中,发射孔径由不同发射阵元构成,描述发射孔径时往往用发射孔径包含的特定阵元数来表达。在“一发多收”合成孔径阵列中,某一特定发射阵元构成发射孔径,多个接收阵元构成接收孔径。相关研究表明,接收矩阵含有成像信息,接收孔径接收到的成像数据可用接收矩阵来表达,接收矩阵是研究超声导波合成孔径直线阵列成像的有力工具,接收矩阵的秩与接收阵元数相对应^[4]。接收孔径发生改变时,接收矩阵的秩相应变化,所成导波图像也不同,接收矩阵的秩是接收孔径阵列成像检测的决定性影响因素。当接收矩阵的秩等于最大接收孔径阵元数时,阵列所成图像为满秩图像^[4]。于是,在“一发多收”阵列中,多个不同的发射阵元发射声波信号后,其回波被满秩接收孔径接收,就可形成多帧满秩成像。

对多种不同型式的阵列可用于板中超声导波成像研究,如直线阵列^[5-7]、非直线阵列^[3, 8]、环向阵列^[9-11]、分散布置型阵列^[12-14]等阵列,这些不同型式阵列的成像方法、成像算法等为超声导波成像研究与应用提供了较好基础。然而,这些不同型式阵列鲜有涉及多帧满秩成像,阵列型式不同时各个帧序满秩图像之间的联系与区别等,是亟待迫切解决的重要问题。

在板中超声导波合成孔径阵列多帧满秩成像中,不同帧序的满秩图像可从多个方位视角充分表征同一成像声场区域内散射信息。同一阵列的多帧

满秩图像往往比传统单帧(单幅)图像在表征缺陷散射信息时更为丰富,在充分表征重点关注区域缺陷散射体信息方面更为有效。

在板中超声导波众多不同型式的阵列成像中,弧形阵列是一种典型的成像阵列,有比直线阵列更高的横向分辨率、更好的“自然聚焦”特性^[4],可面向一确定方位、在较远距离上以自然焦点为中心对重点关注区域进行成像。为探讨板中超声导波多帧满秩成像机制,在板中超声导波合成孔径直线阵列成像^[5,13]研究基础上,论文将接收孔径矩阵作为分析工具,对板中超声水平剪切导波弧形合成孔径阵列多帧成像进行探讨。研究中,弧形阵列由自行研制的导波换能器作为阵元构成,激发的水平剪切导波为零阶模式 SH0 为主,由于其波结构简单、衰减小、无色散等特点,在无损检测具有很大的应用前景^[15-16]。论文研究工作可为深入开展板中超声导波非规则阵列成像检测研究与应用提供有益参考。

1 弧形阵列的满秩接收孔径

满秩接收孔径是指接收矩阵的秩为满秩时的接收孔径,可表达为波幅接收矩阵和渡越时间接收矩阵,且二者的秩相等^[4],包含了阵列成像时可拟利用的所有信息。

在超声合成孔径弧形阵列成像时,单一模态超声导波换能器作为阵元构成了“一发多收”的弧形阵列,阵元 A_m 发射声波被坐标为 (x_p, y_p) 处的散射体 P 散射后被阵元 A_n 接收到的回波信号为 $x_{mn}(t)$, 该阵列接收信号为

$$\mathbf{x}_{mn} = (\mathbf{x}_{m1}(t) \cdots \mathbf{x}_{mn}(t) \cdots \mathbf{x}_{mN}(t))^T$$

$$m, n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中, N 为阵列的阵元数。

令散射体回波信号中某一具有周期信号的主峰值在 $\mathbf{x}_{mn}(t)$ 中为 A_{mn} , 其主峰值对应的渡越时间为 t_{mn} , $\mathbf{t}^m$ 、 $\mathbf{t}^k$ 为 $\mathbf{R}^N$ 上的矢量,接收矩阵的波幅接收矩阵(简称波幅矩阵) $\mathbf{A}_{ms}$ 为

$$\mathbf{A}_{ms} = (\mathbf{a}_1 \cdots \mathbf{a}_k \cdots \mathbf{a}_s)^T =$$

$$\begin{pmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1k} & \cdots & A_{1s} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_{k1} & \cdots & A_{kk} & \cdots & A_{ks} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_{s1} & \cdots & A_{sk} & \cdots & A_{ss} \end{pmatrix} \quad 1 \leq s \leq N \quad (2)$$

式中, A_m 为发射声波的阵元数, s 为接收声波的阵元数。

与波幅矩阵 A_{ms} 相对应的渡越时间接收矩阵(简称为渡时矩阵) T_{ms} 为

$$T_{ms} = (t_1 \cdots t_k \cdots t_s)^T = \begin{pmatrix} t_{11} & \cdots & t_{1k} & \cdots & t_{1s} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ t_{k1} & \cdots & t_{kk} & \cdots & t_{ks} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ t_{s1} & \cdots & t_{sk} & \cdots & t_{ss} \end{pmatrix} \quad 1 \leq s \leq N \quad (3)$$

在阵元 A_m 发射的声波在声场中被不同散射体反射后、经不同路径传播过程中, 被阵列接收孔径中的不同接收阵元接收, 波幅矩阵 A_{ms} 中列矢量表示同一散射体的散射回波被不同阵元接收的波幅当量, 其行矢量表示不同散射体的散射回波被同一阵元接收的波幅当量。可见, 波幅矩阵 A_{ms} 中行矢量之间呈现线性无关, 列矢量呈现线性无关。

同理, 渡时矩阵 T_{ms} 中行矢量之间是线性无关, 列矢量之间是线性无关。

由于波幅矩阵 A_{ms} 与渡时矩阵 T_{ms} 同时成对存在, 波幅矩阵 A_{ms} 与渡时矩阵 T_{ms} 的秩相等, 并有

$$R(A_{ms}^T) = R(T_{ms}^T) = s \quad (4)$$

这就是说, 在发射孔径不变前提下, 波幅矩阵的秩与渡时矩阵的秩相等, 且等于接收孔径接收阵元的数目。

特别地, 当 $s=N$ 时, 即阵元 A_m 发射声波后, 接收孔径阵列中全部阵元接收声波时, 接收矩阵的秩等于全阵元数 N , 即

$$R(A_{ms}^T) = R(T_{ms}^T) = N \quad (5)$$

也就是说, 秩等于全阵元数 N 的接阵孔径称为满秩接收孔径。

2 板中超声导波合成孔径弧形阵列多帧满秩成像

设有 N 个单一模态的超声导波换能器作为阵元构成了“一发多收”弧形阵列, 阵列中某一特定阵元发射声波后, 散射回波信号被满秩接收孔径所接收, 通过合成聚焦处理后, 就可形成一副满秩图像, 即为单帧满秩图像; 当依次改变弧形阵列发射阵元时, 就会形成多幅的单帧满秩图像, 即为多帧满秩成像(图像)。

弧形阵列中任意阵元 A_m 发射的声波被坐标为

(x_p, y_p) 处散射体 P 散射后被阵元 A_n 接收, 其声波渡越时间 t_{mn} 是对直线阵列信号进行合成孔径聚焦成像时的重要参量。接收孔径相邻二通道之间的渡越时间差 τ_{mn} 为

$$\tau_{mn} = t_{mn} - t_{mm} \quad (6)$$

令 $l_{\Delta P}$ 为板材介质中相邻二个散射体之间的声程差, 并有

$$\|t_s - t_{s-1}\|_2 = \left(\sum_{i=0}^{R(A_{ms}^T)} (t_s - t_{s-1})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中, 类如 $\|t_m\|_2$ 为 t^m 在 R^N 空间上的 2-范数。对于 $m \in [0, R(A_{ms}^T)]$, 当

$$\frac{\lambda}{2c_0} \leq \frac{\|t_{ms} - t_{(m-1)s}\|_2}{N} \leq \frac{l_{\Delta P}}{c_0} \quad (8)$$

可在不同接收孔径时对板中超声导波进行合成孔径阵列成像。

利用式(2)~(4)信息, 根据合成孔径成像聚焦原理^[13], 令 $s=N$, 则弧形阵列中任意阵元 A_m 发射的声波后, 阵列满秩接收孔径在成像区域内接收到散射体 $P(x_p, y_p)$ 的反射回波波幅 $A_{ms}(x_p, y_p)$ 为

$$A_{ms}(x_p, y_p) = \sqrt{\sum_{n=1}^{R(A_{ms}^T)} k_{mn} \cdot A_{mn}^2(x_p, y_p, t_{mn} + \tau_{mn})} \quad (9)$$

式中, 接收矩阵的秩 $R(A_{ms}^T)$ 意为成像信息与成像阵列通道之间的对应关系, k_{mn} 为声波能量正比于声波信号幅值平方的比例系数。

将反射回波总波幅 $A_{ms}(x_p, y_p)$ 转换为该散射体在待成 256 级灰度图像中相应像素点的灰度 $f(m, x_p, y_p)$, 那么板中超声导波弧形阵列第 m 帧成像可表达为

$$f(m, x_p, y_p) = 256 \times \frac{A_{ms}(x_p, y_p) - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} \quad (10)$$

式中, $A_{\max}$ 为成像区域中所有散射点中的最大回波幅度, $A_{\min}$ 为成像区域中所有散射点中的最小回波幅度。

那么, “一发多收”弧形阵列中任意阵元 A_m 发射声波后被满秩接收孔径的第 m 帧成像可表达为

$$f(m, x_p, y_p) = \frac{\exp(-ra_r) \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{R(A_{ms}^T)} k_{mn} \cdot A_{mn}^2(x_p, y_p, t_m + \tau_{mn}) - A_{\min}}}{A_{\max} - A_{\min}} \quad (11)$$

式中, r 为发射阵元到成像散射点处的矢径大小, α_r 为声波衰减系数。

由式(11)可以看出, “一发多收” 弧形阵列成像时, 发射阵元 A_m 与所成第 m 帧图像相对应。这样的一帧图像, 为单帧满秩图像, 多个单帧满秩图像就是多帧满秩图像。改变发射阵元时, 多帧满秩图像之间既有区别, 也有联系。

对于 “多发多收” 弧形阵列来说, 其合成孔径阵列进行多通道信号成像时, 阵列信号可分解为若干个 “一发多收” 阵列信号的特定组合。因此, 具有满秩接收孔径的 “多发多收” 超声导波弧形阵列进行合成孔径聚焦成像, 意味着阵列 “全孔径发射、全孔径接收”。这也就是说, “多发多收” 弧形阵列满秩成像是全孔径发射时的满秩成像, “一发多收” 弧形阵列是单阵元发射的满秩成像。为研究方便起见, 将 “多发多收” 弧形阵列满秩成像称为全帧满秩成像, 其图像可看作是多帧图像中的一帧。弧形阵列全帧满秩成像为

$$f(x_p, y_p) = \sum_{m=1}^{R(A_m^T)} f(m, x_p, y_p) = \frac{1}{256} \cdot \frac{\exp(-r\alpha_r) \cdot \sqrt{\sum_{m=1}^{R(A_m^T)} \sum_{n=1}^{R(A_n^T)} k_{mn} \cdot A_{mn}^2(x_p, y_p, t_m + \tau_{mn}) - A_{\min}}}{A_{\max} - A_{\min}} \quad (12)$$

3 弧形阵列多帧满秩成像检测试验

3.1 试验系统构成

基于以上分析, 构建了板中超声导波合成孔径弧形阵列多帧满秩成像检测试验系统, 该试验系统由成像电脑、多通道脉冲信号发射 / 接收器、水平剪切导波换能器弧形阵列、钢板试样等构成, 如图 1 所示。阵列弧形半径为 1 260 mm, 将自行研制超声导波换能器作为阵元, 所激发水平剪切导波为单一零阶模态为主, 当激励频率为 0.5 MHz, 所激发零阶水平剪切导波波长为 6.4 mm, 阵元 -6 dB 的发射开角约为 32° , 阵元数为 9, 相邻阵元之间的中心夹角为 5° 。多通道脉冲信号发射 / 接收器用于发射 400 V 方波脉冲, 并接收采集回波信号, 成像电脑用于存储、处理信号和成像。钢板试样尺寸为 $2\,000\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm} \times 9.5\text{ mm}$, 材料为 16MnR, 人工缺陷 A、C 分别为 $\phi 10\text{ mm}$ 、 $\phi 20\text{ mm}$ 的通孔, B 为 $3.5\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ 、深 2.5 mm 的刻槽。弧形阵列自然焦点在人工缺陷 A 处。

图 1 板中超声导波合成孔径弧形阵列多帧满秩成像检测试验系统

3.2 试验结果分析

对图 1 所示板中超声导波弧形阵列多帧满秩成像检测系统进行试验, 当依次改变阵列发射阵元 A_m , 即当 m 依次在 [1, 9] 取值时, 弧形阵列所成 9 帧满秩导波图像, 如图 2 发射阵元为仅为 A_2 、 A_4 、 A_6 、 A_8 时的相应帧序满秩图像, 图 3 为全帧满秩图像。这些图像在灰度、背景灰度、信噪比、对比度

图2 超声导波弧形阵列多帧满秩图像

等方面存在较为明显的区别与联系,如图4~7所示,其中第1帧~9帧为单帧满秩图像,第10帧为全帧满秩图像。总体来看,人工缺陷散射体均在图像中得到显示,成像效果总体清晰。

图3 超声导波弧形阵列全帧满秩图像

多帧满秩图像中,同一散射体在自然焦点处图像灰度值变化幅度不大,如图4所示位于弧形阵列自然焦点处的孔A、孔C图像灰度值在多帧图像中几乎不变,远离自然焦点的槽B在不同帧序图像中的灰度变化较大。这是由弧形阵列在自然焦点处本身所具有的“自然聚焦”功能所决定的。另外,第10帧图像为全帧满秩图像,其灰度与其他不同帧序图像的灰度保持大体相等。这就是说,如果只是注重散射体图像灰度的话,可以用耗时较少的单帧满秩成像来代替全帧满秩成像。

图4 弧形阵列不同帧数序列的图像灰度

与阵列中其他发射阵元相比,阵列中边缘位置处阵元发射声波信号后,同一满秩接收孔径接收到较少的有效回波信号,这种阵列阵元“边缘效应”,使得第1帧和第9帧图像背景灰度值较大,其它帧序满秩图像背景灰度较小、且背景灰度值较为接近且一致。相比而言,弧形阵列全帧满秩图像背景灰度最小,其背景灰度比其他帧序满秩图像减少了约50%左右。这是由于当阵列进行全帧满秩成像时,相当于对多个接收孔径对应的多路信号分别进行了 N 次反复滤波后进行合成聚焦处理,这样图像背景噪声得到有效抑制,如图5所示。图像背景灰度小,意味着图像对比度相对增大,这样有利于对缺陷散射体的显示。

图5 弧形阵列不同帧数序列的图像背景灰度

由于弧形阵列在自然焦点处具有“自然聚焦”功能,所以多帧满秩图像在自然焦点处的散射体的图像信噪比变化幅度不大,如孔A、孔C。然而,由于当阵列对全帧满秩图像进行合成孔径聚焦处理时,回波信号噪声得到了抑制,使得第10帧全帧满秩图像信噪比得到了大幅度增大。如图6所示。

图6 弧形阵列不同帧超声导波图像信噪比

同样由于阵列两端边缘处发射阵元的“边缘效应”,处于阵列边缘的发射阵元 A_1 、 A_9 所对应帧序图像的对比度较小,其他帧序图像的对比度较大。然而,全帧满秩图像对比度增大200%左右,这同

样是由于全帧满秩图像在合成孔径聚焦成像中背景噪声较小所致, 如图 7 所示。

图 7 弧形阵列不同帧超声导波图像对比度

弧形阵列多帧满秩成像检测中, 将成像原理其多帧满秩图像的灰度、背景灰度、信噪比、对比度等进行综合分析考量, 才是更科学合理。如在检测中注重成像信噪比分析, 或对成像检测结果在图像处理、图像分析等方面要求较高, 而对成像耗时不予优先考虑的话, 可通过增加接收孔径阵元数来增大弧形阵列接收矩阵的秩, 使得图像信噪比、对比度得以提高, 以得到更多、更好的基础图像。在检测中如注重成像清晰度, 或为提高检测效率、增强检测的适时性时, 可用单帧满秩成像来替代全帧满秩成像, 从而达到减小成像耗时、图像灰度大体不变的效果。

4 结论

通过运用接收矩阵定量描述并分析接收孔径, 在发射阵元依次变换情况下, 研究探讨了板中超声导波合成孔径弧形阵列多帧满秩成像机制。

研究结果显示, 弧形阵列多帧满秩成像可用以表征成像检测区域内基本散射信息, 多帧满秩图像在自然焦点处散射体的图像灰度值变化不大, 全帧满秩图像信噪比得到了不同程度增大。由于阵列阵元“边缘效应”, 阵列边缘阵元所对应的满秩图像背景灰度值较大, 比其他多帧满秩图像背景灰度增大了约 50%, 同时全帧满秩图像对比度增大了约 200%。

成像检测试验验证了成像原理的可行性, 表明板中超声导波弧形阵列多帧满秩图像可充分表征待检区域散射信息, 论文研究工作可为深入开展超声导波非规则阵列成像检测研究与应用提供重要基础。

参 考 文 献

[1] PENG C, BAI L, ZHANG J, et al. The sizing of small surface-breaking fatigue cracks using ultrasonic arrays[J].

NDT & E International, 2018, 99: 64-71.

[2] 朱新杰, 韩赞东, 都东, 等. 基于合成孔径聚焦的超声 SH 导波成像检测[J]. 清华大学学报, 2011, 51(5): 687-692.

ZHU Xinjie, HAN Zandong, DU Dong, et al. Imaging and inspection of ultrasonic SH-guided wave by synthetic aperture focusing[J]. Journal of Tsinghua University, 2011, 51(5): 687-692.

[3] 朱新杰, 韩赞东, 都东, 等. 基于椭圆簇轨迹特征的板中超声导波线弧类阵列成像研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(22): 14-20.

ZHU Xinjie, HAN Zandong, DU Dong, et al. Imaging of ultrasonic guided waves in plate based on characteristic of elliptical cluster tracks for line-arc kind of array[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(22): 14-20.

[4] 朱新杰, 邓明晰, 都东, 等. 接收孔径对超声导波合成孔径阵列检测的影响分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 133-140.

ZHU Xinjie, DENG Mingxi, DU Dong, et al. The influence of receiving aperture on imaging and testing of synthetic aperture array for ultrasonic guided waves[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 133-140.

[5] ZHANG J, DRINKWATER B W. Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method [J]. NDT & E International, 2010, 43: 123-133.

[6] KIM D, EOM H. Ultrasonic NDE discrimination with the gradient descent algorithm and SAFT image processing[J]. NDT&E International, 2009, 42: 250-259.

[7] YU L, SANTONI G, GIURGIUTIU V. Shear lag solution for tuning ultrasonic piezoelectric wafer active sensors with applications to Lamb wave array imaging[J]. International Journal of Engineering Science, 2010, 48(10): 848-861.

[8] LIU Zenghua, SUN Kunming, SONG Guorong, et al. Damage localization in aluminum plate with compact rectangular phased piezoelectric transducer array[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 70-71: 625-636.

[9] VELICHKO A, WILCOX PD. Guided wave arrays for high resolution inspection[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123(1): 186-196.

[10] RAJAGOPALAN J, BALASUBRAMANIAM K, KRISHNAMURTHY C V. A phase reconstruction algorithm for Lamb wave based structural health

- monitoring of anisotropic multilayered composite plates[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 119(2): 872-878.
- [11] HYU S K, JIN Y K. An analytical filter design method for guided wave phased arrays[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 81: 433-446.
- [12] MOLL J, SCHULTE R T, HARTMANN B, et al. Multi-site damage localization in anisotropic plate-like structures using an active guided wave structural health monitoring system[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(4): 45022-45037.
- [13] YU L, SANTONI G, GIURGIUTIU V. Shear lag solution for tuning ultrasonic piezoelectric wafer active sensors with applications to Lamb wave array imaging[J]. International Journal of Engineering Science, 2010, 48(10): 848-861.
- [14] LI Weibin, CHOB Y. Quantification and imaging of corrosion wall thinning using shear horizontal guided waves generated by magnetostrictive sensors[J]. Sensors and Actuators A : Physics, 2015, 232(6): 251-258.
- [15] LIU Zenghua, ZHANG Yongchen, XIE Muwen, et al. A direction-tunable shear horizontal mode array magnetostrictive patch transducer[J]. NDT & E International, 2018, 97: 20-31.
- [16] 朱新杰, 陈以方, 韩赞东, 等. 一种用于焊接结构超声成像检测的 SH 导波换能器[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 17-21.
- ZHU Xinjie, CHEN Yifang, HAN Zandong, et al. An ultrasonic SH-guided-wave transducer for imaging and testing of plate with welding structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 17-21.
-
- 作者简介: 朱新杰, 男, 1977 年出生, 博士, 硕士研究生导师。主要研究方向为超声成像、材料无损检测和评估、结构工程检测等。
E-mail: zxjconcrete@163.com
- 邓明晰(通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超声学、非线性声学、超声成像、结构工程检测等。
E-mail: dengmx65@yahoo.com