

利用扩散场信息的超声兰姆波全聚焦成像

张海燕 徐梦云 张辉 朱文发 柴晓冬

Full focal imaging of ultrasonic Lamb waves using diffuse field information

Zhang Hai-Yan Xu Meng-Yun Zhang Hui Zhu Wen-Fa Chai Xiao-Dong

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 224301 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181268

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181268>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[声学超材料与超表面研究进展](#)

Research advances in acoustic metamaterials and metasurface

物理学报.2018, 67(19): 194301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180963>

[基于联合波叠加法的浅海信道下圆柱壳声辐射研究](#)

Sound radiation of cylinder in shallow water investigated by combined wave superposition method

物理学报.2018, 67(8): 084301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171963>

[海面冰层对声波的反射和散射特性](#)

Reflecting and scattering of acoustic wave from sea ices

物理学报.2017, 66(23): 234301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234301>

[基于模式分离的兰姆波逆时偏移成像](#)

Reverse time migration Lamb wave imaging based on mode separation

物理学报.2017, 66(21): 214301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.214301>

[新型负模量声学超结构的低频宽带机理研究](#)

Low-frequency wide-band mechanism of a new type acoustic metamaterial with negative modulus

物理学报.2017, 66(9): 094301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.094301>

利用扩散场信息的超声兰姆波全聚焦成像*

张海燕^{1)†} 徐梦云¹⁾ 张辉¹⁾ 朱文发¹⁾²⁾ 柴晓冬²⁾

1) (上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444)

2) (上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620)

(2018年7月1日收到; 2018年9月17日收到修改稿)

利用兰姆波的扩散场信号, 实现了距离传感器较近缺陷的全聚焦成像. 通过两传感器接收的扩散场全矩阵信号进行互相关, 恢复出两传感器之间的格林函数响应, 重建新的全矩阵. 该重建全矩阵削弱了直接耦合采集响应信号中存在的早期饱和和非线性效应信号, 恢复了被遮盖的近距离缺陷散射信号. 在含缺陷的各向同性铝板中激发兰姆波, 重建信号的早期信息与直接俘获信号的后期信息相结合形成混合全矩阵, 结合全聚焦成像, 优化成像效果. 所提方法为薄板类结构中距离传感器较近缺陷的兰姆波无损检测提供了理论指导.

关键词: 扩散场, 互相关, 兰姆波, 全聚焦成像

PACS: 43.20.+g, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.67.20181268

1 引言

相控阵探头一般是由多个传感器构成, 在检测试件时, 可以根据聚焦深度与角度, 计算出适合的延时法则, 形成聚焦声束. 无损检测中, 与单个超声传感器相比, 阵列传感器在成像分辨率、扫查方式、数据处理以及成像方法上具有明显的优势. 传统的相控阵扫查方式有A扫、B扫、C扫、D扫和S扫, 可以实现试块的实时扫查. 但由于聚焦点的数量和偏转角度的限制, 传统的相控阵扫查范围和检测缺陷的能力受到了焦点的影响. 对于非实时检测, 基于相控阵信号的后处理技术逐渐成熟. 利用相控阵探头俘获全矩阵数据, 在此基础上采用各种分析处理成像算法, 实现非实时的、高分辨率的缺陷检测.

对于全矩阵数据后处理方法, 目前典型的成像算法可分为基于虚拟聚焦的后处理算法和基于频域反演的后处理算法. Holmes等^[1]在2004年提出一种替代传统相控阵扫查的方法, 即全聚焦算法(total focusing method, TFM), 使得声束聚焦

在成像区域内每一点上, 整体优化了阵列传感器的聚焦性能. 随后, Holmes等^[2]又提出了改进的全聚焦算法, 即向量全聚焦成像算法, 它是利用散射声场能量沿不同角度方向变化各不相同的规律, 从而对缺陷的类型和几何特征进行自动定量评价. 焦敬品等^[3]将向量全聚焦成像用于工业上的裂纹检测, 实现了裂纹方向识别和长度定量测量. 频域中, Hunter等^[4]结合了雷达和声纳中的波数算法, 提出了一种频域的全矩阵成像算法, 其计算速度远快于TFM. 由于换能器元件的尺寸以及介质中的衰减引起的衍射效应, Labyed和Huang^[5]实现了以一维傅里叶变换后的全矩阵数据为基础的基于多重信号分类的时间反转成像算法(time reversal imaging with multiple signal classification, TR-MUSIC).

但在检测近距离缺陷时, 超声换能器接收的响应包含了仪器采集系统造成的非线性效应始波信号, 会遮盖近距离缺陷散射信号. 该响应包含了换能器初始激励(例如换能器激励的非线性调制信号、超声在换能器内部经换能器边缘多次反射继续传播引起的混响)、发射换能器到接收换能器的直

* 国家自然科学基金(批准号: 11674214, 11474195, 11874255, 51478258)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hyzh@shu.edu.cn

达波以及非线性电子恢复过程(实际中换能器非电信号与电信号之间转变原理及电路本身存在的非线性)等. 在使用阵列换能器时, 该响应还将包含相邻元件间的机械串扰, 使得早期信号更加复杂. 这样, 直接利用俘获的全矩阵信号在成像时将会产生一个严重的噪声区域.

在地震学^[6,7]、海洋学^[8]、光学^[9]中, 利用监测站检测到的环境噪声之间的相关性, 恢复两点之间的响应, 形成一个无源场. Froment等^[7]通过环境地震迭代噪声相关函数来重建表面波格林函数, 分析了不同相关函数对利用噪声进行层析成像的效果. 在超声学中, Potter等^[10,11]引入了扩散场, 在将超声信号传输到有界介质中, 通过多次散射和反射效应, 在较长时间之后, 得到一个近似均匀的声场, 该声场即为扩散场^[12,13]. 根据扩散场信号之间的相关性, 利用扩散场信号反演出两点之间的格林函数时间结构. 相似地, Chehami等^[14]在混响弹性板中进行实验, 利用噪声源产生的扩散场互相关提取两点之间的格林函数, 为无源成像技术奠定了基础.

本文在各向同性铝板中利用兰姆波扩散场互相关恢复出两点之间的格林函数响应, 基于重建全矩阵信号实现近距离缺陷成像. 文中的近距离是指缺陷位于超声相控阵近场中, 满足文献^[15]中的超声相控阵近场计算公式 $N_d = D^2/4\lambda$, 其中 D 是换能器孔径, λ 是超声波波长. 首先, 理论推导了通过扩散场兰姆波信号互相关, 提取两传感器之间格林函数响应的原理公式. 然后, 搭建实验系统平台, 将相控阵探头置于铝板侧面, 面内激发 S_0 兰姆波, 并变换相控阵探头与缺陷的相对位置, 研究传感器位置对实验效果的影响; 利用相控阵探头俘获扩散场兰姆波全矩阵数据, 提取两传感器之间的格林函数响应, 重建新的全矩阵. 最后将重建信号的早期信息与直接俘获信号的后期信息相结合, 得到混合全矩阵. 该全矩阵可恢复早期时间的散射信号, 结合全聚焦成像算法, 实现铝板中近距离缺陷成像.

2 基于扩散场信号互相关的全聚焦成像原理

2.1 环境噪声中格林函数的提取

在均匀介质中, 现有两个超声接收器 A 和 B, 假设包围接收器 A, B 的闭合表面 S 上存在随机噪

声源 $r_i (i = 1, 2 \dots)$, 场强为 $q(r_i)$, 则根据声场叠加原理^[16], 接收器 A, B 处的声场分别为:

$$p(r_A) = \int G(r_A, r_i)q(r_i) dS, \quad (1)$$

$$p(r_B) = \int G(r_B, r_i)q(r_i) dS, \quad (2)$$

其中, $G(r_{A/B}, r_i)$ 表示 r_i 和 $r_{A/B}$ 之间的格林函数传播公式. 假设声场中噪声源强度是空间均匀分布且互不相关, 功率谱 $Q = |q(\omega)|^2$ 同时与噪声源位置无关^[17,18]:

$$\langle q(r_1)q^*(r_2) \rangle = Q\delta(r_1 - r_2), \quad (3)$$

其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示统计平均的期望值, 上角标 * 表示复数的共轭. 由此可知, A, B 位置处声场互相关为

$$\begin{aligned} & \langle p(r_A, \omega)p^*(r_B, \omega) \rangle \\ &= \left\langle \int q(r_1, \omega)G(r_A, r_1, \omega) dS_1 \right. \\ & \quad \left. \times \int q^*(r_2, \omega)G^*(r_B, r_2, \omega) dS_2 \right\rangle \\ &= \iint |q(\omega)|^2 \delta(r_1 - r_2)G(r_A, r_1, \omega) \\ & \quad \times G^*(r_B, r_2, \omega) dS_1 dS_2 \\ &= Q \int G(r_A, r, \omega)G^*(r_B, r, \omega) dS. \quad (4) \end{aligned}$$

根据文献^[15]得知接收器 A, B 处声场互谱的所有声源积分等于 A, B 之间因果格林函数与非因果格林函数之差:

$$\begin{aligned} & \int G(r_A, r, \omega)G^*(r_B, r, \omega) dS \\ &= \frac{i}{2\omega} [G(r_B, r_A, \omega) - G^*(r_B, r_A, \omega)]. \quad (5) \end{aligned}$$

将(5)式代入(4)式中, 等式右边可得:

$$\begin{aligned} & \langle p(r_A, \omega)p^*(r_B, \omega) \rangle \\ &= \frac{i}{2\omega} Q [G(r_B, r_A, \omega) - G^*(r_B, r_A, \omega)]. \quad (6) \end{aligned}$$

对上式进行傅里叶逆变换, 得到格林函数时域公式:

$$\begin{aligned} & -2 \frac{d}{dt} \langle C_{A,B}(t) \rangle \\ &= [G(r_B, r_A, t) - G(r_B, r_A, -t)] \otimes C_q(t), \quad (7) \end{aligned}$$

其中 $C_{A,B}(t)$ 表示接收器 A, B 处声场的互相关, 符号 \otimes 表示卷积, $C_q(t)$ 表示 $q(t)$ 的自相关. 从频域公式(6)与时域公式(7)可以看出, 在完全扩散场中, A, B 两点声场的互相关统计平均函数关于时间的导数是收敛于两点之间的格林函数, 且是关于时间

的反对称函数. 因此, 利用两点之间噪声信号(本文中的噪声为扩散场信号)的互相关函数可以实现对这两点之间因果格林函数和反因果格林函数的恢复. 这可为相控阵俘获的扩散场全矩阵信号实现近距离全聚焦成像提供理论支持.

2.2 全聚焦成像

传统的全聚焦成像是利用相控阵传感器(共 N 个阵元)俘获的全矩阵数据, 一个阵元发射所有阵元接收, 形成 $N \times N$ 组 A 扫信号矩阵. 从时间零点开始记录, 选取足够长的时间窗口 $[0, t_c]$ 信息, 包含所需的散射信号, 形成的 $N \times N$ 组 A 扫信号矩阵, 记作 $h_{ij}(t)$, 其中, i 表示激励阵元, j 表示接收阵元. 计算成像区域各个像素点的幅值 [19,20]:

$$I(x, z) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h_{ij}(t_{ij}(x, z)) \right|, \quad (8)$$

其中 (x, z) 是成像区域内像素点对应的坐标, $t_{ij}(x, z)$ 是成像区域内信号从激励传感器到像素点再到接收传感器之间的飞行时间:

$$t_{ij}(x, z) = \frac{1}{v} \left[\sqrt{(x - x_i)^2 + (z - z_i)^2} + \sqrt{(x - x_j)^2 + (z - z_j)^2} \right], \quad (9)$$

其中 (x_i, z_i) 是激励传感器的坐标, (x_j, z_j) 是接收传感器的坐标. 传统全聚焦对于远距离缺陷显示具有较好的效果, 但近距离缺陷散射的信号会被掩盖在传感器接收的早期时间背景噪声信号中, 此时利用传统全聚焦算法成像, 近距离缺陷将无法显示.

对此, 利用扩散场全矩阵信号去实现全聚焦成像, 可以削弱传统全矩阵引起的早期时间背景噪声. 扩散场全矩阵是通过传播一段时间 t_r 后, 俘获时间窗口 $[t_r, t_r + t_c]$ 的 $N \times N$ 组 A 扫扩散场信号矩阵, 记为 $d_{ij}(t)$, 相当于 $h_{ij}(t)$ 矩阵的后时间窗口. 对扩散场进行互相关, 再对所有激励阵元进行统计平均得到期望值:

$$\begin{aligned} g_{ij}(\tau) &= \frac{d}{dt} \langle C_{ki,kj}(t) \rangle \\ &= \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \int_{t_r}^{t_r+t_c} d_{ki}(t) d_{kj}(t + \tau) dt \right). \end{aligned} \quad (10)$$

根据 (7) 式可知, 扩散场全矩阵互相关统计平均值可得到包含散射体信息的全矩阵数据, 即

$$h_{ij}(t) \approx g_{ij}(t)(t \geq 0). \quad (11)$$

全矩阵信号截取时间窗口 t_c 越长, 重建信号效果越好, 但计算时间将变长. 扩散场信号起始时间 t_r 是根据实际中扩散率和信噪比综合选择的. 由重建信号全矩阵 $g_{ij}(t)$ 代替原全矩阵 $h_{ij}(t)$ 进行全聚焦成像, 即

$$I(x, z) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N g_{ij}(t_{ij}(x, z)) \right|,$$

可在被检测成像区域显示出近距离缺陷, 使其不淹没于早期背景噪声中.

由于统计平均的次数有限, 重建信号格林函数时间结构的恢复不太完善, 因此对于后期时间信号而言, 直接俘获的信号比重建信号准确, 能更好地获得散射体的响应. 若是将重建信号的早期信息与直接俘获信号的后期信息相结合, 可以得到更加优化的信号 [10],

$$\begin{aligned} s_{ij}(t) &= \frac{1}{1 + e^{-\alpha(t-t_u)}} h_{ij}(t) + \frac{\sum_{k=1}^N |h_{kk}(t_b)|}{\sum_{k=1}^N |g_{kk}(t_b)|} \\ &\quad \times \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\alpha(t-t_u)}} \right) g_{ij}(t), \end{aligned} \quad (12)$$

其中 t_u 是转换时间, 即在转换时间之前选取重建信号 $g_{ij}(t)$, 之后选取直接俘获信号 $h_{ij}(t)$; t_b 是被检测试块的底波时间; α 是平滑度参数.

3 实 验

搭建实验装置如图 1 所示, 其中包括 M2M 阵列发射/接收器、计算机、相控阵探头和铝板. 设置激励信号为 5 个周期的高斯正弦波, 中心频率为 $f = 1$ MHz, 采样频率为 50 MHz. 相控阵探头中心频率为 $f = 1$ MHz, 共 16 阵元组成, 单个阵元长度 15 mm, 宽度 1.8 mm, 阵元中心间距 2 mm. 文献 [15] 中给出了近场定义:

$$N_d = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (13)$$

其中, D 是传感器的孔径. 实验中相控阵的近场为

$$N_d = \frac{31.8^2}{4 \times 5.3} = 47.7 \text{ mm}.$$

被检测铝板尺寸为 300 mm \times 150 mm \times 1 mm, 铝板中存在直径 $\phi = 3$ mm 的四个圆孔缺陷, 圆孔横向间距均为 10 mm, 纵向间距从距离铝板上表面 10 mm 至 25 mm 以 5 mm 步长增加, 位于传感器近场范围内, 如图 2 所示.

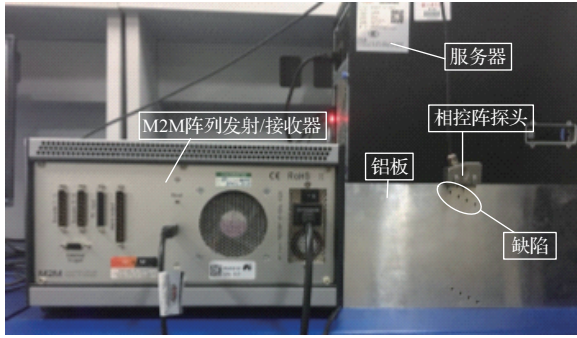


图1 实验装置图
Fig. 1. Experimental device.

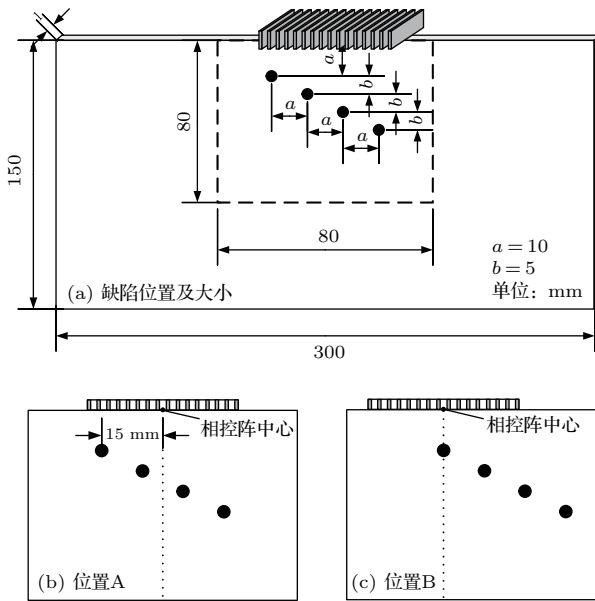


图2 缺陷与传感器位置示意图 (a) 铝板中缺陷位置及大小; (b) 探头与缺陷相对位置 A; (c) 探头与缺陷相对位置 B
Fig. 2. Schematic diagram of defects and transducers location: (a) The position and size of defects; (b) the relative position A of transducers and defects; (c) the relative position B of transducers and defects.

相控阵探头放置于图 2(a) 所示的铝板上方位置, 采用文献 [21] 中的激发方式, 激励 S_0 模式兰姆波, 频厚积为 $1 \text{ MHz}\cdot\text{mm}$, 波速为 $v = 5300 \text{ m/s}$, 波长为 $\lambda = v/f = 5.3 \text{ mm}$. 将探头的激励接收模式设为全矩阵模式, 图 3 给出了相控阵探头第 8 个阵元发射第 8 个阵元接收 ($i = j = 8$) 的响应信号, 时间窗口长度均为 $150 \mu\text{s}$. 图 3(a) 是实验中从时间零点开始直接接收的原实验信号, 即 $h_{ij}(t)$; 图 3(b) 是实验中从 $325 \mu\text{s}$ 开始记录的扩散场信号, 即 $d_{ij}(t)$; 图 3(c) 是扩散场信号进行互相关后重建信号, 即 $g_{ij}(t)$; 图 3(d) 是根据 (12) 式计算得到的混合全矩阵信号, 即 $s_{ij}(t)$. 对比图 3(a)、图 3(c) 和图 3(d), 原实验信号的始波延伸至约 $12 \mu\text{s}$ 处, 掩盖了近距离缺陷散射信息, 重建信号将始波信号缩

短至约 $4 \mu\text{s}$ 处, 恢复出早期时间信号, 但由于实验中阵列传感器有 16 个阵元, 互相关后只能进行 16 次统计平均, 重建信号对于后期时间信息不如原实验信号准确, 而混合全矩阵结合了早期重建信号与后期原实验信息, 能更好地反映全局信息.

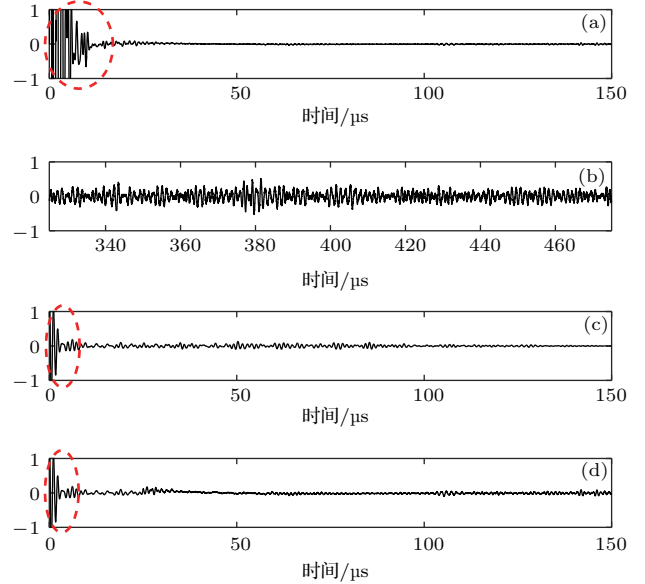


图3 $i = j = 8$ 时 (a) 直接俘获的实验信号, (b) 扩散场信号, (c) 利用扩散场重建的信号; (d) 信号 (a) 与 (c) 的混合信号
Fig. 3. $i = j = 8$: (a) Conventional experimental full matrix; (b) diffuse full matrix; (c) reconstructed full matrix; (d) hybrid full matrix combining signals (a) and (c).

4 成像结果与分析

相控阵探头每次采用一个阵元发射, 16 个阵元接收, 最终捕捉得到 16×16 的全矩阵数据. 图 4 是图 2(c) 模型中探头位于四个圆孔缺陷中心的正上方时, 俘获全矩阵数据, 进行缺陷成像, 成像区域为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 图中圆圈标记处为距离阵列传感器最近的缺陷. 图 4(a) 是相控阵扇扫成像, 偏转角为 $-40^\circ \sim 40^\circ$; 图 4(b) 是直接俘获实验数据进行的全聚焦成像; 图 4(c) 是利用扩散场互相关重建全矩阵信号进行的全聚焦成像; 图 4(d) 是根据 (12) 式得到的混合全矩阵信号进行的全聚焦成像. 对比图 4 成像结果图可知, 直接俘获的实验信号在成像时显示一个延伸十几毫米的噪声区域, 掩盖缺陷的显示, 而重建信号的成像则成功显示了四个近距离缺陷, 但远处存在伪成像. 混合全矩阵信号结合了重建信号的近距离信息与直接接收信号的远距离信息, 它的成像既可以显示近距离缺陷, 还可以消除远处的伪像, 降低背景噪声, 总体提高成像的分辨率.

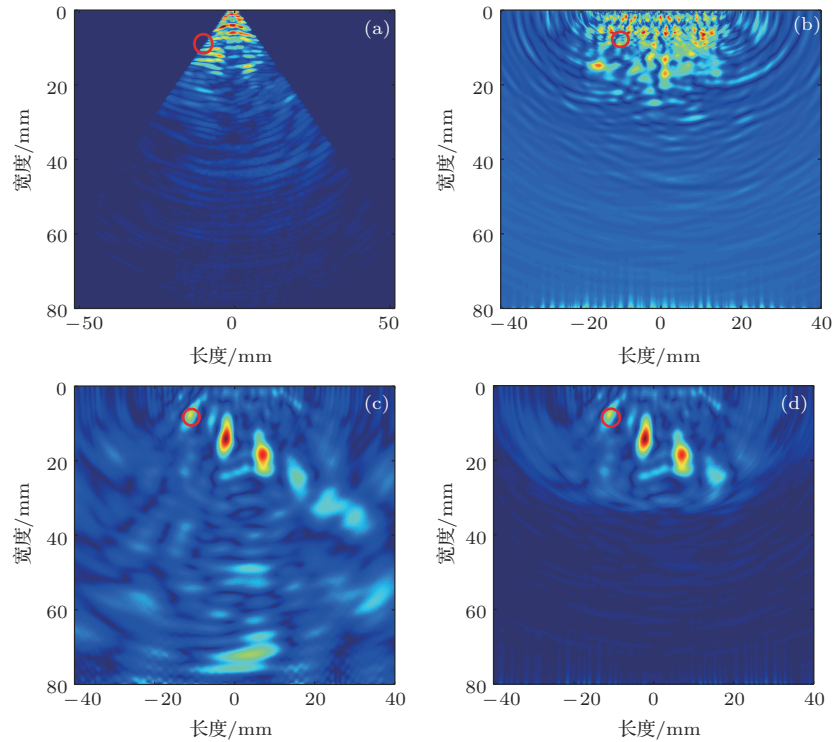


图4 探头放于位置A处 (a) 直接俘获信号扇形扫查, (b) 直接俘获信号全聚焦成像, (c) 重建信号全聚焦成像, (d) 混合信号全聚焦成像

Fig. 4. Put the transducers at position A: (a) Sector scan; (b) total focusing imaging of conventional full matrix; (c) total focusing imaging of reconstructed full matrix; (d) total focusing imaging of hybrid full matrix.

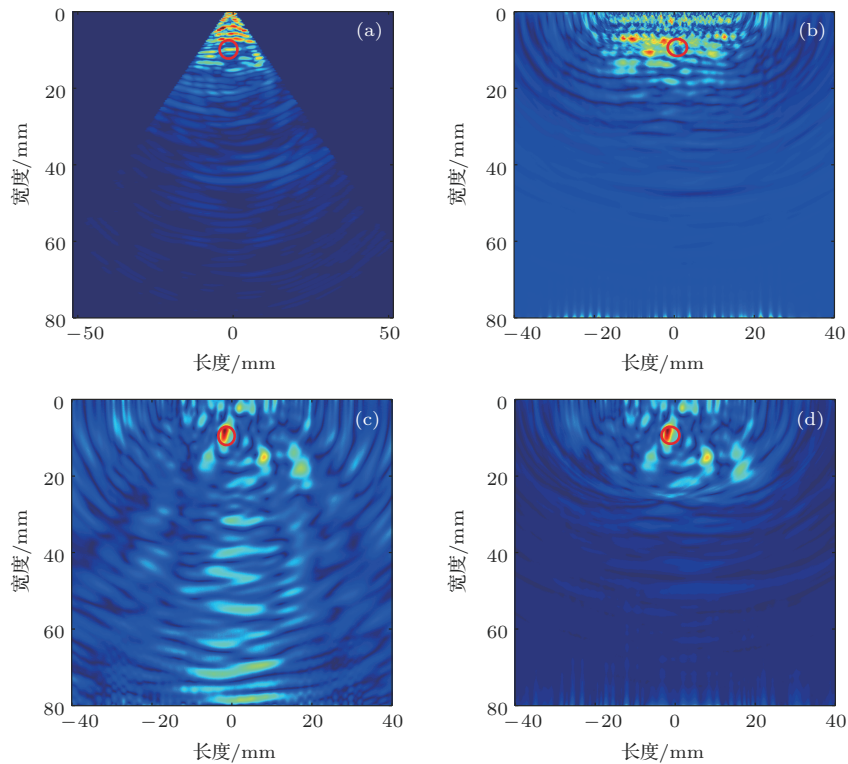


图5 探头放于位置B处 (a) 直接俘获信号扇形扫查, (b) 直接俘获信号全聚焦成像, (c) 重建信号全聚焦成像, (d) 混合信号全聚焦成像

Fig. 5. Put the transducers at position B: (a) Sector scan; (b) total focusing imaging of conventional full matrix; (c) total focusing imaging of reconstructed full matrix; (d) total focusing imaging of hybrid full matrix.

将探头放置图2(b)位置处,即在位置A处向左移动15 mm到达位置B处,重新俘获全矩阵数据,进行扇扫和全聚焦成像,如图5所示.从成像结果可以看出,利用扩散场互相关重建信号,结合全聚焦成像,可以显示位于传感器探头正下方的三个缺陷.扩散场信号是从 $t_r = 325 \mu\text{s}$ 开始记录的实验信号,时间窗口为150 μs ,均远大于缺陷散射信号接收的时间(约4—13 μs),所以传感器探头与缺陷相对位置的改变对扩散场信号影响较小,仍然可利用扩散场重建含有早期散射信息的信号.但由于兰姆波在铝板传播过程中的能量衰减,距离探头最远的深度为25 mm的缺陷没有被重建显示.

5 结 论

对于直接耦合的阵列传感器超声兰姆波检测而言,近距离缺陷信号会被掩盖在仪器采集系统产生的非线性效应信号中.本文在相控阵俘获的兰姆波全矩阵信号中,利用两传感器接收的兰姆波扩散场信号互相关,实现包含早期散射信息的全矩阵重构.在各向同性板上进行实验研究,利用相控阵探头激励中心频率1 MHz的信号,变换阵列传感器与缺陷的相对位置,检测近距离缺陷.结果表明:直接俘获的信号成像时会形成一个十几毫米的噪声区域;而扩散场互相关重建信号可以恢复近距离散射信号,降低近距离背景噪声,实现缺陷成像;若将实验信号与重建信号相结合,可以得到最佳缺陷成像效果,整体提高成像分辨率;且改变阵列传感器与缺陷的相对位置,仍可重建出早期散射信号,实现近距离缺陷成像.这为薄板结构中兰姆波检测近距离缺陷提供了新的思路和有益参考.

参考文献

[1] Holmes C, Drinkwater B W, Wilcox P D 2004 *Insight* **46** 677

- [2] Holmes C, Drinkwater B W, Wilcox P D 2008 *Ultrasonics* **48** 636
- [3] Jiao J P, Chang Y, Sun X R, He C F, Wu B 2015 *J. Nanjing Univ.* **51** 72 (in Chinese) [焦敬品, 常予, 孙欣荣, 何存富, 吴斌 2015 南京大学学报 **51** 72]
- [4] Hunter A J, Drinkwater B W, Wilcox P D 2008 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **55** 2450
- [5] Labyed Y, Huang L 2012 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **59** 2186
- [6] Poli P, Pedersen H, Campillo M 2012 *Geophys. J. Int.* **188** 549
- [7] Froment B, Campillo M, Roux P 2011 *Compt. Rend. Geosci.* **343** 623
- [8] Chi J, Li X L, Gao D Z, Wang H Z, Wang N 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 194304 (in Chinese) [迟静, 李小雷, 高大治, 王好忠, 王宁 2017 物理学报 **66** 194304]
- [9] Liu C X, Cheng C F, Ren X R, Liu M, Teng S Y, Xu Z Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 427 (in Chinese) [刘春香, 程传福, 任晓荣, 刘曼, 滕树云, 徐至展 2004 物理学报 **53** 427]
- [10] Potter J N, Wilcox P D, Croxford A J 2018 *Ultrasonics* **82** 44
- [11] Potter J N, Croxford A J, Wilcox P D 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 144301
- [12] Weaver R, Lobkis O 2002 *Ultrasonics* **40** 435
- [13] Snieder R, Slob E, Wapenaar K 2010 *New J. Phys.* **12** 063013
- [14] Chehami L, Moulin E, Rosny J D, Prada C, Matar O B, Benmeddour F, Assaad J 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 104901
- [15] Sun F, Zeng Z M, Jin S J, Chen S L 2013 *J. Sys. Simul.* **25** 1108 (in Chinese) [孙芳, 曾周末, 靳世久, 陈世利 2013 系统仿真实学报 **25** 1108]
- [16] Li G F, Li J, Gao D Z, Wang N 2016 *Acta Acust.* **41** 49 (in Chinese) [李国富, 黎洁, 高大治, 王宁 2016 声学学报 **41** 49]
- [17] Yang Y, Xiao L, Qu W Z, Lu Y 2017 *Ultrasonics* **81** 187
- [18] Li J, Li G F, Gao D Z, Wang N 2017 *Acta Acust.* **42** 143 (in Chinese) [黎洁, 李国富, 高大治, 王宁 2017 声学学报 **42** 143]
- [19] Zhang J, Drinkwater B W, Wilcox P D, Hunter A J 2010 *NDT & E Int.* **43** 123
- [20] Zhang J, Drinkwater B W, Wilcox P D 2011 *NDT & E Int.* **44** 361
- [21] Rodriguez S, Deschamps M, Castaings M, Ducasse E 2014 *Ultrasonics* **54** 1880

Full focal imaging of ultrasonic Lamb waves using diffuse field information*

Zhang Hai-Yan^{1)†} Xu Meng-Yun¹⁾ Zhang Hui¹⁾ Zhu Wen-Fa¹⁾²⁾ Chai Xiao-Dong²⁾

1) (School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

2) (School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

(Received 1 July 2018; revised manuscript received 17 September 2018)

Abstract

In this paper, a method is presented in which that the diffuse field information of Lamb waves is used to realize the full focal imaging of the defect that is near the transducer array. The near distance means that the defect is located in the near field of ultrasonic phased array and satisfies the near field calculation formula. Near field acoustic information of the defect is obscured by the nonlinear effects of early time saturation present in a directly acquired ultrasonic inspection. The approach proposed here is to recover near field information through cross-correlation of diffuse fields. The diffuse field is generated through multiple scattering and reflection effects after sufficiently long time transmission of ultrasonic signal in a bounded medium. The near field information is implicitly contained throughout the diffuse field. By cross-correlating the diffuse fields of ultrasonic responses recorded at two monitoring points, the Green's functions between the two points is recovered and the direct response between them is obtained. This idea is applied to the full matrix capture of ultrasonic phased array in which the full matrix is formed by sequential acquisition of responses for each transmitter-receiver pair. A virtual array of emitters and receivers is therefore established. Typically, phase delays are used in post-processing to achieve advanced imaging. Here an undelayed full matrix of inter-element responses is reconstructed through cross-correlation of a later time diffuse full matrix. In order to evaluate the applicability of the method for ultrasonic non-destructive testing, the process of full matrix reconstruction is demonstrated experimentally on an aluminium plate containing the near field defect. Combining the full focal imaging, it is shown that a hybrid full matrix formed through a temporally weighted sum of coherent and reconstructed matrices reduces the background noise and allows the effective imaging of near field defect by direct contact experimental measurements. However, the near field defect is hidden by the region of artificial noise in conventional coherent capture images. The proposed imaging method presents a theoretical guidance for detecting and imaging near field defect in plate-like configurations by using the Lamb wave nondestructive testing method.

Keywords: diffuse field, cross-correlation, Lamb waves, total focusing imaging

PACS: 43.20.+g, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.67.20181268

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11674214, 11474195, 11874255, 51478258).

† Corresponding author. E-mail: hyzh@shu.edu.cn