纪念应崇福院士诞辰100周年

阵元固体指向性补偿对超声全聚焦成像的 优化研究*

王 冲† 毛 捷 廉国选

(中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要 超声全聚焦成像中,声波的传播受到阵元指向性的影响,位于阵元不同方位的缺陷成像幅度不同。缺陷 相对阵列中心偏角越大,回波幅度越低,容易造成漏检。为提高超声全聚焦算法对固体中大偏角缺陷的成像能 力,该文引入了矩形阵元固体指向性函数,建立了基于固体指向性补偿的超声全聚焦优化算法,利用指向性系 数对不同角度区域的成像进行幅值补偿。实验结果表明,相对于基本超声全聚焦和传统指向性补偿的超声全 聚焦算法,该文固体指向性优化算法对大偏角缺陷的成像幅度补偿效果更好,检测灵敏度更高,有效避免了缺 陷漏检,扩展了超声全聚焦算法检测范围。

关键词 超声相控阵检测,全聚焦成像,指向性
 中图法分类号: TB559 文献标识码: A
 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.05.018

文章编号: 1000-310X(2018)05-0732-06

The optimization for ultrasonic total focusing method of solid directivity compensation of array element

WANG Chong MAO Jie LIAN Guoxuan

(State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The propagation of sound waves is affected by the directivity of the array element, and the total focusing imaging amplitude of defects is different from different angles. The larger the relative angle with the array center, the lower the amplitude of the echo is, which is easy to cause the defects to be missed. To improve the inspection effect of total focusing method (TFM) to defects with large angles relative to array center, the far field directivity function in solid medium of a single element is applied to the TFM algorithm in this paper, to compensate the amplitude of defects in large angle area. Experimental results show that compared with the basic TFM algorithm and the traditional directivity has higher detection sensitivity for defects in large angles, and the effective detection range of TFM is expanded.

Key words Ultrasonic phased array, Total focusing method, Directivity

²⁰¹⁸⁻⁰⁶⁻¹³ 收稿; 2018-07-03 定稿

^{*}中国科学院科研装备研制项目(YZ201251)

作者简介: 王冲 (1990-), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 研究方向: 超声检测与信号处理。

[†]通讯作者 E-mail: wangchong@mail.ioa.ac.cn

1 引言

随着现代工业的快速发展,人们对材料可靠 性和安全性的要求不断提高。基于超声全矩阵采 集的全聚焦成像逐步成为相控阵超声检测领域的 研究热点^[1-2]。全矩阵采集(Full matrix capture, FMC)指单阵元激发所有阵元接收,各阵元依次激 发直到获取所有的激发接收回波组合。超声全聚 焦(Total focusing method, TFM)成像是以延时叠 加为基础的全矩阵后处理成像方法,对成像区域内 每一个像素点均采用所有的FMC数据进行聚焦计 算。2005年,Bristol大学的Holmes等^[3]提出了基 于FMC+TFM的检测方法,并指出相比于常规相 控阵技术,TFM由于实现了任意点的收发双向聚 焦,成像分辨率得以显著提高。

在TFM成像中,声波传输受到阵元指向性的 影响,同样距离不同角度的缺陷反射幅度不同,造 成不同方位的缺陷成像幅度不均匀^[4]。缺陷相对阵 列中心偏角越大,回波幅度越低,在TFM 成像中的 检测灵敏度就越低,甚至造成漏检。在阵列成像正 演模型中,阵元指向性用来表征阵元辐射声场能量 的角度分布特征。在后处理成像中,研究人员利用 指向性函数对 TFM 算法进行补偿, 以改善 TFM 对 大偏角缺陷的成像能力^[5-6]。但传统指向性函数对 固体中的辐射声场能量衰减表征能力不足,对固体 TFM 成像中大偏角区域的补偿效果有限,无法有效 避免缺陷漏检。本文针对固体材料中的阵元辐射声 场特征,引入了固体指向性因子,建立了基于固体指 向性补偿的TFM 优化算法, 研究了固体指向性函 数对大偏角区域缺陷成像的补偿效果,以提高TFM 算法在固体中的检测能力。

2 超声全聚焦成像基本原理

FMC是基于阵列换能器的一种高级数据采集 方式,采集的结果包含了成像区域内最完备的检测 信息。TFM采用全部的FMC数据集对检测区域内 任意像素点进行聚焦,显著提高了成像分辨率,被称 为"黄金法则"^[7]。

TFM 算法首先对检测区域网格化,然后计算 每一个成像点与各阵元之间的传输延时,根据延时 检索相应的回波数据,最后叠加得到成像点的像素 值。考虑一维线性阵列探头置于二维各向同性均匀 介质表面,建立二维坐标系Oxz,如图1所示。x轴 沿阵列方向并平行于介质表面,z轴垂直于介质表 面并指向介质内部,阵列排列在x轴上,成像区域位 于阵列下方。假设阵元数目为N,记录各阵元中心 点所接收到的回波为u(x_i,x_j,t)。x_i和x_j分别表示 激发和接收阵元的坐标,t为时间。



图1 二维全聚焦成像几何模型示意图

Fig. 1 A schematic diagram of two dimensional total focusing method geometric model

在图1所示模型中, 阵列下方有一散射点 $P(x_n, z_m), n = 1, 2, \cdots, M1, m = 1, 2, \cdots, M2,$ M1为成像区域内x方向的像素点个数, M2是成像区域内z方向的像素点个数。

根据几何关系,激发阵元 $(x_i, 0)$ 和接收阵元 $(x_j, 0)$ 到散射点 $P(x_n, z_m)$ 的路径分别为

$$r_{iP} = \sqrt{\left(x_i - x_n\right)^2 + z_m^2},$$
 (1)

$$r_{jP} = \sqrt{(x_j - x_n)^2 + z_m^2}.$$
 (2)

则任意成像点 $P(x_n, z_m)$ 的TFM像素值 $I(x_n, z_m)$ 可表示为

$$I(x_n, z_m) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} h(x_i, x_j, t_{ijP})$$

=
$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} h_{ij} \left(\frac{r_{iP} + r_{jP}}{c} \right), \quad (3)$$

其中, c为介质声速, h_{ij}是第i个阵元激发、第j个阵元接收的回波信号包络。

考虑声束传播衰减对成像的影响,其全聚焦像 素幅值 *I_B*(*x_n*,*z_m*)可表示为

$$I_B(x_n, z_m) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} B_{ij}(x_n, z_m) h_{ij}\left(\frac{r_{in} + r_{jm}}{c_L}\right), \quad (4)$$

式 (4) 中, $B_{ij}(x_n, z_m) = \frac{1}{B_{iP}B_{jP}} = \sqrt{r_{iP}r_{jP}}$, 为传播衰减补偿系数。

3 指向性补偿的全聚焦优化算法

3.1 矩形阵元指向性

在阵列成像中,声波传输受到阵元指向性的影响,相对阵元不同方位的缺陷反射幅度不同。指向 性反映了单个阵元声场灵敏度随发射或入射声波 方向的变化情况,体现超声换能器在一个主方向定 向辐射的能力^[4]。阵元指向性与其几何尺寸有关, 图2为单个矩形阵元的辐射声场示意图。



图2 矩形阵元辐射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the output of a rectangular array element

宽度为a、长度为L的单个矩形阵元位于Oxyz坐标系内,其归一化远场指向性函数 $D(\omega, \theta, \phi)$ 为

$$D(\omega, \theta, \phi) = \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi a \sin \theta \cos \phi}{\lambda(\omega)}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi L \sin \theta \sin \phi}{\lambda(\omega)}\right), \quad (5)$$

其中, λ 为波长, ω 是角频率, θ 是阵元与聚焦 点 $P(x_n, y_s, z_m)$ 之间的声束与+z轴之间的夹角, 即仰角; ϕ 是声束在Oxy平面的投影与+x轴之 间的夹角, 即方位角。其中 $n = 1, 2, \cdots, M1$, $m = 1, 2, \cdots, M2$, $s = 1, 2, \cdots M3$ 。M1、M2、M3分别为成像区域内x方向、z方向和y方向的像素点 个数。对于一维线形阵元, 通常只考虑声束在Oxz 平面的偏转和聚焦,因此设定 $\phi = 0$,则线阵阵元在 Oxz平面的归一化远场辐射常规指向性函数可简 化为^[8]

$$D(\omega, \theta) = \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi a \sin\theta}{\lambda(\omega)}\right). \tag{6}$$

3.2 常规指向性补偿的 TFM 算法

基于公式(6)所示的矩形阵元常规指向性函数,可以建立包含激发和接收过程的常规指向性因子 $D_{ij}(x_n, z_m)^{[5-6]}$:

$$D_{ij}(x_n, z_m) = D_{iP}(\omega, \theta_{iP}) D_{jP}(\omega, \theta_{jP})$$
$$= \sin c \left(\frac{\pi a \sin \theta_{iP}}{\lambda(\omega)}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi a \sin \theta_{jP}}{\lambda(\omega)}\right), \quad (7)$$

式(7)中, θ_{iP} 为激发阵元i与聚焦点P之间的夹角, θ_{iP} 为接收阵元j与聚焦点的夹角。

在正演模式下,指向性函数用来描述声场能量随扩散角增大而减小的特征。指向性的倒数随扩散 角增大而增加,可以作为补偿系数,以补偿大偏角区 域较低的成像幅度。因此,公式(6)所对应的常规指 向性补偿因子 $C_{ij}(x_n, z_m)$ 为

$$C_{ij}(x_n, z_m) = \frac{1}{D_{ij}(x_n, z_m)}$$
$$= \frac{1}{\operatorname{sinc}\left(\frac{\pi a \sin\theta_{iP}}{\lambda(\omega)}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi a \sin\theta_{jP}}{\lambda(\omega)}\right)}.$$
 (8)

常规指向性补偿的全聚焦像素幅值 I(x_n, z_m)为

$$I(x_{n}, z_{m}) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} B_{ij}(x_{n}, z_{m}) C_{ij}(x_{n}, z_{m}) \times h_{ij}\left(\frac{r_{iP} + r_{jP}}{c_{L}}\right).$$
(9)

3.3 矩形阵元固体指向性函数

文献 [8-9] 研究表明,公式(6) 和公式(7) 所对 应的常规指向性函数为线源向二维空间均匀辐射 的结果。对于流体介质,这种均匀辐射可近似表征 矩形阵元的声传播角度分布,但阵列向固体介质辐 射时,线源向各个方向的辐射并不均匀。因此,常规 指向性函数更适合表征流体介质的声传播角度分 布,而对于固体介质检测,本文引入固体指向性因 子,以更准确地表征矩形阵元在固体中的声辐射角 度分布特性。 假设线阵辐射区域为各向同性的半无限大均 匀弹性介质,考虑纵波检测,引入固体指向性因子 $D_l(\theta)$,表示矩形阵元远场辐射纵波指向性^[8]。

$$D_l(\theta) = \frac{\left(\left(c_L/c_S\right)^2 - 2\sin^2\theta\right)\cos\theta}{F_0\sin\theta},\qquad(10)$$

式(10)中, c_L 和 c_S 分别为介质中纵波和横波的 声速, θ 为Oxz平面内聚焦点与阵元之间的夹角, $k = 2\pi/\lambda$ 。其中, F_0 为

$$F_0(\zeta) = \left(2\zeta^2 - \left(\frac{c_L}{c_S}\right)^2\right)^2 - 4\zeta^2(\zeta^2 - 1)^{1/2}\left(\zeta^2 - \left(\frac{c_L}{c_S}\right)^2\right)^{1/2}.$$
 (11)

矩形阵元在半无限大固体中的指向性函数为 常规均匀指向性函数与固体指向性因子的乘积。则 固体中纵波指向性函数 *D_L*(ω,θ)为

$$D_L(\omega, \theta) = D(\omega, \theta) D_l(\theta)$$

= sinc $\left(\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda(\omega)}\right) \frac{\left((c_L/c_S)^2 - 2\sin^2 \theta\right) \cos \theta}{F_0 \sin \theta}.$ (12)

3.4 固体指向性补偿的 TFM 算法

考虑纵波检测,TFM 成像中包含激发和接收过 程的固体指向性因子 $D_{Lii}(x_n, z_m)$ 为

$$D_{Lij}(x_n, z_m) = D_{iP}(\omega, \theta_{iP}) D_L(\theta_{iP})$$
$$\times D_{iP}(\omega, \theta_{iP}) D_L(\theta_{iP}), \quad (13)$$

式 (13) 中, $D_L(\theta_{iP})$ 和 $D_L(\theta_{jP})$ 分别为激发阵元 *i* 和接收阵元 *j* 与像素点 *P* 的固体指向性因子。则固体指向性补偿因子 $C_{Lij}(x_n, z_m)$ 为

$$C_{Lij}(x_n, z_m) = \frac{1}{D_{Lij}(x_n, z_m)}$$

$$=\frac{1}{D_{ij}\left(x_{n},z_{m}\right)}\frac{1}{D_{L}\left(\theta_{iP}\right)D_{L}\left(\theta_{jP}\right)},\qquad(14)$$

固体指向性补偿的全聚焦像素幅值 I_L(x_n, z_m)为

$$I_{L}(x_{n}, z_{m}) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} B_{ij}(x_{n}, z_{m}) C_{Lij}(x_{n}, z_{m}) \times h_{ij}\left(\frac{r_{in} + r_{jm}}{c_{L}}\right).$$
 (15)

4 两种指向性函数对比

矩形阵元常规指向性和固体指向性函数如公式(6)和公式(12)所示。本节对比两种指向性在不同角度下的衰减特性,以及阵元宽度a对两种指向性的影响。图3是a分别在 0.2λ 、 0.5λ 、 λ 以及 2λ 下,常规指向性与固体指向性函数随偏转角 θ 的变化曲线,其中假设固体介质中声速 $c_L/c_S = 2$ 。图3中虚线所示为常规指向性函数,实线为固体指向性函数。

从图3可以看出,阵元宽度 $a = 0.2\lambda$ 时,常规指 向性函数在各个角度的系数值变化较小,而固体指 向性函数值随 θ 的增加迅速减小,具有明显的角度 差异性。随着阵元宽度增加,常规指向性衰减加快, 但衰减斜率仍明显小于固体指向性函数。当阵元宽 度大于等于波长时,两种函数的曲线趋于一致,两种 函数表现出相近的角度变化特征。

因此,在阵元宽度较小时,固体指向性在大偏 角区域函数值更小,其对应的固体指向性补偿因子 系数值更大,在TFM成像中对大偏角区域的像素 幅值有更高的补偿作用。



图3 矩形阵元不同尺寸下的指向性曲线对比

Fig. 3 Comparison of conventional and solid directivity curves in different element width

5 成像实验

为评估指向性优化对 TFM 算法的影响,采用 钢块内不同角度横通孔进行实验。如图4所示,实 验采用 Olympus 2.25L64-A2线性阵列,中心频率为 2.25 MHz 的 64 阵元线阵直接放置在钢块表面,阵 列下方 10 个横通孔弧形排列,各孔距钢表面深度 及与阵列中心法线偏角如表 1 所示。横通孔直径均 为2 mm,自右向左依次编号为1 ~ 10。钢内纵波 声速为 5900 m/s,横波声速为 3200 m/s,阵元宽度 $a = 0.25\lambda$ 。



图 4 钢内不同角度的横通孔实验

Fig. 4 Experiment with side drilled holes at different angles in steel

表1 钢内各横通孔与阵列中心位置的相对角度和深 度位置

Table 1The relative angles and depth positions of the holes to the array center

编号	深度/mm	偏角/(°)	编号	深度/mm	偏角/(°)
1	15.0	72.0	6	24.5	17.7
2	15.4	69.7	7	28.5	0
3	16.5	63.4	8	33.3	-12.6
4	18.4	52.9	9	38.6	-20.5
5	21.1	37.1	10	44.6	-25.1

分别用基本TFM算法、常规指向性补偿的 TFM算法和本文固体指向性优化算法成像,横通孔 成像结果如图5所示,其中各图均以-20dB动态范 围量化。

从图5中看出,基本TFM 算法和常规指向性补 偿算法只能对孔2~孔10成像,无法检测出孔1;而 固体指向性补偿的TFM可以对孔1~孔10成像,避 免了孔1漏检。孔1相对阵列中心偏角达72°,回波 幅度低,同样条件下基本TFM 算法没能对孔1实现 成像。在阵元宽度 $a = 0.25\lambda$ 下,常规指向性函数由 于衰减平缓、角度差异性小,对大角度区域的缺陷成 像幅度补偿有限,因此其也没有对孔1实现成像。固 体指向性函数在大角度区域的系数值更小,对孔1 的补偿作用更强,因此其成功实现了对孔1成像。



图 5 不同 TFM 算法的横通孔成像幅度 Fig. 5 Experimental images for holes in different

directivity compensated TFM

图6是各算法对横通孔的最大成像幅度。孔1~ 孔4相对于阵列中心的偏角较大,在40°以上。从 图6中看出,固体指向性补偿的TFM对孔1~孔4 的成像幅度高于基本TFM算法和常规指向性补偿 的算法,其中孔1的成像幅度提高最大,为13.3 dB, 体现出本文固体指向性优化的TFM算法对大偏角 区域缺陷成像能力的提高。



图6 不同 TFM 算法的横通孔成像幅度

Fig. 6 The maximum amplitude of each hole in different TFM imaging

各算法成像中横通孔成像幅度的平均值和标 准差见表2。从表2可以看出,常规指向性函数与基 本TFM结果相差较小,固体指向性补偿的TFM算 法成像中,各孔的平均幅度最高,标准差最低,体现 出算法使整个检测区域的缺陷成像结果更加均匀。

表 2 不同算法下各横通孔成像幅度平均值和标准差 Table 2 The mean and standard deviation value of amplitude of holes in different TFM imaging

算法	基本TFM	常规指向性补偿	固体指向性补偿
平均值/dB	-5.7	-5.3	-3.4
标准差/dB	6.7	6.4	3.3

6 结论

在全聚焦成像中,声波传输受到阵元指向性的 影响,不同角度的缺陷成像幅度不同,大偏角区域 缺陷容易漏检,影响TFM有效检测范围。在固体材 料检测中,针对常规指向性对大偏角区域的成像补 偿不足问题,本文引入了固体指向性因子,建立了 固体指向性补偿的TFM优化算法,并通过实验验证了本文TFM优化算法对大偏角缺陷的成像补偿能力。实验结果表明,相比于基本TFM和常规指向性补偿算法,本文固体指向性优化方法可有效提高TFM对大偏角缺陷的补偿效果,成像幅度可提高13.3 dB,使TFM成像更加均匀,扩展了TFM有效检测范围。

参考文献

- Karaman M, Li P C, O'Donnel M. Synthetic aperture imaging for small scale systems[J]. IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1995, 42(3): 429–442.
- [2] 彭虎. 超声成像算法导论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版 社, 2008.
- [3] Holmes C, Drinkwater B W, Wilcox P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation[J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701–711.
- [4] 施克仁, 郭寓民. 相控阵超声成像检测 [M]. 北京: 高等教育出 版社, 2010.
- [5] 周正干,彭地,李洋,等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成 像算法及其校准研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 1–7. Zhou Zhenggan, Peng Di, Li Yang, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 1–7.
- [6] 周祥. 车轮缺陷相控阵超声全聚焦成像技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [7] Oralkan O, Ergun A S, Johnson J A, et al. Capacitive micromachined ultrasonic transducers: next-generation arrays for acoustic imaging?[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2002, 49(11): 1596–1610.
- [8] Drinkwater B W, Wilcox P D. Ultrasonic arrays for nondestructive evaluation: a review[J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525–541.
- Chiao R Y, Thomas L J. Analytic evaluation of sampled aperture ultrasonic imaging techniques for NDE[J].
 IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1994, 41(4): 484–493.