

# 双探头梯形矩阵聚焦成像方法\*

赵新玉<sup>1,2</sup>, 唱晓宇<sup>1</sup>, 张佳莹<sup>1</sup>

(1. 大连交通大学材料科学与工程学院 大连, 116028)

(2. 大连瑞迪声光科技有限公司 大连, 116086)

**摘要** R角是曲面变壁厚结构,传统超声检测方法难以对其轮廓和缺陷进行完整成像显示。针对此问题,首先,提出双探头全聚焦成像方法,实现R角区域的完整成像显示;其次,为了改善双探头全聚焦成像效率较低的问题,采用梯形矩阵聚焦成像算法,实现高效实时成像;最后,对典型变壁厚R角试件开展聚焦成像实验,验证了双探头梯形矩阵聚焦成像方法的有效性。结果表明,与传统单探头全聚焦成像方法相比,双探头梯形矩阵聚焦成像方法能够显示R角结构的完整内轮廓,并清楚显示和定位内部缺陷。

**关键词** 超声无损检测;全聚焦成像;R角结构;缺陷检测  
**中图分类号** TH878

## 引言

工业零部件中R角结构较为常见。R角往往是材料厚度变化的过渡区,易发生应力集中,从而产生缺陷。然而,针对R角的曲面变壁厚结构,现有超声无损检测方法还难以对其实现全覆盖检测。近年来,超声相控阵技术被越来越多地应用于工业无损检测领域<sup>[1-3]</sup>,相控阵成像方法受到国内外学者的广泛研究<sup>[4-6]</sup>。Holmes等<sup>[7]</sup>提出了全矩阵聚焦的概念,建立了全聚焦成像算法,与传统的超声相控阵检测相比,全聚焦成像不需要复杂的延迟电路,仅用多通道技术便可以更清晰地呈现缺陷的几何特征,其图像分辨率明显优于传统偏转聚焦成像效果。周正干等<sup>[8]</sup>针对全聚焦成像提出了灵敏度校准方法。冒琴秋等<sup>[9]</sup>提出了相位统计的全聚焦成像方法来提高成像质量。文献[10]基于声学互易原理,提出三角矩阵成像方法来简化全聚焦成像运算量大的问题。全聚焦成像方法应用方面,王鹏等<sup>[11]</sup>采用全聚焦成像实现了汽轮机转子叶根槽裂纹的检测。李文涛等<sup>[12]</sup>针对高衰减大厚度全构件,建立了环阵换能器全聚焦成像方法。

用单晶探头检测R角结构时,R角区域的回波能量会散射到其他方向,因而无法对R角结构轮廓进行完全显示。采用串列式扫查能够有效检出单探头不易发现的垂直表面缺陷,但对于变壁厚R角结构,发射和接收探头之间的距离会发生变化,因而也难以在实际中进行应用,采用超声相控阵探头检测

R角结构也会遇到同样的问题。

为了解决上述检测难题,笔者提出双探头全聚焦成像方法来完整呈现R角轮廓。考虑到双探头全聚焦成像数据量大、计算效率低,本研究采用了梯形矩阵聚焦成像算法来实现高效实时成像。通过铝合金变壁厚R角试件的单、双探头全聚焦成像实验结果,证明了双探头梯形矩阵聚焦成像算法的有效性。

## 1 理论算法

### 1.1 全矩阵聚焦数据采集

全聚焦成像前,需要对数据进行全矩阵采集。采集过程为一发多收模式,以具有 $n$ 个阵元线阵探头为例,首先,激励第1个阵元,所有阵元对回波进行接收;其次,激励第2个阵元,所有阵元进行接收。以此类推,直到第 $N$ 个阵元被激励后,得到 $n \times n$ 组数据,即

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & \cdots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & \cdots & A_{2N} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & \cdots & A_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & A_{N3} & \cdots & A_{NN} \end{bmatrix}$$

其中: $A_{ij}$ 表示第 $i$ 个阵元发送、第 $j$ 个阵元接收。

### 1.2 全矩阵聚焦成像算法

利用采集到的全聚焦数据进行成像,全矩阵聚焦算法示意图如图1所示。首先,将换能器下方的

\* 国家自然科学基金资助项目(51905070)

收稿日期:2022-01-18;修回日期:2022-12-20

成像区域离散成若干个聚焦点,以点  $P$  为例,先计算聚焦点  $P$  到  $i, j$  两个阵元的距离,再依据传播距离计算出传播时间  $t_0$ ,进而找到信号  $A_{ij}$  在  $t_0$  时刻的幅值。依据此方法,循环计算全聚焦采集的所有数据再进行叠加,最终得到点  $P$  的数字幅度  $I_p$ ,即

$$I_p(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij}(t_0) \quad (1)$$

$$t_0 = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + z^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + z^2}}{c} \quad (2)$$

其中:  $(x, z)$  为任意点  $P$  的坐标;  $x_i, x_j$  分别为第  $i, j$  个阵元的横坐标;  $c$  为材料声速。

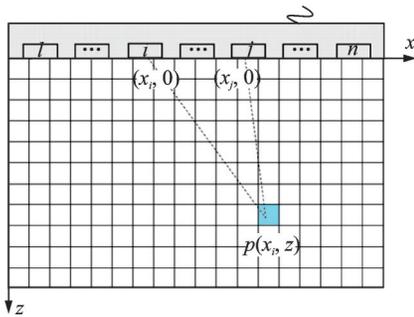


图 1 全矩阵聚焦算法示意图

Fig.1 Schematic diagram of the full matrix focusing imaging algorithm

### 1.3 双探头梯形矩阵聚焦成像算法

采用双探头检测方法,将探头 A 布置在水平方向,探头 B 布置在垂直方向,联合进行全聚焦采集成像。以实验中用到的总计 64 阵元为例,全矩阵成像过程需要采集 4 096 个 A 信号才能重构 1 帧全聚焦图像。为了提高全聚焦成像效率,分析了各阵元对 R 角结构中成像点的贡献大小权重,双探头梯形矩阵聚焦成像算法如图 2 所示。对成像区域某一点来说,临近焦点的阵元起到较大作用,远离该点的发射和接收阵元,距离越远能量越弱。图 2 中,当  $a$  阵元

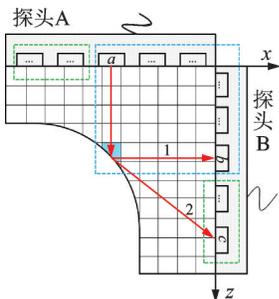


图 2 双探头梯形矩阵聚焦成像算法

Fig.2 Twin probes trapezoidal matrix focusing imaging algorithm

元作为发射阵元时,蓝色虚线框内的阵元接收信号的强度要明显高于绿色虚线框内的阵元,即  $a$  阵元至  $b$  阵元范围内的贡献大于以外更远的阵元。

全矩阵数据中,对角线上信号对应于各阵元自发自收,距对角线越近的信号,对应于距离发射阵元越近的接收阵元。这里仅使用临近发射阵元的 32 个接收阵元,忽略较远的 33~64 阵元,采用梯形矩阵信号,忽略那些能量权重低、远离对角线上的数据。

依据声学互易原理,下对角线数据与上对角线数据具有对称性,因而可以忽略下对角线部分数据<sup>[10]</sup>。

依据上述选取数据原则,用对角线及其临近的 1 552 个 A 信号来成像,定义为梯形矩阵聚焦成像算法,即

$$I_p(x, z) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^{(i+k-1)} A_{ij}(t_0) & (i+k-1 < N) \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^N A_{ij}(t_0) & (i+k-1 \geq N) \end{cases} \quad (3)$$

$$t_0 = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (z_i - z)^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + (z_j - z)^2}}{c} \quad (4)$$

其中:  $(x, z)$  为任意聚焦点  $P$  的坐标;  $(x_i, z_i), (x_j, z_j)$  分别为第  $i, j$  个阵元的坐标;  $k$  为所使用接收阵元的个数(实验中  $k=32$ );  $c$  为材料声速。

在获得每个聚焦点的叠加幅值后,需要对原始数据进行归一化处理,以便进行数字显示。图像显示颜色常采用 256 色,因此这里将幅值数据归一化到 -127~128 之间。

## 2 实验验证

针对 R 角结构分别进行单、双探头全聚焦成像实验。实验选取铝合金变壁厚型材 R 角作为待检区域,变壁厚 R 角试件如图 3 所示,水平和垂直两边长分别为 203 和 192 mm,选取右上 R 角进行检测,其水平和垂直两边厚度分别为 11 和 16 mm。

所选 R 角区域内表面用电火花加工裂纹缺陷,裂纹宽为 0.3 mm,深为 3 mm。人工裂纹尖端距离上表面 22 mm,距离侧面 13 mm。选取 2 个 32 阵元探头,将探头 A 布置于水平方向,探头 B 布置于垂直方向,全聚焦实验成像区域见图 4 中黄色线框部分。

实际检测时,设计了直角夹具,两边分别夹持探头,保持探头和工件表面距离为 14 mm,夹具空腔内充水以实现局部水耦合。实验中可根据需要单独激励任一探头,也可双探头同时激励,R 角全聚焦成像实验如图 5 所示。

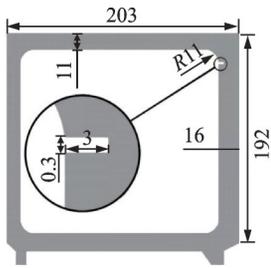


图3 变壁厚R角试件(单位:mm)

Fig.3 Variable thickness R-angle specimen (unit:mm)

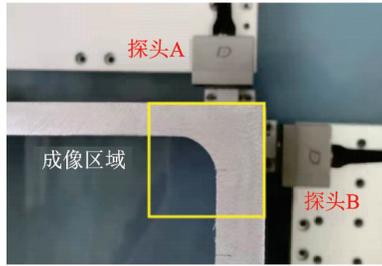


图4 全聚焦实验成像区域

Fig.4 Full matrix focusing imaging experimental imaging area

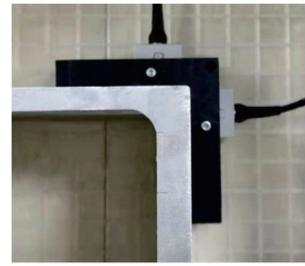


图5 R角全聚焦成像实验

Fig.5 R-angle full matrix focusing imaging experiment

### 2.1 单探头超声相控阵全聚焦成像

仅采用探头 A 进行全聚焦成像,检测结果如图 6 所示。可以看出,探头平行于裂纹放置,裂纹侧壁信号可以检出,图像能显示裂纹侧壁以及上端区域,但 R 角区域侧壁反射回波无法被换能器有效接收,因而无法显示。

仅采用探头 B 进行全聚焦成像,结果如图 7 所示。可以看出,由于探头垂直于裂纹放置,图像能显

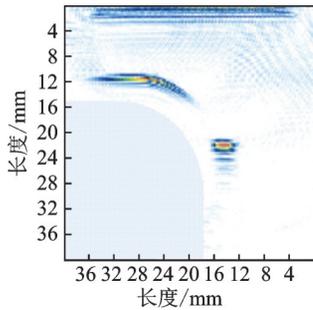


图6 探头 A 全聚焦成像结果

Fig.6 Full matrix focusing imaging results of probe A

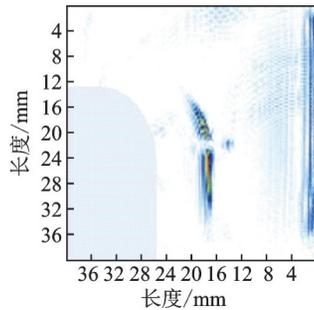


图7 探头 B 全聚焦成像结果

Fig.7 Full matrix focusing imaging results of probe B

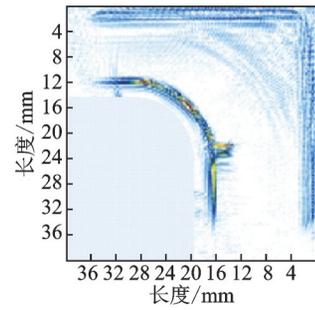


图8 双探头全聚焦成像结果

Fig.8 Full matrix focusing imaging results of twin probes

单、双探头 R 角成像实验结果对比如表 1 所示,由表可知,双探头全聚焦成像方法能够完整显示 R 角轮廓、裂纹侧壁和尖端的影像。

表 1 单、双探头 R 角成像实验结果对比

Tab.1 Comparison of R-angle imaging experimental results of single probe and twin probes

探头	R 角轮廓		裂纹轮廓	
	上壁	侧壁	侧壁	尖端
探头 A	有	无	有	有
探头 B	无	有	无	有
双探头	有	有	有	有

将双探头全聚焦成像结果与 R 角试件截面合二为一,合成图如图 9 所示。由图可以看出,上壁厚度、侧壁厚度和 R 角轮廓与实际工件轮廓一致,裂纹缺陷侧壁和尖端位置与实际相符。

示裂纹尖端以及 R 角侧壁区域,但裂纹侧壁以及 R 角上壁反射的回波无法被换能器有效接收。

### 2.2 双探头全聚焦成像实验

探头 A 和 B 联合全聚焦成像结果如图 8 所示。可以看出,使用双探头成像时,一侧探头散射能量可以被另一侧探头各阵元有效接收,因而能够完整显示 R 角结构内表面轮廓,裂纹缺陷侧壁和尖端也能被有效识别。

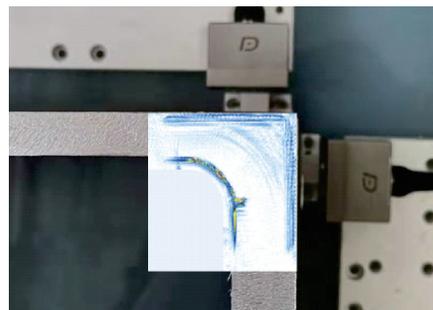


图9 成像结果与 R 角试件合成图

Fig.9 Composite diagram of the imaging results with the R-angle specimen

采用梯形矩阵聚焦成像时,图像中焦点间距为 0.25 mm,成像区域大小为 40 mm×40 mm,总计为 6 400 点。采用显卡加速算法,图像帧频达 92 帧/s,能够满足高效成像检测要求。

综上所述,双探头梯形矩阵聚焦成像方法能够较好地解决R角结构件缺陷的检测问题。

### 3 结束语

针对R角结构的全覆盖高效检测问题,提出了双探头梯形矩阵聚焦成像算法。分析比较了单探头相控阵聚焦成像和双探头聚焦成像检测实验,结果表明,与单探头相控阵全聚焦成像检测方法相比,双探头聚焦成像方法能够更大范围地接收到曲面区域反射回波,完整显示R角结构,有效检出内壁裂纹缺陷,准确定量壁厚、弧面结构和缺陷尺寸。梯形矩阵聚焦成像算法的图像帧频高,可满足高效成像检测需求,具有广泛的应用前景。

#### 参 考 文 献

- [1] 王志凌,袁慎芳,邱雷,等.基于压电超声相控阵方法的结构多损伤监测[J].振动、测试与诊断,2014,34(5):796-801.  
WANG Zhiling, YUAN Shenfang, QIU Lei, et al. Structure multi-damage monitoring based on the piezoelectric ultrasonic phased array[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5): 796-801.(in Chinese)
- [2] 孙亚杰,张永宏,钱承山.采用相控阵方法的结构螺钉松动监测成像研究[J].振动、测试与诊断,2013,33(6):1054-1059.  
SUN Yajie, ZHANG Yonghong, QIAN Chengshan. Phased array based structural bolt debonding monitoring and imaging[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(6): 1054-1059.(in Chinese)
- [3] LI C, PAIN D, WILCOX P D, et al. Imaging composite material using ultrasonic arrays[J]. NDT & E International, 2013, 53: 8-17.
- [4] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Autofocusing ultrasonic imagery for non-destructive testing and evaluation of specimens with complicated geometries[J]. NDT & E International, 2010, 43(2): 78-85.
- [5] VELICHKO A, WILCOX P D. Reversible back-propagation imaging algorithm for postprocessing of ultrasonic array data[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(11): 2492-2503.
- [6] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Effects of array transducer inconsistencies on total focusing method imaging performance[J]. NDT & E International, 2011, 44(4): 361-368.
- [7] 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.
- [8] 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 De, 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.(in Chinese)
- [9] 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):913-921.  
MAO Qiuqin, CHEN Yao, ZHANG Baiyuan, 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.(in Chinese)
- [10] 赵新玉,齐天之,王中亚,等.超声检测三角矩阵聚焦成像算法[J].机械工程学报,2019,55(4):19-24.  
ZHAO Xinyu, QI Tianzhi, WANG Zhongya, et al. Ultrasonic detection triangle matrix focus imaging algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(4): 19-24.(in Chinese)
- [11] 王鹏,王志强,蔡晖,等.基于全聚焦相控阵超声的叶根槽裂纹检测[J].振动、测试与诊断,2020,40(6):1172-1177.  
WANG Peng, WANG Zhiqiang, CAI Hui, et al. Research on crack detection of root groove based on total focusing phased array ultrasonic[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(6): 1172-1177.(in Chinese)
- [12] 李文涛,周正干,李洋.环形阵列超声换能器的全聚焦成像方法及其应用[J].航空学报,2020,41(10):380-388.  
LI Wentao, ZHOU Zhenggan, LI Yang. Total focusing method of ultrasonic annular array and its application [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 380-388.(in Chinese)



**第一作者简介:**赵新玉,男,1979年1月生,博士、副教授。主要研究方向为超声无损检测方法及设备。曾发表《自聚焦线阵声场特征和检测应用》(《机械工程学报》2020年第56卷第12期)等论文。  
E-mail:xyz@djtu.edu.cn

**通信作者简介:**张佳莹,女,1988年4月生,博士、副教授。主要研究方向为焊接结构的无损检测与评价。  
E-mail:zjy@djtu.edu.cn