

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205541

# 超声相控阵传感器阵元间串扰源分析及其隔离方法\*

邓江勇<sup>1</sup> 陈振华<sup>2</sup> 董德秀<sup>3</sup> 卢超<sup>2</sup>  
(1. 广西防城港核电有限公司 防城港 538000; 2. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063;  
3. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 沈阳 110043)

**摘要:**通过研究超声相控阵探头阵元间串扰机理及串扰隔离方法提高近表面检测能力。基于数值仿真技术分析安装了楔块前后阵元间超声波串扰对检测信号及检测声场的影响,分析探头楔块对于隔离阵元间超声波串扰与近表面缺陷检测信号的作用。提出楔块优化方案,并通过试验方法对其进行验证。结果显示,数值模型可直观显示阵元间的超声波串扰,提出的楔块优化方案可将时域上的阵元间串扰信号与近表面检测信号相互隔离。优化楔块后的相控阵探头可对深度2 mm、直径0.3 mm平底孔进行成像检测,近表面缺陷检测能力显著提高。  
**关键词:**阵元间串扰;数值模型;楔块;超声相控阵  
**中图分类号:** TN95      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 430.25

**Analysis and isolation method of crosstalk between the elements in ultrasonic phased array transducer**  
Deng Jiangyong<sup>1</sup> Chen Zhenhua<sup>2</sup> Dong Dexiu<sup>3</sup> Lu Chao<sup>2</sup>  
(1. Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang 538000, China; 2. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 3. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

**Abstract:** The near-surface detection capability is improved by analyzing the crosstalk mechanism and crosstalk isolation method between ultrasonic phased array probe elements. The influences of ultrasonic crosstalk between the elements before and after installing the wedge on the testing signal and testing sound field are analyzed based on the numerical simulation model. Then the capability of the probe wedge on isolation of the crosstalk of array element and near-surface testing signal is analyzed. The wedge block optimization scheme is proposed, and verified by the experimental method. The results indicate that the numerical model can visually display the ultrasonic crosstalk between the array elements, and the proposed wedge block optimization scheme can isolate the crosstalk signal between the array elements in the time domain and the near-surface detection signal from each other. The phased array probe after optimizing the wedge can perform imaging testing on flat-bottomed holes with a depth of 2 mm and a diameter of 0.3 mm, the near-surface detection capability is significantly improved.  
**Keywords:** crosstalk between the elements; numerical simulation; wedge; phased array ultrasonic test

## 0 引言

超声相控阵检测具有聚焦范围大、焦区控制灵活、焦区能量大、成像速度快等优势,适合于大厚度、复杂零部件的高精度、快速成像检测<sup>[1-4]</sup>。超声相控阵技术通过控

制传感器中有序排列的压电阵元的激发延时,在指定深度实现各阵元发射声束同相位叠加增强,即声场聚焦和偏转<sup>[5-8]</sup>。通过多阵元超声波的延时激发能够灵活控制检测声场,可根据具体情况实现各种特殊的声场分布。鉴于多阵元激发的复杂性,超声相控阵检测技术相对于常规单探头检测技术存在检测参数多、检测图像复杂、检

测结果难以评定的问题<sup>[7-9]</sup>。目前,数值仿真技术已应用于超声相控阵检测机理及参数优化、相控阵声场控制方法及各向异性材料中相控阵聚焦算法的优化设计与校准等<sup>[10-17]</sup>。由于阵元间串扰的超声波声程较短,串扰波分布于始波附近,影响近表面检测信号的信噪比。阵元间串扰的超声波波型及传播较为复杂,基于数值仿真技术可直观分析其产生、传播、变型,可为传感器优化设计提供重要的理论参考<sup>[18-20]</sup>。

针对相控阵各阵元间串扰引起的近表面高精度检测困难的问题,开展阵元间超声串扰信号传播机理分析和检测方案优化工作。基于数值仿真技术分析阵元间超声波串扰对检测声场及检测信号的影响,分析探头楔块对避免阵元串扰的作用,并提出楔块的优化设计方法。尽管安装楔块使聚焦性能变差,但经优化设计的楔块可有效隔离阵元间串扰,提高近表面检测信噪比,有利于近表面缺陷的高精度检测。

1 有限元建模分析

1.1 有限元模型

建立超声相控阵检测过程的数值仿真模型,分析阵元间相互干扰机制及楔块对聚焦声场及检测信号的影响。检测对象模型高 4 mm、宽 28 mm、底部制备埋深 2 mm、直径 0.3 mm 的平底孔;楔块宽  $l$ 、高  $h$ ,  $h=0$  表示探头前端未安装楔块,如图 1 所示。仿真模型为一维线型阵列,阵元中心频率 15 MHz,阵元及其排列的详细参数如表 1 所示。

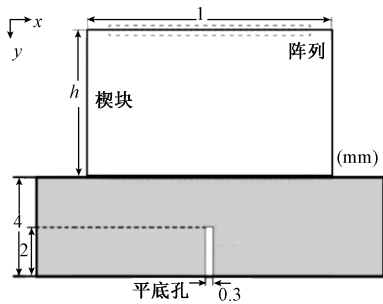


图 1 有限模型结构图

Fig. 1 Structure diagram of FEM

表 1 超声相控阵探头参数

Table 1 The parameters of ultrasonic phased array probe

| 阵元数量 | 中心频率/<br>MHz | 阵元宽度/<br>mm | 阵元长度/<br>mm | 阵元中心距/<br>mm |
|------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 32   | 15           | 0.2         | 5           | 0.25         |

楔块中纵波声速为 2 700 m/s,工件中纵波声速为 6 258 m/s。通过该模型分析楔块安装前后在蒙皮与支

板连接处(T 型焊 2 mm 深)的超声相控阵声场分布。楔块网格尺寸不大于 0.1 mm、检测对象网格尺寸不大于 0.3 mm。

1.2 安装楔块前后的延时计算方法

距焦点最远阵元的声传播时间与其余阵元声传播时间之差,第  $i$  个各阵元的延迟时间  $\Delta t_i$  表示为:

$$\Delta t_i = t_{\max} - t_i \quad (1)$$

式中,  $t_{\max}$  为距焦区最远阵元发射超声波传播至焦区的时间,  $t_i$  为第  $i$  号阵元发射的声束传播至焦区的时间。

距相控阵超声聚焦区域最远的阵元最先被激励,第  $i$  个阵元按式(1)计算的  $\Delta t_i$  延时激发。探头安装楔块后,发射声束经楔块入射至待测工件,在楔块与工件接触的界面发生折射。建立坐标系(图 2)如下:以换能器阵列中心为原点,  $x$  方向为阵元排列方向,  $y$  方向为声束传播方向,设第  $i$  号阵元坐标  $(x_i, y_i)$ 、发射声束入射点距原点  $\Delta x_i$ 、入射角为  $\alpha_i$ 、折射角为  $\beta_i$ ;焦点位置  $(x_f, y_f)$ ,楔块高度  $h$ ,  $C_1$  为楔块中纵波声速、 $C_2$  为检测对象中纵波声速,根据折射定律可得:

$$\frac{\sin \alpha_i}{C_1} = \frac{\sin \beta_i}{C_2} \quad (2)$$

$$\sin \alpha_i = \frac{x_i - \Delta x_i}{\sqrt{(x_i - \Delta x_i)^2 + h^2}} \quad (3)$$

$$\sin \beta_i = \frac{\Delta x_i - x_f}{\sqrt{(\Delta x_i - x_f)^2 + y_f^2}} \quad (4)$$

已知阵元坐标  $(x_i, 0)$  和焦点坐标  $(x_f, y_f)$ , 据式(2)~(4)可求解  $\Delta x_i$ 。

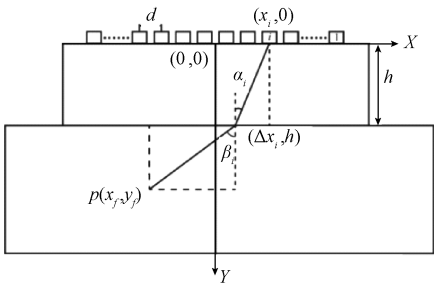


图 2 焦点右侧阵元的声波折射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sound wave refraction of the array element on the right side of the focus

得到  $\Delta x_i$  后,可算得阵元发射声束至焦点的到达时间:

$$t_i = \frac{\sqrt{(x_i - \Delta x_i)^2 + h^2}}{C_1} + \frac{\sqrt{(\Delta x_i + x_f)^2 + y_f^2}}{C_2} \quad (5)$$

如未安装楔块,即:  $h=0$ ,  $x_i = \Delta x_i$ , 则有:

$$t_i = \frac{\sqrt{(x_i + x_f)^2 + y_f^2}}{C_2} \quad (6)$$

2 仿真结果分析

2.1 楔块安装前后对检测声场的影响

楔块高度  $h$  分别设置为 0 mm(无楔块)和 30 mm,聚焦深度为 2 mm。按式(5)和(6)可分别计算各阵元激发延时时间,两侧阵元最先激发、延时最小,中间两阵元最后激发、延时最长,如图 3 所示。

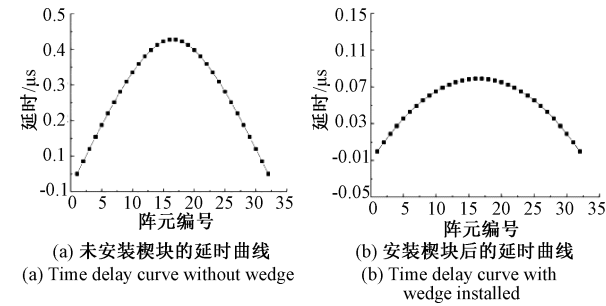


图 3 安装楔块前后的延时曲线

Fig. 3 Time-delay curves before and after wedge installation

图 4 显示各阵元按图 3 延时激励后,均可在 2 mm 深处形成聚焦声场,验证了式(5)、(6)的正确性。对比声束传播方向和截面方向焦点尺寸可知,未安装楔块时,聚焦声场焦点直径 0.27 mm、高度 0.13 mm;安装楔块模型的焦点直径 0.95 mm、焦柱高度 4.6 mm;安装楔块后焦点处声压下降了 22.5%。因此,安装楔块使同深度焦点显著增大、声压最大幅度显著减低、聚焦能力减弱。

2.2 干扰波信号分析

阵元间的信号串扰影响检测信号信噪比。为分析阵元间信号串扰机制以实现有效抑制,建立单阵元发射、多阵元接收的数值仿真模型,分析信号间串扰的来源及其对检测信号的影响机制。数值模型如图 5 所示,在激发/接收方式上采取 1#阵元发射,8#、16#、24#、32#阵元接收的模式,基于声程渐变的检测信号分析安装楔块前后阵元间干扰波的波型结构及其来源。图 5 为未安装楔块时超声波传播的波场快照图(快照时刻  $t$  分别为 0.68、1.02、2.105、2.81  $\mu\text{s}$ ),显示:1#阵元向试块底部发射超声纵波的同时在检测对象表面形成 2 列波包,前一个波包的声速约为后一波包声速的两倍;而向底部发射的纵波到达检测对象底部后发生多次反射。

在 8#、16#、24#、32#阵元位置提取检测信号,如图 6 所示。信号中包括脉冲 C、脉冲 S;其中,4 个接收位置接收到的 C 脉冲的到达时间分别为 0.33、0.66、0.98、1.29  $\mu\text{s}$ ,结合接收位置的距离差可计算 C 脉冲传播速度 6 250 m/s;而 S 脉冲的到达时间分别为 0.68、1.38、2.08、2.77  $\mu\text{s}$ ,结合 4 个接收位置的距离差可计算 S 脉

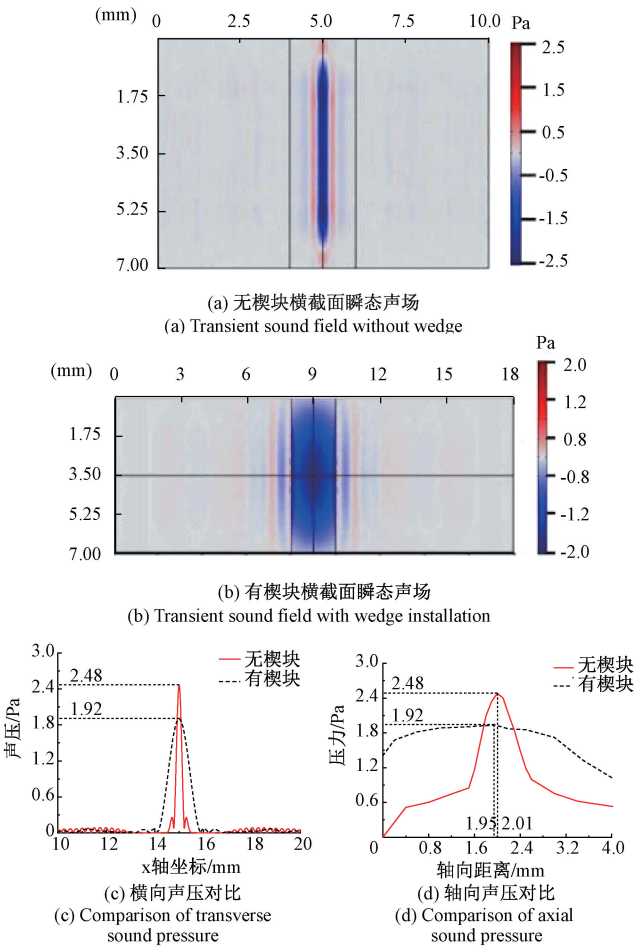


图 4 相控阵近表面聚焦轴向声场及声压分布

Fig. 4 Near-surface focused axial sound field and sound pressure distribution

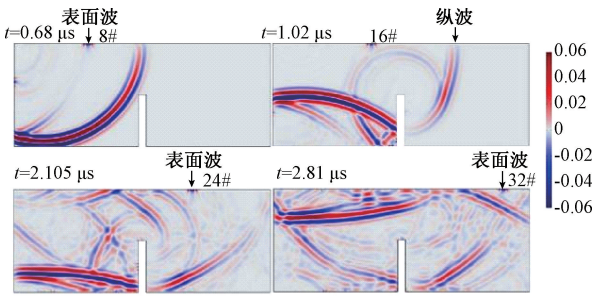


图 5 沿表面传播的波包分析

Fig. 5 Analysis of the wave packet propagating along the surface

冲传播速度为 2 870 m/s;这与钛合金纵波声速 6 257 m/s 和表面波声速 2 863 m/s 基本一致。因此,可判定单阵元激励可在试样表面可形成表面纵波(爬波)和表面波。此外,据声程计算可知,这 4 个阵元位置还可接收到缺陷反射波脉冲,到达时间分别为 1.16、1.03、1.16、1.43  $\mu\text{s}$ 。因此,缺陷回波会混入到波包 C、S 之间,沿界面传播的表



面波和纵波会导致信噪比下降。

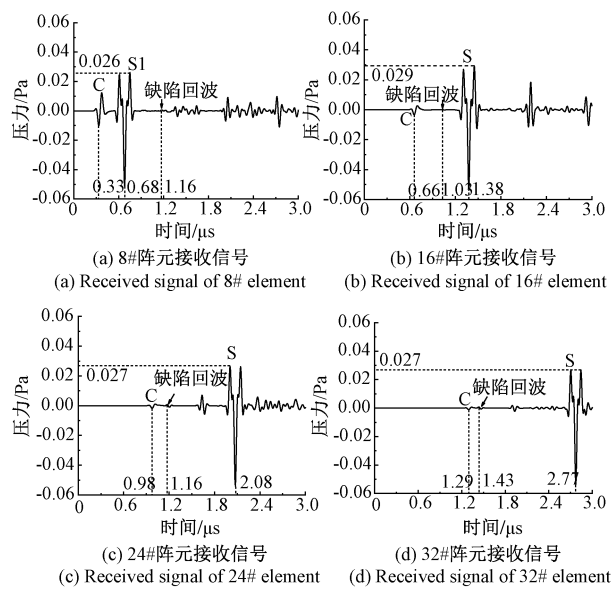


图 6 接收信号

Fig. 6 Received signal

2.3 安装楔块干扰信号分析

在相控阵阵列探头上分别安装高度  $h=30\text{ mm}$ 、长度分别为  $l=10、30\text{ mm}$  的楔块,同样 1#阵元发射,8#、16#、24#、32#阵元接收。由无楔块情况可知,1#阵元除向试块底部发射超声纵波外,同时还会在楔块表面形成近表面纵波和表面波;由于表面波能量幅度更高且衰减较小,可在楔块两端多次反射。因此,各阵元能接收到的波型包括:近表面纵波 C、表面波及其多次反射波包  $S_1\sim S_6$ ,具体如表 2 及图 7 所示。

表 2 干扰波类型分析

| Table 2 Analysis of interference wave type |                                         |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 波包编号                                       | 波型                                      |
| C                                          | 发射的纵波被接收                                |
| $S_1$                                      | 发射的向右传播的表面波被接收                          |
| $S_2$                                      | 表面波向左传播经楔块左端反射后被接收                      |
| $S_3$                                      | 表面波向右传播至楔块右端角反射后被接收                     |
| $S_4$                                      | 表面波向左传播至楔块左端反射至楔块右端再次反射后被接收             |
| $S_5$                                      | 表面波向右传播至楔块右端反射至楔块左端再反射后被接收              |
| $S_6$                                      | 表面波经楔块左端反射至楔块右端,经右端反射再次传播至左端并经左端角反射后被接收 |

有机玻璃楔块的理论纵波声速为  $2\,730\text{ m/s}$ 、楔块表面波声速为  $1\,350\text{ m/s}$ ,据此可判定各阵元接收到检测信号中脉冲的波包类型。由图 8 可知,当楔块长度  $l=10\text{ mm}$  时,两阵元可接收到波包 C 及波包  $S_1\sim S_6$ ;然而,由于楔块端多次反射的表面波声程和衰减随楔块长度的

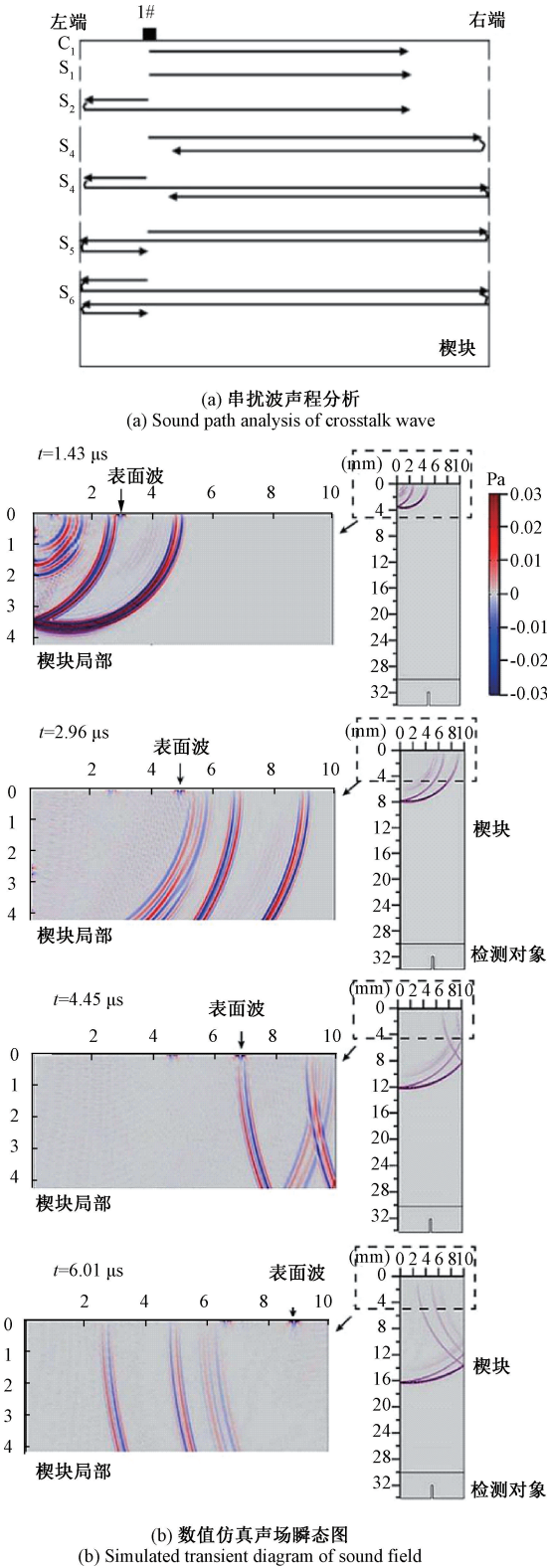


图 7 干扰波声程分析

Fig. 7 Sound path analysis of interference wave

增大而增大,当  $l$  增至  $30\text{ mm}$  时,两接收阵元只能接收到波包 C、波包  $S_1$  和  $S_2$ ,对缺陷检测信号的干扰较大。因



此,楔块长度的增大能够有效降低楔块侧面多次反射形成的串扰信号,减小阵列间超声波的串扰。

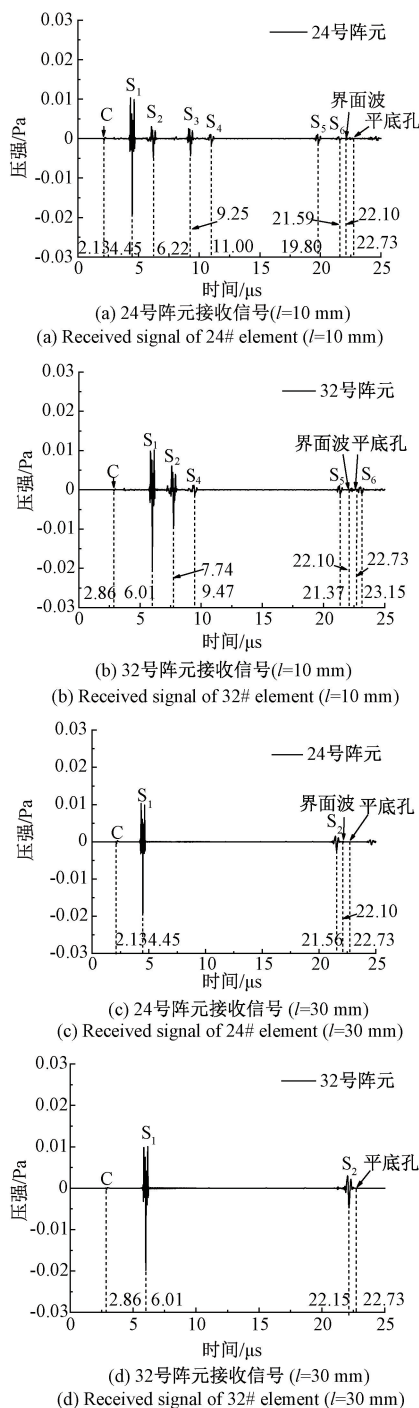


图8 楔块长度对干扰信号的影响

Fig. 8 Influence of wedge length on interference signals

### 3 楔块优化设计及实验验证

#### 3.1 减小近表面检测干扰信号的方法

尽管增大楔块长度可减少串扰波包,但是由于楔块

长度变大可能造成检测面难以选取、检测位置难以进入的问题,不可能通过无限增大楔块长度消除串扰;特别是不经楔块两侧反射的串扰,如波包C和波包 $S_1$ ,是无法通过增大楔块长度消除的。因此,在安装楔块的条件下,可从两方面考虑减小小阵元间串扰对检测信号的不利影响:1)通过增大楔块长度增大表面波多次反射的衰减,降低干扰波数量及幅度,2)通过增大楔块高度 $h$ 使有楔块-检测面的界面反射波和缺陷反射波在干扰波之后。当 $l$ 增大至30 mm时,串扰波剩下C波包、 $S_1$ 和 $S_2$ 波包。为使楔块-检测对象界面的反射波在 $S_2$ 波之后到达,则楔块高度 $h$ 应满足:

$$h > t \times C / 2 \quad (7)$$

式中: $t$ 为干扰波最晚到达时间, $C$ 为有机玻璃中纵波声速。

根据有限元模拟结果,干扰波 $S_2$ 最晚到达时间 $t=22.15 \mu\text{s}$ ,有机玻璃纵波声速为 $C=2700 \text{ m/s}$ 。由式(7)可知,若需避免 $S_2$ 波的干扰,则楔块高度应大于29.9 mm。

#### 3.2 数值仿真结果

图9(a)显示未安装楔块的缺陷检测信号,0和 $0.64 \mu\text{s}$ 处分别为检测对象界面波和缺陷反射回波,信噪比为3.1;图9(b)为安装楔块( $l=30 \text{ mm}$ 、 $h=30 \text{ mm}$ )的缺陷检测信号:0~ $5 \mu\text{s}$ 范围为阵元与楔块间的界面回波、 $22.1 \mu\text{s}$ 为楔块底面与检测面的界面回波、 $5 \sim 22.1 \mu\text{s}$ 为表面波干扰信号,而缺陷的反射回波在楔块-检测对象界面回波之后的 $22.73 \mu\text{s}$ 处,不受串扰波的影响;图9(c)安装楔块检测信号的缺陷反射回波局部部图,信噪比可达6.8。尽管安装楔块后聚焦声场声压(信号)显著下降(聚焦性能变差),但声压下降对近表面检测能力的影响很小。因此,通过优化设计楔块将阵元间串扰隔离在近表面检测区域之外能够显著提高近表面检测信号信噪比,即使安装楔块后提取的缺陷检测信号(图9(b)、(c))具有比未安装楔块时更高的检测信号信噪比(图9(a))。

#### 3.3 检测试验

基于仿真结果设计传感器楔块,相控阵探头阵列参数与模拟相同。设计楔块尺寸为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。检测试样为厚度 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 钛合金试块,在试块中有一直径 $0.3 \text{ mm}$ 、埋深 $2 \text{ mm}$ 平底孔。分别在未安装楔块和安装楔块的条件下采用扇扫模式对平底孔进行超声相控阵扇扫成像检测。

图10(a)显示未安装楔块的相控阵扇扫图像,图中由阵元间串扰波引起的干扰图像覆盖至0~3 mm深度,埋深2 mm直径 $0.3 \text{ mm}$ 的平底孔反射波图像显然被掩埋;图10(b)显示安装楔块后的相控阵扇扫图像,该图像

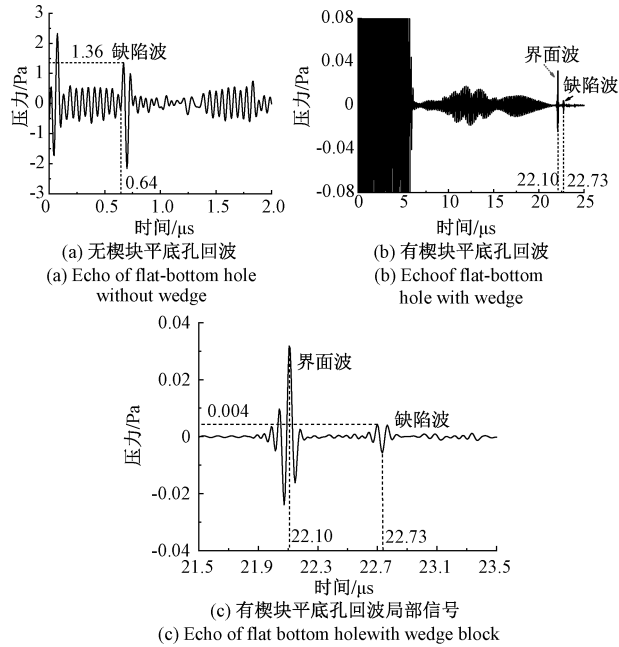


图9 平底孔反射回波信号

Fig. 9 Test signal of reflected echo from flat-bottom hole

能够明显的显示出平底孔位于2.3 mm深处,串扰波被楔块有效的隔离了。

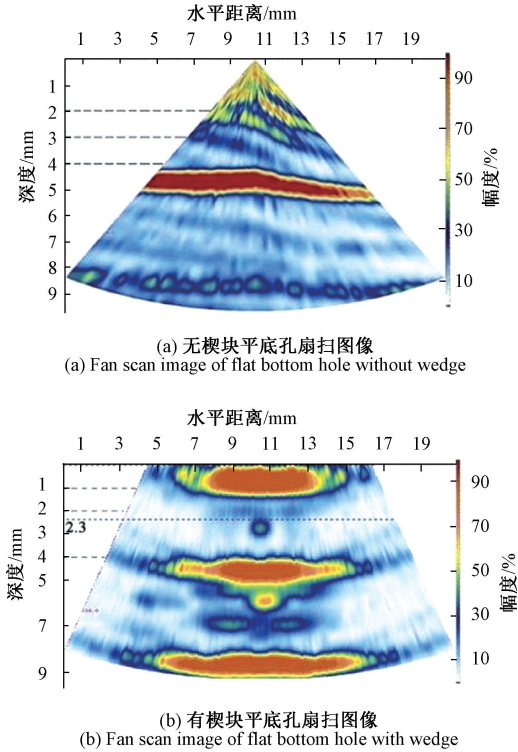


图10 近表面平底孔相控阵扇扫图像

Fig. 10 Fan scan image of near-surface flat-bottom hole

4 结 论

基于数值仿真模型深入分析高频相控阵探头阵元间串扰引起的近表面盲区及其改善方法,结果表明,晶片间串扰波主要包括近表面纵波及表面波,其中表面波衰减较小、幅度较高,是阵元间的主要干扰源,混入到检测信号中,导致近表面盲区;通过增大楔块长度可有效衰减由楔块边缘形成的多次反射表面波干扰,通过增大楔块高度将延长界面波的到达时间,使表面干扰波隔离在界面波之前,避免串扰波对近表面检测信号的影响;基于模型仿真结构提出楔块设计方法,并通过检测试验分析安装楔块后的近表面检测效果,试验显示了与模拟一致的结果,安装楔块后有效的提高了超声相控阵检测技术的近表面检测能力。

参考文献

[1] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934.

JIN SH J, YANG X X, CHEN SH L, et al. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 925-934.

[2] 兰晓峰, 张渝. 超重载铁路钢轨相控阵探伤系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 47-55.

LAN X F, ZHANG Y. Research on heavy haul railway inspection system based on the phased array technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 47-55.

[3] 李治应, 刘菲菲, 杨玉森, 等. 复合材料机身壁板的超声相控阵检测[J]. 航空制造技术, 2021, 64(19): 82-89.

LI ZH Y, LIU F F, YANG Y S, et al. Ultrasonic phased array inspection of composite fuselage pane[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(19): 82-89.

[4] 黄海鸿, 刘文杰, 钱正春, 等. 零件表面损伤对再制造修复件承载能力影响的超声相控阵检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 32-41.

HUANG H H, LIU W J, QIAN ZH CH, et al. Influence of surface damage on load carrying capacity of remanufactured repair parts based on ultrasonic phased array[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 32-41.

- [5] QIANG W, GONG S F, PEI Y, et al. Performance evaluation of austenitic stainless steel weld defect detection in ultrasonic phased array based on DORT[C]. Technology & Application Forum. IEEE, 2016.
- [6] KUMAR S, MENAKA M, VENKATRAMAN B. Simulation and experimental analysis of austenitic stainless steel weld joints using ultrasonic phased array [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(2): 24005.
- [7] 穆鑫. 动车组车轮轮辋相控阵超声探伤成像优化研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(11): 47-51.  
MU X. Optimization of phased array ultrasonic image for EMU wheel rim inspection [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(11): 47-51.
- [8] 王冲, 毛捷, 廉国选. 阵元固体指向性补偿对超声全聚焦成像的优化研究[J]. 应用声学, 2018, 37(5): 732-737.  
WANG CH, MAO J, LIAN G X. The optimization for ultrasonic total focusing method of solid directivity compensation of array element [J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(5): 732-737.
- [9] 龙绒蓉, 王海涛, 郭瑞鹏, 等. 二维超声相控阵的声场特性[J]. 无损检测, 2015, 37(12): 1-4, 9.  
LONG R R, WANG H T, GUO R P, et al. Characteristics of acoustic field of two-dimensional ultrasonic phased array [J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(12): 1-4, 9.
- [10] 朱甜甜, 刘建, 宋波, 等. 焊缝超声相控阵检测数据深度学习降噪方法[J]. 应用声学, 2022, 41(1): 112-118.  
ZHU T T, LIU J, SONG B, et al. Noise reduction method for weld PAUT detection data based on deep learning [J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 41(1): 112-118.
- [11] 曹弘毅, 马蒙源, 丁国强, 等. 复合材料层压板分层缺陷超声相控阵检测与评估[J]. 材料工程, 2021, 49(2): 149-157.  
CAO H Y, MA M Y, DING G Q, et al. Delamination defects testing and evaluation of composite laminates using phased array ultrasonic technique [J]. Journal of Material Engineering, 2021, 49(2): 149-157.
- [12] ZHOU Z. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 1-7.
- [13] 敬博通, 聂鹏飞, 党凯强. 基于COMSOL对超声相控阵特性对比分析[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(1): 53-57.
- JING B T, NIE P F, DANG K Q. Comparative analysis of ultrasonic phased array characteristics based on COMSOL [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(1): 53-57.
- [14] 陈振华, 许倩, 王婵, 等. 相控阵自定义聚焦的有限元模拟及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(12): 142-148.  
CHEN ZH H, XU Q, WANG CH, et al. Finite element simulation and application of self-defined focusing in phased array testing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32: 142-148.
- [15] CHEN Z, SHUAI Z, LU C, et al. Simulation and sound field analysis on ultrasonic phased array test based on the finite element method [J]. Materials Evaluation, 2019, 77: 1054-1602.
- [16] 陈振华, 黄智刚, 王婵, 等. 超声相控阵检测声场的有限元仿真建模及其试验验证[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 48-55.  
CHEN ZH H, HUANG ZH G, WANG CH, et al. Finite element modulation and its experimental verification on sound field of ultrasonic phased array testing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(2): 48-55.
- [17] 池强强, 胡明慧. 相控阵超声全聚焦成像算法的有限元仿真研究[J]. 声学技术, 2020, 39(2): 176-183.  
CHI Q Q, HU M H. Simulation research on finite element method based phased array ultrasonic TFM imaging algorithm [J]. Technical Acoustics, 2020, 39(2): 176-183.
- [18] ZHOU L, FU M, XU W. Research on phased array ultrasonic testing for the girth weld of 4 mm ~ 10 mm austenitic stainless steel pipeline [C]. Pressure Vessels and Piping Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2018, 51593: V01BT01A024.
- [19] GUO Z C, YAN S G, ZHANG B X. Simulation of acoustic fields emitted by ultrasonic phased array in austenitic steel weld [J]. Chinese Physics B, 2019, 28(11): 114302-1-7.
- [20] 傅成城, 高成, 黄姣英, 等. 压电加速度传感器有限元仿真方法研究[J]. 压电与声光, 2021, 43(1): 5-9.  
FU CH CH, GAO CH, HUANG J Y, et al. Study on finite element simulation method of piezoelectric acceleration sensor [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021, 43(1): 5-9.



作者简介



邓江勇, 1997 年于重庆大学获得学士学位, 现为广西防城港核电有限公司高级工程师, 主要研究方向为核电厂金属部件的特殊维修焊接工艺、无损检测工艺及失效分析。

E-mail: dengjiangyong@cgnpc.com.cn

**Deng Jiangyong** received his B. Sc. degree from Chongqing University in 1997. Now he is a senior engineer in Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd. His main research interests include nondestructive testing technology and failure analysis of welding process of metal components in nuclear power plant.



陈振华 (通信作者), 2004 年于江西师范大学获得学士学位, 2010 年于北京工业大学获得博士学位, 现为南昌航空大学副教授, 主要研究方向为超声波无损检测技术及其系统、测控技术及仪器。

E-mail: zhenhuachen@yeah.net

**Chen Zhenhua** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2004 from Jiangxi Normal University, received his Ph. D. degree in 2010 from Beijing University of Technology. Now he is an associate professor in Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic nondestructive testing and related instrument, the measurement and control technology and instrument.