

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407787

# 用于曲面构件超声相控阵检测的聚焦延时方法研究\*

周扬帆<sup>1,2</sup> 涂君<sup>1,2</sup> 毛轶豪<sup>1,2</sup> 王慧珍<sup>1,2</sup> 张旭<sup>1,2</sup> 宋小春<sup>1,2</sup>

(1. 湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068; 2. 现代制造质量工程湖北省重点实验室 武汉 430068)

**摘要:** 为了提高曲面构件内微小缺陷的超声相控阵检测能力,提出了一种用于曲面构件的相控阵聚焦延时方法。本研究建立了线阵相控阵聚焦声场的瑞利积分数学模型,并对声场指向性分布规律进行了分析。应用斯涅尔定律分别推导了斜面和曲面构件中的聚焦延时法则,与传统的迭代遍历算法相比,该方法提高了延迟法则的计算效率,减少了界面结构对扫描声束波阵面的弯曲影响,从而充分发挥了线性相控阵的检测优势。在建立的曲面构件仿真模型中,基于所提聚焦延时方法,依次将延时施加于各阵元,仿真结果证明了声波能够在预设位置实现有效聚焦,并且该方法的计算时间相比于传统迭代遍历计算缩短了约70%。进一步地,展开实际检测实验,制作了含有 $\Phi 0.3$  mm盲孔的环形钢试块,通过对比施加延时法则前后的B扫描图像和A扫信号图,实验结果表明,所提出的方法有效提高了曲面构件内微小缺陷的检测信噪比以及成像质量。

**关键词:** 曲面构件; 超声相控阵; 声场指向性; 线阵聚焦; 延时法则

**中图分类号:** TH701; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.2040

## Research on focus delay method for ultrasonic phased array inspection of curved surface components

Zhou Yangfan<sup>1,2</sup> Tu Jun<sup>1,2</sup> Mao Yihao<sup>1,2</sup> Wang Huizhen<sup>1,2</sup> Zhang Xu<sup>1,2</sup> Song Xiaochun<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** To enhance the detection capability of small defects within curved components using ultrasonic phased array, this paper proposes a phased array focusing delay method tailored for curved structures. In this paper, the Rayleigh integral mathematical model for the linear phased array focusing field is established, and the directional distribution of the sound field is analyzed. By applying Snell's Law, the focus delay rules for inclined and curved components are derived. Compared with the traditional iterative traversal algorithm, the proposed method improves the calculation efficiency of the delay rule, reduces the influence of interface structures on the curvature of the scanning sound beam's wavefront, thereby fully leveraging the detection advantages of linear phased arrays. In the established curved component simulation model, the delay is applied sequentially to each element based on the proposed method. Simulation results confirm that the sound waves can be effectively focused at the present location, and the computation time is reduced by approximately 70% compared to traditional iterative methods. Furthermore, practical detection experiments were conducted using a ring-shaped steel test block with a  $\Phi 0.3$  mm blind hole. By comparing the B-scan images and A-scan signals before and after applying the delay rule, experimental results show that the proposed method significantly improves the signal-to-noise ratio and imaging quality in detecting small defects in curved components.

**Keywords:** curved components; ultrasonic phased array; sound field directivity; linear array focusing; delay rules

## 0 引言

由于良好的声束控制以及成像能力,超声相控阵已经广泛应用于无损检测以及其他领域<sup>[1-2]</sup>。但是在检测时,相控阵探头的参数、时间延迟以及介质性质等对检测结果有着很大的影响,特别是它们影响着线性相控阵的聚焦成像精度<sup>[3-4]</sup>。此外,超声相控阵检测聚焦声场强度还与探头中心频率、阵元数目、聚焦深度、偏转角度有关<sup>[5-6]</sup>。尤其是检测曲面构件时,由几何结构和界面引起的反射、透射以及模式转换,使声场变得相当复杂<sup>[7]</sup>,这给实际检测带来了很大干扰。对于弯曲构件的相控阵检测,需要综合阵元数目、阵元中心距、主瓣宽度、探头偏转角度等因素<sup>[8-9]</sup>。因此,为了提高超声相控阵在曲面构件中的检出效率,优化相控阵探头参数以及对各晶片施加合理的延时显得尤为重要。

目前,计算单层介质中的时间延迟已经相当成熟,近年来许多学者已经开始研究多种介质和不规则界面的延时算法。康亚轩等<sup>[10]</sup>利用虚拟源法重构界面寻找折射点,但是该方法适用于表面曲率半径很大的被检构件。甘勇<sup>[11]</sup>采用虚拟源替代折射点以避免迭代计算,但是这种近似替代容易受到工件表面曲率和水层厚度的影响,而且计算出来延时误差较大。徐娜等<sup>[12]</sup>基于费马原理计算延时将折射界面离散化,计算每个晶片到离散点与离散点到聚焦点的声程,取其中的最小声程作为折射点,该方法的计算量很大。姜学平等<sup>[13]</sup>研究带斜楔的相控阵横波偏转聚焦检测延时法,但是该算法只适用于平面界面。周正干等<sup>[14]</sup>推导了多层介质的线性相控阵延时计算方法,但该方法计算时需要进行大量的迭代和遍历计算。Li等<sup>[15]</sup>提出了“声速标度系数K”算法,但是该算法只适用于多层平面结构。Zheng等<sup>[16]</sup>推导了柔性相控阵在等半径单层和双层复弯曲工件中的偏转聚焦原理,但柔性相控阵的制造工艺复杂且价格昂贵,不具备普遍性。Wang等<sup>[17]</sup>利用反相位匹配法推导了环形相控阵的偏转聚焦延时规律,使用该方法的误差在 $\pm 3\%$ 以内,而且环形相控阵一般应用于管道检测。

针对上述延时方法的结果误差较大,计算量较多,只能应用于平面或者表面曲率半径很大的被检构件的问题,本研究提出了一种基于费马原理和斯涅尔定律的快速延时计算方法,旨在提高线性相控阵探头在曲面零件检测中的延时计算效率和精度。通过分析线性相控阵的声束指向性能,本研究优化了相控阵的参数选择,并结合曲面构件的几何特征,提出了一种高效的延时计算方法。此外,本研究通过有限元仿真验证了该方法的快速性与可行性,并通过实验结果与理论预测的对比,进一步证明了该算法的准确性和可行性。

## 1 线性相控阵声场模型及其指向性

线性相控阵换能器由多个均匀排列的单晶片组成,每个晶片可以看作是一个独立的声源,类似于一个矩形活塞声源。在声场中,每个晶片会产生特定的声压场。因此,整个线性相控阵的声场可以视为各个晶片产生的声压场在空间中的叠加效果。针对单个矩形活塞声源,可以通过瑞利积分法来搭建模型<sup>[18-19]</sup>。如图1所示,单个阵元的长度为 $2a$ ,宽度为 $2b$ , $F$ 是三维空间中的一点, $OF$ 的单位向量为 $\vec{n}$ , $OF$ 与 $z$ 轴的夹角为 $\theta$ ,点 $F'$ 是 $F$ 在 $XOY$ 平面上的投影,投影线与 $x$ 轴的夹角为 $\phi$ ,取阵元中心为原点建立如图所示坐标系,将阵元离散成无限多个点源 $ds$ ,则单个阵元产生的声压为:

$$p(r, \omega) = \iint \frac{j\omega\rho}{2 \times \pi \times r} \times u \times e^{-jkr} ds \quad (1)$$

式中: $\omega$ 是角频率,波数 $k = \omega/c$ , $\rho$ 是介质密度, $c$ 是介质中的声速, $u$ 是振动幅值。当阵元与点 $F$ 的距离足够大时,距离 $r$ 可近似为 $r \cong r_0 - x' \times \vec{n}$ ,代入式(1)可得:

$$p(x, y, z, \omega) = D(\theta, \phi) \times \frac{-4j\omega\rho u(\omega)}{2 \times \pi} \times \frac{\exp(jkr_0)}{r_0} \quad (2)$$

其中,定义指向性函数为:

$$D(\theta, \phi) = \frac{\sin(kb\cos\phi\sin\theta)}{kb\cos\phi\sin\theta} \frac{\sin(ka\sin\phi\sin\theta)}{ka\sin\phi\sin\theta} \quad (3)$$

为了便于分析,取 $XOZ$ 平面内的点,即 $\phi = 0$ ,则上述指向性函数可以简化为:

$$D(\theta) = \frac{\sin(kb\sin\theta)}{kb\sin\theta} \quad (4)$$

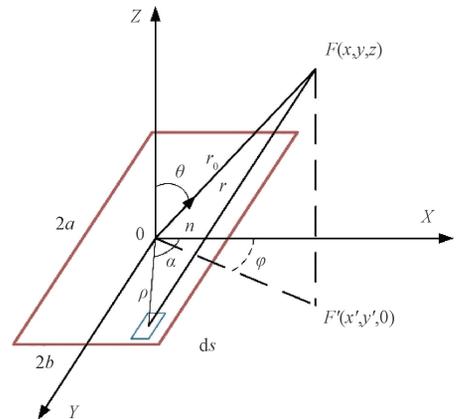


图1 矩形阵元示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rectangular array

如图2所示,在 $XOY$ 平面上均匀线性排列的 $N$ 个阵元的声压指向性函数,根据乘积定理可以表示为 $N$ 个矩形活塞声源的指向性函数的乘积<sup>[20]</sup>,该指向性函数可以

表示为:

$$D(\theta) = \left| \frac{\sin(N \times \pi i \times \frac{d}{\lambda} \times \sin\theta)}{N \times \sin(\pi i \times \frac{d}{\lambda} \times \sin\theta)} \right| \quad (5)$$

式中:  $N$  为阵元个数;  $d$  为阵元间距;  $\lambda$  为信号的波长。观察公式易知, 线性相控阵指向性函数由  $N$  和  $d/\lambda$  控制。在实际检测中要求主瓣宽度尽可能最小, 消除旁瓣, 并抑制栅瓣。

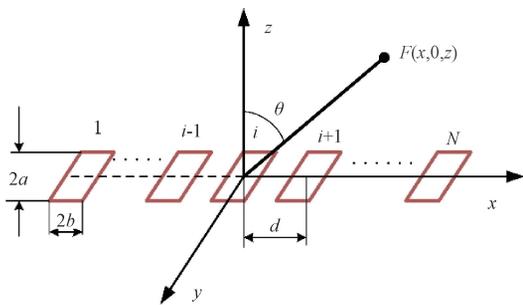


图 2 线性相控阵图

Fig. 2 Schematic diagram of linear phased array

图 3 所示在工件声速为 5 920 m/s, 探头中心频率 10 MHz 的情况下, 主瓣角宽度与阵元数目和  $d/\lambda$  的关系图, 可以看出, 随着阵列元素的增加, 主瓣宽度逐渐减小, 当  $N \geq 32$  且  $d/\lambda \geq 0.6$  时主瓣宽度能够稳定控制在 0.5 mm 以下, 这表明适当增加阵列元素有助于提高空间分辨率, 使检测更为精确。从图 4 相控阵指向性的结果分析可知, 随着  $d/\lambda$  的值增大, 主瓣宽度变窄, 即阵列的方向性逐渐增强, 然而当  $d/\lambda \geq 1$  时, 开始出现栅瓣, 而且随着比值的增大, 栅瓣对主声束的影响逐渐变大。

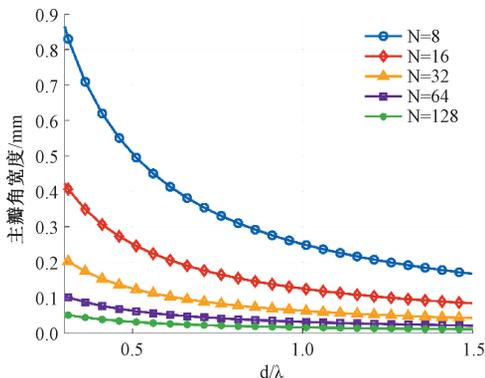


图 3 主瓣角宽度与  $N$  和  $d/\lambda$  的关系

Fig. 3 Relation of main lobe angle width to  $N$  and  $d/\lambda$

## 2 曲面构件相控阵声束偏转聚焦延时理论

在使用线性超声相控阵探头进行检测时, 发射和接收声束是整个检测系统的核心部分。为了准确地将阵换

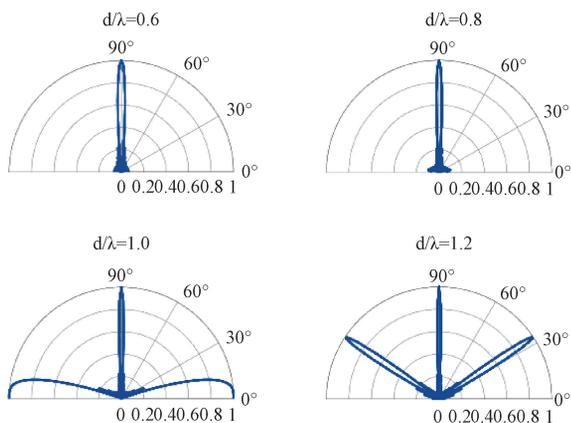


图 4 超声相控阵指向性

Fig. 4 Directivity of ultrasonic phased array

能器的辐射声场聚焦在曲面构件内部的某一区域, 从而完成对该区域的全扫描, 必须计算各阵元的激励时间, 这就是所谓的“延迟法则”。

### 2.1 斜面构件声束路径确定及延时法则计算

斜界面相控阵偏转聚焦原理示意如图 5 所示。以阵列中心为原点, 水平向右为  $x$  轴正方向, 垂直向上为  $y$  轴正方向建立平面直角坐标系。设  $P(x, y)$  点为聚焦点, 从阵列中心垂直到工件上表面的距离为  $h$ , 阵元数目为  $N$ , 相邻阵元之间的中心距为  $d$ , 工件表面与水平面倾角为  $\gamma$ ,  $c_1$  和  $c_2$  分别是耦合介质的声速和工件的声速。

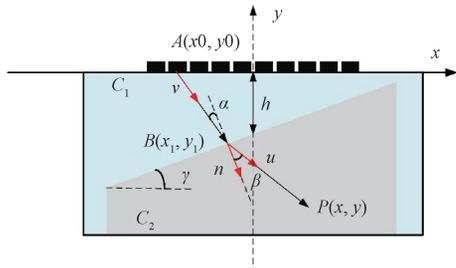


图 5 斜界面相控阵偏转聚焦原理

Fig. 5 Principle of deflection focusing of phased array with inclined interface

设第  $i$  个阵元的位置坐标为  $(x_i, 0)$ , 则由上述已知参数可以表示为:

$$x_i = d \times \left( \frac{2 \times i - 1}{2} - \frac{N}{2} \right) \quad (6)$$

在耦合介质和工件交界面上, 主声束为与界面处的法线成角度为  $\alpha$  的入射声束, 通过界面时主声束会发生折射, 折射声束与法线形成的和折射角  $\beta$  与入射角  $\alpha$  满足斯涅尔定律:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \quad (7)$$

界面的法向量可以由每个折射点的一组单位向量表示,而斜界面上各点的法向量都可以用公式表达为:

$$\vec{n} = \frac{(1 - \cot\gamma)}{\sqrt{1 + (-\cot\gamma)^2}} \quad (8)$$

设  $A$  对应的折射点  $B$  的坐标为  $(x_1, y_1)$  由阵元  $A$  到折射点  $B$  方向上的单位向量,则  $\vec{v}$  可以用  $A$  和  $B$  的坐标表示为:

$$\vec{v} = \frac{(x_1 - x_0, y_1 - y_0)}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}} \quad (9)$$

同理可以用  $B$  和  $P$  的坐标来表示折射声束的单位向量:

$$\vec{u} = \frac{(x - x_1, y - y_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}} \quad (10)$$

现在用向量表示式(7),即:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{|\vec{v} \times \vec{n}|}{|\vec{u} \times \vec{n}|} \quad (11)$$

联立式(9)~(11)即可获得入射点  $B(x_1, y_1)$  的坐标,则从任意阵元  $A$  到聚焦点  $P$  的飞行时间以及各阵元的延时为:

$$\begin{cases} t_i = l_{AB}/c_1 + l_{BP}/c_2 \\ t_{di} = \max(t_i) - t_i \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $l_{AB} = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}$ ,  $l_{BP} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}$ 。最后利用向量运算求解非线性极值优化问题,以获得相控阵探头每个阵元最小化的延迟时间  $t_{di}$ 。

### 2.2 曲面构件声束路径确定及延时法则计算

曲界面相控阵偏转聚焦原理示意图如图6所示。曲面相比于斜界面的计算难点在于折射点处的单位法向量的确定,平面的单位法向量各处相同,而曲面因折射点的位置变化而改变方向。因此,需要将单位法向量与折射点  $B$  的坐标联系起来,而折射点在曲线方程

$y_1 = \sqrt{(r^2 - x_1^2)} - h - r$  上,故  $\vec{n}$  可以表示为:

$$\vec{n} = \frac{(-x_1, -h - r - y_1)}{\sqrt{(x_1)^2 + (-h - r - y_1)^2}} \quad (13)$$

式中:  $r$  是曲面半径。

在解非线性方程组时使用 MATLAB 中的 fsolve 函数,通过迭代和梯度下降算法来寻找一组初始值,使得非线性方程组的结果接近最小值。而初始值的确定与阵元中心位置、聚焦点位置、坐标系建立方式等有关,本研究对于初始值的选择是依据聚焦点与相控阵探头的相对位置。当聚焦点在探头覆盖范围内时,选择  $(x_i, \sqrt{(r^2 - x_i^2)} - h - r)$  作为初始值;当在探头右侧时,选择  $(0, -h)$  作为初始值;当在探头左侧时,选择  $(x_i - 1, \sqrt{(r^2 - (x_i - 1)^2)} - h -$

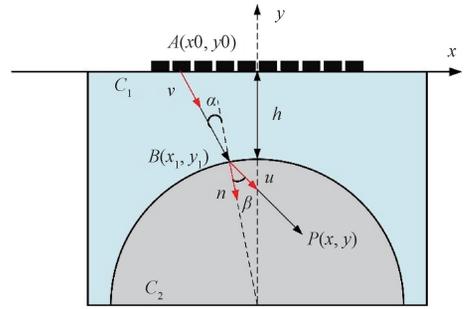


图6 曲界面相控阵偏转聚焦原理

Fig. 6 The deflection focusing principle of a phased array on a curved interface

$r)$  作为初始值。至此曲面相控阵偏转聚焦延迟法则的推导和计算结束,算法流程如图7所示。

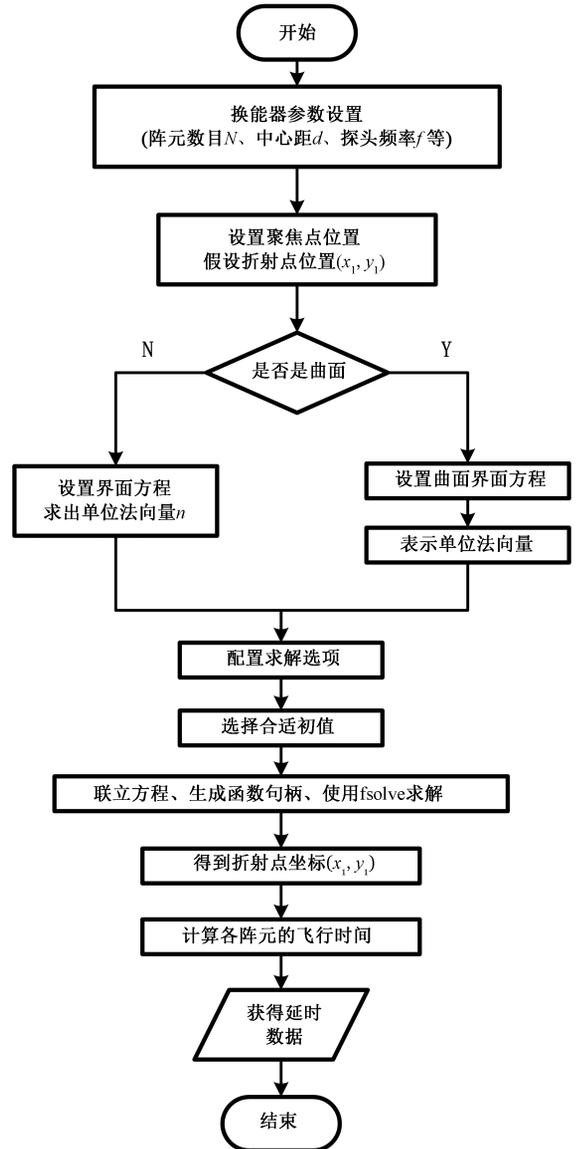


图7 算法流程

Fig. 7 Algorithm flow chart

### 3 仿真验证与结果分析

为了验证本文延时计算方法的正确性以及计算效率优势,首先利用数据处理软件计算各阵元的发射延迟时间,使声束聚焦在指定位置,然后采用 COMSOL 有限元仿真软件模拟线性相控阵声波传输过程,并对其声场进行仿真分析。

#### 3.1 仿真参数设置

以 16 阵元线阵为例,利用 COMSOL 仿真软件进行声学仿真。构建仿真模型时,设置水层到工件表面最短距离为 13.5 mm,圆环外半径为 39 mm,圆环内半径为 25.5 mm,聚焦点在工件的轴线上坐标为  $A(0, -9)$ ,偏转聚焦点在工件内部的坐标为  $B(10, -9)$ 。阵列中心频率 10 MHz,阵列中心距 0.6 mm,阵元宽度 0.54 mm,各阵元编号从左往右依次递增,取水为耦合介质,设定水的声速为 1 480 m/s,工件的声速为 5 920 m/s,假设每个晶片的中心位置为  $x_{0i}$ ,聚焦到点  $A$  的各声束折射点的坐标为  $(x_{1i}, y_{1i})$ ,聚焦到点  $B$  的各声束折射点的坐标为  $(x_{2i}, y_{2i})$ 。

为了验证研究方法在计算效率上的优势,分别用本研究与费马定律方法进行编程,计算参数按照仿真参数设置,由表 1 可知,本研究方法在计算次数上远远小于费马定律算法,且对于轴线聚焦情况本研究方法比传统方法提高了约 71.10% 的计算效率,对于偏转聚焦情况的计算效率提高了约 69.98%。利用本研究算法计算各阵元的声束聚焦到焦点时的各阵元的延时,所有相关计算结果如表 2 所示。

表 1 两种计算方法对比

Table 1 Comparison of two calculation methods

计算方法	费马定律	本文
离散精度/mm	0.01	0.01
轴线聚焦计算次数	3 840	256
偏转聚焦计算次数	16 000	1 488
轴线聚焦耗时/s	0.429	0.124
偏转聚焦耗时/s	0.463	0.139

#### 3.2 仿真验证

##### 1) 轴线聚焦

将表 2 中的聚焦到点  $A$  的延时对应加在各阵元上,使声波同时到达聚焦点位置,仿真结果如图 8 所示,大约 11  $\mu\text{s}$  时,相控阵声场的形状为椭圆形,波阵面为抛物线形,此时声场中能量最强的区域为预设焦点  $A$  附近的位置。为了对比,绘制了相同条件下没有施加延时的瞬态声场,即所有阵元同时激发超声波,仿真结果如图 9 所示,在 11  $\mu\text{s}$  时,声场并未在工件内聚焦且波阵面在工件

内逐渐扩散。

表 2 各折射点横纵坐标和延时

Table 2 Transverse and longitudinal coordinates of each refraction point and time delay

晶片序号	$(x_{1i}, y_{1i})$	聚焦到点 $A$		聚焦到点 $B$	
		的延时/ $\mu\text{s}$	$(x_{2i}, y_{2i})$	的延时/ $\mu\text{s}$	
1	(-4.164, -13.723)	0	(-1.375, -13.524)	0	
2	(-3.627, -13.669)	0.065 8	(-0.951, -13.512)	0.088 9	
3	(-3.082, -13.622)	0.123 4	(-0.528, -13.504)	0.172 9	
4	(-2.531, -13.582)	0.172 3	(-0.104, -13.500)	0.251 9	
5	(-1.975, -13.550)	0.212 1	(0.320, -13.501)	0.326 0	
6	(-1.414, -13.526)	0.242 3	(0.743, -13.507)	0.394 9	
7	(-0.850, -13.509)	0.262 7	(1.164, -13.517)	0.458 8	
8	(-0.284, -13.501)	0.272 9	(1.587, -13.532)	0.517 4	
9	(0.284, -13.501)	0.272 9	(2.008, -13.552)	0.570 7	
10	(0.850, -13.509)	0.262 7	(2.426, -13.576)	0.618 7	
11	(1.414, -13.526)	0.242 3	(2.843, -13.604)	0.661 3	
12	(1.975, -13.550)	0.212 1	(3.257, -13.636)	0.698 3	
13	(2.531, -13.582)	0.172 3	(3.669, -13.673)	0.729 8	
14	(3.082, -13.622)	0.123 4	(4.077, -13.714)	0.755 6	
15	(3.627, -13.669)	0.065 8	(4.483, -13.759)	0.775 7	
16	(4.164, -13.723)	0	(4.884, -13.807)	0.789 9	

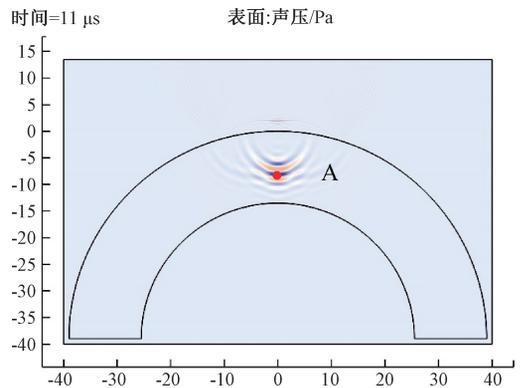


图 8 有延时聚焦瞬态声场分布

Fig. 8 Transient acoustic field distribution with delayed focusing

取施加延时和无延时两种情况下的工件内焦点  $A$  处的声压绘制信号图,如图 10 所示,由图 10 可知 11  $\mu\text{s}$  时,施加延时情况下  $A$  点声压约为 570 Pa,无延时情况下约为 254 Pa,通过式(14)计算可知施加延时比未施加延时条件下,信号增强了约 7.02 dB。

$$dB_{change} = 20\lg(570/254) \quad (14)$$

##### 2) 偏转聚焦

将焦点设置在点  $B$ ,对各个阵元施加表 2 中相应的延时,相控阵偏转聚焦仿真如图 11 所示,可以明显观察到,超声波波束中心向右偏转,且在 11.8  $\mu\text{s}$  左右声波在聚焦点  $B$  位置实现聚焦。提取点  $B$  的声压信号如图 12 所示,约在 11.8  $\mu\text{s}$  时点  $B$  的声压值最大,随后逐渐

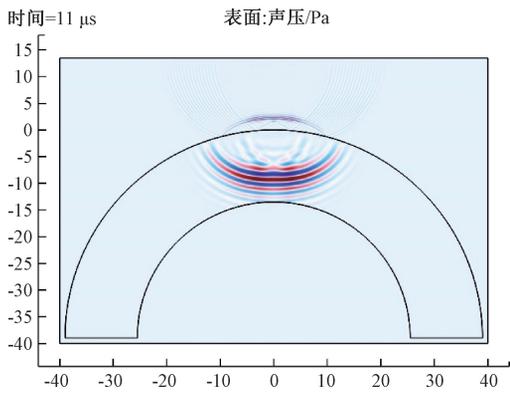


图 9 无延时瞬态声场分布

Fig. 9 Transient acoustic field distribution without time delay

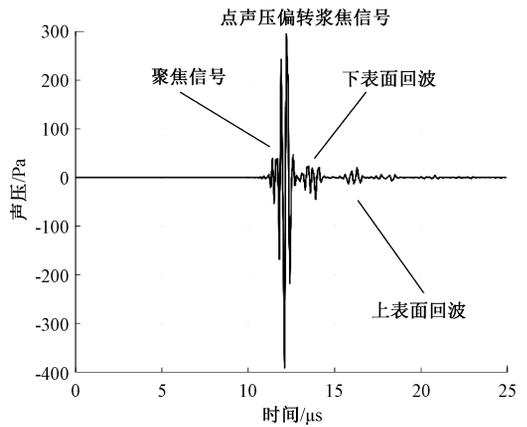


图 12 工件内聚焦点 B 处的声压

Fig. 12 Sound pressure the focus point B within the workpiece

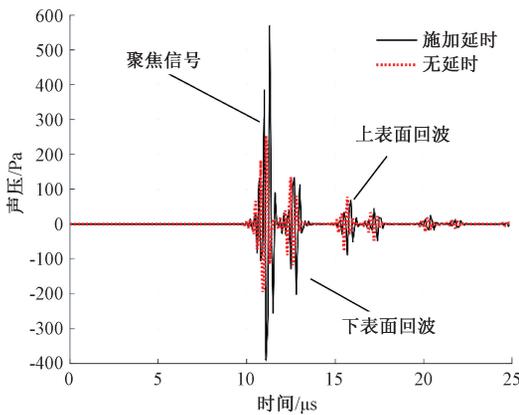


图 10 工件内聚焦点 A 处的声压

Fig. 10 Sound pressure at the focus point A within the workpiece

## 4 实验验证

为了进一步验证本研究延时聚焦方法的有效性,搭建如图 13 所示的水浸超声相控阵实验平台。因为本研究检测的缺陷为  $\Phi 0.3 \text{ mm}$ , 应尽量选择高频超声相控阵探头, 而超声波的分辨率(能够检测到的最小缺陷尺寸)约为  $0.3 \text{ mm}$  故探头的最佳检测波长约为  $0.6 \text{ mm}$ , 通过波长与频率之间的关系可以算得探头的中心频率为  $10 \text{ MHz}$ , 同时要避免栅瓣影响, 根据图 4 选取  $d/\lambda \approx 1$  时最佳, 即选取阵元中心距为  $0.6 \text{ mm}$  的探头。此外阵元数目越多, 主瓣宽度越小, 考虑到延时法则计算时间和成本因素, 本研究采用了 32 阵元探头。相控阵仪器使用的是 Eintik PHASELINK 集成相控阵超声系统。探头搭载在三轴龙门滑台的 Z 轴上, 控制 X、Y 轴移动找到检测结果最好的位置。曲面试样的外径为  $78 \text{ mm}$ , 内径为  $51 \text{ mm}$ , 在其中心轴线上加工一个直径为  $\Phi 0.3 \text{ mm}$ 、深度为  $8 \text{ mm}$  的平底孔缺陷, 缺陷的圆心位置距离圆环外圆  $9 \text{ mm}$ 。利用单通道换能器测量试块的声速约为  $5920 \text{ m/s}$ , 水中的声速约为  $1480 \text{ m/s}$ 。检测时探头位于试块正上方  $18 \text{ mm}$  位置, 如图 14 所示。

将上述所有参数结合本研究计算方法, 计算各声束线下各阵元的聚焦延迟时间, 通过加载计算好的文件, 得到试块的检测结果, 如图 15 所示。图 15(a) 和 (b) 中的 B 扫描结果表明, 与未施加延时的检测结果相比, 施加延时聚焦检测结果的横向分辨率显著提高, 图像变化前后的峰值信噪比 (PSNR) 可以表示为:

$$\begin{cases} PSNR = 10 \times \lg(255^2/MSE) \\ MSE = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $I$  是延时聚焦后的图像的像素值矩阵,  $K$  是未聚焦图像的像素值矩阵, 延时聚焦前后图像的峰值信噪

减小。

通过以上有限元仿真结果表明, 相控阵可以通过声束的聚焦效应增强预设焦点附近的声场, 而且超声波束能够偏转到设定的位置, 并在曲面工件中的聚焦区域内聚焦, 验证了相控阵延时聚焦法则的正确性。

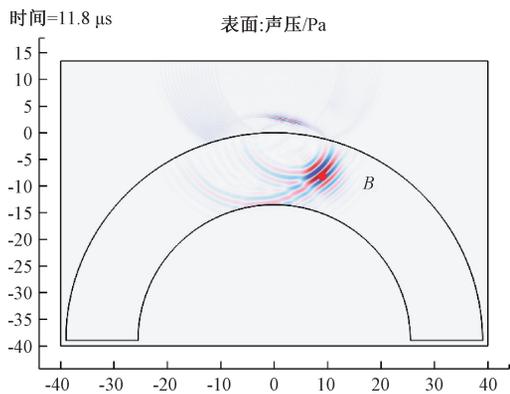


图 11 偏转聚焦瞬态声场分布

Fig. 11 Deflection focusing transient sound field distribution B

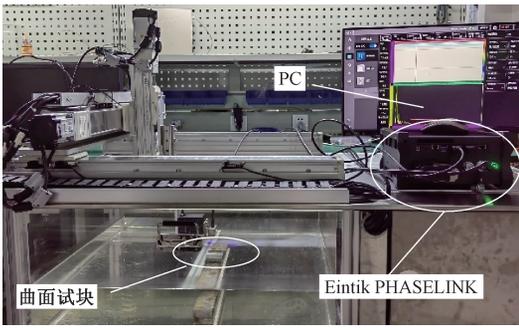


图 13 超声波相控阵测试系统

Fig. 13 Ultrasonic phased array test system

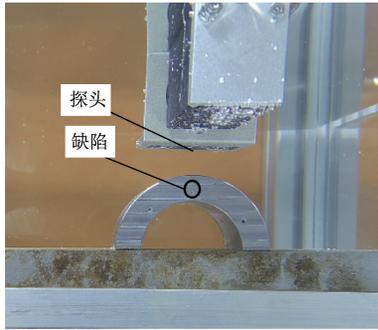
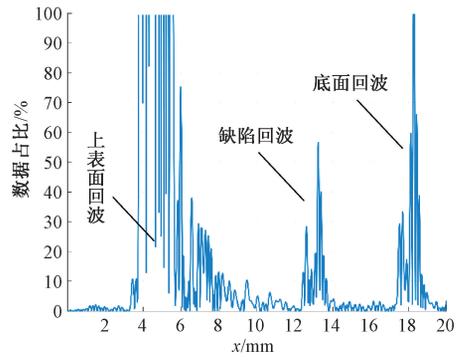
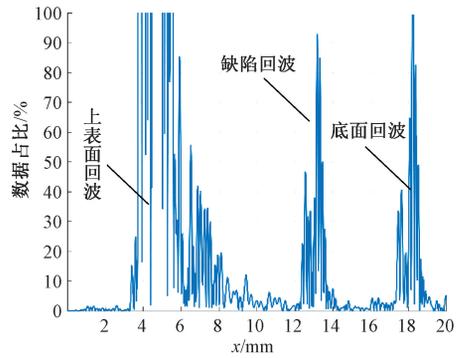


图 14 预埋缺陷的曲面试样检测示意图

Fig. 14 Schematic diagram of testing curved surface samples with embedded defects



(c) 施加延时前A扫信号  
(c) A scan signal before delay is applied

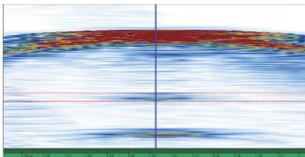


(d) 施加延时后A扫信号  
(d) A scan signal after delay is applied

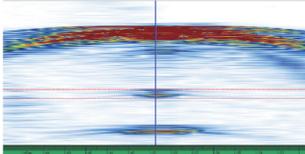
Fig. 15 Test results of curved surface samples before and after applying delay focusing

比  $PSNR = 15.61$  dB。分别从图 15(c) 和 (d) 提取缺陷回波的幅值, 未施加延时的缺陷信号约为满屏信号的 56.62%, 延时后的缺陷信号约为满屏信号的 92.85%, 其中满屏信号对应的幅值为 4 096, 通过式 (14) 计算可知施加延时后信号增强了 4.3 dB。

从上述结果来看, 本研究延时聚焦方法可使超声波束聚焦到预设点处, 且有效提高了图像的峰值信噪比, 提升 B 扫图像的横向分辨率, 改善缺陷检测效果。



(a) 施加延时前B扫描检测结果  
(a) B-scan detection results before applying delay



(b) 施加延时后B扫描检测结果  
(b) After applying delay, B scans the detection results

### 5 结 论

本文针对现有曲面构件延时方法计算量大, 误差高, 耗时长, 只用于表面大曲率半径构件的问题, 提出了一种可用于表面小曲率半径构件的超声相控阵检测延时计算方法, 该方法可用于两层介质的超声相控阵检测延时计算, 可以精确控制相控阵声束在曲面构件中的聚焦和偏转位置, 从而显著提高超声相控阵在曲面构件检测中的精度。本研究通过程序快速计算超声波传播路径的最小值和聚焦延时, 并通过与费马原理的计算结果对比, 验证了该方法在计算效率上的优势。同时本研究通过有限元仿真和实际检测实验均表明延时聚焦方法能够有效提高聚焦点附近的声场能量, 增强了缺陷回波的信噪比。尤其是在水浸实验中, 延时聚焦方法展现了其在曲面构件检测中的实际应用潜力, 验证了本研究提出方法的有效性与可行性。尽管本研究的延时计算方法在提高计算效率和精度方面取得了初步成果, 但仍存在优化空间。未来的研究可以进一步扩展该方法的适用范围, 包括多

层介质、非均匀介质以满足更广泛的工程应用需求。同时,结合人工智能技术进行声场自适应优化和实时计算,也将是提升检测效率和精度的一个重要方向。总的来说,本研究的研究为超声相控阵技术在曲面构件检测中的应用提供了理论依据和实践指导。

## 参考文献

- [ 1 ] 章东, 桂杰, 王晓玲, 等. 等高度聚焦算法的超声相控阵检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2):42-47.  
ZHANG D, GUI J, WANG X L, et al. Phased array ultrasonic detection using equal height focusing algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018,32(2):42-47.
- [ 2 ] 赵志鹏, 戴宁, 周鑫, 等. 复合材料曲面构件缺陷超声三维成像方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7):257-266.  
ZHAO ZH P, DAI N, ZHOU X, et al. A 3D ultrasonic imaging method for defects of composite curved components[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(7):257-266.
- [ 3 ] ZHAO X, WANG ZH B. Steering performance of ultrasonic phased array sensors using acoustic fields under directivity constraint[J]. AIP Advances, 2021, 11(9), DOI:10.1063/5.0061859.
- [ 4 ] 邓江勇, 陈振华, 董德秀, 等. 超声相控阵传感器阵元间串扰源分析及其隔离方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9):132-139.  
DENG J Y, CHEN ZH H, DONG D X, et al. Analysis and isolation method of crosstalk between the elements in ultrasonic phased array transducer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9):132-139.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] 戴宇翔, 阎守国, 张碧星. 固体中线性相控阵列的瞬态聚焦特性[J]. 应用声学, 2022, 41(1):143-150.  
DAI Y X, YAN SH G, ZHANG B X. The transient beam focusing characteristics of linear phased arrays in solid[J]. Journal of Applied Acoustics, 2022,41(1):143-150.
- [ 7 ] 孔惠元, 王鉴, 李仰军, 等. 圆柱类构件超声相控阵聚焦模型[J]. 应用声学, 2024, 43(1):213-222.  
KONG H Y, WANG J, LI Y J, et al. The ultrasonic phased array focusing model of cylindrical component[J]. Journal of Applied Acoustics, 2024,43(1):213-222.
- [ 8 ] WANG ZH, ZHANG CH, LI X H. Research on factors affecting ultrasonic phased array detection imaging quality for curved component [J]. AIP Advances, 2022, 12(6), DOI: 10.1063/5.0090499.
- [ 9 ] ANAND C, DELRUE S, JEONG H, et al. Simulation of ultrasonic beam propagation from phased arrays in anisotropic media using linearly phased multi-Gaussian beams[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 67(1):106-116.
- [ 10 ] 康亚轩, 陈俊超, 龚真珍, 等. 面向非规则界面双层介质超声全聚焦成像[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12):307-315.  
KANG Y X, CHEN J CH, GONG ZH ZH, et al. Ultrasonic total focusing method for double-layer media with irregular interface[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12):307-315.
- [ 11 ] 甘勇. 基于虚拟源的非规则分层介质超声后处理成像[D]. 南昌:南昌航空大学, 2019.  
GAN Y. Ultrasonic post-process imaging for irregular layered media based on virtual source[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.
- [ 12 ] 徐娜, 周正干, 刘卫平, 等. L型构件R区的超声相控阵检测方法[J]. 航空学报, 2013, 34(2):419-425.  
XU N, ZHOU ZH G, LIU W P, et al. Ultrasonic phased array inspection method for the corner of l-shaped components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013,34(2):419-425.
- [ 13 ] 姜学平, 王鹏, 韩庆邦, 等. 带斜楔相控声束偏转聚焦延时特性研究[J]. 应用声学, 2016, 35(3):219-224.  
JIANG X P, WANG P, HAN Q B, et al. Calculations of time delay-laws in phased array focusing ultrasound testing with inclined wedges[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016,35(3):219-224.
- [ 14 ] 周正干, 王俊, 李洋, 等. 多层黏接结构的阵列超声检测评价方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(12):3207-3214.  
ZHOU ZH G, WANG J, LI Y, et al. Ultrasonic array testing and evaluation method of multilayer bonded structures [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023,49(12):3207-3214.
- [ 15 ] LI W T, ZHANG W B, YANG G P. Research on ultrasonic phased array detection algorithm for TA15/Ti2AlNb multi-layer gradient material structure [J]. Applied Acoustics, 2023, 204: 109240.

- [16] ZHENG Y, ZHAO X, SONG S J, et al. Beam generating and sound field modeling of flexible phased arrays for inspecting complex geometric components [J]. *Wave Motion*, 2020, 94: 102494.
- [17] WANG G, YANG L, GENG H, et al. Research on deflection and focusing technology of pipeline annular ultrasonic phased array [J]. *Measurement*, 2023, 223: 113573.
- [18] 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 technique [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(9): 925-934.
- [19] SCHMMER JR L W. Fundamentals of ultrasonic phased arrays[J]. *Modern Physics Letters B*, 2008, 22(11): 917-921.
- [20] 郑浩鑫, 郑智贞, 刘杏娟, 等. 超声相控阵探头指向性优化算法研究[J]. *机械工程与自动化*, 2015(6): 17-18.  
ZHENG H X, ZHENG ZH ZH, LIU X J, et al. Directivity optimization algorithm design of ultrasonic phased array probe [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2015(6): 17-18.

## 作者简介



**周扬帆**, 2022 年于湖北工业大学获得学士学位, 现为湖北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为超声无损检测新技术。

E-mail: 2596258837@qq.com

**Zhou Yangfan** received her B. Sc. degree from Hubei University of Technology in 2022. Now she is a M. Sc. candidate in Hubei University of Technology. Her main research interests include new technology of ultrasonic nondestructive testing.



**涂君**(通信作者), 分别于 2006 年、2009 年和 2014 年于华中科技大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为湖北工业大学教授, 主要研究方向为超声无损检测新技术、检测机器人、检测成像与人工智能识别算法。

E-mail: Juntu@hbut.edu.cn

**Tu Jun** (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2006, 2009 and 2014 respectively. Now he is a professor at Hubei University of Technology. His main research interests include new technology of ultrasonic nondestructive testing, inspection robot, inspection imaging and artificial intelligence recognition algorithm.