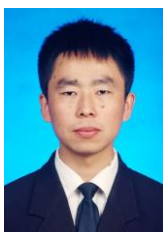


相控阵超声换能器延时法则可视化分析

高世凯 韩 冬 安宏庆 李学雷
(西安航天动力机械有限公司, 西安 710038)



摘要: 针对相控阵超声检测技术延时法则的直观性问题, 采用数学建模方法, 建立并分析研究二维、三维空间中相控阵超声换能器声束延时法则数学模型。同时建模分析凹凸曲面构件中的延时法则。通过可视化处理方法, 得出相控阵超声换能器延时法则的直观量化结果, 为选取相控阵检测技术的最优化工艺参数提供了理论依据。

关键词: 相控阵; 超声换能器; 延时法则; 可视化; 数学模型

Visualization Analysis of Phased Array Ultrasonic Transducer's Delay Rule

Gao Shikai Han Dong An Hongqing Li Xuelei
(Xi'an Aerospace Power Machinery Co., Ltd., Xi'an 710038)

Abstract: For the intuitive problem of phased array ultrasonic detection technology's delay rule, mathematical modeling and visualization processing methods are adopted. The mathematical model of phased array ultrasonic transducer ultrasonic sounder delay law in two-dimensional and three-dimensional space was established and analyzed. At the same time, the time-delay rule modeling of concave-convex surface components was analyzed. Through visual processing, the visual quantification results of phased array ultrasonic transducer delay rule are obtained, which provides a theoretical basis for the selection of suitable process parameters for phased array inspection technology.

Key words: phased array; ultrasound transducer; delay rule; visualization; mathematical model

1 引言

超声相控阵技术的特点是各个阵元晶片可被仪器控制单独激励, 因其独特的优势及优于常规超声检测的技术特点, 近几年在工业无损检测领域越来越受到重视, 并得到了广泛的应用^[1, 2]。相控阵换能器可通过电子控制, 实现声束的偏转和聚焦, 无需更换探头就可以实现局部区域内的多角度全方位扫查。超声检测通常对物体内部的某一局部区域进行原理成像, 为此, 必须对这一局部区域进行声束扫描。现阶段, 声束扫描最佳方式为相控阵法^[3]。超声相控阵检测通过控制换能阵各个阵元延迟及变迹, 改变各个阵元发射或接受超声信号的相位关系, 从而实现超声检测声束的聚焦

偏转, 达到检测目的。压电复合晶片在受到激励信号后产生超声波束, 声束参数均可通过仪器内置软件进行相应的调整。由于相控阵换能器可将各声束在焦点处相干叠加, 使得检测信号的信噪比有了显著提高, 从而更易检测出缺陷^[4]。

研究分析换能阵在不同检测工艺要求下的延时规律, 为不同的检测工艺提供合理的延时法则。常规超声探头因无法实现声束的灵活偏转和动态聚焦, 故在远离声束轴线及与声束成一定角度位置的缺陷容易漏检, 相控阵超声技术以其动态聚焦和声束偏转的特点, 可减少无损检测漏检情况及提高检测效率。利用可视化手段及 MATLAB 软件仿真技术^[5], 研究掌握换能阵延时法则, 合理设置检测工艺参数, 提高相控阵超声

检测技术的效率。

2 相控阵换能器二维声束延时法则模型

2.1 声束的聚焦和偏转

线性超声换能阵施加延时法则后声束偏转示意图如图 1 所示。该换能阵由 N 个阵元构成，阵元中心距为 d ，偏转角度为 θ 。

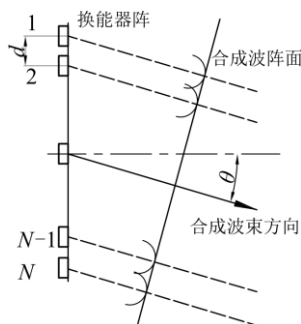


图 1 相控阵声束偏转原理示意图

如果换能阵各阵元受到一致的激励源，则其合成波束与换能阵表面垂直，不发生偏转。若对换能阵各阵元按照一定的法则施加延时 t ，则相邻阵元由于延时法则的存在，不再垂直于换能阵表面，而是按延时法则与中心轴线成一夹角 θ ，从而使声束偏转。

根据图 1 及波合成理论，相邻阵元的延时时间为：

$$t = \frac{d}{c} \sin \theta \quad (1)$$

因此，第一个阵与第 N 个阵元的延迟时间为：

$$t_N = N \times \frac{d}{c} \sin \theta \quad (2)$$

由式 2 可知，通过改变偏转延迟可改变超声波束的偏转角 θ 。对式 (2) 进行成像处理，得到声束偏转延时可视化曲线，如图 2 所示。其中各参数选取： $d=1\text{mm}$ ， $c=5500\text{m/s}$ ， $\theta=45^\circ$ 。

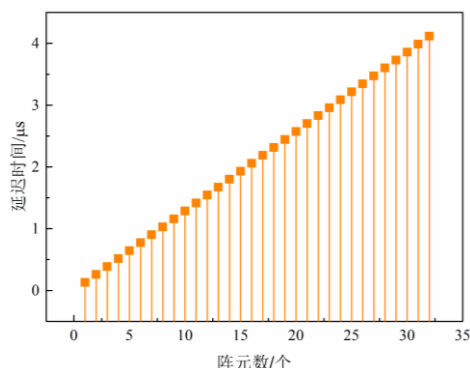


图 2 相控阵声束偏转延时曲线

由图 2 相控阵声束偏转延时曲线可知，换能阵声束在只发生偏转的情况下，延迟时间与阵元个数呈线性关系，因而声束偏转属于最基本的一种换能阵延时法则，通过控制声束偏转延时，可控制换能阵声束偏转角。

相控阵声束聚焦原理如图 3 所示，以换能阵中心阵元为参考阵元，通过声波合成原理，换能器发出的声束在 P 点聚焦。

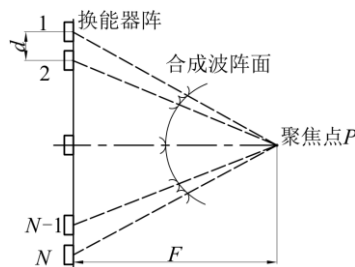


图 3 相控阵声束聚焦原理示意图

换能阵发射聚焦时，采用延时顺序激励阵元的方法^[6]，使换能阵各阵元按设定的延时法则依次被激励，从而在介质内形成新的波阵面，在聚焦点 P 因波的同向叠加而增强，其余区域异向叠加而减弱，甚至消失。以换能阵中心阵元作为参考点，依据几何光学原理，使各阵元发射的声束在焦距为 F 的 P 点聚焦，由图中几何关系可求得各阵元的激励延迟时间为：

$$t_N = \frac{F}{c} \left\{ \left[1 + \left(\frac{S_i}{F} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \quad (3)$$

其中， S_i 为第 i 个阵元到阵列中心的距离， $S_i = [i - (N+1)/2] d$ ， $i=1, 2, \dots, N$ 。

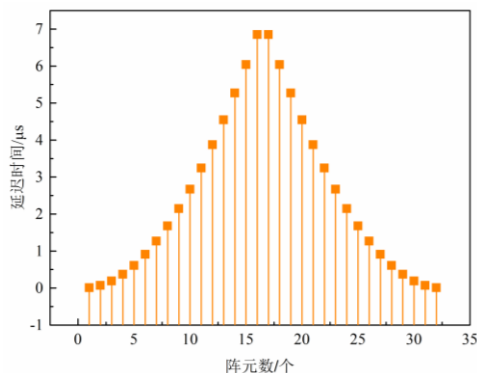


图 4 相控阵声束聚焦延时曲线

可视化处理式 (3)，得到图 4 相控阵声束聚焦延时曲线，其中 $d=1\text{mm}$ ，焦距 $F=30\text{mm}$ ， $c=5500\text{m/s}$ 。由式 3 可知，通过改变发射聚焦延迟 t_N ，可改变焦距 F 。换能阵声束聚焦延时曲线如图 4 所示，由图可知，聚

焦延时时间在中心阵元处出现延时峰值，在两边阵元处为0。随着阵元数目的增加，延时时间呈现先上升再下降的趋势。因此可以通过改变阵元数，控制发射聚焦延时时间，调节动态焦距 F ，从而实现深度方向的聚焦扫查。

2.2 偏转声束的聚焦

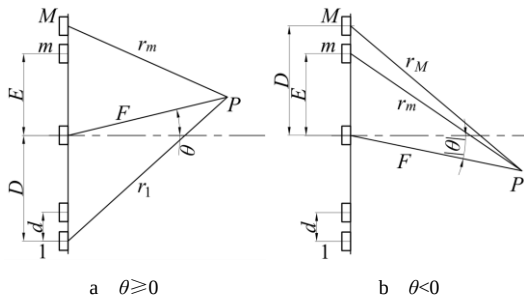


图5 相控阵偏转声束聚焦原理示意图

有许多方法将相控阵换能器阵列中二维声束偏转和聚焦延时法则的模型参数优化设计^[7]。偏转声束的聚焦原理见图 5a、5b， θ 为偏转声束与换能阵中心轴的偏转角度， F 为偏转声束沿偏转方向的焦距。因为偏

$$t_D = \frac{1}{c} [\sqrt{F^2 + D^2 + 2FD\sin\theta} - \sqrt{F^2 + E^2 - 2FE\sin\theta}]$$

根据图 5b 中的几何关系，同理可得， $\theta < 0$ 时：

$$t_D = \frac{1}{c} [\sqrt{F^2 + D^2 + 2FD\sin|\theta|} - \sqrt{F^2 + E^2 - 2FE\sin|\theta|}] \quad (9)$$

由式 (8)、式 (9) 得出相控阵声束偏转聚焦延时曲线，如图 6 所示，曲线为开口向下的半抛物线，在末端阵元处达到偏转聚焦延时峰值，整个过程延时时间呈缓慢增加的趋势，延时法则与仪器实际工作延迟规律一致。

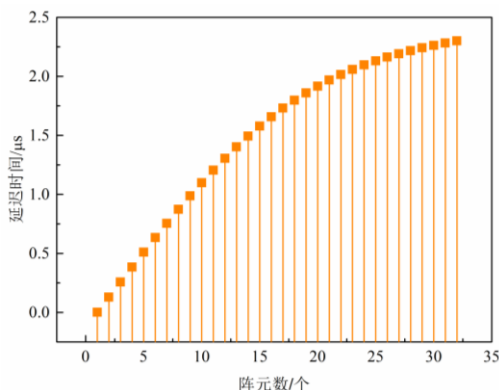


图6 相控阵声束偏转聚焦延时曲线

转角度存在正负两种情况，所以偏转声束聚焦分两种情况。

由图 5a 及合成波束原理，第一个阵元与阵列中心的距离为：

$$D = (M-1)d/2 \quad (4)$$

因此，第 m 个阵元中心的位置可表示为：

$$E = [(M-1) - Me]d \quad (5)$$

式中 $Me = (M-1)/2$ 。

在 $\theta \geq 0$ 时，分析相控阵偏转声束聚焦延时时间与阵元数的关系。如图 5a 所示，为了得到将波束偏转聚焦到点 P 的延时法则，首先计算第 m 个阵元中心传播到点 P 处需要的时间， $t_m = r_m/c$ 。由图 5a 可明显看出，第一个阵元点到聚焦点 P 的距离 r_1 是最大的，可以将延时法则简单的设为：

$$t_D = \frac{r_1}{c} - \frac{r_m}{c} \quad (6)$$

据图 5a 中的几何关系和余弦定理，可得：

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{F^2 + D^2 + 2FD\sin\theta} \\ r_m = \sqrt{F^2 + E^2 - 2FE\sin\theta} \end{cases} \quad (7)$$

延时法则整理为：

$$(8)$$

对比分析图 2、图 4、图 6 发现，三种不同情况下的延时法则各不相同，只发生偏转时的延时法则最基本也最简单，聚焦延时及偏转聚焦延时法则相比之下较复杂，由此可知偏转聚焦扫差可全方位检测定位对缺陷。通过控制相应的延时参数，可以控制检测工艺参数，全方位检测。

3 相控阵换能器三维声束延时法则模型

3.1 三维声束控制方程

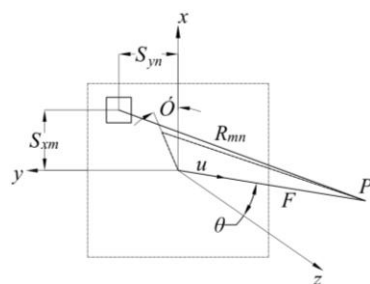


图7 二维阵列波束控制聚焦参数示意图

为二维阵列中的阵元产生的三维空间单位矢量 u 方向上的超声波束控制聚焦参数如图 7 所示。根据球坐标下计算公式,可得出 u 在球坐标系 (θ, ϕ) 下的表达式为:

$$u = \sin \theta \cos \phi S_x + \sin \theta \sin \phi S_y + \cos \theta S_z \quad (10)$$

对阵列面应用线性延时 $\Delta t_{mn} = ux/c$ 可以实现波束方向的控制,分析单个阵元中心的相位,得出延时为:

$$\Delta t_{mn} = (\sin \theta \cos \phi S_{xm} + \sin \theta \sin \phi S_{yn})/c \quad (11)$$

中心位置为:

$$e_{xm} = [(m-1) - \frac{(M-1)}{2}]d_x \quad (12)$$

$$R_{mn} = \sqrt{(F \sin \theta \cos \phi - S_{xm})^2 + (F \sin \theta \sin \phi - S_{yn})^2 + F^2 \cos^2 \theta} \quad (15)$$

通过优化处理,由式(11)可得出恰当的延时法则计算公式

$$\Delta t_{mn}^d = \max \left\{ \frac{R_{mn}}{c} \right\} - \frac{R_{mn}}{c} \quad (16)$$

利用 MATLAB 软件对式(16)进行仿真模拟^[8],得到以下二种换能阵延时法则。 t_d 为 x 方向 M 个阵元, y 方向 N 个阵元阵列的延时矩阵。阵列在 x 和 y 方向的间距分别为 S_{xm} 、 S_{yn} ,波束偏转角为 θ 、 ϕ ,焦距为 F ,介质中的波速为 c 。

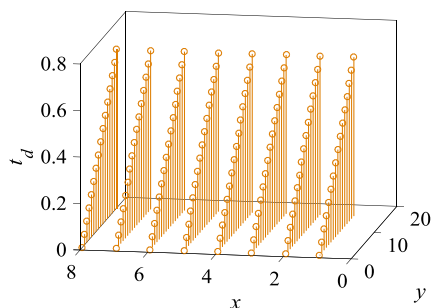


图 8 $M=8$, $N=16$ 个阵元的二维平面阵列平行于 y 轴波束偏转的延时 t_d

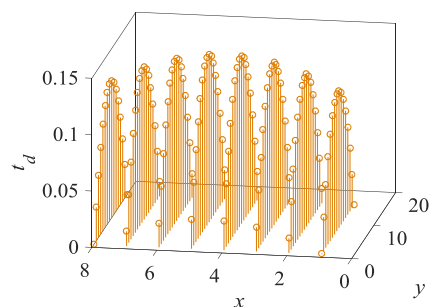


图 9 $M=8$, $N=16$ 个阵元的二维平面阵列沿 z 轴波束偏转的延时 t_d

$$e_{yn} = [(n-1) - \frac{(N-1)}{2}]d_y \quad (13)$$

由于式 11 得到的延时包含正、负值,因此通过增加一个等于最大负值的常数延时来获得合适的延时法则,即:

$$\Delta t_{mn}^d = |\{\Delta t_{mn}\}_{\min}| + \Delta t_{mn} \quad (14)$$

3.2 三维空间中声束的偏转和聚焦

由图 7 可知,换能阵波场在 P 点聚焦,焦距为 F ,偏转角为 θ 、 ϕ ,根据几何关系,从阵元到 P 点的距离可表示为:

如图 8、图 9 所示, $M=8$, $N=16$ 阵元阵列辐射的延时法则例子,其中 $S_{xm}=S_{yn}=0.5\text{mm}$ 。图 8 表示 $\theta=30^\circ$, $\phi=90^\circ$, $F=\text{inf}$ 仅平行于 y 轴偏转的情况。由图 8 可以看出,延时法则是包含于式(11)的线性函数。图 9 考虑了同一阵列 $\theta=\phi=0^\circ$, $F=10\text{mm}$ 的聚焦情况,此时,在 x 和 y 轴方向上的延时法则呈二次方程规律。

对比分析换能阵二维声束和三维声束延时法则,二者的延时法则规律相同。但三维声束延时法则表现形式为矩阵,二维声束延时法则为单一数值。由式(15)可知,通过改变延时时间 t_d ,运用控制变量法,可分别控制参数 θ 、 ϕ 、 F ,进而获得三维声束不同参数下的延时法则。

4 凹曲面构件延时聚焦模型

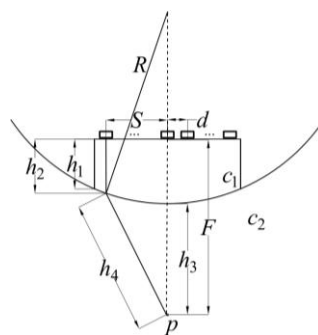


图 10 凹曲面构件延时聚焦模型示意图

由于新技术和新工艺的发展,异形曲面件在实际生产中的应用越来越多。对曲面构件的无损检测一直都是一个技术难点^[9]。现实生产中,相控阵技术用于检测曲面构件的耦合方法有两种:楔块耦合和柔性探头耦合^[10]。建模分析楔块耦合过程的延时法则,并给出

相应的延时计算公式。凹曲面构件延时参数模型示意图如图 10 所示。

由图可知激励阵元到中心轴线水平距离 S 与阵元间距 d 的关系为:

$$S = \frac{1}{2}(n-1)d \quad (17)$$

式中: n 为第 n 个阵元, 由图 10 几何关系可得到第 n 个激励阵元相对于中心轴线的延迟时间 t_n 为:

$$t_n = \frac{\sqrt{R^2 - S^2} - R}{c_1} + \frac{\sqrt{(h_3 + R - \sqrt{R^2 - S^2})^2 + [\frac{1}{2}(n-1)d]^2} - h_3}{c_2} + t_0 \quad (19)$$

其中 t_0 为一足够大的时间常数, 以避免 t_n 出现负的延迟时间。

对式 (19) 进行可视化处理, 选取参数下: $d=1\text{mm}$, $h_2=10\text{mm}$, $h_3=15\text{mm}$, $R=40\text{mm}$, $c_1=1500\text{m/s}$, $c_2=5500\text{m/s}$ 。得到如图 11 所示的凹曲面声束聚焦延时曲线。

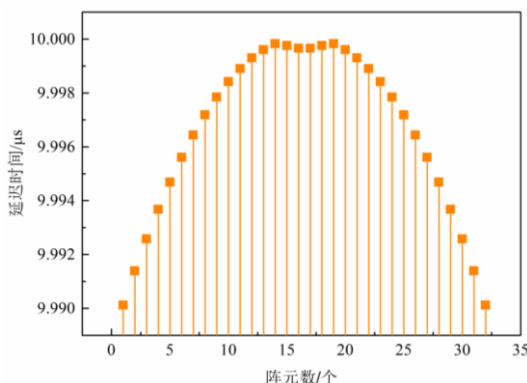


图 11 凹曲面相控阵声束聚焦延时曲线

分析图 11 可知, 在上述模拟参数条件下, 凹曲面聚焦延时法则不同于平面聚焦延时法则。凹曲面延时曲线在中心阵元两侧存在一个缓冲带, 延时峰值在此缓冲区域, 此区域内聚焦延时变化不明显, 中心阵元左侧呈先增加达到峰值后缓慢减小到中心阵元处的变化趋势, 中心阵元两侧变化趋势对称。

5 结束语

研究分析相控阵换能器二维、三维声束延时法则, 掌握了相控阵换能器的延时机理, 得到以下两点结论。

a. 二维声束不同情况下延时法则各不相同, 只发生偏转时的延时法则最基本也最简单, 聚焦延时及偏转聚焦延时法则相比之下较复杂。通过改变延时参数,

$$t_n = \frac{h_1 - h_2}{c_1} + \frac{h_4 - h_3}{c_2} + t_0 \quad (18)$$

其中: $h_1 = h_2 - (R - (R^2 - S^2)^{1/2})$, h_2 为凸型楔块弧面部分最凸点到楔块表面的距离; h_3 为聚焦点深度即缺陷深度; h_4 为折射点到聚焦点的距离; F 为折射点到聚焦点距离; c_1 、 c_2 分别表示声束在楔块和工件中的传播速度。

结合式 (17) 和式 (18), 可得到凹曲面构件延时法则 t_n 计算公式:

可以达到对偏转角和聚焦点的控制, 从而实现声束偏转和动态聚焦。

b. 三维声束延时法则, 计算参数较多, 因而较二维延时法则复杂, 但二者规律相同。运用控制变量法, 通过控制不同参数, 可获得三维声束不同参数下的延时法则。通过可视化处理, 得到相控阵超声换能器延时法则的直观量化结果, 为进一步优化工艺参数提供理论依据。

参考文献

- 1 Rao R T. Microelectronics packaging handbook[M]. New York: McGraw-Hill Publisher, 2001
- 2 Long Zhili, Wu Yunxin, Han Lei, et al. Dynamics of ultrasonic transducer system in thermionic flip chip bonding[J]. IEEE Trans on Components and Packaging Technologies, 2009(2): 261~267
- 3 杨平. 二维阵列相控阵超声三维成像技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2006
- 4 高鹏, 李法新. 非线性超声相控阵无损检测系统及实验研究[J]. 实验力学, 2014(1): 1~11
- 5 Jensen J A. Simulation of advanced ultrasound systems using field II [C]. In Proceedings of 2004 IEEE International Symposium on Biomedical Engineering, 2004
- 6 Smith S W, Pavy H G, Ramm O T. High-speed ultrasound volumetric imaging system. I: Transducer design and beam steering[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 1992, 38(2): 100~108
- 7 Weston M, Mudge P, Davis C, et al. Time-efficient auto-focusing algorithms for ultrasonic inspection of dual-layered media using full matrix capture[J]. NDT&E Int, 2012(47): 43~50
- 8 Dziejewicz J, Gachagan A. Computationally efficient solution of snell's law of refraction[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2013(6): 1256~1259
- 9 张元亮, 张洪潮, 赵嘉旭, 等. 高端机械装备再制造无损检测综述[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 80~90
- 10 李衍. 柔性相控阵换能器用于形状不规则工件的超声检测[J]. 无损探伤, 2013(5): 1~5