

# 基于等声程聚焦算法的超声相控阵检测技术

陈伟, 林丹源, 杨贵德, 詹红庆, 陈建华

(广东省超声电子重点工程技术研究开发中心, 汕头 515041)

**摘要:** 超声相控阵技术通过对超声阵列换能器各阵元进行相位控制, 能获得灵活可控的合成波束, 进行动态聚焦、成像检测, 能够提高检测灵敏度、分辨力和信噪比。在研究超声相控阵换能器声场的偏转和聚焦特性基础上, 基于 ASTM 推荐试块与试验标准 E 2491-06, 设计了等声程聚焦模型, 并给出了扇形偏转非聚焦以及扇形偏转等声程聚焦的检测成像结果。试验结果表明, 等声程聚焦算法有效地检出了材料中的缺陷, 具有很好的分辨率和信噪比, 能够比较真实地反映材料内部缺陷的相对位置和大小。

**关键词:** 超声相控阵; 相位控制; 合成波束; 扇形偏转; 等声程聚焦

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2011)10-0073-04

## A New Defect Detection Method of Ultrasonic Phased Array Based on Constant Sound Path Focusing Algorithm

CHEN Wei, LIN Dan-Yuan, YANG Gui-De, ZHAN Hong-Qing, CHEN Jian-Hua

(Key Engineering Technology Research and Development Center of Guangdong Province Ultrasonic Electronics, Shantou 515041, China)

**Abstract:** By the control of element phase of the ultrasonic transducer array, flexible and controllable synthesis beam can be obtained to implement dynamic focusing and imaging detection. Higher detection sensitivity, resolution and SNR will be achieved. On the basis of deflection and focusing properties research of the ultrasonic array transducer sound field, the constant sound path focusing model is designed based on ASTM recommended test block and the E 2491-06 experimental standard, and the imaging detection results of sectorial scan non-focus method and sectorial scan constant sound path focusing method are provided. Experimental results show that the constant sound path focusing algorithm can effectively detect the defects of the material. Ideal resolution and SNR are achieved to clearly reflect the relative position and the size of the defects in the material.

**Keywords:** Ultrasonic phased array; Phase control; Synthetic beam; Sectorial scan; Constant sound path focus

近年来国外的相控阵技术发展迅速, 在医学诊断和工业检测方面的研究非常活跃。一些公司如 R/D TECH、SIMENS 及 IMASONIC 还推出了商品化相控阵超声工业检测系统<sup>[1]</sup>。而在国内, 超声相控阵技术上的研究应用尚处于起步阶段, 主要集中于医疗领域, 在工业检测方面还非常落后, 主要的设备都依赖于进口, 研究远远落后于应用。鉴于超

声相控阵技术在国际上研究非常活跃, 而国内在此方面的相关研究还很薄弱的局面, 现阶段开展相控阵超声检测技术的研究有着非常重大的意义<sup>[2]</sup>。

超声相控阵换能器由多个相互独立的压电晶片组成阵列, 按一定的规则和时序用电子系统控制激发各个晶片单元, 来调整声束的偏转、焦点的位置和聚焦的方向<sup>[3]</sup>。对于外形复杂, 具有不规则曲面的被检对象, 传统的超声检测非常困难。在单探头的情况下, 发射的超声波束的方向无法控制, 常常遇到界面的反射, 需要改变探头的位置方向, 定位困难<sup>[4]</sup>。如果采用相控阵超声, 可以灵活地改变波束

收稿日期: 2011-01-26

作者简介: 陈伟(1962—), 男, 工程师, 汕头超声电子股份有限公司仪器分公司总经理兼技术开发中心技术总监, 主要从事超声模拟电路设计及信号处理方面的研究。

传播的方向,调节焦点的深度和位置,在不移动或者少移动探头的前提下,方便地对复杂几何外形的工件进行扫查检测<sup>[5]</sup>。

笔者通过数学模型的建立,计算阵元触发延时,精确地控制声束的偏转和聚焦,实现了工件缺陷的高效检出率。首先,建立等声程聚焦数学模型,在此模型基础上,准确计算声束要实现一系列偏转角度以及聚焦位置,各阵元需要提供的激发延时时间。以计算出的延时时间,顺序激发各个阵元,达到了良好的聚焦效果<sup>[6]</sup>。试验结果表明,通过等声程聚焦算法,声束实现了精确的偏转和聚焦,有效地检测出了工件内部扇形区域的一系列缺陷。

## 1 试块及检测系统

试验采用 ASTM 推荐试块,材质为 20 号钢,工件侧面制作了一系列横通孔。检测装置采用油超仪器公司生产的 CTS-2108 型相控阵仪器和相控阵探头。该系统能够提供 1ns 的延时精度以精确控制声束的偏转和聚焦。相控阵探头参数为:5 MHz, 64 阵元线阵,阵元间距 0.65 mm,阵元宽度 0.55 mm,阵元长度 12 mm。探头与工件之间采用机油耦合。通过等声程聚焦算法,进行缺陷检测。



图1 相控阵检测试块

## 2 声束的偏转和聚焦

以相控阵探头的第一阵元中心作为坐标原点。假设阵元间距  $d$ , 声速  $v$ , 各阵元中心坐标位置  $(x_i, 0)$ 。声束偏转  $\alpha$  角度所需阵元延时为:

$$\Delta t = d \cdot \frac{\sin \alpha}{v} \quad (1)$$

声束聚焦于  $(x_0, y_0)$  点, 各阵元声程时间为:

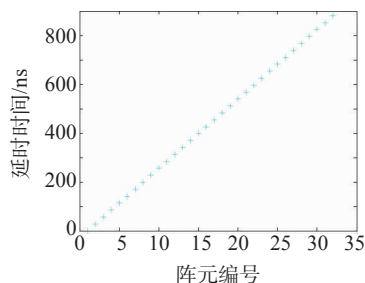
$$t(i) = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + y_0^2}}{v} \quad (2)$$

所需阵元延时为:

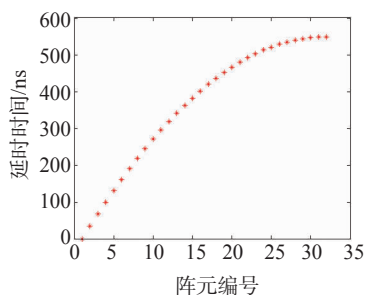
$$\Delta t = \max[t] - t(i) \quad (3)$$

在试验系统内,选取阵元组孔径为 32。实现声

束偏转  $15^\circ$ , 各阵元延时关系曲线如图 2(a) 所示; 实现声束聚焦到 (20, 60) 点, 各阵元延时关系曲线如图 2(b) 所示。



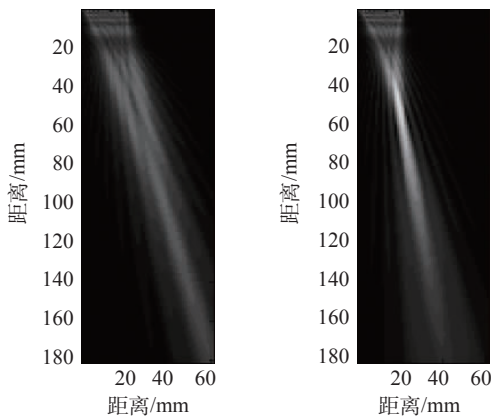
(a) 声束偏转阵元延时时间



(b) 声束聚焦阵元延时时间

图2 声束偏转和聚焦阵元延时时间曲线

图 3(a) 和 (b) 分别为按照上述延时时间计算出的偏转声场以及聚焦声场。由模拟声场可以看出, 通过上面计算得到的延时时间去依次激发阵元, 获得了理想的偏转以及聚焦声束, 在焦点附近声波同相叠加, 声波能量明显增强。



(a) 偏转声场

(b) 聚焦声场

图3 声场的偏转和聚焦

声波的传播及偏转将会出现声衰减效应, 有必要引入常规的深度增益补偿 DAC 以及角度增益补偿 AGC。角度增益补偿系数的计算如下:

$$\text{coeff}(i) = \frac{\sin\left(k \cdot a \cdot \frac{\sin\theta_{\min}}{2}\right) / \sin\theta_{\min}}{\sin\left(k \cdot a \cdot \frac{\sin\theta_i}{2}\right) / \sin\theta_i} \quad (4)$$

式中  $k$  为波数;  $a$  为相控阵探头阵元宽度;  $\theta_{\min}$  为起始扫描线对应的角度;  $\theta_i$  为第  $i$  条扫描线对应的偏转角度, 其中  $\theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max}$ ,  $\text{coeff}(i)$  为计算出的角度增益系数。

### 3 等声程聚焦算法和扇形偏转成像算法

针对 ASTM 推荐试块, 以阵元面为参考位置, 设计了等声程聚焦模型, 并根据模型给出了等声程聚焦算法。聚焦模型如图 4 所示。

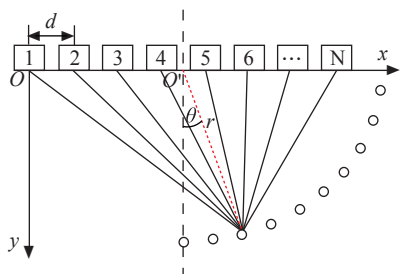


图4 等声程聚焦模型

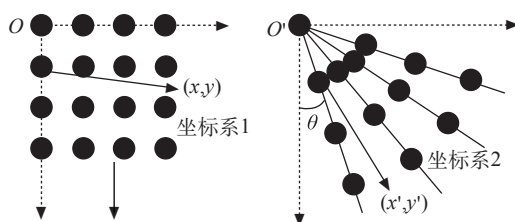
以第一阵元中心  $O$  为坐标原点, 阵元面为  $x$  方向, 垂直阵元面为  $y$  方向。阵元间距  $d$ , 阵元组孔径为  $N$ 。阵元组中心位置  $O'$  作为中心声束偏转轴点。控制阵元组依次聚焦于半径  $r$  的圆弧面上。

如图 4 所示, 假设当声束聚焦到某个横通孔时, 聚焦半径为  $r$ , 主声束偏转角度为  $\theta$ 。  $O$  点坐标  $(0, 0)$ ,  $O'$  点坐标  $((N-1) \cdot d/2, 0)$ 。孔径内各个阵元中心坐标  $(x_i, y_i)$  表示为  $((i-1) \cdot d, 0)$ , 其中  $i=1, 2, 3, \dots, N$ 。圆弧面上各焦点  $F$  坐标  $(F_x, F_y)$  表示为  $(r \cdot \sin\theta + (N-1) \cdot d/2, r \cdot \cos\theta)$ 。各个阵元发出的声波, 在声速为  $v$  的工件中传播时, 到达焦点  $F$  的声程时间分别为:

$$t(i) = \frac{\sqrt{(F_x - x_i)^2 + (F_y - y_i)^2}}{v} \quad (5)$$

式中偏转角度  $\theta$  为用户自定义参数, 可以表示为  $\theta = \theta_{\min} : \Delta\theta : \theta_{\max}$ ,  $\Delta\theta$  为偏转角度步进。  $i$  为阵元编号, 表示为  $i=1 : 1 : N$ 。计算出各阵元到达焦点的声程时间后, 依据式(2), 可以计算出各阵元聚焦所需延时时间。

如图 5 所示, 假设坐标系 1 中数据矩阵的每一列对应于每一条 A 形波原始数据, 且每一条 A 形波即每一列数据都对应于一个角度参数  $\theta$ 。在坐标系 1 中坐标为  $(x, y)$  的数据点映射到坐标系 2 之后坐



(a) 坐标系 1

(b) 坐标系 2

图5 扇形成像坐标系映射

标变化为  $(x', y')$ 。其映射关系为:

$$x' = \text{int}(x \cdot \cos\theta) \quad (6)$$

$$y' = \text{int}(y \cdot \sin\theta) \quad (7)$$

在上述扇形图像偏转初成像算法的基础上, 为了使检测结果能够更加细致地显示被检工件的内部情况, 设计了扇形图像的径向插值算法:

$$x'' = \text{int}(x \cdot \cos\theta') \quad (8)$$

$$y'' = \text{int}(y \cdot \sin\theta') \quad (9)$$

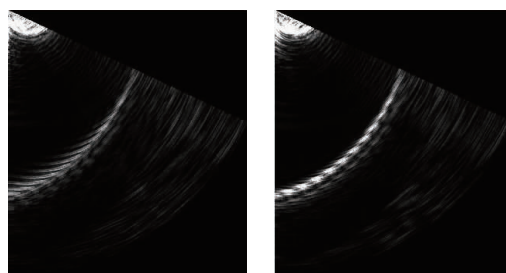
当  $\theta - \frac{\Delta\theta}{2} \leq \theta' \leq \theta + \frac{\Delta\theta}{2}$  时

$$\text{img}(x'', y'') = \text{img}(x', y') \quad (10)$$

式中  $(x'', y'')$  为插值数据的坐标位置;  $\theta'$  为插值数据所处的径向角度。

### 4 检测结果

下面是基于等声程聚焦算法, 对 ASTM 推荐试块 (如图 1 所示的工件) 进行实时纵波检测所形成的扇形图像显示。如图 6 所示, 图 6(a) 为扇形非聚焦扫描图像, 图 6(b) 为扇形等声程聚焦扫描图像。



(a) 非聚焦

(b) 等声程聚焦

图6 扇形偏转扫描图像

将图 6 中所显示的扇形图与图 1 相控阵检测系统中被检 ASTM 推荐试块的实际结构进行对比, 扫描区域是一系列位于半径 50 mm 的弧面上的  $\phi 2$  mm 横通孔。图 6(a) 中, 采用  $0 \sim 65^\circ$  的非聚焦偏转扫描对横通孔进行检测, 可见, 横通孔部位总体轮廓可以检测出来, 但很难分辨出各个独立的通孔, 且每个通孔的形状和尺寸的显示也与实际不相符; 图

6(b)采用  $0\sim 65^\circ$  的等声程偏转聚焦扫查对横通孔进行检测,可见,各个横通孔清晰可辨,在不移动探头的前提下, $0\sim 65^\circ$  的扫查范围内,检测到了 11 个横通孔,通孔形状基本保持下来,且相对于图 6(a)的非聚焦情况,横通孔的缺陷回波信号的信噪比有明显的提高。

## 5 结论

(1) 根据试验系统的 64 阵元相控阵探头参数,选取孔径 32 阵元,计算出阵元延时时间,模拟激发阵元,产生的合成偏转聚焦声场与目标偏转聚焦所要达到的声束偏转角度,聚焦点位置相一致。

(2) 针对 ASTM 推荐试块,建立了超声相控阵纵波检测的等声程聚焦模型,提出了基于等声程聚焦模型的相控阵纵波检测的聚焦算法,实现了超声相控阵的动态偏转聚焦检测并给出了扇形偏转成像算法。

(3) 将扇形偏转扫查和扇形偏转聚焦扫查方法进行对比试验,验证了等声程聚焦算法检测工件内部缺陷的高效性以及进行动态聚焦的必要性。

(4) 进行相控阵检测,系统本身必须能够提供精确细致的延时精度,以满足声束偏转聚焦对延时精度的需求;相控阵探头各个阵元的材料以及加工特性要保持均匀一致,以保证同等条件下产生的声

束,在移位同相叠加的过程中能够可控;聚焦算法要有合理的数学理论作为依据,以科学的数学模型为参考。综上所述,对于相控阵技术来说,仪器、探头、聚焦法则相互配合,才能实现比较理想的检测效果。

## 参考文献:

- [1] 周琦,刘方军,李志军,等. 超声相控阵成像技术与应用[J]. 兵器材料科学与工程,2002,25(3):34-37.
- [2] 赵霞,王召巴. 超声相控阵声束时空控制仿真研究[J]. 科技情报开发与经济,2006,16(6):156-157.
- [3] Jerome pogue, Andres Garcia, Jesus Vazquez, et al. Phased array technology concepts, probes and applications[C]. 8<sup>th</sup> European Vongress on NDT. Barcelona, Spain: 2002.
- [4] Kramb V A, Olding R B, Sebastian J R. Considerations for using phased array ultrasonics in a fully automated inspection system[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation,2004(23):817-825.
- [5] 黄晶,张志刚,阙沛文. 线形宽带超声相控阵换能器的声场分析[J]. 压电与声光,2004,26(6):506-509.
- [6] Huang J, Que P W, Jin J H. A parametric study of beam steering for ultrasonic linear phased array transducer[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2004,40(4):254-259.



敬请关注

## 最新 2011 版系列丛书《无损检测标准汇编》 现已出版 欢迎订阅

(1) 无损检测标准汇编 表面检测方法(上),  
价格:158.00 元

(2) 无损检测标准汇编 表面检测方法(下),  
价格:75.00 元

(3) 无损检测标准汇编 射线检测方法(上),  
价格:220.00 元

(4) 无损检测标准汇编 射线检测方法(下),  
价格:180.00 元

(5) 无损检测标准汇编 超声检测方法(上),  
价格:215.00 元

(6) 无损检测标准汇编 超声检测方法(下),  
价格:220.00 元

(7) 无损检测标准汇编 其他检测方法,价格:  
230.00 元

(8) GB/T 228.1—2010 金属材料 拉伸试  
验 第一部分:室温试验方法,价格:60.00 元

需订阅者请与上海材料研究所科技期刊发行部  
联系。联系人:王 敏;联系电话:021-65527634;邮  
箱:wm@mat-test.com。

(科技期刊发行部)