

超声相控阵声束控制特性分析

万 敏¹, 王海涛¹, 程继隆¹, 沈立军¹, 田贵云^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016; 2. 纽卡斯尔大学, 纽卡斯尔 NEI TRU)

摘 要: 超声相控阵技术通过对超声阵列换能器中各阵元进行相位控制, 获得灵活可控的合成波束, 从而实现对整个检测对象的扫描。它具有可进行动态聚焦、可成像检测、可检测复杂形状物体等一些优点, 近年来正成为国际无损检测领域的研究热点, 并已经在医学和工业领域得到应用。在研究超声相控阵技术原理的基础上, 建立了数字声束模型来分析线阵换能器参数对声束控制的影响, 并用计算机软件进行仿真分析声束的偏转聚焦。通过这种方法, 可以很清楚的了解超声相控阵声束控制特性。

关键词: 超声相控阵; 声束; 换能器; 特性研究

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)11-0859-03

The Analysis on the Features of The Propagating Waves Control of the Ultrasonic Phased Array

WAN Min¹, WANG Hai-Tao¹, CHENG Ji-Long¹, SHEN Li-Jun¹, TIAN Gui-Yun^{1,2}

(1. School of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronomy, Nanjing 210016, China;

2. Newcastle University Upon Tyne, Newcastle NEI TRU, UK)

Abstract: Ultrasonic phased array technique can achieve flexible, controllable synthesized ultrasound beam by exciting each element of an ultrasonic array transducer with independent phased delay to detect the whole part of component. Phased array ultrasonic can accomplish dynamic focusing, obtain visual image, inspect component of complex geometry. Recently, the ultrasonic phased array technique has been highly recognized in NDT research domain and it has been used successfully in medical and industry application. In this thesis, a numerical simulation model is established to investigate the influences of parameters of linear phased array transducers on beam steering based on the principle of ultrasonic phased array which will be basic results for UPA. Using this approach, we can clearly know the features of controlling synthesized ultrasound beam of ultrasonic phased array.

Keywords: Ultrasonic phased array; Beam of the waves; Transducer; Research on the features

超声相控阵已经有几十年的发展历史, 与传统的超声检测相比, 其显著优点是可以灵活有效控制声束指向及声压分布; 其焦点位置和焦点大小在一定范围内连续、动态可调; 相位控制可以快速偏转或移动声束从而实现扫描, 而无需移动探头; 由于各声束信号在焦点处叠加, 所以信号的信噪比有了显著提高。随着社会的进步, 检测工件的形状也越来越

复杂, 常规超声检查已无法满足某些检测要求, 超声相控阵技术可以完成常规超声无法完成的检测工作, 且有许多成功的应用案例, 也有许多学者对超声相控阵进行研究, 包括聚焦、偏转方面的研究^[1-2]。

线性相控换能器是超声相控阵系统的关键部件。要有效控制动态聚焦、动态变迹、波束行成等效果, 需要精心设计高性能的相控换能器; 换能器的参数包括: 阵列数量、阵元宽度、阵元间距等, 每个参数对声束控制都有重要的影响。通过对各个参数的选取、仿真来分析不同参数对声束聚焦偏转的影响, 为国产化超声相控阵仪器的研制、开发提供必要的技术支持。

收稿日期: 2009-08-01

基金项目: 江苏省科技厅国际合作项目(BZ2009051); 江苏省科技工业支撑计划(SBE200900338)

作者简介: 万 敏(1983—), 女, 助理工程师, 硕士, 从事自动化测控和自动化研究。

1 超声相控阵声束形成原理

相控阵是由多个压电晶片按一定的分布排列,然后逐次按预先规定的延迟时间激发各个晶片,可实现声波的波束扫描、偏转和聚焦^[3]。通常使用的是一维线性阵列探头,压电晶片呈直线状排列,聚焦声场为片状,能得到缺陷的二维图像,在工业中得到广泛的应用^[4],以线性阵列分析。

如图1所示,线性阵列的阵元数为 N ,阵元间距为 d ,中心阵元到焦点的距离为 l_f ,偏转角度为 θ ,第 n 个阵元到中心阵元的距离为 D ,则^[5]:

$$D = \frac{2n - N + 1}{2}d \quad (1)$$

$$l = \sqrt{l_f^2 + D^2} - 2l_f D \sin\theta \quad (2)$$

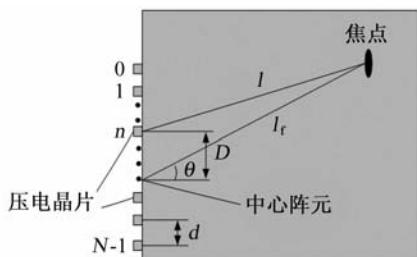


图1 相控阵超声换能器及偏转聚焦原理图

各个阵元晶片的激发延迟时间不同可以产生不同指向性的超声波束,例如,产生偏转角度为 θ 的声束,则各阵元的延迟时间为 $T[n]$:

$$T[n] = \frac{l_f - \sqrt{l_f^2 + D^2} - 2l_f D \sin\theta}{C} + t_0 \quad (3)$$

式中: t_0 是为了避免出现负延时引入的足够大的常数; C 为声速。

实际上,线性换能器的参数,包括阵元数、阵元间距、阵元宽度、频率和频带等,阵元数量一般取 2^n ,根据相关资料,可知,增加阵元数或增加阵元间距都可以改善声束指向性,其中,阵元间距不能大于超声波长的一半,否则会出现栅瓣。

2 相控阵超声线性探头的声场分析

相控阵换能器是由很多个阵元按一定方式排列的阵列,线阵就是按线性排列的阵元列。每个阵元可以看成是无限多个简单线元的组合,简单线元在高压激励下径向振动而产生柱面波,阵元产生的波束就是这些无限多个柱面波的叠加。

利用波动方程可以求得简单线元在离线元距离为 r 处的声压为^[6]:

$$p(r, t) = \left(\frac{p_0}{r}\right)^{1/2} [j(\omega t - kr)] \quad (4)$$

式中: p_0 为线元在单位距离上产生的声压; k 为波数; ω 为角频率。

利用简单线元声压公式通过对阵元宽度积分,可以计算阵元在 $p(r, \theta)$ 处的声压^[6]:

$$p(r, \theta, t) = \left(\frac{p_0}{r}\right)^{1/2} \frac{\sin\left(\frac{ka \sin\theta}{2}\right)}{\frac{ka \sin\theta}{2}} \cdot \exp\left(-j \frac{ka \sin\theta}{2}\right) \exp[j(\omega t - kr)] \quad (5)$$

式中 a 为阵元宽度。

根据惠更斯原理,相控阵线阵在 $p(r, \theta)$ 处的声压可以通过各个阵元在该处的声压叠加得到^[6]:

$$p(r, \theta, t) \approx \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{p_0}{r}\right)^{1/2} \frac{\sin\left(\frac{ka \sin\theta}{2}\right)}{\frac{ka \sin\theta}{2}} \exp\left(-j \frac{ka \sin\theta}{2}\right) \cdot \exp[j(\omega(t - \Delta t_n) - k(r - nd \sin\theta))] \quad (6)$$

式中: Δt_n 为第 n 个阵元延迟时间。

2.1 阵元数

图2是阵元数分别为 $N=8, 16, 32$ 和 64 的超声相控阵声束指向性图,其它参数为: $C=6\,000\text{ m/s}$; $f=3\text{ MHz}$; $a=1\text{ mm}$; $d=2\text{ mm}$; $\theta=30^\circ$ 。可以看到随着阵元数 N 的增加,声束变窄;同时,在声束主瓣两边出现一些旁瓣,实际上旁瓣不能完全消除,旁瓣随着阵元数的增加而减少;当 $N=8$ 时,主瓣的宽度为 10° ,主瓣宽度是取归一化声压 >0.5 (-6 dB)之间的差。当 $N=16, 32$ 和 64 时,主瓣宽度分别为 $5.6^\circ, 4.2^\circ$ 和 2° 。

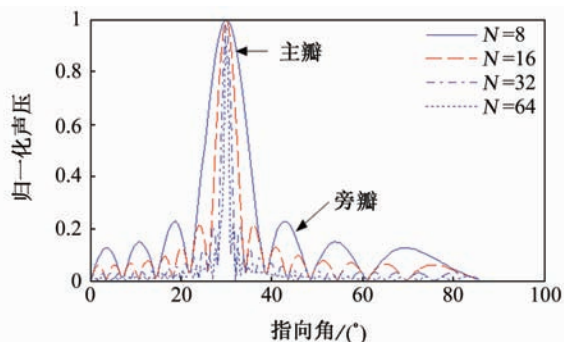


图2 不同阵元数的仿真图

图3是不同阵元表的垂直聚焦仿真图,很明显, $N=32$ 的声束指向性比 $N=8$ 时要好,声束宽度窄。图4是不同阵元数的声束偏转聚焦仿真图。从图3和4中,可以看到增加阵元数可以提高超声相控阵

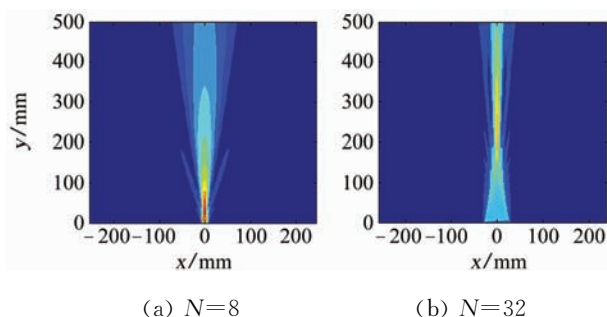


图3 不同阵元数的声束垂直聚焦仿真图

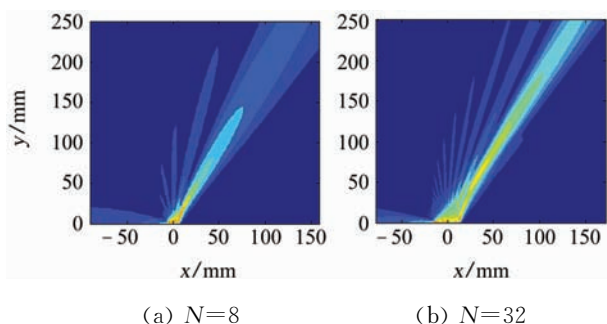


图4 不同阵元数的声束偏转聚焦仿真图

的聚焦性能。

2.2 偏转角度

图5为不同偏转角度的声束仿真图,偏转角分别为 15° 、 30° 、 45° 和 60° ,其它参数: $C=6\,000\text{ m/s}$; $f=3\text{ MHz}$; $a=1\text{ mm}$; $d=2\text{ mm}$; $N=32$ 。可知,偏转角度越大,主瓣宽度越宽,并且在不同偏转角度时,都存在旁瓣。同时,在 $\theta=60^\circ$ 时,主瓣右边的旁瓣要比左边的旁瓣要宽。总之,偏转角度越大,聚焦效果变差。

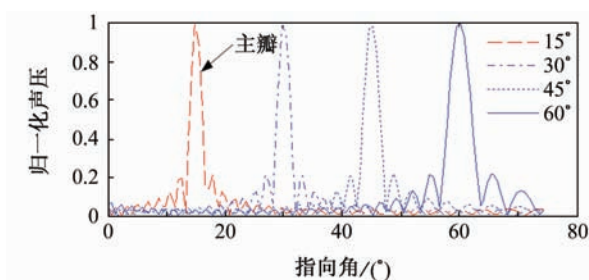
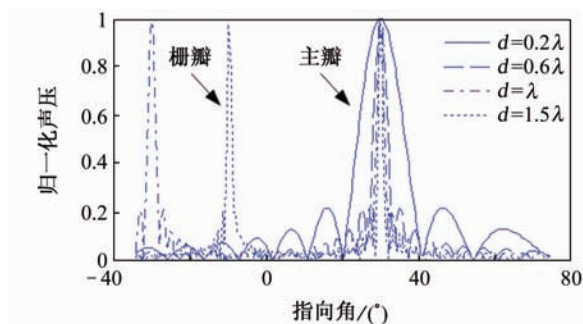


图5 不同偏转角度的仿真图

2.3 阵元间距

如图6为不同阵元间距值的仿真图,阵元间距分别为 0.2λ 和 0.6λ , λ 和 1.5λ (λ 为波长),其它参数: $C=6\,000\text{ m/s}$; $f=3\text{ MHz}$; $a=1\text{ mm}$; $\lambda=2\text{ mm}$; $N=32$; $\theta=30^\circ$ 。可见,增加阵元间距 d ,声束主瓣变窄,但是 d 太大,当 $d=\lambda$ 和 1.5λ 时,又分别在 -30° 和 -10° 位置产生了栅瓣,栅瓣的能量很大,它的存

图6 阵元间距 d 不同的仿真图

在会严重造成超声能量的泄漏,因此必须采取措施加以消除,消除栅瓣的条件^[7]: $d/\lambda \leq (N-1)/N$ 。

2.4 聚焦位置

超声相控阵的声场可以通过计算延时时间来实现不同位置的聚焦,延时时间可以根据式(3)计算,图7为阵元数 $N=16$,聚焦点分别为 $(0, 200)$ 和 $(0, 400)$ 的聚焦仿真图,其它参数: $C=6\,320\text{ m/s}$; $f=2.25\text{ MHz}$; $a=2\text{ mm}$, $d=2.5\text{ mm}$, $\lambda=2.8\text{ mm}$ 。

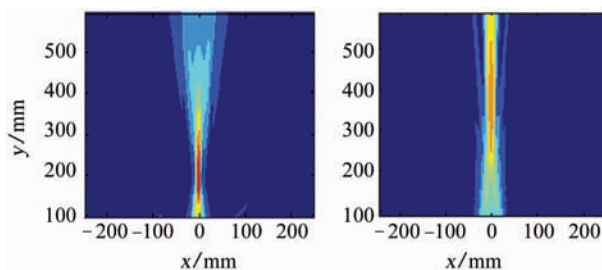


图7 不同位置聚焦仿真

3 结论

计算机根据数学模型计算并模拟实际相控阵超声声场,可以直观的看出在不同阵元数、阵元间距、偏转角度和焦点位置下形成的声束,并判断和比较它们各自的影响。综上仿真结果可知,增加阵元数和阵元间距可以改善声束指向性,同时减小偏转角度也可以提高声束的指向性。由于阵元数是有限的,实际应用时应该综合考虑并设计各个参数。

参考文献:

- [1] Wooh S C, Shi Y. Optimum beam steering of linear phased arrays. Wave Motion[J]. Wave Motion, 1999, 29(3): 245-265.
- [2] Wooh S C, Shi Y. A simulation study of the beam steering characteristics for linear phased array. Journal

(下转第867页)

在一个比较粗糙的表面(如现场焊缝)进行扫查时,缺陷检查结果不重现。

(3) 检测的难点和焊接结构、冶炼方法、缺陷形态、部件几何形状、声束在复杂几何形状中的传播等的变化有关,包括各向异性、各向同性材料。

为了在欧洲范围建立一套无损检测资格认证程序的通用原则,欧洲国家的机构联合到一起成立了欧洲检查认证网络(ENIQ)^[11]。ENIQ 制定了资格认证的方法。在欧盟层面上,核能管理机构工作组创建了一个特殊部门,目的是建立一个 NDT 资格认证方面公共管理机构的共识^[12]。在 ENIQ 框架下,检查资格认证定义为“利用所有必要提供可靠确认的方法,以及一套用于系统评估的检查系统,以保证能在真实检查条件下达到需要的性能”。ENIQ 资格认证方法在欧洲很多国家得到广泛的采用,IAEA 文件“WWER 核电站在役检查系统认证方法”即是采用了和 ENIQ 相似的方法^[13]。

6 结语

(1) RSEM 规范和 ASME 规范对异种金属焊缝的检查要求存在区别。

(2) 奥氏体粗晶材料的存在以及焊缝几何结构的复杂性使得异种金属焊缝的检查非常具有挑战性。

(3) 异种金属焊缝的检查技术不统一,国际检查单位所使用的技术各有侧重。

(4) 异种金属焊缝检查的可靠性有待提高,对焊缝和预堆边材料中缺陷的准确检查和可靠评价目前还存在困难。

(5) 国际上已经开展了对异种金属焊缝的检查资格认证活动,我国目前尚未实施。

参考文献:

[1] Pherigo G L, Pherigo A L. Manufacturing Qualification Specimens for Dissimilar Metal Weldments[C]// 2nd International Conference on NDE in Relation to

(上接第 861 页)

of nondestructive evaluation[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1999, 18(2): 39—57.

[3] 李锦,林玉书. 平面相控阵的尺寸对声波聚焦效果的影响[J]. 应用声学, 2004, 23(3): 23—28.

[4] 李衍,李明东. 超声波阵列探头的结构和特性[J]. 无损探伤, 2005, 29(6): 1—5.

[5] Hyun Lee Joon, Woo Choi Sang. A parametric study

Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. New Orleans: [s. n.], 2000.

[2] IAEA. Assessment and Management of Ageing of Major NPP Components Important to Safety: Primary Piping in PWRs[R]. Vienna: IAEA-TECDOC-1361, 2003.

[3] ASME Boiler and Pressure vessel Code, Section II - Material Specifications, Part A-Ferrous Materials[S].

[4] ASME Boiler and Pressure vessel Code, Section XI, Rules for ISI of NPP Components[S].

[5] RSE-M Code Surveillance and ISI rules for mechanical components of PWR nuclear islands[S].

[6] NUREG/CR-6860 An Assessment of Visual Testing[S].

[7] Casula O. A flexible phased array transducer for contact examination of component with complex geometry [C]// 16th WCNDT. Canada: [s. n.], 2004.

[8] IAEA TECDOC 1400, Improvement of ISI in Nuclear Power Plants[S].

[9] Non-Destructive Examination Practice and Results, State of Art and PISC III Results, Proceedings of the Joint CEC OECD IAEA Specialists Meeting held at Petten on 8—10 March 1994, EUR 15906 EN, NEA/CSNI/R(94)23.

[10] Dombert P. Main Results of PISC III Action 3: Nozzles and Dissimilar Welds, Determining Material Characterization: Residual Stress and Integrity with NDE[C]// Pressure Vessel and Piping Conference, [s. l.]: [s. n.], 1994.

[11] EUR 17299 EN European methodology for qualification, Second issue[S].

[12] EUR 16802 EN Common Position of European Regulators on Qualification of NDT Systems for Pre and ISI of Light Water Reactor Components[S].

[13] IAEA-EBP-WWER-11 Methodology for qualification of in-service inspection systems for WWER Nuclear Power Plants, March[S].

[14] EUR 22469 EN General review of dissimilar metal welds in piping systems of pressurized water reactors including WWER designs[S].

of ultrasonic beam profiles for a linear phased array transducer[J]. IEEE Transactions On Ultrasonic, Ferroelectrics And Frequency Control, 2000, 47(3): 644—650.

[6] Azar L, Shi Y, Wooh S C. Beam focusing behavior of linear phased arrays[J]. NDT&E International, 2000 (33): 189—198.

[7] 冯若. 超声诊断设备原理与设计[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1993.