

基于四维切片图的相控阵超声辐射声场研究

钱雪微¹,王召巴^{1,2},赵霞^{1,2},陈友兴^{1,2}

(1. 中北大学 信息与通信工程学院,山西 太原 030051;2. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室,山西 太原 030051)

摘 要:声束聚焦是超声相控阵区别于常规超声检测方式的主要特点之一。该文研究了单源矩形换能器与一维线阵的辐射声场。在四维切片图的基础上详细分析了频率、阵元数和阵元间距对声束聚焦时焦斑和焦深的影响,进而分析了对检测分辨率和声压值的影响,换能器参数的优化结果对于相控阵探头的优化设计具有一定的参考价值。

关键词:声束聚焦;超声相控阵;一维线阵;四维切片图;分辨率;声压值

中图分类号:TB552

文献标识码:A

Study on Phased Array Ultrasonic Radiated Sound Field Based on The Four-Dimensional Slices

QIAN Xuewei¹, WANG Zhaoba^{1,2}, ZHAO Xia^{1,2}, CHEN Youxing^{1,2}

(1. College of Communication And Information Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. National Key Lab. For Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The focusing beam is one of main characters of ultrasonic phased array which differs from the conventional ultrasonic test method. The sound field of monophyletic rectangular transducer and one dimensional linear array were studied in this paper. The effects of frequency, element numbers and space of element space on the focal spot and depth of focus were analyzed based on the four-dimensional slice figure. Furthermore, the influence on the resolution and sound pressure value were analyzed. The optimized results of transducer parameters have certain reference value for optimal design of phased array probe.

Key words: focusing beam; ultrasonic phased array; one dimensional linear array; four-dimensional slice figure; resolution; sound pressure value

0 引言

近年来,由于压电复合材料、纳秒级信号控阵、数据处理、计算机仿真、大规模集成电路等多种高新技术在超声相控阵成像领域中的综合应用,使超声相控阵检测技术得以快速发展,被逐渐应用于电力、航空航天等领域^[1]。相控阵超声的成像质量在很大程度上影响着工业检测的效果,而分辨率又是衡量成像质量的重要指标,因此研究相控阵超声分辨率对于提高成像质量具有重要意义^[2]。目前二维相控阵换能器主要处于研究和探索阶段,还没有大量地被应用,因此,本文采用一维线形相控阵换能器^[3]。对于一维线形超声相控阵换能器分辨率的研究大多是通过二维平面图中的焦点宽度来研究其横向分辨率,但实际上仅由此研究焦点是不准确的,因为聚焦区域的形状并非线状,且这些研究中也无具体的研

究纵向分辨率和声压^[4]。本文在一维线形超声相控阵换能器的声场四维切片图的基础上对分辨率和声压进行了更具体的研究。

1 线形相控阵换能器原理

在线形条件下,换能器的辐射和接收具有可逆性。根据惠更斯原理,一个有限尺寸的换能器或阵列,有效辐射面可看作是由无数个点源组合而成^[5]。求解换能器或阵列辐射声场中某一点处的声压,实际上就是计算换能器或阵列所有声源发出的超声波到达这一点时的叠加结果。

1.1 单源矩形换能器的辐射声场

图1为单源矩形换能器声场的计算模型。图中, r_0 为所求的辐射声压点与原点的距离。由图可见,单源矩形换能器向外辐射声波,在点 $Q(x, y, z)$ 处的声压为辐射球面波的各面元在 Q 点处声压的

2014-08-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61201412);山西省青年基金资助项目(2012021011-5);山西省青年学术带头人基金资助项目

作者简介:钱雪微(1991-),女,湖北荆门人,硕士生,主要从事相控阵的缺陷检测的研究。

叠加,在 Q 点处声压的表达式^[3]为

$$p = j \frac{\rho_0 C_0 \mu_0 e^{j\omega t}}{\lambda} \int_{b/2}^{b/2} \int_{a/2}^{a/2} \frac{e^{-jkr}}{r} dx_1 dy_1 \quad (1)$$

式中: ρ_0, C_0 为常数; a 为单源矩形换能器长度; b 为单源矩形换能器宽度; μ_0 为垂直于面源表面的质点振动的速度幅值; $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为超声波波长; $r = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + z^2}$ 为 $dS(x_1, y_1, 0)$ 到 $Q(x, y, z)$ 的距离。

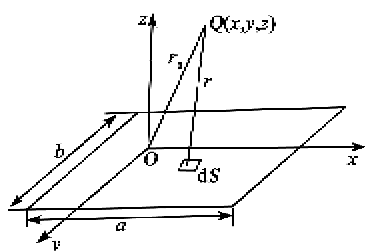


图1 单源矩形换能器声场的计算模型

1.2 一维线阵的辐射声场

设相控阵换能器由 N 个阵元组成,由相控阵技术的原理可知,各个阵元的辐射时间不同步,因此要引入初始相位 a_n ^[5]。图2为矩形相控阵换能器声场的计算模型。图中, a 为阵元长度, b 为阵元宽度, d 为阵元间距。

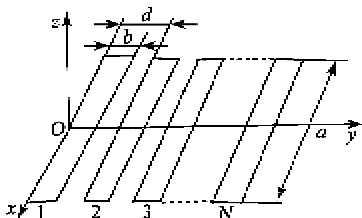


图2 矩形相控阵换能器声场的计算模型

按照面元的组合方法,推导出的矩形相控阵换能器的辐射声场为

$$p = j \frac{\rho_0 C_0}{\lambda} \sum_{n=1}^N \mu_n \iint_S \frac{e^{j(\omega t - kr_n - a_n)}}{r_n} dS_n \quad (2)$$

式中: μ_n 为垂直于第 N 个阵元表面的质点振动的速度值; r_n 为第 N 个阵元上的面元到观察点的距离; S_n 为第 N 个阵元的面积。

2 一维线形相控阵超声探头的参数优化

超声检测的分辨力是超声检测的重要指标,包括空间分辨力,时间分辨力和对比度分辨力。空间分辨力是指在一定条件下,区分两个相邻的反射体的能力,它包括横向分辨力和纵向分辨力^[5],而时间分辨力主要受到系统最高重复频率的影响。

当超声相控阵的声束聚焦时,焦点左右声压与焦点声压为 -3 dB 时的范围为焦点宽度,焦深是指

主声束上焦点前后声压下降 20% 时的声束长度^[6]。换能器参数是影响系统分辨力的重要因素之一,换能器的横向分辨力主要取决于焦斑大小,而纵向分辨力主要受到检测频率,超声脉冲宽度,激励信号强度和检测仪器系统性能的影响。栅瓣是产生伪像的主要原因之一,而旁瓣的出现一方面降低了主瓣的能量,降低了系统的对比度分辨力,另一方面栅瓣也有可能造成伪像,因此对成像分辨力来说旁瓣和栅瓣也是不能被忽视的观察因素^[6]。图3为相控阵超声聚焦示意图。

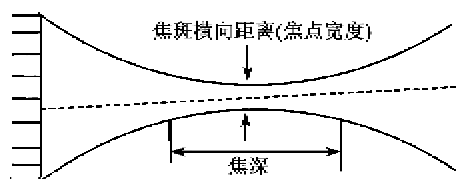


图3 相控阵超声聚焦示意图

图4为中心频率 $f=5$ MHz, $N=64$, $d=0.3$ mm, $b=0.2$ mm 时在有机玻璃中的聚焦仿真图。

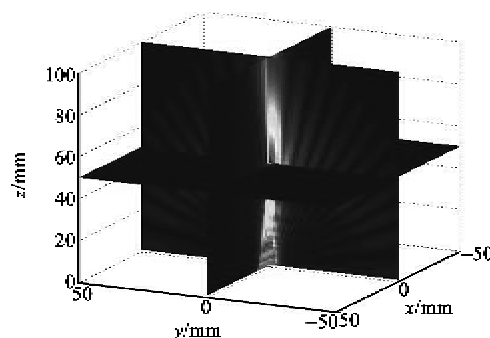
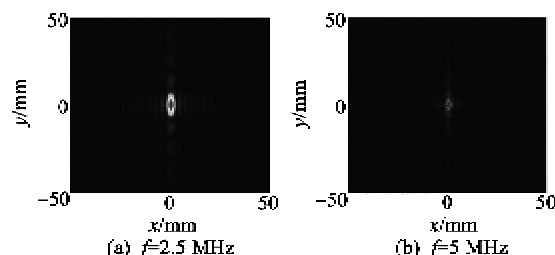
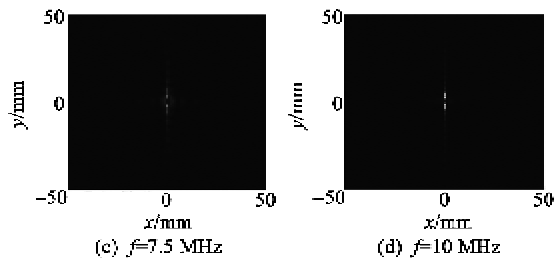
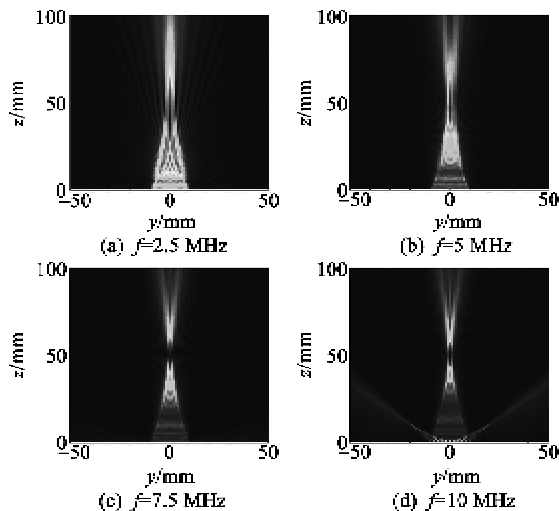


图4 聚焦点为(0,0,50)时的四维切片图

2.1 一维线形相控阵超声探头频率的优化

目前,相控阵超声检测的频率 f 一般为 2~10 MHz。超声波在有机玻璃中的纵波速度为 2 730 m/s,横波速度为 1 430 m/s,本文分别选取 2.5 MHz、5 MHz、7.5 MHz 和 10 MHz 的中心频率来研究超声相控阵换能器在有机玻璃中的横向分辨力、纵向分辨力如图5、6所示(其中 $N=64$, $d=0.3$ mm, $b=0.2$ mm)。



图 5 不同频率下 xoy 平面成像图 6 不同频率下 yoz 平面成像

由图 5、6 可见,当频率变化时,焦斑区域大小和焦深都随之变化。频率越高,焦斑越小,焦深越短,分别影响其横向和纵向分辨率,但当频率超过一定值时就会产生明显栅瓣。4 个频率下的焦斑大小、焦深长度和声压值如表 1、2 所示。

表 1 不同频率下焦斑大小

类别	2.5 MHz	5.0 MHz	7.5 MHz	10.0 MHz
焦斑区的最大声压值/ μPa	14.715 8	14.079 0	13.063 3	11.733 4
焦斑区的最小声压值/ μPa	10.418 0	9.567 2	9.248 1	8.308 0
焦斑大/ mm^2	17	5	3	3

表 2 不同频率下焦深长度

类别	2.5 MHz	5.0 MHz	7.5 MHz	10.0 MHz
焦深区的最大声压值/ μPa	15.538 6	14.600 7	13.207 3	11.764 0
焦深区的最小声压值/ μPa	12.430 9	11.680 6	10.563 8	9.411 2
焦深长度/ mm	30	18	14	11

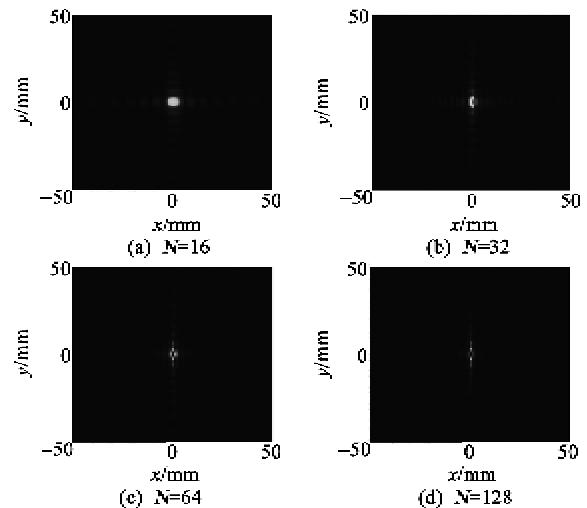
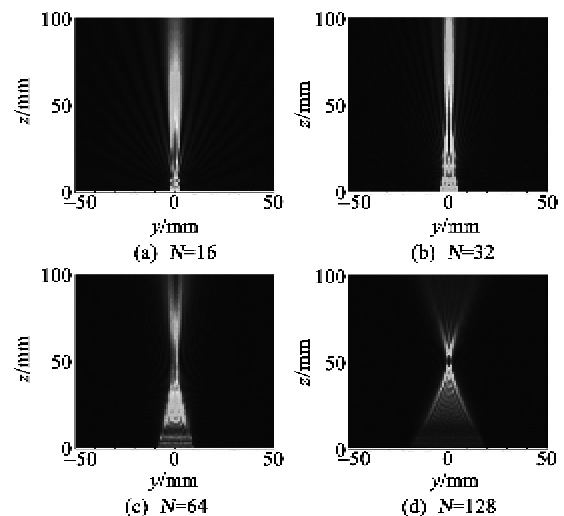
由表 1 可知,频率越大,焦斑面积越小,横向分辨率增加,同时焦斑区域的最大声压值减小,下降幅度相对更明显,二者相互联系和制约。由表 2 可知,

频率越大,焦深越短,纵向分辨率增加,且声束聚焦位置越准确,即焦斑区和焦深区最大的声压值点越接近,但是由于频率超过一定范围后就会产生明显的栅瓣,易产生伪像,因此应综合各项影响因素来选择合适的频率。

2.2 一维线形相控阵超声探头阵元数的优化

系统的阵元数是指探头可以使用的最大阵元数,而系统的独立通道数则是系统在检测时实际使用的最大通道数。一般探头阵元数大于系统的独立通道数,后者又大于实际检测通道数^[7]。

探头的中心频率 $f=5\text{ MHz}$, $d=0.3\text{ mm}$, $b=0.2\text{ mm}$,阵元数分别为 N 分别为 16、32、64 和 128 时 yoz 和 xoy 平面的仿真图如图 7、8 所示。

图 7 不同阵元数下 xoy 平面的成像图 8 不同阵元数下 yoz 平面的成像

不同阵元数下的焦斑大小、焦深长度和声压值分别如表 3、4 所示。

表3 不同阵元数下焦斑大小

类别	16	32	64	128
焦斑区的最大声压值/ μPa	3.549 2	7.086 4	14.079 0	27.460 7
焦斑区的最小声压值/ μPa	2.512 6	5.016 8	9.967 2	19.440 7
焦斑大小/ mm^2	15	9	5	5

表4 不同阵元数下焦深长度

类别	16	32	64	128
焦深区的最大声压值/ μPa	6.255 0	9.272 3	14.600 7	27.460 7
焦深区的最小声压值/ μPa	5.004 0	7.417 8	11.680 6	21.968 6
焦深长度/ mm	20	26	18	6

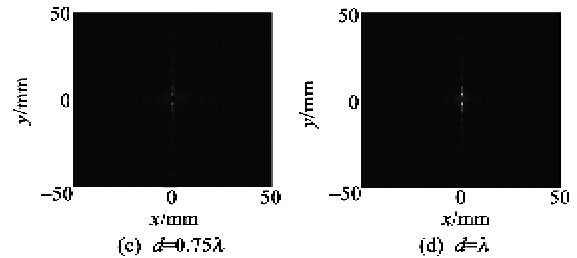
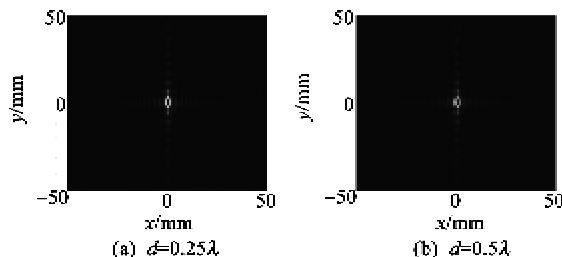
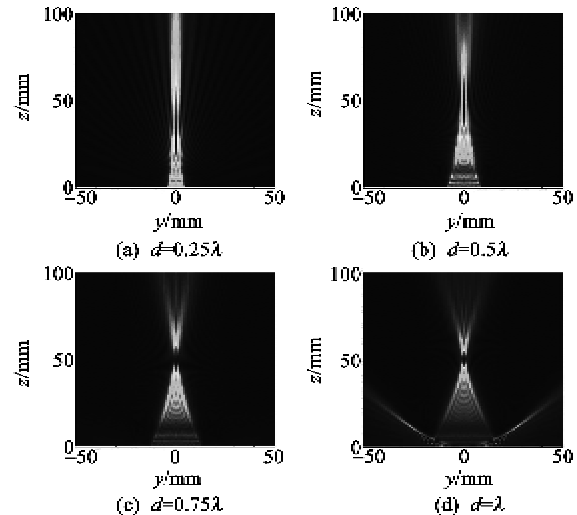
由图7可见,阵元数越多,焦斑越小,横向分辨力增加。由图8可看出,当 $N=16$ 时,不能在预设聚焦点处聚焦,而当阵元数继续增加时,才能表现为好的聚焦效果,此时焦深长度也随着阵元数的增加而减短,纵向分辨力增加。随着阵元数量的增多,阵列的孔径增大,抑制旁瓣,增加主瓣宽度^[7-8]。由表3、4可得,焦斑面积随着阵元数的增加而减小,焦斑区的最大声压值也随之明显增加,并且和焦深区最大的声压值点也更接近,聚焦位置更准确,因此对于横向分辨力和对比度分辨力,应选择尽量多的阵元。但当阵元数大到一定程度时,阵列孔径过大^[9],从而形成近场盲区,且阵元数越多电子线路越复杂,硬件成本也越高。

2.3 一维线形相控阵超声探头阵元间距的优化

根据几何关系,阵元宽度必然小于阵元间距,并且为了消除栅瓣,阵元间距必须小于波长,因此阵元的最大间距^[10](声束的偏转角度为 θ)为

$$d < \frac{N-1}{N(1+\sin\theta)}\lambda \quad (3)$$

图9、10为阵元间距分别为 $0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.75\lambda$ 和 λ 下在 $yo z$ 和 xoy 平面内所成的图像($N=64, f=5\text{ MHz}, b=d$)。

图9 不同的阵元间距下 xoy 平面的成像图10 不同的阵元间距下 $yo z$ 平面的成像

由图9、10可见,当阵元间距增大时,焦斑面积减小,横向分辨力越大,且当阵元间距接近 λ 时就会产生栅瓣,因此应在不产生栅瓣的前提下尽可能地增加阵元间距。不同的阵元间距下的焦斑大小和焦深长度分别如表5、6所示。

表5 不同阵元间距下焦斑大小

类别	0.25λ	0.50λ	0.75λ	λ
焦斑区的最大声压值/ μPa	14.186 7	14.107 3	13.897 4	13.460 5
焦斑区的最小声压值/ μPa	10.043 4	9.987 2	9.838 6	9.529 3
焦斑大小/ mm^2	11	5	5	3

表6 不同阵元间距下焦深长度

类别	0.25λ	0.50λ	0.75λ	λ
焦深区的最大声压值/ μPa	19.555 2	14.840 0	14.050 1	13.460 5
焦深区的最小声压值/ μPa	15.544 2	11.872 0	11.240 1	10.768 4
焦深长度/ mm	25	21	11	7

由表5可知,当 $d < \lambda$ 时,不同的阵元宽度时最大的声压值波动较小,因此对于声压值影响不大。当阵元间距增大时,焦斑面积减小,因此对于横向分辨力来说应尽可能地增加阵元间距。由表6可知,

阵元间距越大,焦深长度越短,因此纵向分辨力越高,且实际聚焦点与预设的焦点更接近,但由于间距过大会引起栅瓣,因此应综合考虑横向和纵向分辨力,以及是否有栅瓣来选择合适的阵元间距。

3 结 论

本文在声场四维切片图的基础上,研究了在不同频率、阵元数和阵元间距时,相控阵换能器的横向、纵向分辨力和声压值的变化,得出如下结论:

1) 频率越高,焦斑越小,焦深越短,使横向和纵向分辨力都增加,但同时会引起声压值下降,声波易衰减,声压值降低,并且频率高会造成栅瓣,不易控制。

2) 当声束能在预设的聚焦点聚焦时,阵元数越多,焦斑越小,焦深越短,声压值越大,使得横向和纵向分辨力增加,声压值增大,并且旁瓣得到抑制,但是阵元数的增大到一定程度会引起栅瓣,使电路复杂,增加硬件负担。

3) 在阵元间距小于波长的前提下,阵元间距越宽,焦斑越小,焦深越短,但当阵元间距过大时就会产生明显的栅瓣,阵元间距变化对声压值的影响相对较小。

由于超声相控阵换能器的各项参数之间是相互联系和制约的,因此应根据实际的检测材料和检测要求选择合适的换能器参数。

参考文献:

- [1] 刘晓睿,刘斯以,吴斌斌. 超声相控阵技术在工业上的应用[J]. 硅谷,2012(17):125-127.
LIU Xiaorui, LIU Siyi, WU Binbin. The industrial application of phased array ultrasonic technology[J]. Silicon Valley, 2012(17):125-127.
- [2] 杨平华,林莉,刘春伟,等. 相控阵超声检测横向分辨力实验测试及分析[J]. 仪器仪表学报,2011,32(6):1384-1389.
YANG Pinghua, LIN Li, LIU Chunwei, et al. Experimental measurement and analysis of the lateral resolution of phased array ultrasonic detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6):1384-1389.
- [3] 施克仁. 无损检测新技术[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [4] 黄佩,王召巴,赵霞. 层状多界面的超声相控阵换能器声场研究[J]. 压电与声光,2010,32(6):1059-1061.
HUANG Pei, WANG Zhaoba, ZHAO Xia. Study on the beam field of ultrasonic phased array transducer with multi-layered interface[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010, 32(6):1059-1061.
- [5] 骆英,王伟,王自平,等. 基于FPGA的超声相控阵相控发射系统的研究[J]. 仪表技术与传感器,2010(10):51-53.
LUO Ying, WANG Wei, WANG Ziping, et al. Research of phased transmission in ultrasonic phased array system based on FPGA[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(10):51-53.
- [6] 冯诺. 超声设备原理与设计[M]. 北京:中国医药科技出版社,1993.
- [7] 施义茂,张建寰,陈仲怀,等. 超声相控阵探头声场优化设计仿真[J]. 厦门大学学报,2013,52(3):370-375.
SHI Yimao, ZHANG Jianhuan, ZHEN Zhonghuai, et al. Optimization in design and simulation for sound field of ultrasonic phased array probe[J]. Journal of Xiamen University, 2013, 52(3):370-375.
- [8] 孙芳. 超声相控阵若干关键问题的研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [9] RUIJU H, LESTER W, SCHMERR J. Characterization of the system functions of ultrasonic linear phased array inspection systems[J]. Ultrasonics, 2009, 49(2):219-225.
- [10] 陈伟,曾德平,王华,等. 超声相控阵输出声场优化及仿真[J]. 压电与声光,2011,33(1):96-99.
CHEN Wei, ZENG Deping, WANG Hua, et al. Optimization and simulation for the output acoustic field of ultrasonic phased array[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2011, 33(1):96-99.