相控阵超声换能器声场可视化仿真研究

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



摘要:针对相控阵超声换能器声场的可视化问题,通过理论计算分析,建立相控阵超声换能 器声场的数学模型,采用 MATLAB 可视化仿真软件,对换能器声场进行仿真研究。通过对相控 阵超声换能器不同参数的仿真分析,掌握不同参数影响换能器声场的规律,从而在实际检测中选 取合理的换能器参数,以达到优化相控阵超声检测工艺参数的目的,并给出相控阵换能器声场的 直观量化结果。

关键词:相控阵声场;换能器;可视化仿真;数学模型

Simulation Research on Sound Field Visualization of Phased Array Ultrasonic Transducer

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

Abstract: Aiming at the visualization problem of the phased array ultrasonic transducer sound field, the mathematical model of the phased array ultrasonic transducer sound field is established by theoretical calculation and analysis. The MATLAB visual simulation software is used to simulate the transducer sound field. Through the simulation analysis of different parameters of the phased array ultrasonic transducer, the rules of different parameters affecting the sound field of the transducer are mastered, so that the transducer parameters can be reasonably selected in the actual detection to achieve the optimized phased array ultrasonic detection process parameter and give an intuitive quantitative result of the phased array transducer sound field.

Key words: phased array sound field; transducer; visual simulation; mathematical model

1 引言

相控阵超声成像检测技术是采用多阵元的阵列换 能器,依靠计算机技术控制阵列中各阵元发射超声波 的时间来控制各阵元的声束在声场中偏转、聚焦;或 控制接受阵列换能器中各阵元接受超声回波信号的时 间,进行偏转、聚焦成像检测的一种高端技术,是目 前超声检测技术中的发展热点之一^[1]。相控阵技术起源 于相控阵雷达,海洋地貌探测和反潜的先进声呐也采 用相控阵技术。相控阵超声成像起初应用于医疗超声 影像技术中,近年来在工业无损检测领域也开始了应 用,取得了良好的效果^[2]。相控阵超声成像检测涉及声 场理论、相控阵声场控制技术、阵列换能器的设计理 论、阵列换能器的材料和制作工艺技术、相控阵超声 波的发射和接受技术等^[3]。

本文主要研究内容为相控阵超声换能器声场的可 视化仿真,从相控阵超声检测原理进行理论分析,并 建立相控阵超声换能器数学模型。通过对换能器不同 参数的仿真,掌握不同参数影响换能器声场的规律, 从而在实际检测中对换能器参数进行合理的选取,进 而优化相控阵超声检测工艺参数,以达到相控阵超声 检测合理、高效的目的。

2 相控阵换能器工作原理

作者简介: 高世凯(1993),硕士,材料科学与工程专业;研究方向: 超声无损检测研究。 收稿日期: 2018-10-10 相控阵超声检测技术,其原理与常规超声检测技 术从根本上是一致的,前者采用相控阵换能器,后者 采用单晶换能器,两者都是基于超声波束进入材料内 后与材料内部缺陷发生一系列物理反应的物理基础。

$$p(x,\omega) = \rho c v_0 + \sqrt{\frac{2}{\pi i} (kbM) D_b(\Theta) \frac{\sin[(Mks\sin\Theta)/2]}{M\sin[(ks\sin\Theta)/2]}} \frac{\exp(ikR)}{\sqrt{kR}}$$

式中: ρ 为材料密度;c为超声波在材料中的传播 速度;k为波数, $k=2\pi/\lambda$;b为阵元宽度;M为阵元数; s为阵列中相邻两阵元间距;R为中心阵元距聚焦点的 距离。

$$D_{\rm b}(\Theta) = \frac{\sin(kb\sin\Theta)}{kb\sin\Theta} \tag{2}$$

$$D_{\rm s}(\Theta) = \frac{\sin[(Mks\sin\Theta)/2]}{M\sin[(ks\sin\Theta)/2]}$$
(3)

超声波束因其独特的指向性,而被应用于无损检 测领域。无论是单个阵元换能器还是阵列换能器,都 具有指向性。式(2)、式(3)分别为其指向性函数^[5]。 其中式(2)为单个阵元的声场指向性函数,式(3) 为间隙 *s* 的离散阵元形成的阵列所产生的声场的指向 性函数。因而通过对式(2)、式(3)的仿真研究,可 得到阵列换能器参数对声场指向性的影响规律。

相控阵换能器即将整个压电芯片分割成许多形 状、尺寸相同的小芯片,每个小芯片称为一个阵元, 将这些单个阵元按一定的法则进行顺序排列,即组成 相控阵换能器。每个小芯片可视为辐射柱面波的线状 波源,这些线状波源的波阵面就会产生波的干涉,形 成整体波阵面。每个单独的芯片可被施加一定的延时 法则和偏转法则,通过控制不同的法则,可产生一定 角度偏转的超声聚焦波束。



图 1 为相控阵换能器参数示意图,图中 W 为从动窗,指阵元长度;p 为相邻两阵元中心距离,即 p=(b+s); A 为主动窗,指换能器阵元受激励的总长度,主动窗 长度由式(4)给出:

 $A=M\times b+s\times (M-1)$

检测采用的超声波束属于机械波,故满足波动方程。因此,经推理计算,可得到单个阵元辐射声波的波束模型,通过叠加多个单阵元波束模型,可得到*M*个阵元组成的阵列模型^[4],如式(1)所示:

(1)

式中: b 为阵元宽度; s 为相邻两阵元间距; M 为 阵元数。

由图 1 可知,影响换能器声场的主要参数为阵元 宽度、阵元间距。因此可对换能器阵元宽度和阵元间 距两参数进行仿真研究,获得上述两个参数对相控阵 换能器声场的影响规律,从而为选取合适的工艺参数 奠定理论基础。

3 频率对声场的影响

超声无损检测对换能器频率有着严格的要求,主 要考虑到超声波束在被检工件中有足够

的传播距离,以保证对工件的充分检测。频率的 高低影响到超声波束能量的高低,在实际应用中频率 并不是越高越好,要综合考虑被检材料的性质,以此 来选择合理的频率,达到高效检测的目的。一般来说, 超声无损检测所使用的换能器频率在 1~10MHz 之 间,频率过低会导致能量达不到检测要求,因而不能 进行检测,频率过高一则会使超声波束检测区域过小, 降低检测效率;二则超声波束能量衰减过大,不利于 检测。因而合理的换能器频率的选取,将会大大提高 检测效率和质量。

本文所研究的工件材料为普通钢,超声波在被检 材料中的传播速度为 5890m/s,具体仿真参数如表 1 所示。主要仿真内容为,针对 32 阵元换能器,在阵元 宽度和阵元间隙一定的条件下,施加不同频率时的声 场变化规律。

表1 换能器频率仿真参数表

仿真参数		<i>f/</i> MHz			<i>b</i> /mm	s/mm
数值	1	5	10	32	0.8	0.2

利用 MATLAB 软件强大的可视化仿真功能, 对表 1 参数进行可视化仿真处理,得到图 2、图 3、图 4 所 示的声场仿真图。



由图 2 仿真结果可知,当 *f*=1MHz 时,超声波束 形成的声场过于分散,能量不够集中,无法有效地检 测工件;图 3 为 *f*=5MHz 时的声场仿真结果,由图可 知,声束的集中程度适中,可检区域适当,并且能量 衰减较小,达到超声检测声场的要求;图 4 为 *f*=10MHz 时的声场仿真结果,由图可知,此时声场集中性最好, 但声束有效检测区域过小,使得检测效率降低,同时 能量衰减过大,对较深处的缺陷检测不利。

对仿真结果分析可知,频率越高,脉冲宽度越小, 分辨力也就越高,有利于区分相邻缺陷且缺陷定位精 度高;频率越高,声束指向性越好,能力越集中,但 相对检测区域也就越小,仅能发现声束轴线附件的缺 陷。故对普通钢的超声检测,选择频率为 5MHz 时, 可使检测效率最高,结果最优。

4 阵元间隙对声场指向性的影响

超声波束具有方向性,这一性质是其能被应用于 无损检测领域的重要条件之一。因此对相控阵换能器 指向性 *D* 的研究具有十分重要的意义。相控阵换能器 是由多个小的单阵元按照一定的规则排列而成,分析 得到影响其指向性最主要的参数为相邻两阵元的间隙 长度。通过选取不同的间隙参数,来仿真不同间隙对 换能器声场指向性的影响,见表 2。

表 2 换能器阵元间隙仿真参数表

仿真参数	s/mm				<i>M</i> /个	<i>b</i> /mm	f/MHz
数值	0.02	0.2	0.8	1.2	32	0.8	5



图 5 换能器不同阵元间隙指向性三维仿真图

在其他参数不变的条件下,只改变阵元间隙s,通

过仿真处理,得到图 5 所示的换能器不同阵元间隙指 向性三维仿真图。图 5a 为 s=0.02mm 时的仿真结果, 可看出此时声束指向性变化不明显,因而该阵元间隙 不合理;图 5b 为 s=0.2mm 时的仿真结果,由图可看出, 声束指向性较好,可检区域适当,且无栅瓣带入;图 5c为 s=0.8mm 时的仿真结果,由图可知,此时声束指 向性非常好,但声束处于带入栅瓣的临界点,阵元间 隙大于此数值时将带入栅瓣;图 5d 为 s=1.2mm 时的仿 真结果,由图可明显看出,此时的声束不单一,有较 多的栅瓣带入,导致声束指向性反而变差。

综合上述分析可知,在阵元数、阵元宽度一定的 情况下,随阵元间隙s的增加,声束聚焦指向性越好, 且使主瓣宽度变小,但阵元间隙s取值过大,会带入

栅瓣,导致声束质量变差,检测灵敏度下降。所 以在不带入栅瓣的情况下,取较大的s值。s取值范围 上限 $s_{max} \leq 0.8 \text{mm}$ 。

5 阵元宽度对声场的影响

相控阵换能器产生的声场对相控阵超声检测结果 的影响尤为突出,因此合理优化声场的选择对检测效 果而言则十分重要。本节主要仿真研究换能器阵元宽 度参数对产生的声场的影响规律,从而给出合理恰当 的阵元宽度参数的仿真结果,达到检测工艺中参数的 优化目的,进一步提高相控阵超声无损检测的效率和 可靠性。具体仿真参数如表3所示。

表3 换能器阵元宽度仿真参数表

仿真参数	<i>b</i> /mm				<i>M</i> /个	s/mm	<i>f</i> /MHz
数值	0.1	0.4	0.8	1.2	32	0.2	5

在控制阵元数 M、阵元间隙 s 及换能器频率 f 一定 的条件下,通过改变阵元宽度参数 b,进行换能器声场 的三维仿真,不同阵元宽度仿真结果如图 6 所示,其 中 p/p0 为声压。



换能器不同阵元宽度声场三维仿真图 图 6

由图 6a 可知, 阵元宽度 b=0.1mm, 声场轴向(z 向)长度、声压较小, 且各阵元无法形成统一的波阵 面,故不能利用此时的声场进行检测;图 6b 为阵元宽 度 b=0.4mm 时的声场仿真结果,由图可看出,此时有 不完全的波阵面形成,但声场轴向长度仍然过小,不 利于检测:图 6c 中声场的仿真结果直观上看自然、规 则具有工艺美感,此时阵元宽度 b=0.8mm,该参数下 形成的声场波阵面完整规则,声场轴向和径向(x向) 长度合理,并且此时可以在仿真结果中看到换能器阵

元的具体分布情况,所以该仿真结果合理可靠,可以 作为优化参数结果:图 6d 为阵元宽度 b=1.2mm 时的 仿真结果,由图可明显看出声场已经发生畸变,尽管 声场轴向和径向长度合理,但有较多的旁瓣声束产生, 导致声场变形严重, 且声压分布不规则, 因而此时的 声场不能作为检测声场。

综合分析可知,随着阵元宽度的增加,声场声压 强度、轴向、径向长度都逐渐增强,这有利于提高信 (下转第41页)