柔性相控阵动态聚焦理论与仿真

王中亚[1]，刘欣平[2]，史 猛[2]，李晓利[2]，闫浩明[3]，赵新玉[3]
(1. 中国大唐集团科学技术研究院有限公司华东分公司，安徽合肥 230088； 2. 驻北方华安工业集团有限公司代表室，黑龙江齐齐哈尔 161046；3. 大连交通大学材料科学与工程学院，辽宁大连 116028)

摘要：曲面构件被广泛应用在各个领域的关键部位，一旦出现质量问题将造成不可估量的后果，为确保曲面构件在服役期间安全可靠，对其定期进行无损检测尤为重要。因超声相控阵技术检测灵敏度高、速度快，适用于曲面构件的快速检测，特别是柔性相控阵换能器的成功研制满足了复杂曲面构件的检测需求，但目前仍缺乏相应的理论支撑。因此，提出了复杂曲面柔性相控阵动态聚焦理论，并建立有限元声场时域仿真模型。结果表明，基于所提出的聚焦理论，采用柔性相控阵换能器可解决复杂曲面构件内部微小缺陷检测难题，为柔性相控阵换能器参数设计提供了理论依据，推动了柔性相控阵换能器的应用与发展。

关键词：柔性相控阵换能器；动态聚焦；时域仿真研究
中图分类号：TB553　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-3630(2019)-05-0585-05
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.05.017

Dynamic focusing theory and simulation study of flexible phased array

WANG Zhong-ya[1], LIU Xin-ping[2], SHI Meng[2], LI Xiao-li[2], YAN Hao-ming[3], ZHAO Xin-yu[3]
(1. *China Datang Corporation Science and Technological Research Institute Co., Ltd. Eastern China Branch*, *Hefei* 230088, *Anhui*, *China*;
2. *Representative office of North Hua'an Industry Group Co., Ltd. Qiqihar* 161046, *Heilongjiang*, *China*;
3. *School of Material Science and Engineering*, *Dalian Jiaotong University*, *Dalian* 116028, *Liaoning*, *China)*

Abstract: Curved workpieces are widely used in the key parts of various fields, once quality problems arise, it will cause incalculable consequences. In order to ensure the safety and reliability of the curved workpieces during service, it is particularly important to carry out non-destructive testing regularly. The ultrasonic phased array technology is suitable for the rapid detection of curved workpieces due to its high sensitivity and high speed. Especially, the flexible phased array transducer has been successful developed to meet the needs of complex curved workpiece detection, but there is still a lack of corresponding theoretical support. Therefore, a dynamic focusing theory of flexible phased array with complex curved surface is presented in this paper, and a finite element sound field model in time domain is established for simulation. The results show that based on the proposed theory, the flexible phased array transducer can solve the problem of small defect detection in complex curved workpieces, which provides a theoretical basis for the parameter design of flexible phased array transducers and promotes its application and development.

Key words: flexible phase array transducer; dynamic focusing; simulation study in time domain

0　引 言

随着航空航天、轨道交通等装备制造领域的飞速发展，越来越多的曲面结构被广泛应用，例如发动机叶片、钢轨及船舶结构件等。这类复杂曲面构件在制造和服役期间受到生产工艺、复合载荷以及外界环境等多重因素影响，致使其表面及内部会出现气孔、疏松、裂纹甚至断裂等各种损伤缺陷，若不能及时检出和定量评价，将严重影响关键装备的安全运行，甚至会造成严重事故。因此迫切需要曲面构件内部缺陷的量化检测技术，进而对构件的可靠性和寿命进行评估[1-3]。

超声相控阵换能器可实现动态偏转聚焦、探伤灵敏度高、检测速度快，近些年得到了广泛关注[4-6]。北京航空航天大学的马立印等[7]针对发动机叶片根部裂纹检测需求，研制了带有弧形楔块的线阵换能器，并进行了叶片试件的 S 扫描试验，结果验证所设计的相控阵换能器可实现叶片根部缺陷检测。针对 L 型构件 R 区超声检测难题，徐娜等[8]提出了线阵换能器检测方案并开展检测试验，验证了线阵换能器检测方法可行；张冬梅等[9]利用弧阵换能器和

收稿日期：2018-06-02; **修回日期：**2018-07-18
基金项目：国家重点研究项目(2016YFF0203000)资助。
作者简介：王中亚(1986－), 男, 安徽合肥人, 工程师, 硕士, 研究方向为电力行业无损检测工艺及仿真技术。
通讯作者：赵新玉, E-mail: xyz@djtu.edu.cn

线阵换能器进行了超声相控阵试验，发现弧阵换能器的检测结果优于线阵换能器。但是带有楔块的换能器和固定曲率的弧阵换能器加工复杂且适用范围有限，难以满足各类复杂曲面工件检测需求。

为检测复杂形廓曲面构件，南昌航空大学[10]和多浦乐公司分别研制了柔性相控阵换能器，并开展了相应的实验研究。利用柔性相控阵换能器检测曲面构件时，受构件曲率影响，很难控制换能器的辐射声场。因此，本文推导了一维线阵在二维复杂曲面的动态聚焦算法以准确计算辐射声场偏转聚焦时各阵元的延迟时间，并在此基础上，建立柔性相控阵换能器辐射声波时域仿真模型。

1 柔性相控阵动态聚焦方法

超声相控阵技术是通过精确控制每个阵元的延迟时间，灵活而方便地控制声束，实现波束动态偏转与聚焦，从而提高超声检测的分辨力、灵敏度，增大信噪比。利用柔性相控阵检测复杂曲面构件时，由于构件表面曲率发生变化，构件中声场分布情况极其复杂，需深入研究复杂曲面声场聚焦特性及分布规律。本文首先推导了柔性相控阵动态聚焦方法，在此基础上，采用声场有限元理论，建立超声时域动态仿真模型。

本文以一个具体曲面工件为例，工件的凹面半径 R_1=40 mm、凸面半径 R_2=42 mm、凹面凸面圆心角均为60°，工件曲面能放置87个柔性换能器阵元，凹面放置43个，凸面放置44个。探头每次并行激励16个阵元进行电子线性扫描，阵元芯距 s=1 mm，超声纵波在工件中的传播速度 c=5 890 m·s^{-1}，曲面线阵扫描原理示意图如图1所示。

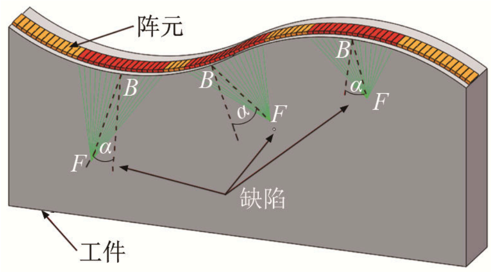


图 1 曲面检测的扫描原理示意图

Fig.1 Scanning principle diagram of curved surface detection

柔性相控阵换能器检测技术中，多阵元换能器被包裹在柔性保护膜中，换能器可随构件形廓曲率变化而与构件进行完全贴合。根据惠更斯原理，建立曲面柔性相控阵声场聚焦模型，按照各个阵元与聚焦点的距离计算延迟时间。以半径为 R_1 的凹面和半径为 R_2 的凸面组成的复杂曲面构件为例，将曲面检测过程划分为三个阶段：一、所有阵元都在凹面；二、在凹面、凸面上都有阵元；三、所有阵元都在凸面。每个阶段各个阵元延迟时间按公式 $\tau=\dfrac{\max(d_{FX})-d_{FX}}{c}$ (d_{FX} 为阵元组中第 X 个阵元与任意聚焦点 F 之间的距离，c 为超声纵波在试件中的速度)计算，只要确定 d_{FX} 大小就能求出各个阵元的延迟时间。换能器每次以 M=16 个阵元为一组进行电子线性扫描，扫描过程中阵元芯距 s 保持不变。一次扫描结束，再按照相应的延迟聚焦法则激励下组阵元，直至扫描整个构件曲面。曲面柔性相控阵聚焦原理示意图如图2所示。

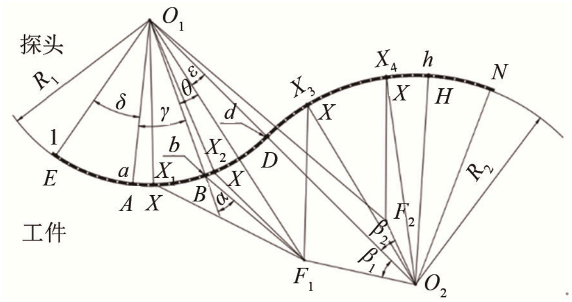


图 2 曲面工件检测的柔性相控阵聚焦原理

Fig.2 Principle of flexible phased array focusing for curved workpiece detection

柔性换能器阵元沿构件曲面排列，O_1，O_2 分别为凹面和凸面的圆心，凹面圆心角 $\angle EO_1O_2$、凸面圆心角 $\angle O_1O_2N$ 均已知。D 为两曲面交点，待测工件曲面能放置 N 个阵元，从左到右排列序号 1～N，A 点为扫描时首阵元的位置，a 为扫描时首阵元的序列号，H 点为扫描时尾阵元的位置，h 为扫描时尾阵元的序列号，d 为 D 点左边紧邻阵元的序列号，M(偶数)个阵元组成的阵元组辐射声波偏转角为 α，O_1B 为 $\angle AO_1O_2$ 的角平分线，F 为根据实际情况确定的电子焦点，聚焦深度为 BF，F_1、F_2 为超声波束聚焦点位置，b 为交点 B 左边紧邻阵元的序列号，X_1、X_2、X_3、X_4 为第 X 个阵元的序列号。δ 为 O_1E 与 O_1A 的夹角，γ 为 $\angle AO_1O_2$ 的半角，θ 为 O_1B 与 O_1F 的夹角，ε 为 O_1F 与 O_1O_2 的夹角，β 为 O_2F 与 O_2O_1 的夹角。

尾阵元序列号为 h：

$$h=a+M-1 \tag{1}$$

D 点左边紧邻阵元的序列号 d：

$$d=\mathrm{round}\left(\frac{\angle EO_1O_2}{s/R_1}\right)+1 \tag{2}$$

工件曲面能放置的阵元总数 N：

$$N=\mathrm{round}\left(\frac{\angle EO_1O_2}{s/R_1}+\frac{\angle O_1O_2N}{s/R_2}\right)+1 \tag{3}$$

其中，round 为对数值进行四舍五入的函数。焦点 F 与凹面圆心 O_1 之间距离为 O_1F：

$$O_1F=\sqrt{R_1^2+BF^2+2R_1\cdot BF\cdot\cos\alpha} \tag{4}$$

O_1B 与 O_1F 的夹角为 θ：

$$\theta=\arcsin\left(\frac{BF\cdot\sin\alpha}{O_1F}\right) \tag{5}$$

凹面、凸面圆心距为 O_1O_2

$$O_1O_2=R_1+R_2 \tag{6}$$

(1) 当所有阵元都在凹面扫描时，$h\ll d$ 即 $a\ll d+1-M_2$。

计算第 X 个阵元辐射声场从各阵元中心传播到焦点的传播路径长度 d_{FX}：

$$d_{FX}=\sqrt{R_1^2+O_1F^2-2R_1\cdot O_1F\cdot\cos\left|\theta-\left(x-\frac{M+1}{2}\right)s/R_1\right|} \tag{7}$$

计算各个阵元延迟时间 τ：

$$\tau=\frac{\max\left(d_{FX}\right)-d_{FX}}{c} \tag{8}$$

(2) 当所有阵元都在凸面扫描时，即 $a>d$

计算第 X 个阵元辐射声场从各阵元中心传播到焦点的传播路径长度 d_{FX}：

$$d_{FX}=\sqrt{R_2^2+O_2F^2-2R_2\cdot O_2F\cdot\cos\left|\angle BO_2F-\left(x-\frac{M+1}{2}\right)s/R_2\right|} \tag{9}$$

其中：

$O_2F=\sqrt{R_2^2+BF^2-2R_2\cdot BF\cdot\cos\alpha}$，

$\angle BO_2F=\arcsin\left(\frac{BF\sin\alpha}{O_2F}\right)$。

计算各个阵元延迟时间 τ：

$$\tau=\frac{\max\left(d_{FX}\right)-d_{FX}}{c} \tag{10}$$

(3) 当在凹面和凸面上都有阵元时，$a<d$，$h>d$ 即 $d+M-1<a<d$，在凹面、凸面上分别计算阵元延迟时间。

阵元在凹面上扫描时，即 $X\le d$ 时，凹面部分阵元所对的圆心角为 $\angle AO_1O_2$

$$\angle AO_1O_2=\angle EO_1D-\delta \tag{11}$$

式中：$\delta=(a-1)s/R_1$

扫描中凹面部分阵元数目为 z_1：

$$z_1=\mathrm{round}\left(\frac{\angle AO_1O_2}{s/R_1}\right) \tag{12}$$

则：$b=a+\mathrm{round}(z_1/2)$。

计算第 X 个阵元辐射声场从各阵元中心传播到焦点的传播路径长度 d_{FX}：

(1) $x\ll d$ 时

$$d_{FX}=\sqrt{R_1^2+O_1F^2-2R_1\cdot O_1F\cdot cos\left|\theta-\left(x-\frac{M+1}{2}\right)s/R_1\right|} \tag{13}$$

各个阵元延迟时间 τ：

$$\tau=\frac{\max\left(d_{FX}\right)-d_{FX}}{c}$$

阵元在凸面上扫描时，凸面部分阵元所对的圆心角为 $\angle DO_2H$：

$$\angle DO_2H=\frac{(M-1)s-\angle AO_1O_2\cdot R_1}{R_2}$$

计算第 X 个阵元辐射声场从各阵元中心传播到焦点的传播路径长度 d_{FX}：

(i) 当 $X\ll h$ 且 $\gamma>\theta$ 时

$$d_{FX}=\sqrt{R_2^2+O_2F^2-2R_2\cdot O_2F\cdot\cos(\varphi)} \tag{14}$$

其中：$O_2F=\sqrt{O_1F^2+O_1O_2^2-2\cdot O_1F\cdot O_1O_2\cdot\cos(\varepsilon)}$，$\varepsilon=\gamma-\theta$，$\varphi=\beta+(\angle DO_2H-(h-X)s/R_2)$，$\beta=\arcsin\left(\frac{O_1F\sin\varepsilon}{O_2F}\right)$。

(ii) 当 $X\ll h$ 且 $\gamma<\theta$ 时

$$d_{FX}=\sqrt{R_2^2+O_2F^2-2R_2\cdot O_2F\cdot\cos\varphi} \tag{15}$$

其中：$O_2F=\sqrt{O_1F^2+O_1O_2^2-2\cdot O_1F\cdot O_1O_2\cdot\cos(\varepsilon)}$，$\varepsilon=\theta-\gamma$，$\varphi=\left|\beta-(\angle DO_2H-(h-X)s/R_2)\right|$，$\beta=\arcsin\left(\frac{O_1F\sin\varepsilon}{O_2F}\right)$。

计算各个阵元的延迟时间 τ：

$$\tau=\frac{\max\left(d_{FX}\right)-d_{FX}}{c} \tag{16}$$

实际检测时，只要给出构件凹面半径 R_1、凸面半径 R_2、凹面圆心角 $\angle EO_1O_2$、凸面圆心角 $\angle O_1O_2N$、超声纵波在工件中的传播速度 c、阵元数目 M、超声扫描时阵元组首阵元 a、阵元芯距 s、偏转角 α 与聚焦深度 BF，就能计算出各个阵元延迟时间。然后利用多通道仪器控制发射信号的时间延迟，对各阵元进行精确激励，使得各阵元辐射声波在聚焦点处同相叠加而形成聚焦声波，实现高灵敏度和信噪比的超声检测，接收回波信号是发射信号的逆过程。

基于曲面柔性相控阵聚焦理论，采用相控阵技术对复杂曲面构件进行无损检测的最大特点是，阵元组完成一次电子线性扫描后，用户可根据实际需要调整声波偏转角、聚焦深度，实现超声波束的动态聚焦，再进行下一次探伤扫描，极大地提高了探测能力和检测效率，满足日益提高的工业无损检测需求。

2　柔性相控阵时域仿真分析

在曲面检测的过程中，当探头的部分阵元分布在凹面，另一部分阵元分布在凸面时，延迟聚焦理论最为复杂，检测难度最大。所以为验证柔性相控

阵辐射波束能实现动态聚焦与偏转，本文针对工件内部无缺陷时的凹凸结合面，建立了不同偏转角α与聚焦深度 BF 的四组对比仿真模型，固体中声场分布用位移场来表示。首阵元 a=34，各个阵元的延迟时间如图 3 所示，声波聚焦时的仿真结果如图 4 所示。

结果表明：按照图 3 计算的延迟时间对各阵元进行信号激励，能实现柔性相控阵波束动态偏转与聚焦，验证了曲面柔性相控阵聚焦理论的正确性。

但能否实现曲面构件内部微小缺陷的检测还未得以证实，因此，在曲面构件内设置了半径为 r 的孔形缺陷，缺陷圆心位于α=30°，BF=15 mm 位置处(图 1 中间缺陷位置)，建立仿真模型，计算曲面构件实际检测时内部质点位移场分布。设置仿真参数：α=30°、BF=10 mm，阵元数目 M=16、阵元芯距 s=1 mm、首阵元序列号 a=34，用序列号为 43

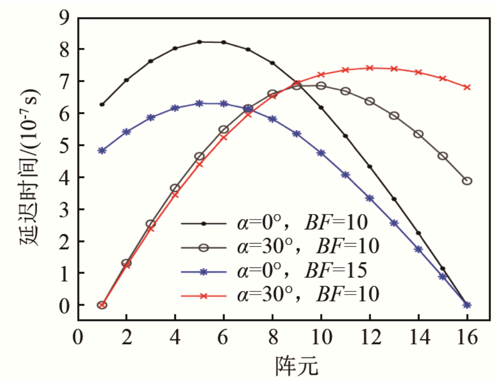
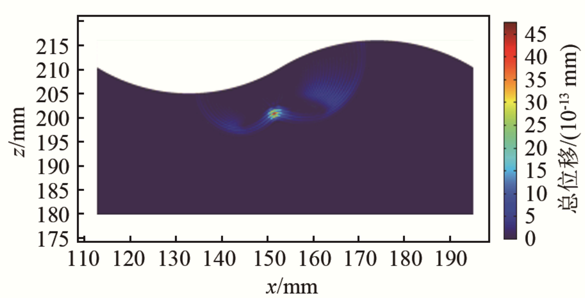
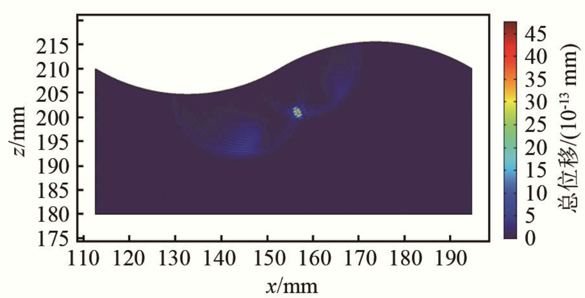


图 3 凹凸面检测时各阵元延迟时间

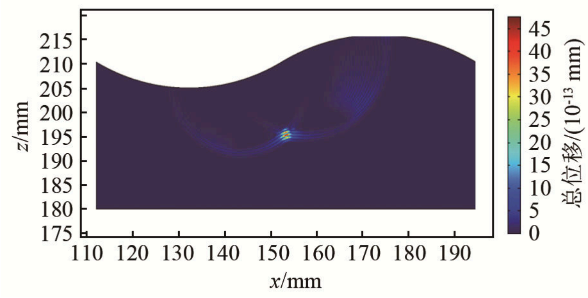
Fig.3 Delay time of each array element in the detection of concave and convex surfaces



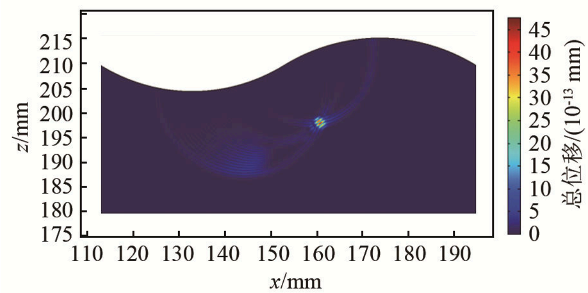
(a) α=0, BF=10 mm



(b) α=30°, BF=10 mm



(c) α=0, BF=15 mm



(d) α=30°, BF=15 mm

图 4 基于图 3 各阵元延迟时间的声束聚焦仿真结果

Fig.4 Simulation results of beam focusing based on delay times of array element shown in Fig.3

的阵元进行信号采集，结果如图 5 所示。

图 5 显示，缺陷半径为 0.05 mm 的回波信号不太明显，当波束遇到小孔缺陷时方向发生改变，大部分声束能量被散射到其他方向；缺陷半径为 0.1、0.2、0.4 mm 的回波信号比较明显，且信号峰值随缺陷半径增大而增大。为确定缺陷信号信息，需要利用多个阵元采集回波信号，回波信号到达各个阵元的延迟时间也由上述推导的聚焦法则决定，按照其时间差对各阵元接收的信号进行进行延迟叠加，就能得到增强的缺陷回波。以上分析表明，本文推导的延迟聚焦理论，采用柔性相控阵技术能够有效检测复杂形廓工件内部微小缺陷。

本文也模拟了当曲面工件内部有多个孔形缺

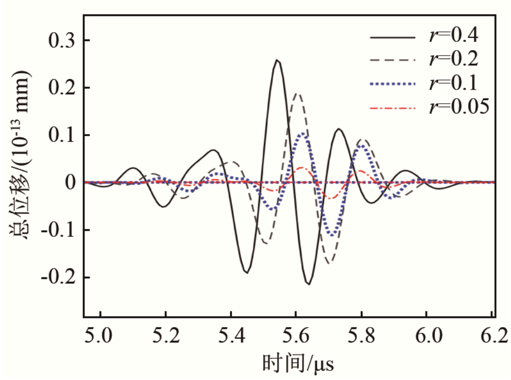
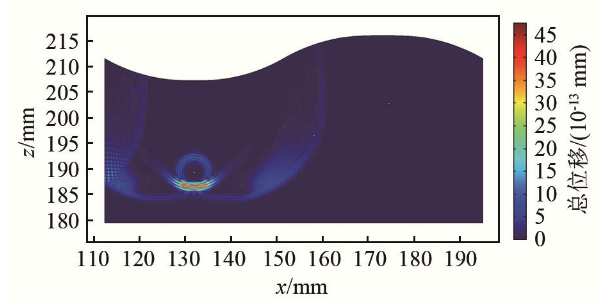


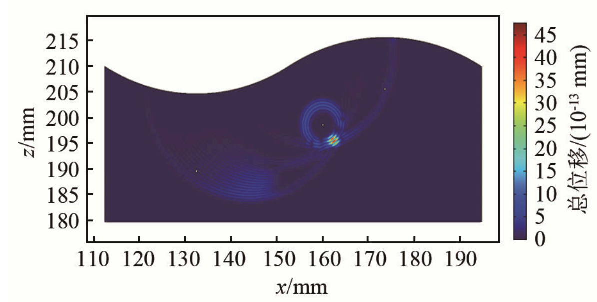
图 5 检测不同尺寸孔缺陷的仿真结果

Fig.5 Simulation results of detecting hole defects with different sizes

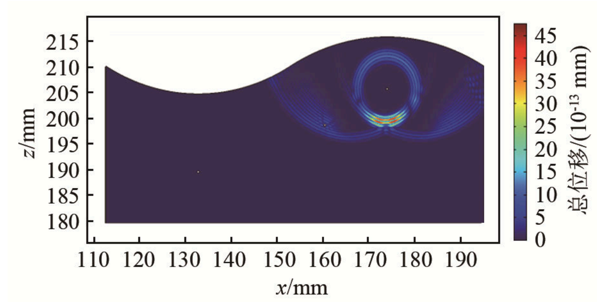
陷时，聚焦声波在不同位置孔缺陷处的散射位移场分布情况。工件结构示意如图 1 所示，探头的 16 个阵元为一组对工件从凹面到凸面进行电子线性扫描，仿真计算结果如图 6 所示。



(a) 阵元都在凹面



(b) 凹面、凸面都有阵元



(c) 阵元都在凸面

图 6　多个孔缺陷检测的仿真结果

Fig.6　Simulation results of multiple hole defect detection

图 6 显示，无论是在凹面、凹凸结合面还是在凸面，探头根据计算得到的各个阵元延迟时间进行信号激励，辐射波束能实现动态偏转聚焦，多角度、多方位扫描探伤，可有效提高工件内部微小缺陷检出的能力。

针对复杂曲面工件检测问题，设计高精度、高分辨率的柔性相控阵换能器时，换能器参数如阵元数目、阵元宽度、阵元芯距、中心频率等都会影响超声相控阵换能器辐射声场特性，仅依靠经验难以保证换能器参数正确。因此，利用本文建立的聚焦延迟方法和聚焦声场有限元仿真模型，可以分析换能器参数对辐射声场的影响，优化换能器参数以避免较大波束旁瓣和栅瓣产生，进而有效提高换能器质量。

3　总　结

针对复杂曲面构件无损检测难题，本文推导了柔性超声相控阵聚焦算法，并建立时域声场仿真模型，仿真结果验证了复杂曲面聚焦算法的正确性，为柔性阵列换能器的设计提供理论基础和技术支持，促进柔性相控阵换能器在曲面工件检测中的高效研发和实际应用。

致谢　感谢吉林大学郑艳芳的校改完善。

参　考　文　献

[1] 林莉，杨平华，张东辉，等. 厚壁铸造奥氏体不锈钢管道焊缝超声相控阵检测技术概述[J]. 机械工程学报, 2012, **48**(4): 12-20.
LIN Li, YANG Pinghua, ZHANG Donghui, et al. Review of phased array ultrasonic testing for thick wall cast austenitic stainless steel pipeline welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, **48**(4): 12-20.

[2] 陈世利，常文爽，靳世久. 汽轮机轮缘超声相控阵检测中缺陷方向识别[J]. 纳米技术与精密工程, 2013, **11**(4): 328-333.
CHEN Shili, CHANG Wenshaung, JIN Shijiu. Recognition of defect direction in ultrasonic phased array testing of turbine disc rims[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2013, **11**(4): 328-333.

[3] 陈昌华，汤志贵，陈能进，等. 列车车轮缺陷的超声波相控阵分析[J]. 物理测试, 2012, **30**(1): 34-39.
CHEN Changhua, TANG Zhigui, CHEN Nengjin, et al. Ultrasonic phased array analysis of railway wheel flaws[J]. Physics Examination and Testing, 2012, **30**(1): 34-39.

[4] LI C, PAIN D, WILCOX P D, et al. Imaging composite material using ultrasonic arrays[J]. NDT & Einternational(S0963-8695), 2013, **53**(16) :8-17.

[5] 赵新玉，刚铁，张碧星. 非近轴近似多高斯声束模型的相控阵换能器声场计算[J]. 声学学报, 2008, **33**(5): 475-480.
ZHAO Xinyu, GANG Tie, ZHANG Bixing. Prediction of radiation beam fields from an array transducer with nonparaxial multi-Gaussian beam model[J]. Acta Acustica, 2008, **33**(5): 475-480.

[6] 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, **5**(17): 125-127.
LIU Xiaorui, LIU Siyi, WU Binbin. Ultrasound phased array technology applications in industry[J]. Silicon Valley, 2012, **5**(17): 125-127.

[7] 马立印，李洋，周正干. 检测发动机叶片的相控阵超声换能器设计[J]. 压电与声光, 2017, **39**(5): 669-672.
MA Liyin, LI Yang, ZHOU Zhenggan. Design of phased array ultrasonic transducer for detection of aero engine turbine blade[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, **39**(5): 669-672.

[8] 徐娜，周正干，刘卫平，等. L 型构件 R 区的超声相控阵检测方法[J]. 航空学报, 2013, **34**(2): 419-425.
XU Na, ZHOU Zhenggan, LIU Weiping, et al. Ultrasonic phased array inspection method for the corner of L-shaped componeents[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, **34**(2): 419-425.

[9] 张冬梅，于光，周正干，等. 复合材料构件 R 区的超声相控阵检测实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, **39**(5): 688-692.
ZHANG Dongmei, YU Guang, ZHOU Zhenggan, et al. Ultrasonic phased array inspection for the corner of composite components[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, **39**(5): 688-692.

[10] 常俊杰，魏强，卢超，等. 宽带高灵敏度柔性相控阵换能器的发展与应用[J]. 无损检测, 2016, **38**(6): 24-27.
CHANG Junjie, WEI Qiang, LU Chao, et al. Development and application of broadband high sensitive flexible array probe[J]. Nondestructive Testing, 2016, **38**(6): 24-27.