

阵元失效对超声阵列换能器的影响及优化研究

尹冠军, 范皓然, 康栋栋, 郭建中

(陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西师范大学应用声学所, 陕西西安 710119)

摘要: 超声阵列换能器单个或多个阵元的振动效率、几何尺寸等参数的改变, 会影响整个阵列的声场分布等性能参数, 降低超声检测的分辨率及相应的检测效果. 基于阵列换能器声压分布理论, 利用自适应算法, 从阵元激励的角度, 探讨阵列超声换能器阵元激励的优化方法, 消除阵元失效的影响. 研究表明, 利用声场分布空间中有限数量的优化参考点, 经过对激励参数的优化, 可以使有阵元失效阵列的整个声场分布、指向性及聚焦特性等性能指标与标准无阵元失效阵列的基本一致, 达到期望的标准声场分布的参数指标, 大大降低超声检测设备的应用成本, 提高检测效果.

关键词: 超声相控阵; 阵元失效; 指向性; 分布误差; 自适应算法

中图分类号: TB559 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)08-1995-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.08.027

The Optimization Research on Element Failure of Ultrasonic Array Transducer

YIN Guan-jun, FAN Hao-ran, KANG Dong-dong, GUO Jian-zhong

(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Institute of Applied Acoustics, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract: Array transducer is the crucial component of all kinds of these instruments depending on ultrasonic phased array technology. While, efficiency changing and size error of a single element or several elements can make significant negative effects on the acoustic field and its directivity, and reduce the detection effect on the field of high performance and high resolution application. Using the adaptive algorithms, we presented a method to optimize and correct the array from the excitation mode of elements. By adjusting the excitation amplitude of each normal elements, the influence to the acoustic field from element failure can be decreased availably. The experiment results and theoretical analysis indicate that this method is much available to correct the acoustic field of the array with disabled elements by using the acoustic pressure of a few reference points in the field. In consequence, the array transducer with element failure or size errors can be well optimized by the method we proposed.

Key words: ultrasonic phased arrays; element failure; directivity; distribution errors; adaptive algorithm

1 引言

超声相控阵技术是一种较为成熟的控制阵列换能器辐射声场分布的方法^[1], 广泛应用于医学诊疗、工业无损检测、海洋探测开发、地震监测等多个领域^[2-4]. 其核心器件是由多个相互独立的压电晶片作为阵元, 按照一定的规则排列组成的超声阵列换能器. 通过特定

时序激励各个晶片, 可以灵活、便捷地控制声场的聚焦、扫描, 满足超声检测和成像的需要, 具有较高的灵敏度、分辨率和信噪比^[5,6]. 使用过程中, 随着使用时间的增长, 使用不当、磨损的增加等因素都会导致某些阵元辐射效率降低, 产生辐射失效问题; 实际制作过程中, 阵元实际尺寸与设计尺寸往往也会存在偏差, 影响换能器的性能, 降低精密检测的准确性^[7].

收稿日期: 2016-05-27; 修回日期: 2016-10-24; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11574192, No. 11274217); 陕西师范大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. GK201704003)

阵列换能器的优化一直是超声相控阵技术的研究热点,1999年,Wooh^[8,9]等学者研究了线性相控阵声束聚焦特征,分析了阵元数目、阵元间距、阵元尺寸、偏转角度对远场声压的影响.2010年,徐丰^[10]等学者认为误差主要影响声场聚焦区域能量的分布,提出通过提高相控阵发射总声功率等途径可以减小误差.2014年,Zhengyao He^[11]利用近场响应向量计算加权矢量使得换能器阵列在聚焦成像中减少旁瓣的产生,声波能量更加集中.

目前,该领域的大部分研究主要集中在提高标准换能器的声场指向性主瓣幅值,减小旁瓣等应用上^[12-14],对由于阵元尺寸误差和辐射效率变化等因素所产生的声场分布误差,特别是针对正在使用过程中的阵列换能器,主要的校正方法是提高阵元制造精度,或者直接更换整个换能器阵列.本文设想针对阵元的激励参数,利用自适应优化算法,对有阵元激励效率改变的有误差阵列的声场分布进行优化校正,减小由于阵元失效或几何误差所产生的对声场分布以及波束指向性的影响,确保检测设备的精度.根据常用的图像重建评价指标——峰值信噪比^[15,16],本文引入声峰值振幅误差比,对校正优化效果进行评估.

2 阵列换能器的声场分布及优化校正算法

2.1 相控线阵的声压分布

由 N 个相互独立的阵元组成的相控线阵如图 1 所示, a 为阵元宽度, b 为相邻阵元间距, r_i 代表第 i 个阵元到空间点 $A(r, \theta)$ 的距离.在远场,每一个阵元都可以近似为一个点源相互独立地辐射声波.

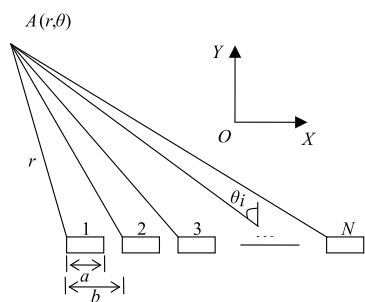


图1 阵列换能器示意图

为了统一表述阵元老化、失效等阵元误差因素对阵元辐射的影响,本文将尺寸误差、阵元损坏、阵元老化等因素引起的阵元辐射效率误差定义为失效因子 μ ,取值范围从 1 到 0,表示阵元从完全正常辐射到完全失效不辐射声波的失效程度。 μ 的大小取决于阵元几何尺寸和辐射效率的改变程度.单个阵元在空间点的辐射声压 P 和阵元失效因子 μ 成正比,其辐射声压如式(1)所示^[17].

$$P_{(r,t)} = \mu_i \frac{P_0}{r_i} e^{j(\omega t - kr_i)} \quad (1)$$

由叠加原理可得到阵列换能器在空间点的声压如式(2)所示.

$$P_{(r,\theta,t)} = \sum_i^N \mu_i \frac{P_0}{r_i} e^{i(\omega t - kr_i)} \quad (2)$$

上式中 μ_i 表示第 i 个阵元的失效因子.

2.2 基于自适应算法的声场优化

自适应算法是根据某种判据调整一定的加权系数,使得输入输出信号之间按照这个判据的误差最优的滤波估计算法.判据方法一般有迫零算法、最陡下降算法、最小均方算法(Least mean square,简称 LMS 算法)、递归最小二乘算法、以及各种盲均衡算法等^[18,19],本文研究对声场分布的校正优化,因此采用常用的 LMS 算法^[20].自适应滤波器原理框图如图 2 所示,如果期望信号 $d(t)$ 与由滤波器输入信号 $x(t)$ 激励的滤波器输出信号 $y(t)$ 之差的均方根值 $\varepsilon(t)$,未达到最小或最优,通过迭代算法调整加权系数 $\omega(t)$,直至 $\varepsilon(t)$ 达到最小或者最优.

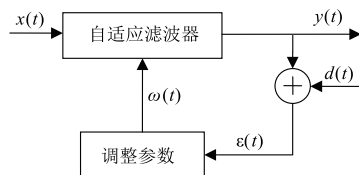


图2 自适应滤波器原理框图

基于自适应方法的声场优化程序流程图如图 3 所示.分别选择各个阵元进行优化,以线阵换能器在空间点 (i, j) 的声压 $P_a(i, j)$ 作为自适应滤波器的输出信号 $y(t)$,把线阵换能器的设计指标(标准阵列声压分布 $P_b(i, j)$)做为自适应滤波器的期望信号 $d(t)$,设定加权系数 $K(n)$ 初始值为 0,开始迭代调整当前阵元的激励 $x(t)$,直到得换能器的实际输出声压 $P_a(i, j)$ 和期望声压 $P_b(i, j)$ 的均方根误差值 $\varepsilon(m)$ 达到最小,输出的校正系数 $K(n)$,作为该阵元的激励优化系数,结束该阵元的迭代优化,然后进行下一个阵元加权系数的估计,直到完成所有阵元加权系数的估计.为提高优化结果,可以用此次结果作为初始值再次进行优化,直到误差达到要求.通过多次对比,一般优化 2-3 次以上,校正参数更新数据基本不变,误差达到最优.

2.3 优化效果的判据

在图像处理技术中,衡量原始图像与重构图像误差最常用的图像质量判据是峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio,简称为 PSNR)^[16],如式(3).

$$\text{PSNR} = 20 * \lg\left(\frac{255}{\text{RMSE0}}\right) \quad (3)$$

其中 RMSE0 为重构图像的均方根误差,如式(4).

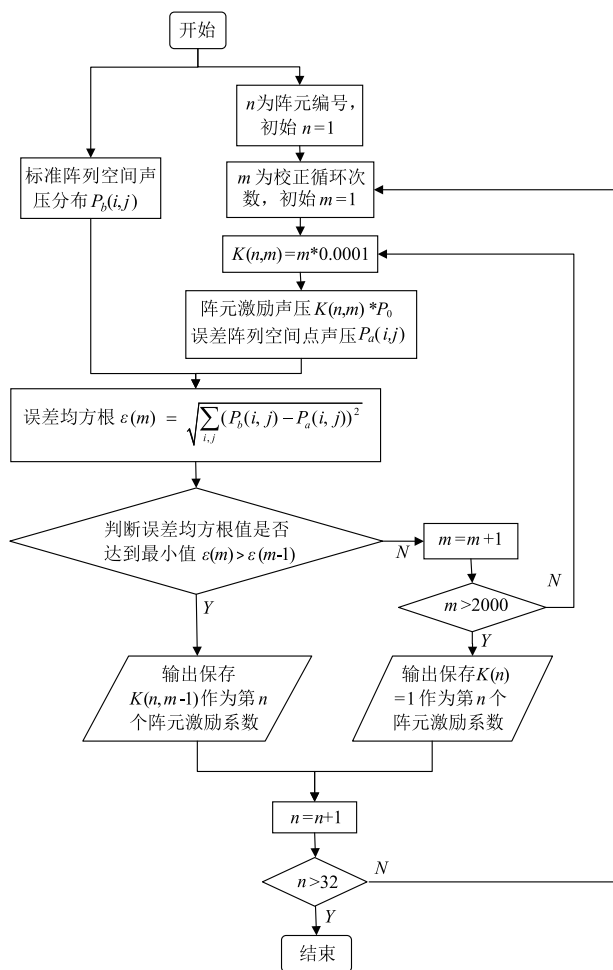


图3 自适应声场优化程序流程图

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [H(i,j) - K(i,j)]^2} \quad (4)$$

式中 m, n 是图像的点数, H, K 分别是图像每点的灰度值, 上述图像质量判据是基于图像的灰度值做具体对比分析。

本文中的声场分布图直接反映平面中各点的声压值, 因此为了评价经过激励优化后的非标准阵列声场分布情况, 本文根据 PSNR 方法原理, 将声场声压分布值类比为图像的灰度值, 提出声峰值振幅误差比 (Peak Amplitude to Error Ratio, 简称为 PAER) 作为评价声场优化误差的判据, 如式 (5)。

$$\text{PAER} = 20 * \lg\left(\frac{P_{\max}}{\text{RMSE}}\right) \quad (5)$$

其中 P_{\max} 为标准阵列声场中声压最大值, RMSE 为标准阵列与有阵元失效阵列声场各点声压的均方根误差值:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{IJ} \sum_i \sum_j [P_b(i,j) - P_a(i,j)]^2} \quad (6)$$

式中 $P_b(i,j)$ 为有限元仿真实验中标准阵列的声压分布, $P_a(i,j)$ 为有阵元失效阵列的声压分布, I 和 J 分别为整个

声场中声压采样点在采样区横纵坐标上的最大值。

3 阵列换能器声场分布

3.1 理想及有阵元失效阵列换能器的声场分布

为不失一般性, 我们研究各阵元同相激励产生的平面波叠加声场和根据相控阵聚焦原理^[21]对各阵元进行相应的相位延时激励得到的偏转聚焦叠加声场两类分布情况。

3.1.1 理想阵列换能器声场分布

设线阵换能器参数为: 阵元声速 $c = 6260\text{m/s}$, 阵元个数 $N = 32$, 阵元间距 $b = 4\text{mm}$, 阵元宽度 $a = 2\text{mm}$, 声波频率 $f = 50\text{kHz}$, 激励声压振幅 $P = 10000\text{Pa}$ 。对 32 个阵元同相位激励, 通过有限元仿真, 得到均匀线阵的平面声场瞬时声压图如图 4(a1) 所示, 阵列换能器有效声压指向性如图 4(a2) 所示; 对各个阵元按照相控阵聚焦原理^[21]计算得到的相位延时进行激励, 得到偏转角为 30° , 焦点位置距离中心阵元 50mm 处的偏转聚焦声场, 其瞬时声压图如图 4(b1) 所示, 阵列换能器有效声压指向性如图 4(b2) 所示。

3.1.2 有阵元失效阵列换能器的声场分布

假设阵列换能器的失效阵元为第 16 个阵元和第 17 个阵元, 失效因子 $\mu = 0$, 其他阵元正常辐射声波, 失效因子 $\mu = 1$ 。对阵列分别进行相应的同相位激励和相位延时激励, 得到对应的平面波声场分布和偏转聚焦声场分布如图 5(a1) 和图 5(b1) 所示, 声场有效声压指向性图分别为图 5(a2) 和图 5(b2)。

3.2 换能器优化校正的最优参数选择

优化校正的目标是, 从图 5(a1) 所示的有阵元失效阵列的平面波声场分布, 通过对其它未失效阵元激励振幅进行优化, 使有阵元失效阵列声场分布与图 4(a1) 中的标准阵列声场分布的相对误差达到最小, 满足实际使用要求。针对通常超声相控阵声场的应用, 我们选择声场中较大的且最主要的区域进行优化: 取图 4(a1) 中 x 方向 -100mm 到 100mm 的宽度范围, y 方向 5mm 到 170mm 的高度范围, 每 1mm 为一个采样点, 得到 $I = 201$ 列, $J = 166$ 行, 这样一个声压采样区域。

校正方法是基于式 (2), 计算 32 个标准阵元在空间多个点的声压值; 按照上述阵元失效的假设情况, 得到有阵元失效阵列换能器声场中对应空间多个点的声压值。利用图 3 所示程序, 以有阵元失效阵列和标准阵列的声压误差均方根值 $\varepsilon(m)$ 达到最小为判断标准, 得到各阵元的校正系数 $K(n)$ 。将 $K(n)$ 应用于有限元仿真, 调整各阵元的激励参数, 获得经过校正优化的有阵元失效阵列的声压分布, 通过分析该声场分布与标准阵列声压分布图 4(a1) 的声峰值振幅误差比 (PAER), 来分析校正参数对有阵元失效阵列的校正优化效果。

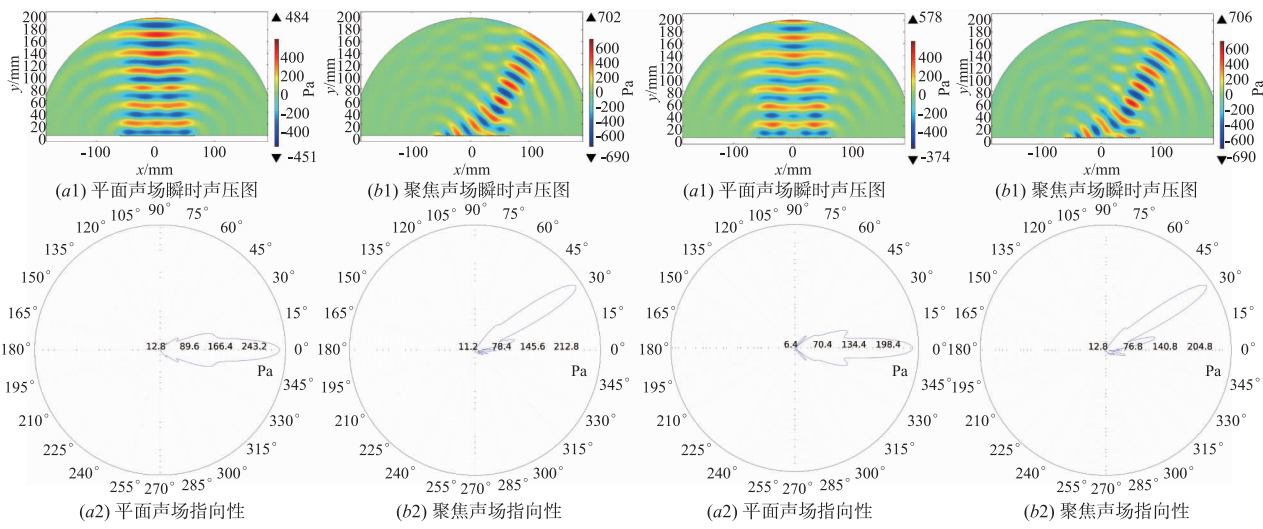


图4 标准阵列换能器辐射声场

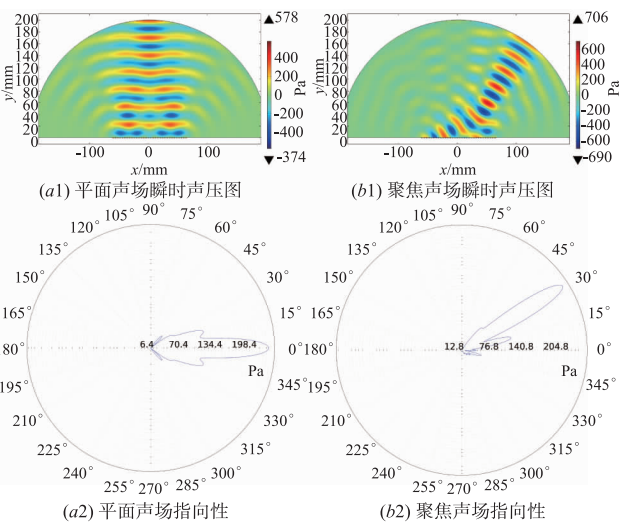


图5 有阵元失效阵列换能器辐射声场

很显然,空间参考点位置和数量的选择与校正效果直接相关.但是,如果选择采样区域中全部点作为校正参考点,计算量非常大,也不现实.本文探讨利用声场分布中最少的参考点,达到最优的优化校正效果.为探讨最佳的校正参考点的选择,我们在自适应程序中分别选择距离阵列 $l = 10\text{mm}, 20\text{mm}, 30\text{mm}, 40\text{mm}, 50\text{mm}$ ($L1, L2, L3, L4, L5$) 的 5 条平行线作为参考线,在每条参考线上设置数量为 Num,间距均匀分布的参考点,分别估计对应的校正系数.根据校正系数改变有阵元失效阵列各阵元的激励幅度,在有限元仿真中,得到校正后的声场分布,与标准阵列仿真声场比较,得到 PAER.

这样,每条参考线上参考点的个数占采样区域横向总点数的比例(Num/I)和校正后声场的 PAER 的对应关系如图 6 所示.图中 $L1-L5$ 为各参考线对应得到的 PAER.

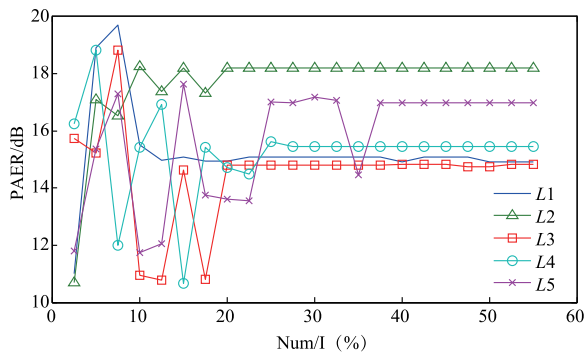


图6 参考点数对校正结果的影响

3.3 有阵元失效阵列的优化校正

经过对校正点的最优选择,取 $l = 20\text{mm}$ 这条参考线上 80 个参考点(即选择了 40% 的参考点数量)计算得到的各阵元的校正系数.按照有阵元失效阵列的仿真参数,利用校正系数,对应调整各阵元的激励振幅,

得到校正后有阵元失效阵列的平面声场和偏转聚焦声场的瞬时声压图分别如图 7(a1) 和图 7(b1) 所示,有效声压指向性分别如图 7(a2) 和图 7(b2) 所示.

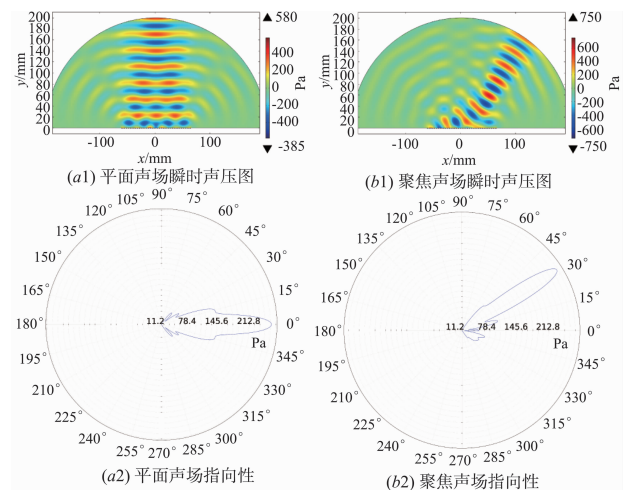


图7 两阵元失效阵列换能器校正后辐射声场

4 分析与讨论

(1) 校正参考点的最优选择

图 6 中五条曲线 $L1-L5$ 分别为校正程序中选择的五条参考线上的参考点数占声场采样区域横向点数的比例(Num/I)与校正结果的 PAER 的关系.当参考点数小于 50,占声场横向点数比例小于 20% 时,五条线起伏波动较大,PAER 不稳定.这是因为当参考点数较少时,这些点的声压值不能完全体现整个声场的分布特点,校正结果失真,造成每次校正结果差异较大.当参考点数占声场横向点数比例大于 20% 时,五条线基本都趋于平缓,表明校正后的 PAER 基本稳定.这是因为参考点数越多,越能体现整个声场分布特点,校正结果越可

靠. 参考线距离为 $l = 20\text{mm}$ 时校正效果最好. 经过多次比较实验, 也发现参考线选择在近远场的交界区域时校正结果比较理想.

(2) 阵元失效对声场的影响

通过标准阵列声场分布图(图 4)与有失效阵元阵列声场分布图(图 5)的比较, 由于存在失效阵元, 阵列换能器的瞬时声压分布图(图 4(a1)与图 5(a1)以及图 4(b1)与图 5(b1))存在明显的偏差. 特别是在接近失效阵元的区域, 声压与标准阵列声场之间有明显变化, 对于聚焦声场的影响更大, 其主瓣峰值减小, 旁瓣峰值

增大.

(3) 自适应算法对有阵元失效阵列换能器声场分布的校正

图 7 是经过校正参数校正后的有失效阵元的阵列换能器的声场分布图, 从平面声场图(图 7(a1))和偏转聚焦声场图(图 7(b1))中可以看到, 声场明显趋于标准阵列的声场分布.

标准阵列, 有阵元失效阵列和校正后的有阵元失效阵列三种情况的声场分布获得的参数整理如表 1.

表 1 阵列换能器声场分布情况

	平面声场			偏转聚焦声场		
	主瓣峰值(Pa)	旁瓣峰值(Pa)	分布相对误差	主瓣峰值(Pa)	旁瓣峰值(Pa)	分布相对误差
标准阵列	287.54	140.8		256.71	100.8	
有阵元失效阵列	232.62	110.6	45.31%	240.01	112	11.04%
校正后有阵元失效阵列	248.92	128.0	30.26%	255.96	95.2	1.36%

从表中数据可以看到校正后有阵元失效阵列的平面声场, 主瓣峰值增加到 248.92Pa, 旁瓣峰值达到 128.0Pa, 其分布相对误差也从 45.31% 降低到 30.26%. 而聚焦声场, 主瓣峰值升高到 255.96Pa, 基本和标准阵列一致, 旁瓣峰值为 95.2Pa, 和标准阵列接近, 其分布误差也降低到了 1.36%, 声场分布情况基本和标准阵列基本一致, 优化校正效果理想.

(4) 自适应算法对有阵元效率误差的阵列换能器声场分布的校正

本文主要研究阵元完全失效对阵列换能器的影响以及利用基于自适应算法的校正程序对有阵元失效阵列进行校正. 实际应用中经常出现阵元存在效率误差的情况, 即 μ 为 0 到 1 之间. 利用本文提出的校正方法, 我们做了大量实验, 验证了程序针对这类情况的有效性. 相对于阵元失效的校正需要通过调整其它阵元校正系数补偿失效阵元, 对误差阵元的校正, 我们可以通过调整误差阵元本身的校正系数补偿其效率误差的影响. 本文提出的校正程序同样适用于有效率误差但是并没达到完全失效的情况.

5 结论与展望

针对由于阵元失效引起的换能器声场偏差, 利用自适应算法原理估计有失效阵元阵列的校正系数, 从激励方式角度, 实现优化校正. 理论分析及仿真实验结果表明, 阵元失效对换能器的辐射声场有明显的影响; 用声峰值振幅误差比(PAER)作为评价优化校正效果的判据是可行的; 在近场区域选择平行于阵列的参考线, 在参考线上选择超过声场采样区域横向点数 20% 比例的参考点, 可以作为整个声场的校正标准; 利用自适应算法, 从阵元激励参数的角度, 可以较好地对有阵

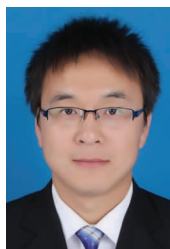
元失效阵列进行优化校正, 使有指向性等性能指标能达到或接近标准阵列的辐射声场标准. 这种校正方法可以降低阵列换能器制造中对几何精度的过高要求, 不仅可以减少阵列换能器使用期间由于阵元损坏需要更换阵元的情况, 延长实际应用中阵列换能器的服役时间, 而且为特殊形状的声场分布要求及阵列换能器的研制和声场优化方式提供了一种新的技术方案.

参考文献

- [1] Azar L, Shi Y, Wooh S C. Beam focusing behavior of linear phased arrays[J]. NDT & E International, 2000, 33(3): 189 - 198.
- [2] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925 - 934.
Jin S J, Yang X X, Chen S L, et al. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology[J]. J Electr Meas Instr, 2014, 28(9): 925 - 934. (in Chinese)
- [3] Ellens N, Hynynen K. Simulation study of the effects of near-and far-field heating during focused ultrasound uterine fibroid ablation using an electronically focused phased array: A theoretical analysis of patient safety[J]. Med Phys, 2014, 41(7): 072902.
- [4] Drinkwater B W, Wilcox P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review[J]. Ndt & E Int, 2006, 39(7): 525 - 541.
- [5] Lee J H, Choi S W. A parametric study of ultrasonic beam profiles for linear phased array transducer[J]. IEEE Ultrason Ferroelect Freq Contr Trans, 2000, 47(3): 644 - 650.
- [6] 刘波, 郭建中. 载频调制二相编码激励的超声成像信噪比提高研究[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 2701 - 2707.

- LIU B, Guo J Z. Research on SNR Improvement in ultrasonic imaging by coded excitation with carrier modulation [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(11): 2701 - 2707. (in Chinese)
- [7] 姚旭, 郭建中. 线阵阵元间距和宽度对波束指向性的影响[J]. *陕西师范大学学报*, 2010, 38(1): 46 - 50.
- Yao X, Guo J Z. Influence of linear array element width and element spacing on beam steering behavior [J]. *J Shaanxi Normal University*, 2010, 38(1): 46 - 50. (in Chinese)
- [8] Wooh S C, Shi Y. Optimum beam steering of linear phased arrays [J]. *Wave Motion*, 1999, 29(3): 245 - 265.
- [9] Wooh S C, Shi Y. Influence of phased array element size on beam steering behavior [J]. *Ultrasonics*, 1998, 36(6): 737 - 749.
- [10] 徐丰, 陆明珠, 万明习, 等. 256 阵元高强度聚焦超声相控阵系统误差与多焦点模式精确控制 [J]. *物理学报*, 2010, 59(2): 1349 - 1356.
- Xu F, Lu M Z, Wan M X, et al. System errors of a 256-element high intensity focused ultrasound phased array and precise control of multi-focus patterns [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(2): 1349 - 1356. (in Chinese)
- [11] He Z. Optimization of acoustic emitted field of transducer array for ultrasound imaging [J]. *Bio-Med Mater Eng*, 2014, 24(1): 1201 - 1208.
- [12] Lookwood G R, Foster F S. Optimizing the radiation pattern of sparse periodic two-dimensional arrays [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 1996, 43(1): 15 - 19.
- [13] Diego C, Jimenez A, Hernandez A, et al. Improved ultrasonic phased array based on encoded transmissions for obstacle detection [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(2): 827 - 835.
- [14] Wooh S C, Shi Y. Optimum beam steering of linear phased arrays [J]. *Wave Motion*, 1999, 29(3): 245 - 265.
- [15] Huynh-Thu Q, Ghanbari M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment [J]. *Electr Lett*, 2008, 44(13): 800 - 801.
- [16] 郭建中, 秦晓伟. 稀疏化的压缩传感超声图像重构特性研究 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2012, 42(6): 743 - 753.
- Guo J Z, Qin X W. The performance of reconstruction ultrasound imaging based on compressed sensing by sparsity [J]. *Science China Information Sciences*, 2012, 42(6): 743 - 753. (in Chinese)
- [17] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. *声学基础* [M]. 南京: 南京大学出版社, 2012. 218 - 222.
- [18] Walach E, Widrow B. The least mean fourth (LMF) adaptive algorithm and its family [J]. *IEEE Trans Inform Theory*, 1984, 30(2): 275 - 283.
- [19] Smolka B, Plataniotis K N, Chydzinski A, et al. Self-adaptive algorithm of impulsive noise reduction in color images [J]. *Patt Recogn*, 2002, 35(8): 1771 - 1784.
- [20] Fukada T, Tokuda K, Kobayashi T, et al. An adaptive algorithm for mel-cepstral analysis of speech [J]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1992, 1: 137 - 140.
- [21] 郑莉, 郭建中. 圆环形聚焦声场的构建与调控 [J]. *物理学报*, 2016, 65(4): 44305 - 044305.
- Zheng L, Guo J Z. A controllable circular ring acoustic focused field [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(4): 44305 - 044305. (in Chinese)

作者简介



尹冠军 男, 1991 年 11 月出生于陕西西安, 现为陕西师范大学物理信息技术学院、陕西省应用声学所博士研究生在读, 主要研究方向为应用声学及医学超声。
E-mail: yinguanjun123@126.com



郭建中 (通信作者) 男, 1967 年 1 月出生于陕西西安, 现为陕西师范大学物理与信息技术学院、陕西应用声学研究所教授, 主要研究方向为医学超声、超声信号检测及处理。
E-mail: guojz@snnu.edu.cn