

基于遗传算法的超声换能器阵列优化设计

李夕海,康志谦,杨婷婷,李祥雨

(火箭军工程大学 核工程学院,陕西 西安 710025)

摘要:声频定向传输系统可向外发射具有高指向性的声波信号,在工业、医疗和军事等领域具有重要的研究意义和价值。换能器阵列作为该系统中最关键的一环,仍存在成本高,能量转化率低和设备结构复杂等缺点。该文采用遗传算法对阵列布局方式进行优化设计,分析了阵元排列方式和数目对阵列指向性的影响,以达到在减少阵元使用数量的同时有效抑制旁瓣的目的。仿真实验表明,采用遗传算法优化后的阵列可使用更少的阵元数目,同时获得更低的旁瓣,使能量更集中在主瓣方向。因此,该方法可降低阵列设计的复杂度和制造成本,对于声频定向传输系统的改进具有一定的借鉴意义。

关键词:声频定向传输系统;超声波;换能器;阵列;遗传算法

中图分类号: TN912; TM935

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.04.013

Optimal Design of Ultrasonic Transducer Array Based on Genetic Algorithm

LI Xihai, KANG Zhiqian, YANG Tingting, LI Xiangyu

(Nuclear Engineering College, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: The acoustic directional transmission system can transmit acoustic signals with high directivity outward and has many applications in the fields of industry, medical treatment and military. As the most critical part of the system, the transducer array still has the disadvantages of high cost, low energy conversion efficiency and complex equipment structure. In this paper, the genetic algorithm is used to optimize the array layout and the effect of arrangement and amount of array elements on the array directivity is analyzed in detail to get the purpose of reducing the number of array elements and suppressing the side-lobe effectively. The simulation experiment shows that the array optimized by the genetic algorithm can use less array elements and obtain lower side-lobe, so that the energy is more concentrated in the main lobe direction. Therefore, the proposed method can reduce the complexity of the array design and manufacturing cost, and has certain reference value for the improvement of the audio directional transmission system.

Key words: acoustic directional transmission system; ultrasonic; transducer; array; genetic algorithm

0 引言

声频定向传输理论是声学研究中的一个较新领域。其基本原理是根据非线性声学中的声参量效应,利用超声波具有波长短,指向性强且在大气中衰减迅速的特点,将所需传播的低频声信号调制到超声频段,该信号在传播过程中即可自我解调出具有高指向性的低频声信号^[1]。声频定向传输系统也称作声学参量阵,因此,也称具有定向传播声频能力的扬声器为参量阵扬声器^[2]。利用超声换能器组成的高指向性超声波发射阵列是该系统的关键部分^[3]。

本文基于平面阵列的指向性理论,采用遗传算法对阵元数目及布局方式进行了优化研究,以达到控制成本,降低系统复杂度,同时抑制旁瓣级的目的。

1 均匀平面阵列指向性函数

目前的研究中,均匀二维布局的阵列是最广泛采用的一种超声换能器阵列的布局形式^[4]。如图1所示,该阵列位于 xoy 平面上,沿 x 轴的 N 个换能器阵元和沿 y 轴的 M 个换能器阵元分别以间距 r_x , r_y 均匀排列,共 $N \times M$ 个阵元^[4]。

收稿日期:2017-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41374154)

作者简介:李夕海(1975-),男,山东诸城人,教授,主要从事智能信息处理与识别方面的研究。通信作者:康志谦(1995-),男,陕西渭南人,硕士生,主要从事声学信号处理的研究。

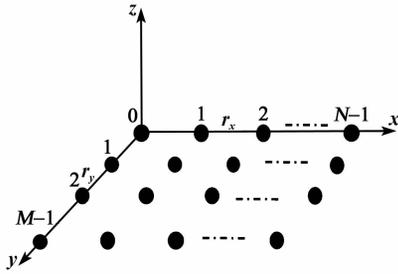


图1 均匀平面阵列

定义一个声源所辐射的声场空间分布的函数为指向性函数^[5],且

$$D(\theta, \phi) = \frac{|F(\theta, \phi)|}{|F(\theta_0, \phi_0)|} \quad (1)$$

式中: $|F(\theta, \phi)|$ 为在远场距离为 r 的球面各个方向上声压的幅值,将垂直 x 轴观察时声束与主瓣的夹角记为俯仰角 θ ;将垂直 y 轴观察时声束与主瓣的夹角记为方位角 ϕ 。 (θ_0, ϕ_0) 为主瓣的所指方向, $|F(\theta_0, \phi_0)|$ 即为主瓣声压幅值,是所有方向上声压中的最大值^[3]。

建立一球坐标系,令阵列的声中心为坐标原点,设空间中远场有一点 Q ,用 $(\cos \alpha_x, \cos \alpha_y, \cos \alpha_z)$ 表示该点所在的方向,如图 2 所示。各换能器阵元到目标点 Q 存在的路程差决定了信号传输过程中的相位差。因此,第 (n, m) 个阵元与参考阵元 $(0, 0)$ 沿 x, y 轴的空间相位差可分别表示为

$$\begin{cases} \Delta\phi_x = \frac{2\pi}{\lambda} r_n \cos \alpha_x \\ \Delta\phi_y = \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cos \alpha_y \end{cases} \quad (2)$$

式中: λ 为超声波的波长; r_n 与 r_m 分别为第 (n, m) 个阵元与参考阵元在 x, y 轴上的距离。

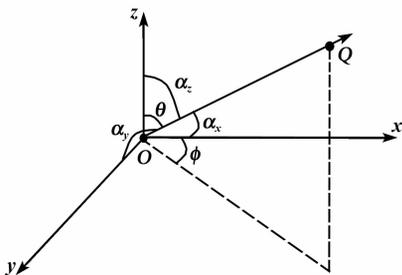


图2 远场目标点坐标关系

观察图 2 中几何关系可知:

$$\begin{cases} \cos \alpha_x = \sin \theta \cos \phi \\ \cos \alpha_y = \sin \theta \sin \phi \\ \cos \alpha_z = \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

一般情况下,各阵元采用相同的换能器组件及

等幅的激励输入,因此认为各阵元具有一致的振幅,可忽略其影响。根据乘积定理^[2],均匀平面阵列是由沿 x, y 轴分布的线阵列的组合,此时该平面阵列指向性函数 $D(\theta, \phi)$ 表示为

$$D(\theta, \phi) = D_1(\theta, \phi) \cdot D_2(\theta, \phi) \quad (4)$$

其中

$$D_1(\theta, \phi) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r_n (\sin \theta \cos \phi - \sin \theta_0 \cos \phi_0)} \right| \quad (5)$$

$$D_2(\theta, \phi) = \left| \sum_{m=0}^{M-1} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r_m (\sin \theta \sin \phi - \sin \theta_0 \sin \phi_0)} \right| \quad (6)$$

式中 $D_1(\theta, \phi), D_2(\theta, \phi)$ 分别为 x, y 轴上线阵列的指向性函数。假设一均匀平面超声换能器阵列由 10×20 个阵元组成,所有换能器阵元满足等幅全向性,发射声频为 25 kHz,阵元间距为 8 mm。根据式 (1) 计算平面阵列指向性如图 3~5 所示。本文将垂直于 x 方向观测所得指向性图称为俯仰向上的指向性图,垂直于 y 轴观测所得指向性图称为方位向上的指向性图。图 3 中,将指向性函数值取对数并进行归一化处理即为阵列增益。

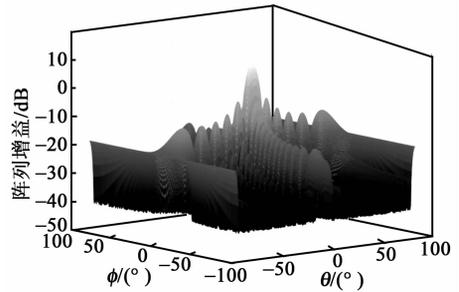


图3 阵列三维指向性

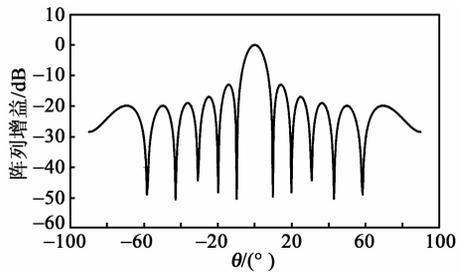


图4 阵列俯仰向指向性

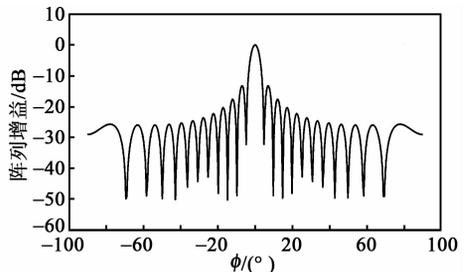


图5 阵列方位向指向性

根据文献[6-7]可知,多阵元数、高密度换能器阵列具有更出色的指向性,但这受换能器的生产工艺和设备制造成本限制。当阵元数目过少时,阵列无法在主瓣方向形成尖锐的指向性,降低声信号定向传播能力。如何在设计阵列时权衡这一对矛盾,减少阵元使用数目、降低设备制造难度的同时使阵列仍具有较好的指向性,这需要对其中阵元的排列布局进行优化设计。显然,该问题存在着庞大的排列组合规模,若是通过枚举法,计算机很难在如此巨大的搜索空间内求出其最优解,因此,本文选择遗传算法对此问题进行优化处理。

2 遗传算法

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的自适应全局优化搜索算法。它借用生物遗传学的观点,通过对历代种群施加选择、交叉和变异等遗传学操作,最终演化得到更适应环境的个体,即种群进化到包含最优解的状态。因此,自提出遗传算法后,因其具有并行、高效和全局搜索的特点,在组合优化、函数优化和机器学习等领域被广泛应用[4,8]。

为选取最优的阵列布局形式,本文首先构建一组由不同阵元个数、不同排列方式组成的阵列集合,然后通过遗传算法进行历代演化运算,最终得出最优方案。

2.1 算法步骤

1) 创建由一定数量的个体构成的初始种群。本文将不同的阵列排列方式称为不同的个体,阵元的位置信息保留在个体的“基因”中。用 f_{nm} 表示相应位置阵元的状态, $f_{nm} = 0$ 表示对应位置去掉阵元, $f_{nm} = 1$ 表示该位置保留阵元。本文中个体的基因维数为 10×20 。

2) 设计适应度函数。对均匀排列的平面阵列进行优化,应在给定的阵元数目条件限定下,同时考虑阵列处理后旁瓣增益和主瓣宽度变换情况。 M_{dB} 是指阵列中最大的旁瓣增益[2],根据公式

$$M_{dB} = -20 \lg \left| n_0 \sin\left(\frac{3\pi}{2n_0}\right) \right| \quad (7)$$

式中 n_0 为阵元数目。

主瓣宽度 Θ_{-3dB} 是最大阵列增益值下降 3 dB 处两点之间的夹角。本文希望经过优化处理后得到的最佳结果拥有最低的旁瓣级和最尖锐的主瓣,因此,取适应度函数 $f_{fitness}$ 为 M_{dB} 与 Θ_{-3dB} 和的相反数,即

$$f_{fitness} = -(M_{dB} + \Theta_{-3dB}) \quad (8)$$

由式(8)可知,最优的布局方式就拥有最大的适应度函数值。

3) 选择操作。经过上述步骤,求得每一代中每一个个体适应度函数的值,然后根据遗传算法中经典的“轮盘赌”选择法[4]选择个体,即个体的适应度函数值越大,被选择的概率就越大,反之亦然。

4) 再按照一定的概率进行交叉和变异运算,原始的阵列排布形式得到更新,称为新一代种群。将新产生的种群返回步骤 3),进行下一次遗传操作。

5) 循环操作步骤 3)、4),当循环次数达到要求后输出适应度函数取得最大值时所对应的个体,即为最优解。

算法的流程图如图 6 所示。

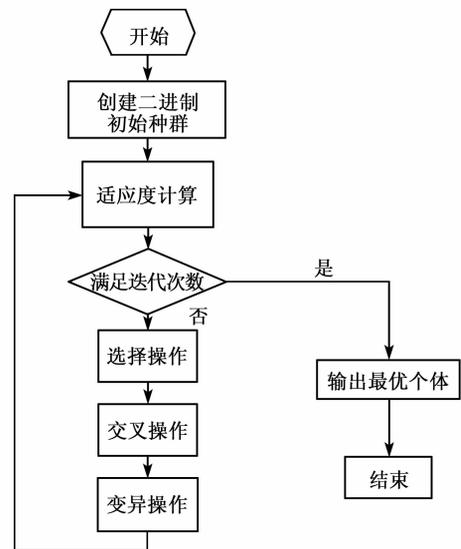


图 6 算法流程

2.2 仿真实验

选择文中最初提到的平面阵列进行优化。根据经验,为兼顾算法的性能和运算效率,将遗传算法中初始化种群数目设为 50,最大进化代数为 300,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.05。

对于初始种群的设定,本文设优化后阵元数目为 N_w ($N_w \leq 200$) 个,通过在 $[0, 1]$ 之间产生符合高斯分布的随机数,令种群中每个个体有 N_w 个基因的取值为 1,剩下的全部为 0。在后续的全部操作中保持 N_w 始终不变,当子代中存在个体阵元数目与 N_w 不等时,从该个体当前状态为 1 或 0 的所有阵元中随机选择差额数目个阵元,强制命令其状态更改为 0 或 1。

图7为优化处理后阵列的峰值增益随阵元数目减少时的变化。由图可看出,将布满200个阵元时的阵列峰值增益设为0,当所使用阵元数目在40%左右时,每减少10个阵元,峰值增益下降约0.12 dB。阵列的峰值增益与其数量的变化基本呈现线性关系,但当阵元使用量继续下降时,阵列的峰值增益开始迅速恶化。因此,在对阵列进行优化时,阵元数目的选择应在一定的范围内进行,若阵元数目过少,阵列的峰值增益太低则优化将失去意义。

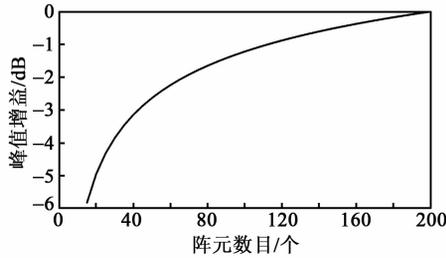


图7 优化后阵列的峰值增益与阵元数目的关系

若峰值增益损失在0.5 dB内可接受,此时令 $N_w=150$ 进行阵列优化处理。优化结束后,阵列的指向性如图8~10所示。阵元位置优化结果如图11所示。

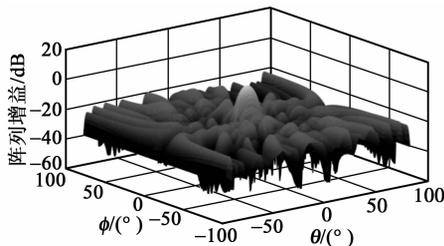


图8 优化后阵列三维指向性

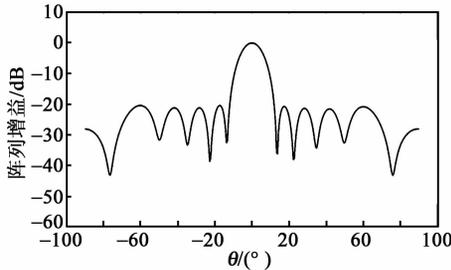


图9 优化后阵列俯仰向指向性

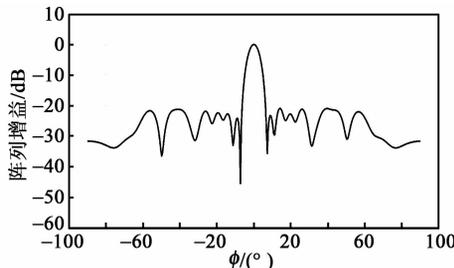


图10 优化后阵列方位向指向性

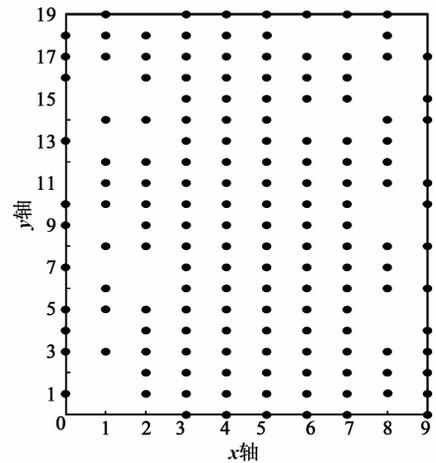


图11 优化后阵元位置布局情况

3 实验对比

图12为该平面阵列优化前、后俯仰向指向性对比图。由图可知,旁瓣得到明显抑制,主瓣方向上的阵列增益高出旁瓣级20.38 dB。阵元数目减少的同时,在主瓣尖锐程度方面带来了一定损失,但通过优化算法中关于适应度函数的合理设计,可将损失控制在一个较低的水平。和优化前相比,主瓣向两侧仅展宽了 1.2° ,变为了现在的 11° 。图13为阵列优化前、后方位向指向性对比图。由图可知,主瓣两侧的旁瓣增益明显下降,均约为-24 dB。旁瓣级由优化前的-13.26 dB下降到-21.21 dB,且远离主瓣。主瓣宽度由优化前的 5° 略微展宽,为优化后的 6° 。

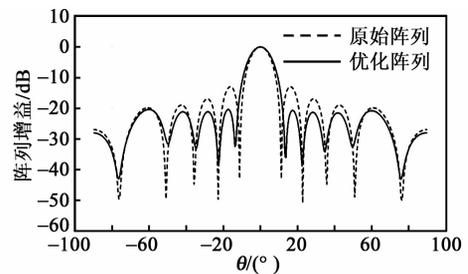


图12 优化前、后俯仰向指向性对比

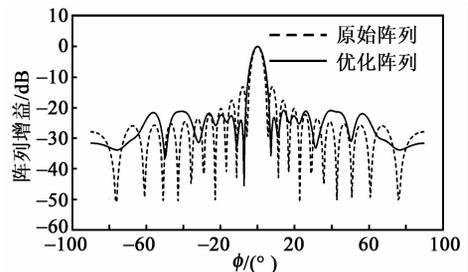


图13 优化前、后方位向指向性对比

可见,经遗传算法的优化处理,该阵列在空间中

形成了尖锐的扁平状指向性图,旁瓣增益得到了很好的抑制,无栅瓣出现。与此同时,换能器阵元的使用数量,由优化前的200个下降到现在的150个,降低了25%,不仅降低了换能器阵列的生产成本和复杂度,还有助于提高整个声频定向传输系统的能量转化效率。

为了进一步检验该优化设计方法的性能,比较阵元数目相同时采取该排布方式所得阵列指向性是否更理想,本文选取由 10×15 个阵元均匀布局的阵列,其中各阵元间距保持8 mm,其他参数也保持与图3中阵列一致。对优化与均匀布局两种阵列所得结果进行对比,如图14、15所示。由图可知,与均匀布局阵列相比,优化后阵列的旁瓣增益下降明显,且主瓣的尖锐程度提升。说明在阵元数目保持不变的情况下,采用本文设计的遗传算法对阵列布局进行优化设计后可获得更好的阵列指向性。

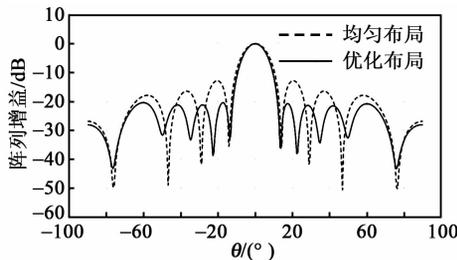


图14 两种布局方式下俯仰向指向性对比

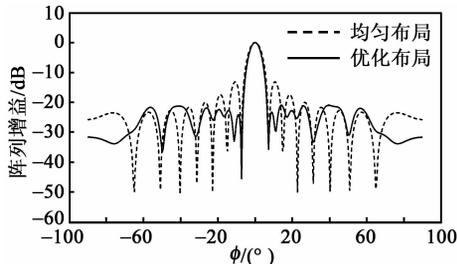


图15 两种布局方式下方方位指向性对比

4 结束语

本文基于遗传算法,完成了对超声换能器阵列的指向性优化设计。一方面在阵列尺寸不改变的情况下,减少阵元使用数目;一方面在使用阵元数目一定的情况下,优化阵元布局方式。根据仿真实验结果可看出,阵列的指向性得到了很好的优化,与优化

前相比,现有的阵列可获得能量更集中的主瓣波束和更低的旁瓣级,且减少了换能器的使用数量,降低了设备的复杂度,有效控制了设备的制造成本。

参考文献:

- [1] 李德科. 基于声学参量阵的声频定向传输系统原理及应用研究[D]. 成都:电子科技大学,2011.
- [2] 栾桂冬,张金铨,王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京:北京大学出版社,2004:327-380.
- [3] 李婷婷,王炳和,林志远. 一种新型的参量阵扬声器阵列设计与优化[J]. 压电与声光,2010,32(1):78-81.
LI Tingting, WANG Binghe, LIN Zhiyuan. Design and optimization of a new parametric array loudspeaker[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(1):78-81.
- [4] 包子阳,余继周. 基于MATLAB的遗传算法及其在稀布阵列天线中的应用[M]. 北京:电子工业出版社,2017:5-33.
- [5] 林建,马建敏,庄子听. 换能器组阵对声场指向性的影响[J]. 噪声与振动控制,2010,30(3):55-59.
LIN Jian, MA Jianmin, ZHUANG Ziting. Influence of transducer array on directivity of acoustic fields[J]. Noise and Vibration Control, 2010, 30(3):55-59.
- [6] 宋蕊,张明,冯怡斯. 压电MEMS超声换能器阵列声场研究[J]. 压电与声光,2015,37(2):219-222.
SONG Rui, ZHANG Ming, FENG Yisi. Research on sound field of MEMS piezoelectric ultrasonic transducer array[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(2):219-222.
- [7] 刘健康,王莉,鲁五一,等. 影响超声换能器阵指向性的几个关键因素研究[J]. 压电与声光,2013,35(4):564-567.
LIU Jiankang, WANG Li, LU Wuyi, et al. Study on several key factors of influencing the directivity of ultrasonic transducer array[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(4):564-567.
- [8] 李蕾,王建明,伍光新,等. 基于自适应遗传算法的稀布阵天线优化[J]. 现代雷达,2017,39(3):59-61.
LI Lei, WANG Jianming, WU Guangxin, et al. Optimization of sparse array based on adaptive genetic algorithm[J]. Modern Radar, 2017, 39(3):59-61.