

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108513

高指向性声阵列后向辐射抑制及优化方法

王 波,赵治华,陆智淼,胡安琪,张 磊

(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室 武汉 430033)

摘 要:按一定几何结构排布的离散声阵列具有能量集中、辐射方向可调、布置灵活等优点。针对声阵列辐射高强度低频声波时定向难度大和后向辐射能量难以屏蔽的问题,提出一种阵列布局及优化方法。利用横向布置的线型阵限制主波束的宽度,给出了指向性的设计准则;通过控制多层线型阵的纵深位置和相位延迟实现了对后向辐射的抑制;最后提出一种改进的遗传模拟退火算法用于优化阵元的横向位置,进一步降低方向图旁瓣。仿真和声场测试结果表明该设计方法可以有效对阵列指向性和后向辐射水平进行控制,设计的纵深相控阵在发射 100 Hz 声波时前向 4 m 处的半功率角为 21.91° , $50^\circ \sim 60^\circ$ 方向上的平均抑制比为 8.82 dB, $90^\circ \sim 180^\circ$ 方向上的抑制比超过 20 dB。

关键词:纵深相控阵;矢量合成;后向抑制;遗传模拟退火算法

中图分类号: TH73 TB51 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Design and optimization method of backward radiation suppression for high directivity acoustic array

Wang Bo, Zhao Zhihua, Lu Zhimiao, Hu Anqi, Zhang Lei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Discrete acoustic array arranged in a certain geometric structure takes advantages of energy concentration, adjustable radiation direction, and flexible configuration. An array design and optimization method is proposed to solve the difficulty of controlling orientation direction and backward radiation suppression when the acoustic array radiates high-intensity low-frequency sound waves. Firstly, the horizontally arranged linear array is used to limit the width of the main beam, and the design principle of directivity is analyzed. Then, the vertical position and phase of the multi-layer linear array are controlled, thereby achieving the suppression of backward radiation. Finally, an improved genetic simulated annealing algorithm is proposed to optimize the lateral coordinate of the array element and further improve the performance of the array. Simulation and sound field test results show that the design method can effectively control the directivity and backward radiation level of the array. The test results are consistent with the theoretical analysis. When the designed depth array emits 100 Hz sound waves, the half-power angle is 21.91° . The average radiation suppression ratio in the direction from 50° to 60° is 8.82 dB and the radiation suppression ratio in the direction from 90° to 180° exceeds 20 dB.

Keywords: depth phased array; vector composition; backward suppression; genetic simulated annealing algorithm

0 引 言

高指向性声阵列在无损检测^[1-3]、医学治疗^[4-5]、主动降噪^[6-7]等领域具有重要的应用价值。利用声阵列实现声波定向的技术主要包括两种^[8]: 1) 针对辐射声波的目标频率对阵列方向图的主波束宽度和旁瓣水平进行优化

设计; 2) 利用高频声波在空气中的非线性产生具有高指向性的差频声波^[9-10]。以上方法均建立在原波高指向性的基础上, 因此阵列设计及优化引起了研究者的广泛关注。

Toshiyuki 等^[11]基于近似的 Helmholtz 公式设计了一种三维声场演示系统, 并指出声阵列的指向性不够尖锐是导致声场合成与实际测试产生误差的主要原因。杨益等^[12]提出一种交错六边形的阵列结构, 实现了对阵列形

状的改进,可以显著提高平面阵的指向性。陈伟等^[13]利用伪逆算法^[14]和迭代优化进一步实现平面阵输出声场形态的控制,从而可以合成任意模式的声场分布,但会导致声场增益的损失。李国伟等^[15]通过球面阵的不等间距布置,显著降低了栅瓣水平,增加了焦点增益。以上研究仅分析了高频、低强度声波的前向传播,当声阵列发射低频、高强度声波时,若不对后向辐射进行有效控制,则会对后方的人员、设备造成损伤,鲜有文献对阵列后向辐射的抑制问题进行报道。

遗传算法^[16-19](genetic algorithm, GA)具有解决多目标优化问题的能力常被用于声阵列性能的提升上。文献[16-17]基于GA优化了麦克风阵列的波束成形性能,并将其分别应用对环境感知和噪声监测系统中。文献[18]采用GA设计了一种稀疏线型阵,降低阵列复杂度的同时提升了阵列孔径,实现了更窄的主瓣宽度和更低的旁瓣水平。杨赫然等^[19]将GA的进化过程分为前期和后期并分别采用不同的交叉概率和变异概率,降低了算法对初始参数的依赖性。GA收敛速度快但易陷入局部最优解,因此在声阵列的设计中具有一定局限性,模拟退火算法(simulated annealing, SA)在温度下降足够慢时可以收敛到全局最优解。张立峰等^[20]通过引入蝙蝠算法进一步改进了SA算法新解的随机生成方式,提高了新解的生成效率。本文将遗传算法的解空间作为模拟退火算法的搜索空间并提出一种遗传模拟退火算法(GASA),在提高收敛速度的同时保证解的全局最优性。

本文提出一种纵深阵的阵列布局,通过控制线型阵的阵列宽度、阵元数量、阵元间距约束主波束的宽度;基于矢量合成原理对阵元的纵向位置进行设计,实现了后向辐射能量的抑制;最后根据前向辐射能量与后向辐射能量之比最大设计了目标函数,利用改进的GASA算法实现了阵元的横向位置的进一步优化,使得阵列辐射的能量更加集中在主波束附近。应用提出的设计方法对14声源的离散阵进行了设计并开展了声场测试试验。

1 纵深相控阵设计方法

为了实现高指向性的设计目标,需要同时控制前向辐射的主波束宽度和后向辐射的抑制比,因此阵列的设计应包含横向宽度和纵向深度两个维度。

1.1 指向性设计

单层线型声阵列如图1所示,声波沿 y 轴正向传播,声源数量为 N ,声源间距为 d ,易知阵列宽度 $W=(N-1)d$ 。当声源尺寸远小于辐射波长时,可以将每个声源近似看作点声源。以 y 轴正向作为 0° 方向角,方向角沿逆时针旋转为正。

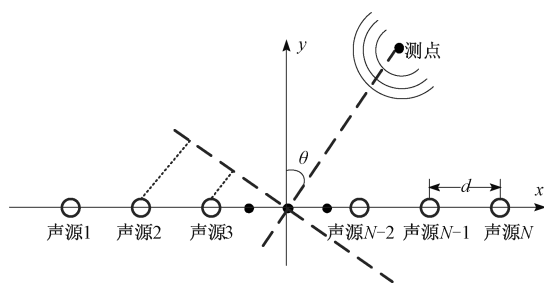


图1 一维线型阵列

Fig. 1 One dimension linear array

将原点处的声源作为参考声源,以垂直测点方向的虚线作为相位基准面,根据声波的干涉原理^[21],测点处指向性函数 $D(\theta)$ 为:

$$D(\theta) = \frac{\left| \sum_{n=1}^N p_r \exp(jkx_n \sin\theta) \right|}{\left| \sum_{n=1}^N p_r \right|} = \frac{\left| \frac{\sin[(kW/2)\sin\theta \cdot N/(N-1)]}{N \sin[(kW/2)\sin\theta/(N-1)]} \right|}{\left| \frac{\sin\left[\frac{\pi Nd}{\lambda} \sin\theta\right]}{N \sin\left[\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right) \sin\theta\right]} \right|} \quad (1)$$

式中: y 轴正方向为主波束方向; r 为测点到参考阵元的距离; p_r 为参考声源在测点处的声压幅值; x_n 为第 n 个声源的横坐标; $k=\omega/c$ 为波数, ω 为声波角频率; c 为声速; λ 为声波波长。

考虑阵元间距为0的极限情况,图1等效为一维连续线阵列,阵元分布的宽度为 $x=[-W/2, W/2]$,等效点声源的密度为 N/W ,则观测点的声压 $p(\theta)$ 为:

$$p(\theta) = \left| \int_{-W/2}^{W/2} \frac{N}{W} p_r \exp(jkx \sin\theta) dx \right| = N p_r \left| \frac{\sin[(kW/2)\sin\theta]}{(kW/2)\sin\theta} \right| \quad (2)$$

令式(2)取值 $1/\sqrt{2}$ 可得线阵方向图半功率角 $\theta_{-3\text{dB}}$ 与阵列宽度 W 的关系:

$$\theta_{-3\text{dB}} \approx \arcsin(0.443\lambda/W) \quad (3)$$

由此得出半功率角随阵列宽度变化的情况如图2所示。

由图2可以看出,当 $W > 0.43\lambda$ 时,半功率角 $<90^\circ$,辐射开始出现方向性,随着阵列宽度进一步增大,半功率角进一步减小;但阵列宽度较大,达到2~3倍波长时,继续增加阵列宽度对主波束的半功率角的改善有限。

当阵列宽度固定时,方向图随阵元数量的变化如图3所示。

由于此时增加阵元数量相当于减小了阵元间距,因此声源数量 N 越大,主波束半功率角 $\theta_{-3\text{dB}}$ 也越大。阵元

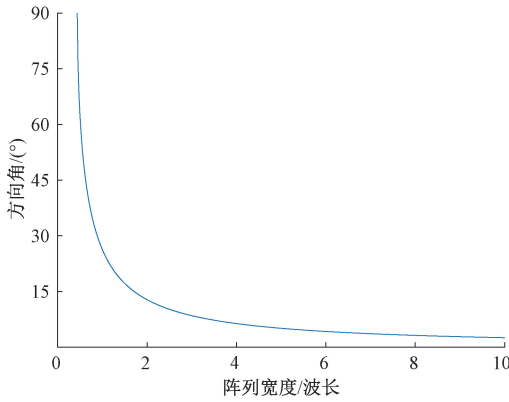


图2 半功率角随阵列宽度变化

Fig. 2 Half power angle via different array widths

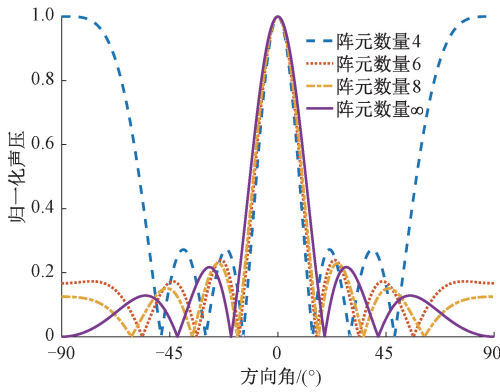


图3 方向图随声源数量变化情况

Fig. 3 Directional pattern corresponding to different acoustic sources

数量 $N = 2$ 时, $\theta_{-3\text{dB}}$ 最小:

$$p(\theta) = 2p_0 \cos\left(\frac{1}{2}kWs \sin\theta\right) \quad (4)$$

$$\theta_{-3\text{dB}} = \arcsin\left(0.25 \frac{\lambda}{W}\right) \quad (5)$$

若将半功率角作为设计指标,可以选择采用较少的阵元配合较大的间距或较小的间距配合较多的声源数量,由此得到当半功率角为 $\theta_{-3\text{dB}}$ 时阵列宽度的最小值与最大值:

$$W_{\min} = \frac{0.250\lambda}{\sin\theta_{-3\text{dB}}} \quad (6)$$

$$W_{\max} = \frac{0.443\lambda}{\sin\theta_{-3\text{dB}}} \quad (7)$$

1.2 后向辐射抑制设计

线型阵列的方向图前后对称 $p(\theta) = p(\pi - \theta)$, 多层布置的线型阵列主要是为了抑制后向辐射,辐射抑制的基本原理如图4所示。

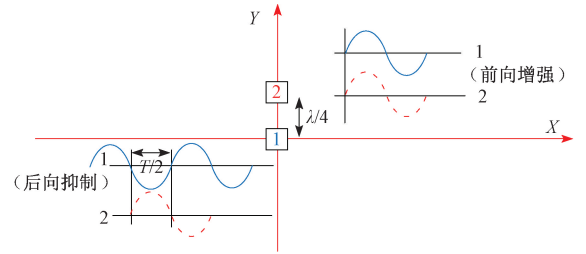


图4 后向辐射抑制原理

Fig. 4 Principle of backward radiation suppression

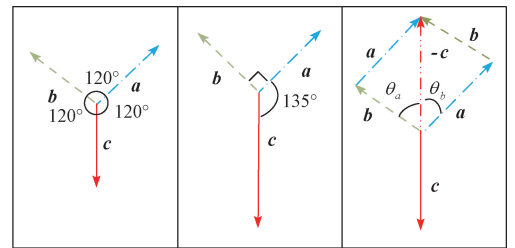
声源 1、2 前后布置,对应辐射的声波分别用实线和虚线表示。两声源间隔 $1/4\lambda$,声源 2 相比声源 1 延迟 $1/4$ 周期。声波沿 Y 轴正向传播时,声源 1 发射的声波传播 $1/4$ 波长后正好与声源 2 延迟 $1/4$ 周期的声波同相合成,增强前向辐射。声波沿 Y 轴负向传播时,声源 2 发射的声波经过 $1/4$ 周期的初始延迟和 $1/4$ 波长距离的传播延迟,恰与声源 1 发射的声波反相相消,抑制后向辐射。

对于纵深阵而言,可将每层包含 N 个相位可调声源的线型离散阵建模成长度为 N 的矢量,从而纵深阵的后向辐射叠加可建模为不等模长、不同方向的矢量合成。矢量 a 、 b 、 c 分别用带箭头的点划线、虚线、实线表示,如图5所示。当其模相等时,为了使矢量和为 0,需要满足两两矢量的间隔为 120° ,如图5(a)所示;当 $|a| = |b| = \left|\frac{c}{\sqrt{2}}\right|$ 时,矢量 a 、 b 的间隔角度为 90° 且矢量 a 、 c 的间隔角度为 135° 时可以达到矢量和为 0 的效果,如图5(b)所示。拓展至 M 个模值相等的矢量时,要想实现相加之和为零矢量,角度的最小间隔 $\Delta\varphi$ 应满足式(8)。

$$\Delta\varphi = 2\pi/M \quad (8)$$

对于任意矢量 a 、 b 、 c ,如图5(c)所示,当满足 $|c| \leq |a| + |b|$ 时,总可以找到间隔角度 θ_a 、 θ_b 满足式(9)。

$$a \exp(j\theta_a) + b \exp(j\theta_b) + c = 0 \quad (9)$$



(a) 等模矢量合成 (b) 不等模矢量合成 (c) 任意矢量合成
(a) Vector composition of equal magnitude (b) Vector composition of unequal magnitude (c) Arbitrary vector composition

图5 矢量叠加原理

Fig. 5 Principle of vector composition

对等间隔布置的 M 层纵深相控阵,如图6所示每层声源数量相等为 N ,为了满足前向合成增强和后向抵消

抑制,只需满足:

$$D = \lambda/2M \quad (10)$$

$$\Delta\varphi = 2\pi D/cT = T/M \quad (11)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为两层声源的相位差; D 为两层线阵之间的深度; T 为发射声波的周期。

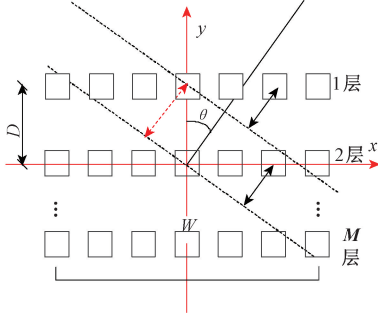


图6 M层纵深相控阵

Fig.6 M layers depth phased array

将图6的纵深阵推广至更一般的情形,将M层线阵分别看作模长 $A_1 \sim A_M$, 相位 $\phi_1 \sim \phi_M$ 的矢量,设第1个矢量的相位为0,则要达到矢量和为0的要求相位需满足式(12)。

$$A_1 + A_2 \exp(-j\phi_2) + \dots + A_M \exp(-j\phi_M) = 0 \quad (12)$$

其中负号代表相位超前。因此多层纵深阵的后向辐射抑制可以通过调节每层线阵的相位延迟 φ_m 来实现,为了同时保证前向发射的声波同相叠加, φ_m 应与纵深位置 y_m 、矢量相角 ϕ_m 满足式(13)和(14)。

$$\varphi_m = \phi_m/2 \quad (13)$$

$$\phi_m = \omega y_m/c = ky_m \quad (14)$$

式中: k 为波数。

纵深阵任意方向的合成声压为:

$$p(\theta) = \sum_{n=1}^N p_n \eta(\theta) \exp(jkx_n \sin\theta) \quad (15)$$

$$\eta(\theta) = \exp(-jk y_n \cos\theta) \quad (16)$$

式中: N 为声源数; $\eta(\theta)$ 为多层线型阵列相位差决定的阵列合成因子; x_n, y_n 为每个声源的坐标。

2 14 声源纵深阵设计及优化

2.1 14 声源纵深阵设计

本文仅验证设计方法的有效性,受试验场地限制,所设计的14阵元纵深阵宽度与纵深均不超过4 m,基本布局为包含4层线阵的“4-4-3-3”结构。可将“4-4”与“3-3”看作两组双层纵深阵分别进行控制,双层线阵之间的纵深只需满足 $\lambda/4$ 的要求,对应的初相位延迟为 45° ,有如下关系:

$$D_{12} = D_{34} = \lambda/4 = 0.86 \text{ m} \quad (17)$$

$$\theta_{12} = \theta_{34} = 45^\circ \quad (18)$$

式中: λ 为100 Hz声波的波长; D_{12}, θ_{12} 分别为两层4声源线阵之间的纵深间距与相位延迟角度; D_{34}, θ_{34} 分别为两层3声源线阵之间的纵深间距与相位延迟角度; D_{23} 为4声源线阵与3声源线阵之间的距离。

设计阵列发射100 Hz声波时的半功率角小于 25° , 根据式(1)和(5)可得3声源和4声源线型阵的宽度 W_3, W_4 应满足式(19)。

$$2.53 \leq W_3 \leq 6.88, 2.78 \leq W_4 \leq 10.32 \quad (19)$$

根据第1.1节分析可知,半功率角随阵列宽度增加减小,因此在 $[-2 \text{ m}, 2 \text{ m}]$ 范围内将每层线阵沿 x 轴方向等间隔布置可以满足半功率角的要求,得到的设计参数如表1所示。

表1 “4-4-3-3”布局优化前位置参数

Table 1 Position parameters of “4-4-3-3” layout before optimization

层数	声源1 位置/m	声源2 位置/m	声源3 位置/m	声源4 位置/m	纵深 位置/m	相位延 迟/($^\circ$)
1	-2	-0.667	0.667	2	1.600	129
2	-2	-0.667	0.667	2	0.740	84
3	-2	0	2	-	0	45
4	-2	0	2	-	-0.860	0

根据表1的位置参数给出了4层纵深阵的三维示意图及方向图分别如图7、8所示。

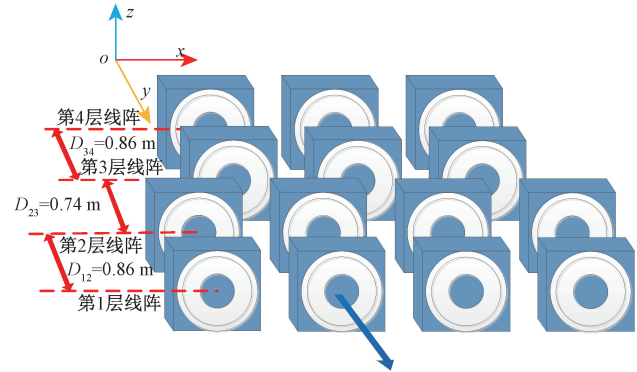


图7 4层纵深阵三维示意图

Fig.7 3D diagram of four layers depth array

从图8可以看出,单层线阵主波束具有一定指向性,但无法对 $[45^\circ, 135^\circ]$ 范围内声压进行有效抑制;紫色虚线所示的纵深阵因子在 90° 和 180° 附近有明显的低谷,从而显著降低了纵深阵 $[45^\circ, 180^\circ]$ 范围内的声压,说明纵深阵布局可以对后向辐射起到很好的抑制作用。纵深阵主波束的半功率角宽度主要由单层线型阵决定,若期望的合成声压越大、半功率角宽度越小,需要的阵列宽度越大,声源数量也越多。

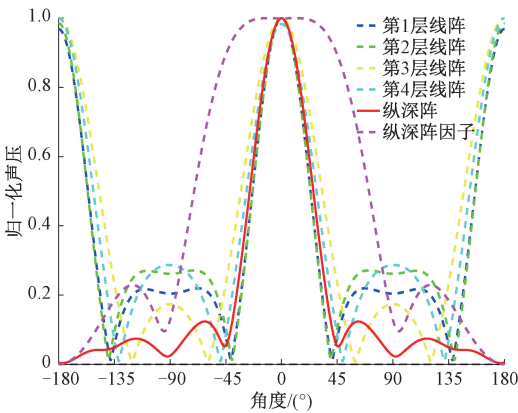


图8 单层线型阵及纵深阵方向

Fig. 8 Beam pattern of one layer array and multi-layer depth array

2.2 14 声源纵深阵优化

1) GASA 算法流程

GASA 算法为经典的多目标优化算法,但分别存在容易收敛到局部最优解和收敛速度慢的缺点。分析可知模拟退火算法收敛速度慢的主要原因是需要在整个解空间进行搜索,因此本文利用遗传算法解空间作为模拟退火算法的搜索空间,在提高收敛速度的同时可以保证优化结果的全局最优性。GASA 的优化流程如下。

(1) 参数初始化。GASA 需考虑的初始化参数包含每段基因的编码长度 M 和降温速度 t_0 ,该参数分别影响了遗传和模拟退火优化过程中的搜索步长,提高搜索步长的精度可以进一步提升解的全局最优性,但同时会提升计算时间,因此需结合实际应用场景进行综合考虑。在对计算耗时要求不高的场景下,可适当提高搜索精度,本文采用经验参数 $M=8, t_0=0.99$ 即可满足声阵列的优化需求。

(2) 目标函数。设定优化区域如图9所示,前向辐射的能量集中限制在 θ_r 内。待优化的参数为声源横向坐标 x_n ,根据指向性的要求设计优化的目标函数为:当 $|\theta| < \theta_r$ 时,前向辐射总功率最大;当 $|\theta| > \theta_r$ 时,后向辐射及次极大的旁瓣应最小,如式(20)所示。

$$\text{opt}(x_n, y_n) = \max \left\{ \frac{1}{\max \{ I(|\theta| > \theta_r) \}} \cdot \int_{-\theta_r}^{+\theta_r} \frac{I(\theta)}{2\theta_r} d\theta \right\} \quad (20)$$

(3) 利用遗传算法计算新状态的适应度函数,以概率 P 接受新状态作为当前状态,接受概率 P 可以表示为:

$$P = \begin{cases} 1, & E_{j+1} > E_j \\ e^{\Delta E/T}, & E_{j+1} \leq E_j \end{cases} \quad (21)$$

式中: E_j, E_{j+1} 分别为当前状态和新状态的目标函数值,

T 为温度下降值, ΔE 为前后两次迭代得到的目标函数之差。

(4) 终止条件。迭代时目标函数之差连续 5 次小于 10^{-6} 即终止优化。

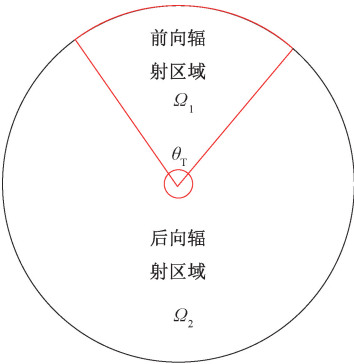
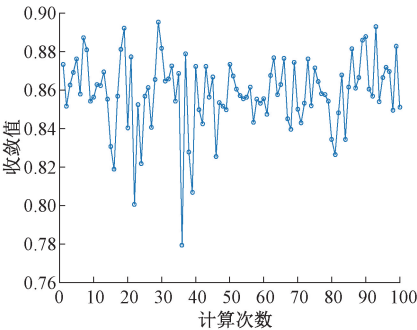


图9 优化区域示意图

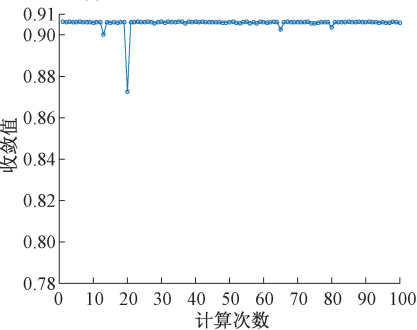
Fig. 9 Schematic diagram of the optimization area

2) GASA 的优化结果

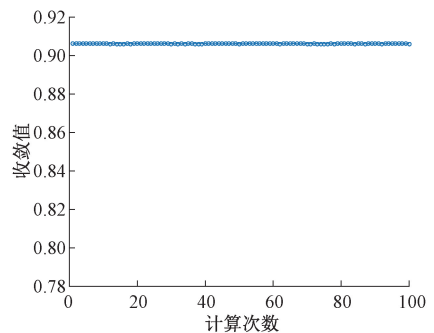
图10所示为 GA、SA、GASA 的收敛曲线和迭代过程,可以看出,GA 收敛时所需迭代次数最少,但优化结果多次取到局部最优解;SA 的结果基本与全局最优解保持一致,但收敛需要经过漫长的迭代过程;改进的 GASA 既可以保证取到全局最优解,相比 SA 又能降低收敛所需的迭代次数。



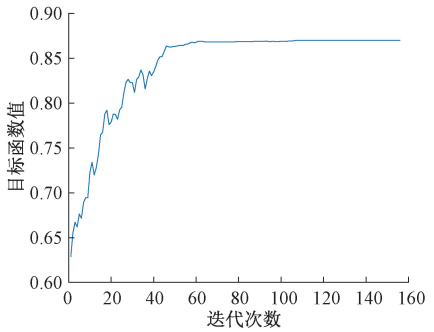
(a) 遗传算法运行100次结果分布
(a) 100 times result in the distribution of GA



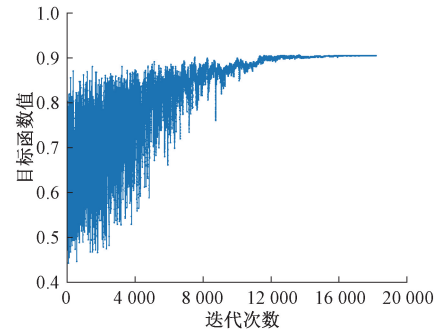
(b) 模拟退火算法运行100次结果分布
(b) 100 times result in the distribution of SA



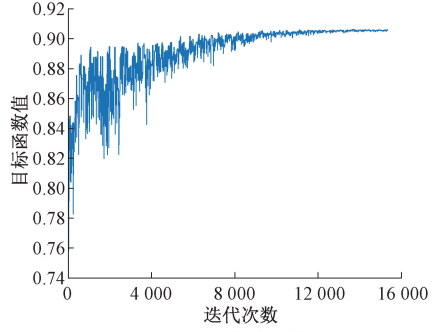
(c) GASA运行100次结果分布
(c) 100 times result distribution of GASA



(d) 遗传算法迭代过程
(d) Iteration process of GA



(e) 模拟退火算法迭代过程
(e) Iteration process of SA



(f) GASA迭代过程
(f) Iteration process of GASA

图 10 算法性能对比

Fig. 10 Algorithm performance comparison

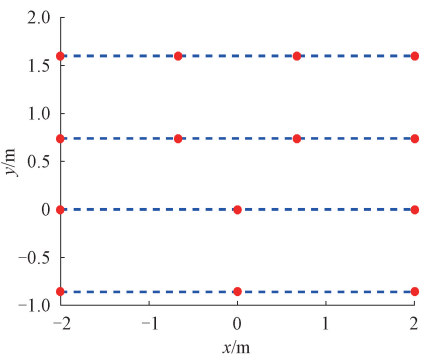
优化参数对比如表 2 所示,优化后参数设置如表 3 所示。根据表 1 和 3 的位置参数,对所设计纵深阵优化前后的声压分布及方向图进行仿真,结果分别如图 11、12 所示。

表 2 优化算法性能参数对比
Table 2 Comparison of performance parameters between optimization algorithms

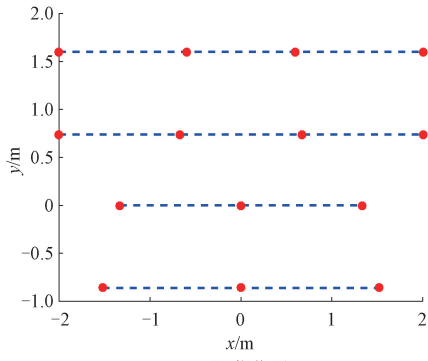
算法对比	GA	SA	GASA
收敛所需迭代次数	157	18 171	15 347
取得全局最优解的频率/%	49	81	100

表 3 “4-4-3-3”布局优化后位置参数
Table 3 Position parameters of “4-4-3-3” layout after optimization

层数	声源 1/m	声源 2/m	声源 3/m	声源 4/m	纵深 位置/m	相位延 迟/(°)
1	-2	-0.600	0.600	2	1.600	129
2	-2	-0.667	0.667	2	0.740	84
3	-1.333	0	1.333	-	0	45
4	-1.520	0	1.520	-	-0.860	0



(a) 优化前
(a) Before optimization



(b) 优化后
(b) After optimization

图 11 “4-4-3-3”纵深阵布局俯视图

Fig. 11 Top view of “4-4-3-3” depth array

图 12 中颜色栏对应归一化声压级数值,可以看出,基于矢量合成原理得出的纵深阵,可以对后向及侧向的辐射起到很好的抑制作用,但优化前即横向声源等间隔布置时旁瓣水平较高,阵列能量明显分散,而优化后阵列

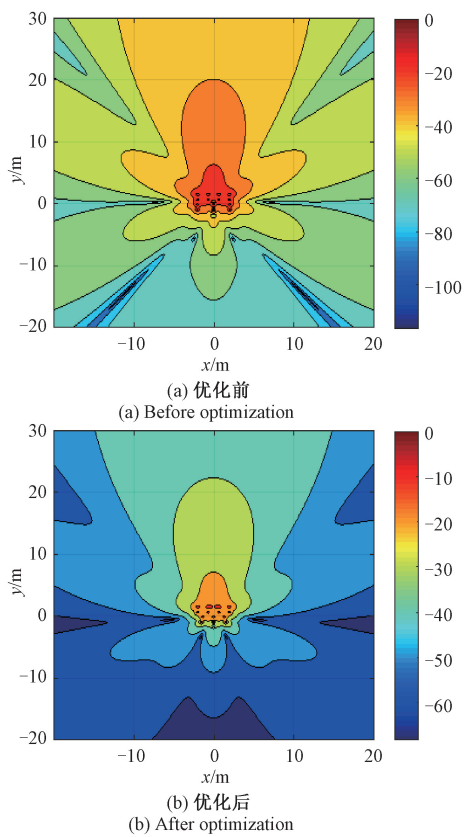


图 12 “4-4-3-3”布局纵深阵的声压分布
Fig. 12 Acoustic pressure distribution of depth array
in “4-4-3-3” layout

能量能较好的集中在主波束附近。表 4 为优化前后阵列的性能参数。

表 4 14 声源纵深阵性能参数

Table 4 Performance parameters of depth array composed of 14 sources					
布局 方式	观测距 离/m	半功率 角/(°)	50°~60° 平均抑制 比/dB	90°抑制 比/dB	180°抑制 比/dB
优化前	4	19.13	7.29	20.35	24.12
	10	15.96	12.84	36.73	29.15
	100	16.17	13.89	29.21	46.66
优化后	4	21.91	8.82	26.24	22.07
	10	17.88	15.61	30.54	28.85
	100	18.56	19.59	32.36	47.50

结合图 13 和表 4 可以看出,优化前后的“4-4-3-3”纵深阵在 $[-180^{\circ},-90^{\circ}]$ 、 $[90^{\circ},180^{\circ}]$ 范围内的辐射抑制能力均超过 20 dB,4 m 距离上的半功率角分别为 19.13°、

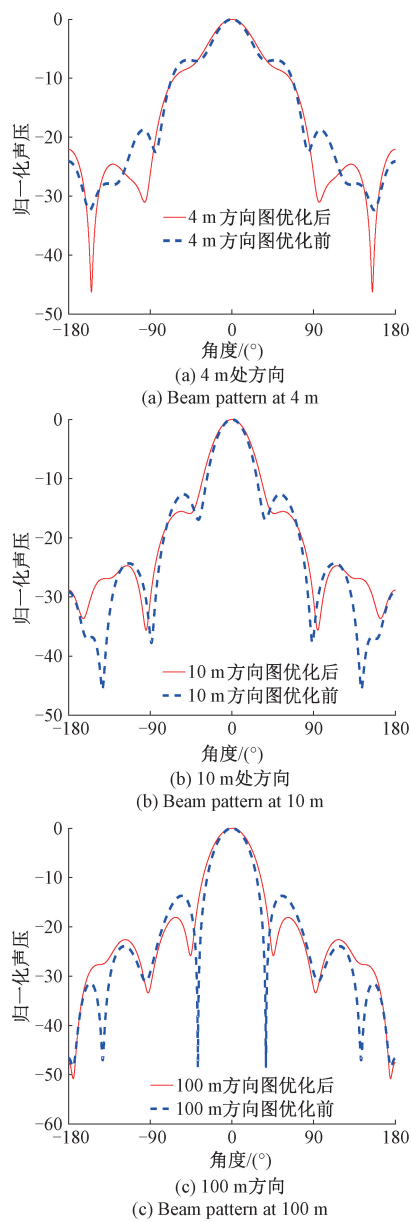


图 13 “4-4-3-3”布局纵深阵方向
Fig. 13 Beam pattern of “4-4-3-3” layout depth array

21.91°。优化前阵元的横向间距更大,因此半功率角更小,但优化后的阵列明显降低了方向图的旁瓣水平,其中 50°~60°方向在 4、10、100 m 传播距离上的平均抑制比分别增加了 1.53、2.78、5.7 dB,从而得到了工程上性能更优的阵列布局方式。

3 试验验证

为了验证所设计纵深阵的有效性,搭建了图 14(a)所示的试验平台,并开展声场测试试验。声源选用 SVS SB-16 型音箱,图 14(b)所示为单声源与纵深阵 4 m 处方

向的实测值,其中单声源 0° 与 180° 之间的声压级之差小于 1.3 dB,说明单声源基本没有指向性。信号源为 Tektronix AFG2021-SC,测试设备包含传声器 B&K-4193 和噪声分析仪 B&K-2270。主要试验流程为信号源输出激励信号及同步信号至音箱及测试系统,由传声器采集声波数据并保存至噪声分析仪中。试验场地选择在室外四周无遮挡的开阔区域,开展试验时需将图 14(a) 中纵深阵四周的防雨帆布全部打开。

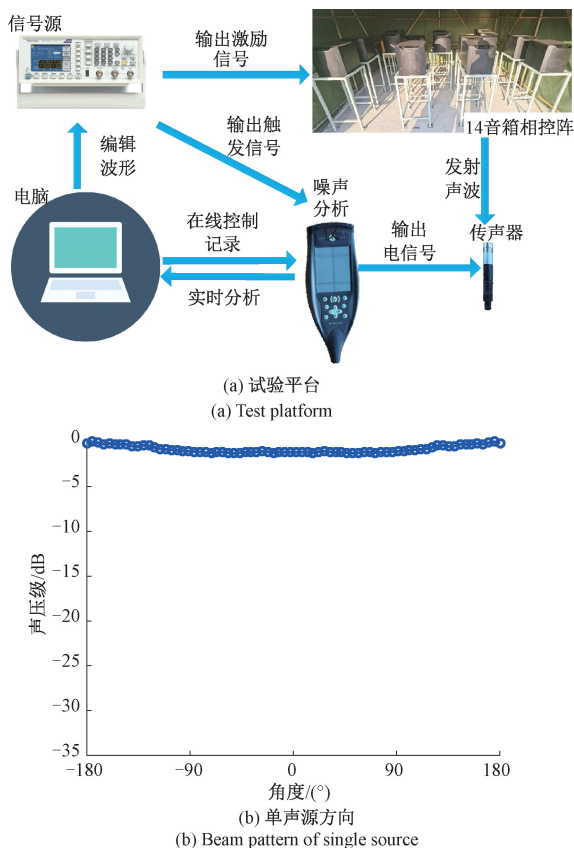


图 14 声场测试流程

Fig. 14 Sound field test process

通过图 14 可以看出,声源沿横向等间隔布置时,虽然半功率角和后向辐射抑制水平可以满足要求,但方向图旁瓣水平较高,对此本文提出 GASA 算法对阵元的横向位置进一步优化。纵深阵的声场测试以坐标原点为中心,测试距离包含 4 和 10 m,测点间隔 10° ,得到的实测方向图如图 15 所示。其中图 15(b) 受场地限制,只测试了半圆周范围内的声场。

由图 15(a) 可以看出,前向 $\pm 30^\circ$ 范围内实测方向图与理论值基本一致,其中实测的半功率角约为 19.3° , 180° 方向的抑制比达到了 19.6 dB。由图 15(b) 可以看出,传播半径为 10 m 时,14 音箱相控阵前向 90° 范围内实测方向图与理论值基本一致,其中实测的半功率角度

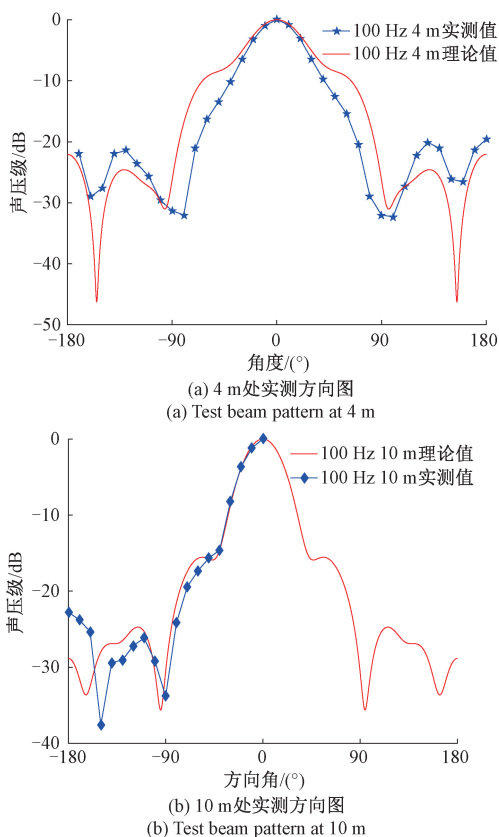


图 15 “4-4-3-3”纵深阵的方向图

Fig. 15 Test beam pattern of “4-4-3-3” depth array

约为 15.2° ,后向 180° 的抑制效果达到了 22.8 dB。10 m 范围上后向 $150^\circ \sim 180^\circ$ 实测方向图与理论值相差较大的原因可能来自于试验场地地面的反射及试验环境环境。

4 结 论

为了解决高强度低频声波后向辐射能量难以屏蔽的问题,本文提出一种纵深阵的阵列布局,在控制前向辐射半功率角的同时抑制了侧向及后向的辐射。针对 GA 算法在优化声源横向位置时容易收敛到局部最优解的问题,兼顾解的全局最优性和收敛速度提出一种 GASA 算法,从而进一步降低了方向图的旁瓣水平。所设计的声阵列可以满足发射高强度低频声波时后向防护、控制参量阵基波指向性等场景下的使用要求,基于矢量合成抑制后向辐射的思想也可以移植到平面阵、球面阵、抛物面阵等二维阵列上,拓展了声阵列的应用范围。下一步应考虑声强进一步上升时的非线性效应对阵列指向性带来的影响。

参考文献

- [1] 董宇光, 萧旭峰, 曹丽. 基于阵列探头的 PFA 管超声导波流量测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10):

- 105-111.
- DONG Y G, CUI X F, CAO L. Ultrasonic guided wave flow measurement of PFA tube based on array probe[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 105-111.
- [2] 张楠, 马超, 许宝杰, 等. 基于 2D-MUSIC 算法 L 型声阵列的轴承故障研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 121-127.
- ZHANG N, MA C, XU B J, et al. Research on bearing fault location based on L-type acoustic array based on 2D-MUSIC algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1): 121-127.
- [3] 王好贞, 杨媛, 魏小源, 等. Barker 编码激励超声导波在断轨检测中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 101-108.
- WANG H ZH, YANG Y, WEI X Y, et al. Application of Barker code excited ultrasonic guided waves in broken rail detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 101-108.
- [4] 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.
- XV F, LU M ZH, WAN M X, et al. System errors of a 256-element high intensity focused ultrasound phased array and precise control of multifocus patterns[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(2): 1349-1356.
- [5] LU M Z, WAN M X, XU F, et al. Focused beam control for ultrasound surgery with spherical-section phased array: Sound field calculation and genetic optimization algorithm [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(8): 1270-1290.
- [6] 邸忆, 顾晓辉, 龙飞. 一种基于声阵列信息融合及改进 EEMD 的信号降噪方法[J]. 振动与冲击, 2017, 36(15): 133-141.
- DI Y, GU X H, LONG F. A signal de-noising method for multi-microphone array based on information fusion and improved EEMD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(15): 133-141.
- [7] NOBUO T, MOTOKI T. Active noise control using a steerable parametric array loudspeaker[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(6): 3526-3537.
- [8] 吴鸣, 曹洁, 匡正, 等. 特定频带扬声器频响补偿技术[J]. 声学学报, 2010, 35(2): 208-214.
- WU M, CAO J, KUANG ZH, et al. Compensation for the frequency response of loudspeaker array at specific frequency band [J]. Acta Acustica, 2010, 35(2): 208-214.
- [9] 张富东, 徐利梅, 陈敏, 等. 幅度加权相控参量阵波束合成方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 429-436.
- ZHANG F D, XU L M, CHEN M, et al. Study on the beamforming method for phased parametric array based on amplitude weighting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 429-436.
- [10] WOON-SENG G, YANG J, TOMOO K. A review of parametric acoustic array in air[J]. Applied Acoustics, 2012, 73: 1211-1219.
- [11] TOSHIYUKI K, YOKO Y, MICHIAKI K, et al. Three-dimensional radiated sound field display system using directional loudspeaker and wave field synthesis [J]. Acoustical Science Technology, 2012, DOI: 10.1250/ast.33.11.
- [12] 杨益, 阎兆立, 温周斌, 等. 超指向性扬声器的阵列设计与研究[J]. 声学技术, 2008, 27(3): 433-438.
- YANG Y, YAN ZH L, WEN ZH B, et al. Design and research of an ultrasonic transducer array applied in audio beam loudspeaker [J]. Technical Acoustics, 2008, 27(3): 433-438.
- [13] 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 W, ZENG D P, WANG H, et al. Optimization and simulation for the output acoustic field of ultrasonic phased array[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(1): 433-438.
- [14] EBBINI E S, IBBINI M S, CAIN C A. An inverse method for hyperthermia phased-array pattern synthesis[J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1988, 5(2): 947-950.
- [15] 李国伟, 陈亚珠. 不等间距排列的球面高强度聚焦超声相控阵列[J]. 声学学报, 2001, 21(2): 117-120.
- LI G W, CHEN Y ZH. A spherical high intensity focused ultrasound phased array with unequal space between elements[J]. Acta Acustica, 2001, 21(2): 117-120.
- [16] YU J J, DONOHUE K D. Optimal irregular microphone distributions with enhanced beamforming performance in immersive environments[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(3): 2066-2077.
- [17] BJELI M, STANOJEVI M, PAVLOVI D S, et al.

Microphone array geometry optimization for traffic noise analysis [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(5): 3101-3104.

- [18] YANG P, CHEN B, SHI K R. A novel method to design sparse linear arrays for ultrasonic phased array [J]. Ultrasonics, 2006, 44: 717-721.

- [19] 杨赫然, 赵桐, 孙兴伟, 等. 基于改进遗传算法的机床主轴径向回转误差分离技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 82-91.

YANG H R, ZHAO T, SUN X W, et al. Research on radial rotation error separation technology of machine tool spindle based on the improved genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 82-91.

- [20] 张立峰, 张梦涵. 基于自适应模拟退火及 LM 联合反演算法的 ECT 图像重建[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 228-235.

ZHANG L F, ZHANG M H. Image reconstruction for electrical capacitance tomography based on adaptive simulated annealing and LM joint inversion algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 228-235.

- [21] 栾桂冬, 张金泽, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.

LUAN G D, ZHANG J Z, WANG R Q. Piezoelectric transducer and array [M]. Beijing: Peking University Press, 2005.

作者简介



王波, 2016 年于军械工程学院获得学士学位, 2018 年于陆军工程大学获得硕士学位, 现为海军工程大学博士研究生, 主要研究方向为非线性声场的数值计算。

E-mail: wangnec19@163.com

Wang Bo received his B.Sc. degree from Ordnance Engineering College in 2016, and M.Sc. degree from Army Engineering University in 2018. He is currently pursuing his Ph.D. degree at Naval University of Engineering, his main research interest is numerical calculation of nonlinear sound fields.



赵治华 (通信作者), 1983 年于海军电子工程学院获得学士学位, 1990 年于中国科学院获得硕士学位, 2006 于清华大学获得博士学位, 现为海军工程大学教授, 主要研究方向为电磁兼容、电磁发射故障诊断。

E-mail: 13871164752@139.com

Zhao Zhihua (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Naval College of Electronic Engineering in 1983, M.Sc. degree from Chinese Academy of Sciences in 1990, and Ph.D. degree from Tsinghua University in 2006. He is currently a professor at Naval University of Engineering. His main research interests include electromagnetic compatibility and electromagnetic emission fault diagnosis.