

优化扬声器阵列的指向性与声功率级^{*}

欧达毅[†] 沈勇 安康

(近代声学教育部重点实验室 南京大学声学研究所 南京 210093)

摘要 提出了同时优化扬声器阵列的指向性和声功率级的方法。运用该方法可以优化扬声器阵列的输入电压分布,获得指向性和声功率级二者兼顾的扬声器阵列。本方法不必使用复杂的与频率相关的信号处理装置。模拟结果和实验测量结果表明该方法是可行的和有效的。

关键词 扬声器阵列, 声功率级, 指向性, 遗传算法

Optimizing directivity and acoustic power level of loudspeaker array

OU Da-Yi SHEN Yong AN Kang

(Institute of Acoustics, Key Laboratory of Modern Acoustics (Nanjing University), Ministry of Education, Nanjing 210093)

Abstract In this article, a method to optimize not only the directivity but also the acoustic power of loudspeaker arrays is developed. In consideration of the directivity and acoustic power, the input voltage distribution of a loudspeaker array can be optimized and selected. Frequency-dependent signal processors are not needed with this method. The results of computer simulation and experiment both show that the method is feasible.

Key words Loudspeaker array, Acoustic power level, Directivity, Genetic algorithm

1 引言

传统的扬声器阵列是将 N 个扬声器等间距的排成一条直线,其指向性是频率的函数,频率越高,主声束宽度就越窄,旁瓣就越多,辐射声场就越不均匀^[1]。Olson 在《Acousti-

cal Engineering》一书中阐述了关于阵列的基础理论^[2],此后声学家和工程师们研究出了多种优化理论和方法^[3-6],包括曲线型阵列、多排声柱技术、阶梯型阵列、锯齿形阵列、对数排列的恒指向性阵列以及全指向性阵列等等。其中,全指向性阵列的特点是在全空间实现均匀

2006-08-22 收稿; 2007-12-11 定稿

^{*} 国家自然科学基金资助(10774075)资助项目。

作者简介: 欧达毅(1982-),男,福建泉州人,南京大学硕士研究生,研究方向:电声学。

沈勇(1965-),男,教授,博士,博士生导师。

安康(1983-),男,南京大学博士生。

[†] 通讯联系人 E-mail: oudayi@gmail.com

的指向性,因此有效改善了声场的均匀程度。

文献[5-6]已经为实现全指向性扬声器阵列提供了很好的理论基础和设计方法,但是它们的理论都是在只考虑阵列指向性的情况下推导出来的,对阵列辐射功率的关注不够,往往难以同时满足对指向性和声功率级的技术要求,因此存在一定的局限性。

指向性和声功率级是扬声器阵列的两个重要指标,本文提出一种基于遗传算法的全指向性扬声器阵列优化方法,该方法对指向性和声功率级同时进行优化,能有效兼顾指向性和声功率级。计算机模拟结果和实验测量结果表明该方法是可行的和有效的。

2 优化的理论方法

下文所分析的扬声器阵列均由若干小型封闭式扬声器系统(下文简称闭箱单元)组成。

2.1 指向性和声功率级

(1) 阵列指向性^[7]

扬声器阵列的角指向率 $\Gamma(\theta)$ 和角指向增益 $D(\theta)$ 分别表示为:

$$\Gamma(\theta) = \frac{\bar{p}_T(\theta)}{\bar{p}_T(0)} \quad (1)$$

$$D(\theta) = 20\lg\Gamma(\theta) \quad (2)$$

其中, $\bar{p}_T(\theta)$ 为扬声器阵列在与参考轴成 θ 角、距离阵列中心距离 r 处的辐射声压; $\bar{p}_T(0)$ 为在参考轴上,距离阵列中心距离 r 处的辐射声压,如图1所示,本文提到的指向性都为阵列的垂直指向性。

(2) 声功率级

根据文献[2]并结合本文,扬声器阵列的辐射声功率 W 和辐射声功率级 L_W 可分别表示为:

$$W = \frac{2\pi r^2}{\rho_0 c_0} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \bar{p}_T^2(\theta) \cos\theta d\theta \quad (3)$$

$$L_W = 10\lg \frac{W}{W_{ref}} \quad (4)$$

其中, ρ_0 为空气密度, c_0 为声速, W_{ref} 为基准功率,取 $10^{-12}W$,下同。

2.2 优化原理

对若干个特性基本相同的闭箱单元等间距直线排列组成的阵列(如图1),其辐射声压 p_T

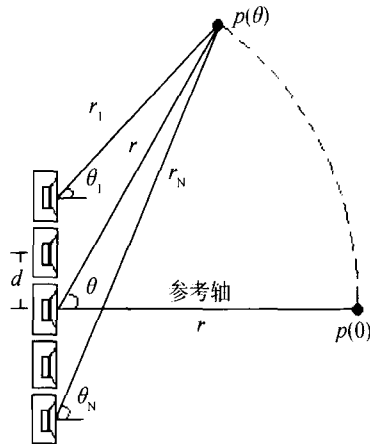


图1 N 个等距封闭式扬声器直线阵列的声场

可表示为:

$$p_T(\omega, \theta, r) = \sum_{i=1}^N A(\omega, \theta_i) \frac{x_i r_i}{r} e^{j(\omega t - kr_i)} \quad (5)$$

其中, ω 为角频率, θ 为观察点到阵列中心连线与参考轴的夹角, θ_i 为第 i 个闭箱单元相对于计量点的角度, $A(\omega, \theta_i)$ 为闭箱单元的指向性频响函数, r_i 为第 i 个闭箱单元到观察点的距离 ($i=1, 2, \dots, N$), N 为组成阵列的闭箱单元个数, x_i 是与声压幅值有关的系数(以下称为第 i 个闭箱单元的幅值系数)。

假设 $kr \gg 1, r \gg l$ (k 为波数, r 为阵列中心到观察点的距离, l 为阵列长度),则上式中 θ_i 可近似用 θ 替代,幅度部分的 r_i 可近似用 r 替代。此时,式(5)中可简化为^[8]

$$p_T(\omega, \theta, r) = A(\omega, \theta) \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{r} e^{j(\omega t - kr_i)} \quad (6)$$

为了简化计算,本文仅考虑频率较低的情况,即 $ka < 1$ (a 为闭箱单元的振膜有效半径)。此时,闭箱单元可认为处于活塞辐射区,上式可改写如下:

$$p_T(\omega, \theta, r) = \left| \frac{2J_1(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \right| \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{r} e^{j(\omega t - kr_i)} \quad (7)$$

其中, $r_i = r_1 + (i-1)d \sin\theta$, d 为闭箱单元之间的间距。再由式(1)~(7)可得:

$$D(\theta) = 20\lg \left(\frac{\left| \frac{2J_1(k\text{asin}\theta)}{k\text{asin}\theta} \right| \left| \sum_{i=1}^N x_i e^{-jk(i-1)d\text{sin}\theta} \right|}{\left| \sum_{i=1}^N x_i \right|} \right) \quad (8)$$

$$W = \frac{2\pi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left| \frac{2J_1(k\text{asin}\theta)}{k\text{asin}\theta} \right|^2 \left| \sum_{i=1}^N x_i e^{-jk(i-1)d\text{sin}\theta} \right|^2 \cos\theta d\theta}{\rho_0 c_0} \quad (9)$$

$$L_W = 10\lg \frac{2\pi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left| \frac{2J_1(k\text{asin}\theta)}{k\text{asin}\theta} \right|^2 \left| \sum_{i=1}^N x_i e^{-jk(i-1)d\text{sin}\theta} \right|^2 \cos\theta d\theta}{\rho_0 c_0 W_{ref}} \quad (10)$$

上述分析可知, 对一个给定的直线型扬声器阵列 (闭箱单元个数、间距已知), 其指向特性和声功率级只由 x_i 和 f 决定 (k 与频率 f 有关)。于是, 我们希望通过寻找一组合适的幅值系数分布 $[x_1, x_2, \dots, x_N]$, 使得阵列在不同频率 f 下都保持声场比较均匀并具有较高的辐射声功率级。第 i 个闭箱单元的幅值系数 x_i 与其输入电压 e_i 成正比, 因此, 找到一组合适的 $[x_1, x_2, \dots, x_N]$ 将通过调整输入电压分布 E 来实现, $E=[e_1, e_2, \dots, e_N]$ 。以上即为本文的优化原理。值得注意的是, 在实际应用中, 由于受自身额定功率和失真的限制, 闭箱单元输入电压存在最大允许值, 而且调整输入电压分布 E 会使指向性和声功率级同时受到影响, 二者不可能独立地无限制得到改善, 存在相互制约关系。因此优化过程中这两个因素需同时考虑, 下面介绍的算法能有效地达到这一要求。

2.3 算法理论及实现过程

2.3.1 算法中重要指标:

为了衡量整个优化频段内的指向性均匀度以及声功率级大小, 在算法全局搜索过程中引入两个指标:

$$\begin{cases} (1) \text{ 指向性最大不均匀度 } \Delta D_{\max} : \\ \left\{ \begin{array}{l} \Delta D(q) = D_{\max}(\theta, f_q) - D_{\min}(\theta, f_q) \\ \Delta D_{\max} = \max\{\Delta D(q)\} \end{array} \right. \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$, f_q 为优化频段内 1/3oct 的

频率点, $q=1, 2, \dots, m$, m 为频率点的个数。该指标表示阵列在优化频带内各个方向角辐射声压之间的最大波动。 ΔD_{\max} 越小表示阵列在指定频带内的指向性均匀程度越好。

(2) 平均声功率级 $\overline{L_W}$:

指定频带内的平均声功率 [9] 为指定频带内所有 1/3oct 的声功率的算术平均值, 即

$$\overline{W} = \frac{\sum_{q=1}^m W(f_q)}{m} \quad (12)$$

相应的平均声功率级为

$$\overline{L_W} = 10\lg \frac{\overline{W}}{W_{ref}} \quad (13)$$

其中, $W(f_q)$ 为在频率 f_q 处的声功率, m 为频率点的个数。

2.3.2 遗传算法

遗传算法 [10] 是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机化全局搜索算法, 具有简单、通用, 鲁棒性强, 适用于并行分布处理等特点, 尤其适用于处理传统搜索方法难于解决的复杂和非线性问题, 可广泛用于组合优化、规划设计等领域。

遗传算法的步骤: (流程图如图 2)

(1) 初始化控制参数: 设置群体规模 n ; 交叉概率 P_C ; 变异概率 P_M 。

(2) 在变量设定范围内随机产生初始种群。

(3) 对现有种群进行如下操作: ①计算群体中每个个体的适应度 $f(a_g)$, $g=1,2,\dots,n$; ②按照赌轮机制实施选择操作, 适应度大的个体被选择的概率大; ③随机选出两个个体 a_g 和 $a_{g'}$ 作为父代, 按照概率 P_C 进行交叉操作, 产生两个新的个体 a'_g 和 $a'_{g'}$, 计算四个个体的适应度, 选择其中最大的两个个体; ④对交叉后的个体以概率 P_M 进行变异操作, 接收变异后的新解。

(4) 如果满足收敛条件, 则退出进化过程, 否则转至 (3)。

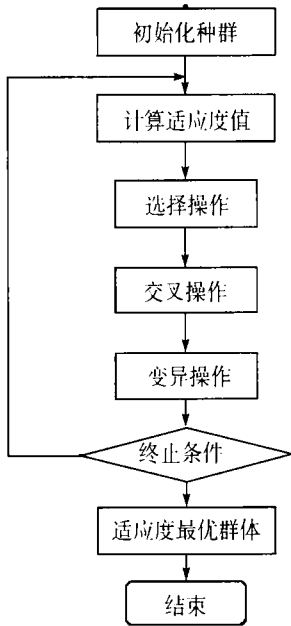


图2 遗传算法流程图

本算法的优化目标: 根据指向性、声功率级等指标的技术要求, 寻找出最优的输入电压分布。根据该目标, 我们将适应度函数定义为: $f(X)=Y_1 \times \overline{L_W} + Y_2 \times \frac{1}{\Delta D_{\max}}$ 。其中, $X=[x_1, x_2, \dots, x_N]$, Y_1 、 Y_2 为权重系数。实际应用时, 只需对该适应度函数或其中的权重系数略作修改, 即可实现对任一指标的严格控制或优先级调整。最后的适应度函数采用了归一化的形式, 即 $F(X)=1/[1+f(X)]$ 。

2.3.3 算法实现:

由于篇幅有限, 下文只着重介绍算法中的一种典型应用, 具体如下:

- (1) 给定扬声器阵列的各项已知参数, 包括优化频段、闭箱单元个数、闭箱单元间距等;
- (2) 根据设计要求给定 ΔD_{\max} 上限值;
- (3) 引入遗传算法找出使 $\overline{L_W}$ 取最大值的最优输入电压分布。

其中, 允许的最大输入电压根据所用的闭箱单元而定。

3 计算机模拟

本文做了大量模拟, 由于篇幅有限, 下面给出一个优化实例。为了便于分析, 最终结果做了归一化处理, 即幅值系数 x_i 最大取为 1, $i=1,2,\dots,N$; 同时为说明其效果, 对优化后阵列和单个闭箱单元二者的平均声功率级进行了比较 (单个闭箱单元的幅值系数 x 值取 1)。

已知参数: 闭箱单元个数 N 为 5, 振膜有效半径 a 为 0.02m, 间距 d 为 0.1m, 频率范围从 400Hz 到 2.5kHz。设计要求:

- (1) $\Delta D_{\max} \leq 1.6dB$ 。
- (2) 在满足 (1) 的同时, $\overline{L_W}$ 取到最大值。

优化结果: $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]=[0.4, 0.9, 1.0, -0.9, 0.4]$ 。根据式 (8)~(13) 计算可得, 从 400Hz 到 2.5kHz, 阵列的平均声功率级 $\overline{L_W}$ 比单个闭箱单元高 4.7dB; 阵列的指向性最大不均匀度 ΔD_{\max} 不超过 1.6dB (见图 3)。其中, 图 3 给

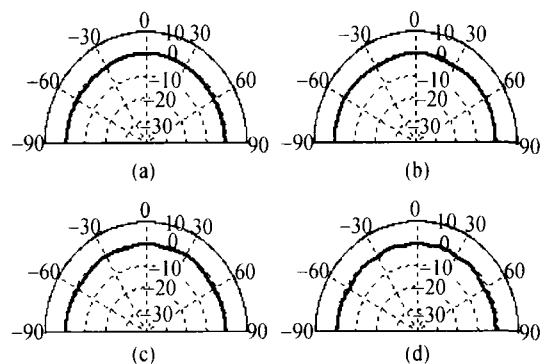


图3 (a) $f=500\text{Hz}$ (b) $f=1\text{kHz}$ (c) $f=1.6\text{kHz}$ (d) $f=2.5\text{kHz}$ 。

出了几个频率点下的优化后扬声器阵列指向性理论模拟图。

为了进一步说明本算法的有效性，将本例优化得到的阵列(下文简称 GA 阵列)与其他类型的全指向性扬声器阵列作了对比(其中，不同类型的阵列除了幅值系数 $[x_1, x_2, \dots, x_N]$ 不同以外，其他条件都一样，结果均根据式(8)~(13)计算而得)，如表 1 所示，可见 GA 阵列的指

向性均匀程度最好，而且在少用一个闭箱单元的情况下平均声功率级略高于 Sinc 阵列，不过 GA 阵列的平均声功率级也略低于 Bessel 阵列。正如前文分析，指向性和声功率级二者相互制约，优化过程中需要根据设计要求进行取舍，并最大限度实现二者的兼顾，本算法能有效地实现这一点。表 1 中 $\Delta \bar{L}_W$ 为扬声器阵列和单个闭箱单元的平均声功率级之差。

表 1 三类阵列对比

阵列类型	Sinc 阵列 [5]	Bessel 阵列 [6]	GA 阵列
闭箱单元个数 N (个)	6	5	5
幅值系数 $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$	$[1/5, -1/3, 1, 1, -1/3, 1/5]$	$[0.5, -1, 1, 1, 0.5]$	$[0.4, 0.9, 1, -0.9, 0.4]$
ΔD_{\max} (dB)	42.4	1.9	1.6
$\Delta \bar{L}_W$ (dB)	3.7	5.4	4.7

4 实验测量

实验在南京大学消声室进行。使用仪器如下：B&K 2012 音频分析仪、2706A 功率放大器、B&K 4190 传声器和 B&K 2669 前置放大器。挑选了几个特性非常接近的闭箱单元做实验，闭箱单元的振膜有效半径约为 0.02m，在 400Hz 到 2.5kHz 的频率范围内基本符合本文优化计算时使用的理论模型。将闭箱单元组成阵列，分别测出阵列优化前后的指向性频响曲线(优化前各个闭箱单元的输入电压都一样，其他条件不变)。实验信号为正弦信号，阵列中心到观察点的距离 r 为 4m，测量角从 -90° 到 90° 变化，每隔 10° 测量一次；其他实验条件与理论模拟时假设的已知参数一致。

下面给出 GA 阵列的实验结果。详见图 4、图 5 以及表 2，其中，图 4 给出了几个频率点下的优化前后扬声器阵列实测指向性对比图；图 5 给出了几个频率点下的优化后扬声器阵列模拟和实测指向性对比图；表 2 给出了 1.6kHz 和 2.5kHz 时实测结果和模拟结果的具体偏差数值(表中给出了 10° 到 90° 的具体数据，另外半空间的数据基本对称)。由图 4 可见，优化后阵列的指向性均匀程度比优化前有明显改

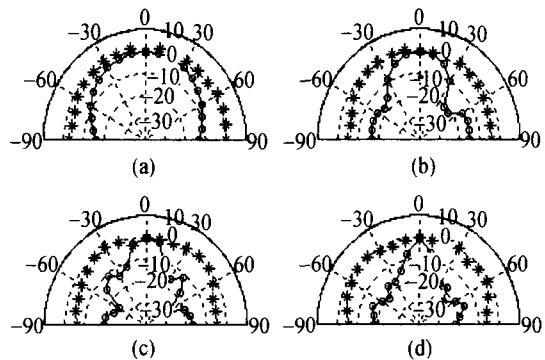


图 4 (a) $f=500\text{Hz}$ (b) $f=1\text{kHz}$ (c) $f=1.6\text{kHz}$ (d) $f=2.5\text{kHz}$ 。“o”为优化前阵列实测结果，“*”为 GA 阵列实测结果，测量间隔为 10° 。

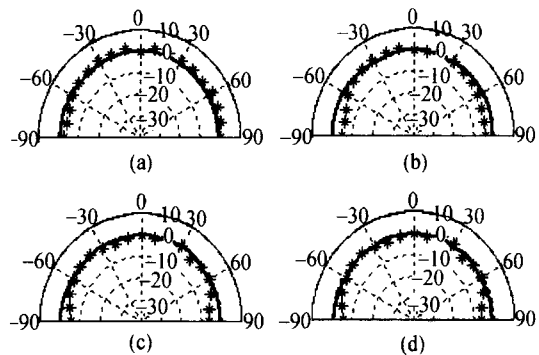


图 5 (a) $f=500\text{Hz}$ (b) $f=1\text{kHz}$ (c) $f=1.6\text{kHz}$ (d) $f=2.5\text{kHz}$ 。实线为 GA 阵列理论模拟值，“*”为 GA 阵列实测结果，测量间隔为 10° 。

表 2 实测结果和模拟结果的偏差

角度	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
1.6kHz 时偏差 (dB)	0.0	-0.2	-0.3	-1.0	-1.4	0.8	3.9	4.8	4.4
2.5kHz 时偏差 (dB)	0.1	-0.8	-1.2	2.1	0.4	-0.8	2.2	5.0	5.2

进。由图 5 和表 2 可见, 模拟结果和实测结果符合得很好, 只是二者在 $\pm 80^\circ$ 以外开始出现一定差异, 但总体上对优化结果影响不大。

5 结论

改变扬声器阵列的输入电压分布是优化指向性的有效方法。引入遗传算法则可以根据不同的设计需要, 有效地找出最佳的输入电压分布, 实现指向性和声功率级二者的优化和兼顾。计算机模拟结果和实验测量结果表明, 该方法是可行的和有效的。

本方法的特点是: (1) 可获得均匀指向性和较大声功率级的扬声器阵列; (2) 阵列的优化频段、组成阵列的闭箱单元个数、闭箱单元间距、指向性最大不均匀度等设计参数均可根据需要进行合理调整; (3) 适用于需要获得均匀球面声场的场合或者要求扬声器阵列横放又希望水平指向性均匀的场合, 如平板电视机、家庭影院, 会议室等。

参 考 文 献

- [1] 江超, 沈勇. 扬声器阵列优化目标和优化方法. 电声技术, 2002, (12): 20-23.
- [2] Olson H F. Acoustical Engineering. New Jersey: D. Van Nostrand Company, 1957, 35-55, 210-211.
- [3] 曹水轩, 沙家正. 扬声器及其系统. 南京: 江苏科学技术出版社, 1991, 301-310.
- [4] Wal M V D, Start E W, Vries D D. Design of logarithmically spaced constant-directivity transducer arrays. J. Audio Eng. Soc., 1996, 44 (6) : 497-507.
- [5] Jiang Chao, Shen Yong. An omni-directivity sound source array. The 18th International Congress on Acoustics, Kyoto, Japan, 2004: 747-750.
- [6] Keele D B. Effective performance of bessel arrays. J. Audio Eng. Soc., 1990, 38 (10): 723-748.
- [7] 阿诺特, 斯蒂芬著 (王季卿, 赵其昌译). 扩声技术原理及其应用. 北京: 电子工业出版社, 2003, 57.
- [8] Aarts R M, Janssen A J E M. On analytic design of loudspeaker arrays with uniform radiation characteristics. J. Acoust. Soc. Am., 2000, 107 (1) : 287-292.
- [9] 国家标准《扬声器主要性能测试方法》1996. 15.
- [10] 陈国良, 王熙法, 庄镇泉等. 遗传算法及其应用. 北京: 邮电出版社, 1996, 1-10.