

◇ 研究报告 ◇

紧凑型双单元声系统的波束形成研究*

朱宏艺 申雨晨 沈勇†

(南京大学声学研究所 近代声学教育部重点实验室 南京 210093)

摘要: 紧凑型扬声器系统的空间感增强是目前便携式移动电声设备面临的一个重要难题。该文基于拓宽视在声源宽度以增强空间感的理念,进行了紧凑型扬声器系统的波束形成研究。该文基于圆柱形刚性障板的声学特性,利用两只扬声器单元设计了紧凑型双单元声系统,分别利用基于相位对齐的最小均方误差算法实现左/右声道的波束形成和利用最小均方误差算法并设计半空间指向性的目标实现虚拟中央声道的波束形成。通过分析波束宽度和扬声器单元的工作状态验证了波束形成效果符合目标设计。考虑到实际使用情况,一方面,该文利用边界元方法仿真分析了有限长障板对扬声器单元指向性以及波束形成的影响,仿真结果表明有限长障板会使得单元整体的指向性变宽,该结果更有利于声系统实现目标;另一方面,该文基于有限元仿真的条件实际设计了双单元声系统,通过实验测量进一步验证了算法的性能。

关键词: 视在声源宽度;波束形成;紧凑型;边界元

中图法分类号: O42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2020)02-0169-09

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.02.002

On the beamforming of a compact dual-speaker sound system

ZHU Hongyi SHEN Yuchen SHEN Yong

(Key Laboratory of Modern Acoustics, MOE, and Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Spatial impression enhancement of compact loudspeaker systems is an important problem faced by portable mobile electroacoustic equipment at present. Based on the idea of broadening the apparent source width (ASW) to enhance the spatial impression, this paper studies the beamforming of a compact loudspeaker system. Based on the acoustic characteristics of the cylindrical rigid baffle, a compact dual-speaker sound system is designed by using two loudspeakers. The left/right channel beamforming is realized by using phase-aligned minimum mean squared error (MMSE) algorithm, and the phantom center channel beamforming is realized by using MMSE algorithm and designing a half-space directional target. By analyzing the beamwidth and the operating state of loudspeakers, it is verified that the beamforming effect is in accordance with the target design. Considering the actual application, this paper uses the boundary element method to simulate and analyze the influence of the finite-length baffle on the directivity of loudspeaker and beamforming. The simulation results demonstrate that the finite baffle can widen the directivity of the loudspeaker, which is more conducive to the realization of the target of the sound system. On the other hand, this paper further validates the performance of the algorithm by experimental measurements.

Keywords: Apparent source width; Beamforming; Compact; Boundary element method

2019-05-14 收稿; 2019-09-11 定稿

*国家重点研发计划项目 (2018YFB1403800)

作者简介: 朱宏艺 (1995-), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 研究方向: 声学。

†通信作者 E-mail: yshen@nju.edu.cn

0 引言

随着智能扬声器箱和便携式移动扬声器箱的高速发展与应用,此类设备在家居环境下的应用日益广泛。相比于传统分立式双声道重放系统或多声道重放系统,此类设备各声道扬声器之间物理间距很近,难以实现将节目中的各声道信号从不同方向辐射到达听者位置,这对声重放的空间感是非常不利的。同时智能扬声器箱和便携式移动扬声器箱的主要应用场景多为音乐重放(双声道节目源),因此本文旨在改善此类紧凑型扬声器系统在上述应用场景下的声重放空间感。

声重放的空间感有两个关键构成,视在声源宽度(Apparent source width, ASW)和听者包围感(Listener envelopment, LEV)^[1-3]。其中ASW主要和80 ms以前的反射声相关,LEV主要和80 ms以后的反射声相关^[4-6]。对于家居环境而言,传统的分立式双声道系统的两声道扬声器物理间距较大,因而容易获得满意的ASW。但要建立LEV需要多声道重放,难以通过扬声器系统布置来改善^[4]。因此紧凑型扬声器系统的声重放空间感只能通过拓宽ASW来改善,目前已有一些产品(例如,Bose Home Speaker 500^[7]和Apple Homepod^[8]等)通过尽量增大侧向声辐射来拓宽ASW。由于在家居环境中常见的音乐重放场景下,声像定位并不十分关键,提升声重放空间感所能带给听者的沉浸感是更为重要的目标^[9]。因此本文将扬声器系统辐射的声波投射到反射边界上,利用反射声来增大侧向声辐射^[10](如图1所示)。这对于紧凑型扬声器系统而言是一种可行的空间感提升解决方案。

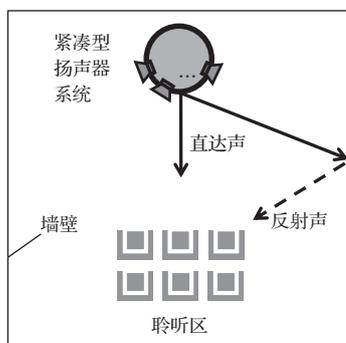


图1 紧凑型扬声器系统的聆听场景示意图

Fig. 1 Listening scenario of a compact loudspeaker system

为实现上述方案,关键在于实现扬声器系统的指向性控制。考虑到便携式电声设备的尺寸和成本限制,Faller^[11]提出利用偶极子的声学特性设计以控制紧凑型双单元声系统的指向性,通过分频段处理分别实现左/右声道和虚拟中央声道,可用于播放立体声。但其模型简单,实际双单元的声辐射不等同于偶极子,且分频段处理的方法增加了设计难度。Kolundzija等^[12]提出利用基于相位对齐的最小均方误差(Minimum mean squared error, MMSE)方法对紧凑型扬声器阵列进行宽带可听声范围内的波束形成,实现多通道的波束形成。该方法虽然使用的单元数量较多,但是避免了分频段处理,同时为解决空间感增强中的波束形成问题开拓了一个新的可能性。

本文首先分析了无限长圆柱形刚性障板上单个扬声器单元的指向性,然后基于该结果针对左/右声道和虚拟中央声道设计了不同的波束形成方案,并进行了数值模拟验证。其次考虑到实际设计声系统时所用的障板尺寸有限,因此本文利用边界元方法研究了安装于有限长障板上单个扬声器单元的指向性,并基于该结果分析了有限长障板对波束形成的影响。

1 理论分析

1.1 无限长圆柱形刚性障板上扬声器单元的指向性

如图2(a)所示,本文研究了安装于无限长圆柱形刚性障板上单个扬声器单元的辐射声场。当扬声器单元尺寸较小时,扬声器单元在高频的分割振动可被忽略,因此在图2(a)所示的球坐标系中可以将其看作是一个以恒定速度 v_0 振动的矩形活塞,其中 r 、 θ 、 ϕ 分别表示球坐标系的径向距离、仰角与方位角。设障板半径为 R ,活塞长为 $2L$,圆周宽度为 $2W = 2\alpha R$ 。则该扬声器单元的远场辐射声压为^[13-14]

$$p(\omega, r, \theta, \phi) \approx C(\omega, r, \theta) e^{jk_r r} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \frac{(-j)^l e^{jl\phi} \text{sinc}(l\alpha)}{H'_l(kR \sin \theta)}, \quad (1)$$

其中,

$$C(\omega, r, \theta) = \frac{4v_0\alpha L\rho_0 c \text{sinc}(kL \cos \theta)}{2\pi^2 r \sin \theta}, \quad (2)$$

ρ_0 是空气密度, c 是声速, ω 是角频率, $k = \omega/c$ 是波数, $H'_l(x)$ 是第一类柱汉克尔函数的一阶导数。当 kR 比较大时,

$$H'_l(x) \sim (-j)^l \sqrt{\frac{2}{\pi x}} e^{j\pi/4} e^{jx}.$$

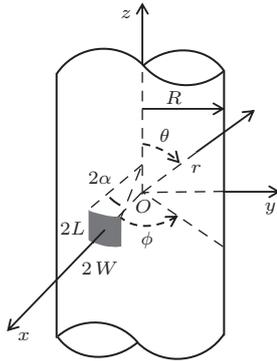
假设与障板相比扬声器单元很小, 则有 $\text{sinc}(l\alpha) \approx 1$ 。因此式(1)可改写为

$$p(\omega, r, \theta, \phi) \approx C(\omega, r, \theta) e^{jkr} \sqrt{\frac{\pi k R \sin \theta}{2}} \times e^{-jkR \sin \theta - j\pi/4} \sum_{l=-\infty}^{\infty} e^{jl\phi}, \quad (3)$$

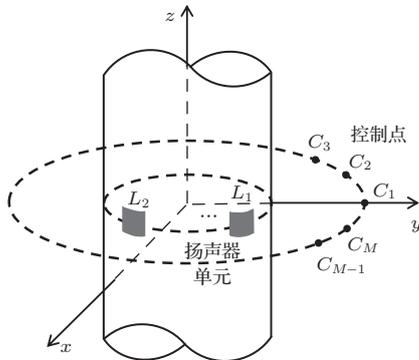
其中,

$$\sum_{l=-\infty}^{\infty} e^{jl\phi} = 2\pi\delta(\phi).$$

这意味着当频率较高时, 扬声器单元的指向性接近于 δ 函数。但当扬声器单元的尺寸相对于障板的尺寸不可忽略时, 则会导致 $e^{jl\phi}$ 带有不同大小的权重, 即



(a) 安装于无限长圆柱形刚性障板上的扬声器单元活塞模型



(b) 双单元声系统结构示意图

图2 双单元声系统的理论模型和结构示意图

Fig. 2 Theoretical model and sketch of the dual-speaker sound system

$$\begin{aligned} & \sum_{l=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(l\alpha) e^{jl\phi} \\ &= \sum_{l=-\infty}^{\infty} e^{jl\phi} + \sum_{l=-\infty}^{\infty} (\text{sinc}(l\alpha) - 1) e^{jl\phi} \\ &= 2\pi\delta(\phi) + \sum_{l=-\infty}^{\infty} (\text{sinc}(l\alpha) - 1) e^{jl\phi} \\ &= 2\pi\delta(\phi) + f(\phi), \end{aligned} \quad (4)$$

从而导致高频指向性变宽。当 kR 比较小时, 有 $H'_0(x) \sim \frac{2j}{\pi x}$, 则式(1)可改写为

$$p(\omega, r, \theta, \phi) \approx -jQ \frac{\rho_0 c k}{4\pi} \frac{e^{jkr}}{r}, \quad (5)$$

其中, $Q = 4v_0\alpha LR$ 。这意味着当频率较低时, 扬声器单元的指向性接近于全指向。

1.2 左/右声道

基于1.1节的分析, 可以得到一个利用装载在刚性圆柱形障板上的双单元声系统产生立体声左/右声道的波束形成设计方案。即在低频时利用扬声器单元的宽指向性, 使用两只扬声器单元进行波束形成得到较窄的波束宽度; 在高频时利用其窄指向性, 仅使用一只扬声器单元。

1.3 虚拟中央声道

为提升声像的定位准确度且扩大虚拟中央声道聆听区域, 因此其波束目标为半空间指向。假设安装于圆柱形障板上的两只扬声器单元的角度间隔为 ϕ_0 , 则两只扬声器单元在频率 ω 处的远场总辐射声压为

$$\begin{aligned} p(\omega, r, \theta, \phi) &= h_1 p_1 + h_2 p_2 \\ &= C(\omega, r, \theta) e^{jkr} \left(h_1 \sum_{l=-\infty}^{\infty} \frac{(-j)^l e^{jl\phi} \text{sinc}(l\alpha)}{H'_l(kR \sin \theta)} \right. \\ &\quad \left. + h_2 \sum_{l=-\infty}^{\infty} \frac{(-j)^l e^{j l(\phi + \phi_0)} \text{sinc}(l\alpha)}{H'_l(kR \sin \theta)} \right) \\ &= A(\omega, r, \theta) e^{jkr} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \frac{(-j)^l e^{jl\phi} \text{sinc}(l\alpha)}{H'_l(kR \sin \theta)} \\ &\quad \cdot (1 + \gamma e^{jl\phi_0}), \end{aligned} \quad (6)$$

其中, h_1, h_2 分别为加载在两只扬声器单元上的复权重, $A(\omega, r, \theta) = h_1 C(\omega, r, \theta)$, $\gamma = h_2/h_1$ 。基于1.1节的分析, 当频率较低时, 扬声器单元的辐射声场与方位角 ϕ 无关, 因此双单元声系统在低频依然为全指向。而随着频率的升高, 其指向性不仅与 kR 有

关,也与扬声器单元的尺寸 α 以及两只单元安装的角度间隔 ϕ_0 有关。为减少方位角 ϕ 的影响,在高频实现较宽的指向性,存在两种解决方案:(1)减小障板半径 R ,使高频不满足式(3)的条件,从而导致高频的指向性变宽;(2)由于sinc函数满足当 $x > 10$ 时, $\text{sinc}(x) \approx 0$,因此可通过增大 α 以减少阶数 l 的影响,同时减少角度间隔 ϕ_0 的影响,从而拓宽高频指向性。

本文结合以上两种解决方案设计了紧凑型双单元声系统,即在障板半径较小且单元尺寸较大的情况下,实现虚拟中央声道的波束形成。

2 问题陈述与算法

2.1 问题陈述

图2(b)为双单元声系统示意图,该系统由两只扬声器单元组成并装载于刚性圆柱形障板上。设两只扬声器单元所在方位角为 $\psi_L = [-\psi_0, \psi_0]$, $-\psi_0$ 处安装左单元, ψ_0 处安装右单元。定义 0° 为双单元声系统的主轴方向, $-\psi_0$ 为左声道目标方向, ψ_0 为右声道目标方向。在半径为 R_C 的圆周上选取 M 个点作为空间声场控制点,设其所在方位角为 $\varphi_C = [\varphi_1, \dots, \varphi_M]$ 。选取 K 个频率 $\omega = [\omega_1, \dots, \omega_k]$ 作为控制频率。设 $\mathbf{G}_k \in \mathbf{C}^{M \times 2}$ 为双单元声系统在频率为 ω_k 处至各控制点的传输矩阵,其中矩阵元素 $g_{mn}(\omega_k)$ 表示当频率为 ω_k 时第 n 个扬声器单元到第 m 个控制点的声压传递函数,根据式(1)可表示为

$$g_{mn}(\omega_k) = C(\omega_k, r, \theta) e^{jk_k r} \cdot \sum_{l=-\infty}^{\infty} \frac{(-j)^l e^{jl(\varphi_m - \psi_n)} \text{sinc}(l\alpha)}{H_l'(k_k R \sin \theta)}. \quad (7)$$

设各控制点处的声压为 $\mathbf{p}_k \in \mathbf{C}^{M \times 1}$,其中 $\mathbf{p}_k = [p_1(\omega_k), \dots, p_M(\omega_k)]^T$ 。设波束形成器给两只扬声器单元加载的复权重为 $\mathbf{h}_k \in \mathbf{C}^{2 \times 1}$,其中 $\mathbf{h}_k = [h_1(\omega_k), h_2(\omega_k)]^T$ 。设波束形成器的目标为在各控制点实现目标声压 $\mathbf{d}_k \in \mathbf{C}^{M \times 1}$,其中 $\mathbf{d}_k = [d_1(\omega_k), \dots, d_M(\omega_k)]^T$ 。则波束形成器的设计问题可转换为在各频率 ω_k 处求解 \mathbf{h}_k ,使得误差函数 $\mathbf{e}_k = \mathbf{d}_k - \mathbf{p}_k = \mathbf{d}_k - \mathbf{G}_k \mathbf{h}_k$ 最小。

2.2 算法介绍

对于左/右声道,为实现前述设计理念,通常采用分频段滤波器设计的方法。但由于扬声器单元存在从低频全指向性到高频窄指向性的过渡区,

该过渡区不易划分且分频段处理易导致滤波器不平滑。因此为避免分频段处理,同时确保滤波器能从低频平滑过渡到高频,本文采用了基于相位对齐的MMSE算法^[6]。首先选取高频某个参考频率 ω_{ref} 处目标方向上的单元在各控制点的声压幅度 $\mathbf{s}_{\text{ref}} \in \mathbf{C}^{M \times 1}$ 作为幅度目标,然后为该目标添加每个频率 ω_k 处单元在各控制点的相位信息,即优化目标设置为

$$\mathbf{d}_k = \text{diag}(|\mathbf{g}_{N_{L/R}}|)^{-1} \text{diag}(\mathbf{g}_{N_{L/R}}) \cdot \mathbf{s}_{\text{ref}}, \quad (8)$$

其中, $N_{L/R}$ 表示位于左/右声道目标方向上的控制点的序号, $\mathbf{g}_{N_{L/R}} \in \mathbf{C}^{M \times 1}$ 是传输矩阵 \mathbf{G}_k 的第 $N_{L/R}$ 行,表示单元在左/右声道目标方向上的频率响应。这样设置优化目标的原因是在高频时各单元在同一控制点的幅度和相位具有明显差异,使用相位对齐的优化目标可以驱使波束形成器仅使用一个单元;在低频时,由于声波波长较长,各控制点的相位差异不大,因此相位对齐对波束形成的影响可忽略。为增强系统稳健性,防止任一单元在任一频率出现复权重过大的情况,本文对每一单元的复权重 \mathbf{h}_k 增加了幅值限制。同时本文对左/右声道方向上的目标控制点添加了软约束,防止在目标控制点上出现过优化。

综上所述,针对左/右声道的波束形成优化方案可概括如下:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{h}_k} \|\mathbf{d}'_k - \mathbf{G}'_k \mathbf{h}_k\|_2 \\ & \text{subject to } |h_n| \leq h_{\max}, \quad n = 1, 2, \\ & |d_{N_{L/R}} - \mathbf{g}_{N_{L/R}}^T \mathbf{h}_k| \leq t |d_{N_{L/R}}|, \end{aligned} \quad (9)$$

其中, \mathbf{G}'_k 是矩阵 \mathbf{G}_k 去除第 $N_{L/R}$ 行后的传输矩阵, \mathbf{d}'_k 是向量 \mathbf{d}_k 去除第 $N_{L/R}$ 行元素后的目标向量。参数 $t \geq 0$ 用于控制左/右声道目标方向的频率响应与目标响应的偏离程度, t 越小,则目标方向的频率响应与目标响应越一致。

对于虚拟中央声道,由于波束目标为半空间指向,因此不需要添加相位约束。设计优化目标为

$$\mathbf{d}_k = \begin{bmatrix} \underbrace{0, \dots, 0}_{[M/4] \text{个}}, \underbrace{1, \dots, 1}_{M-2 \times [M/2] \text{个}}, \underbrace{0, \dots, 0}_{[M/4] \text{个}} \end{bmatrix}^T, \quad (10)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整,则针对虚拟中央声道的波束形成优化方案可概括如下:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{h}_k} \|\mathbf{d}_k - \mathbf{G}_k \mathbf{h}_k\|_2 \\ & \text{subject to } |h_n| \leq h_{\max}, \quad n = 1, 2. \end{aligned} \quad (11)$$

3 数值模拟

3.1 模拟设置

为评价上述算法的宽带波束形成的效果, 本节对两只以角度间隔为 120° 装载在刚性圆柱形障板上的扬声器单元所构成的声系统进行了数值模拟。其中圆柱形障板的半径为 $R = 4\text{ cm}$, 扬声器单元的长为 $2L = 5\text{ cm}$, 宽为 $2W = 5\text{ cm}$ ($\alpha = W/R = 5/8$)。设定用于计算双单元声系统复权重的空间控制点数为 $M = 100$, 并以等角度间隔 $\pi/50$ 分布于距声系统中心半径为 $r = 2\text{ m}$ 的圆周上。为方便下文讨论, 本文的指向性图由每个频率的归一化指向性构成, 即将每个频率的指向性的幅度最大值归一化至 0 dB , 目标频率范围为 $200\text{ Hz}\sim 10\text{ kHz}$ 。根据优先效应, 当反射声的声压

级比直达声至少高 10 dB 时, 人耳感知到的反射声和直达声响度相同, 因此本文以 -10 dB 对应的波束宽度作为算法性能的评价指标^[6,11,15]。

3.2 安装于无限长圆柱形障板上的扬声器单元的指向性

图3(a)~(c)是安装于无限长圆柱形障板上单个扬声器单元的指向性图, 由图可见单元的指向性随频率增大逐渐变窄。为方便下文分析左/右声道和虚拟中央声道的波束形成结果, 本文根据单个扬声器单元的指向性随频率的变化特征将频率范围分为三段, 频段I: 1 kHz 以下; 频段II: $1\text{ kHz}\sim 5\text{ kHz}$ 段; 频段III: 5 kHz 以上。在频段I, 单元基本为全指向; 在频段II, 单元处于从低频全指向到高频窄指向的中频过渡区; 在频段III, 单元的指向性较窄约为 120° 。

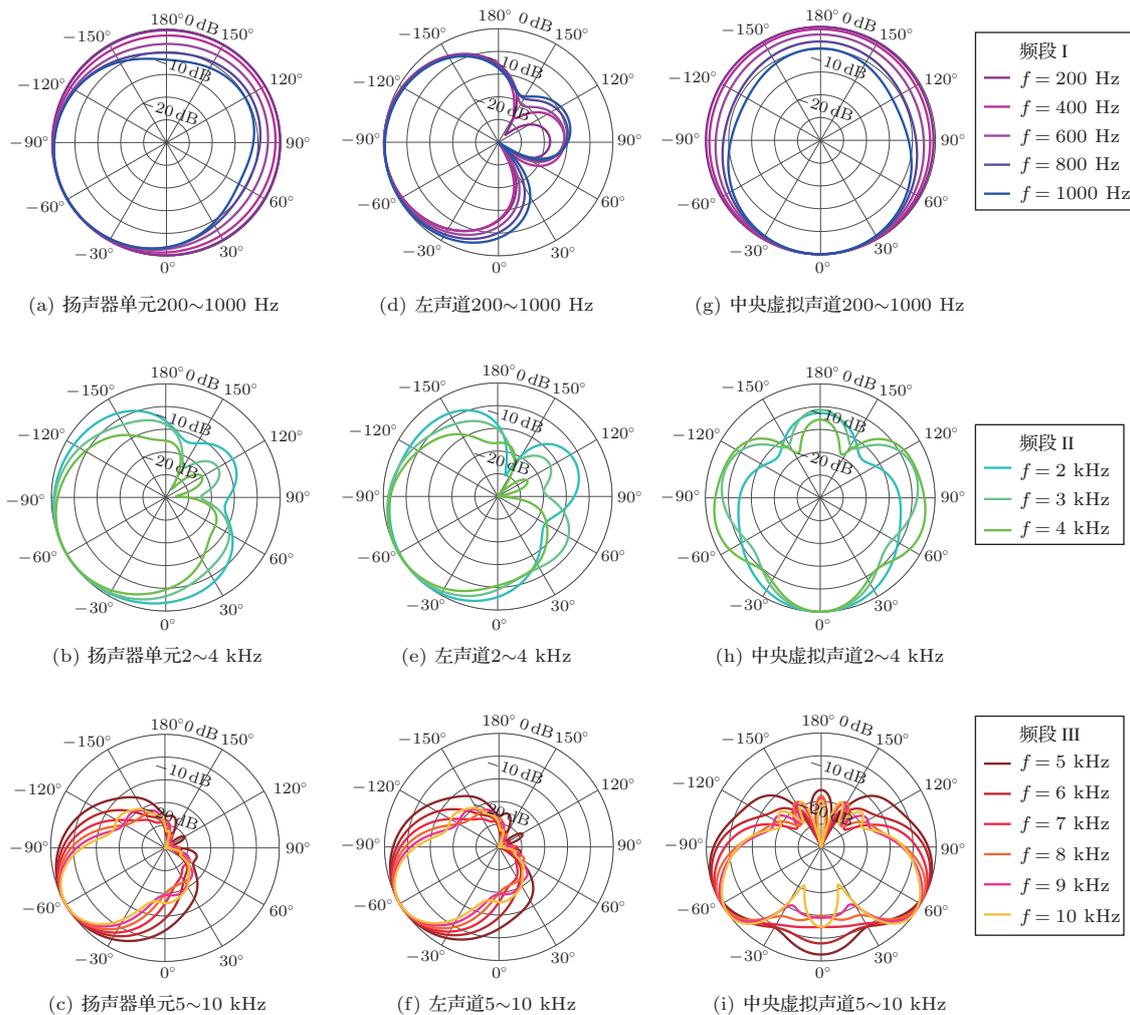


图3 无限长圆柱形障板上扬声器单元的指向性和左声道/虚拟中央声道波束形成结果

Fig. 3 Directivity of a loudspeaker mounted on an infinite cylindrical baffle and beamforming results of left/phantom center channel

3.3 左/右声道波束形成

本文的优化目标选取指向性最窄的频率作为参考频率,即 $\omega_{\text{ref}} = 10 \text{ kHz}$,利用2.2节的算法进行左/右声道波束形成。图3(d)~(f)是左声道的波束形成结果(右声道与左声道关于轴向方向对称,因此本文对右声道波束形成不作赘述)。在频段I,由图3(d)可见,由于单元为全指向,因此算法通过驱动两只单元共同工作实现的波束宽度约为 210° 。同时根据式(5)可知扬声器单元在低频段等同于单极子,因此组成的双单元声系统等同于偶极子,从而导致左声道的波束方向为 -90° 。在频段II,由图3(e)可见,算法实现了滤波器设计的平滑过渡,由驱动两单元工作逐渐过渡为驱动一个单元工作实现较窄的波束形成,波束宽度约为 240° 。由于频段II的声波波长与障板的直径以及单元之间的间距相当,因而波束宽度略宽于频段I的波束宽度。在频段III,图3(f)和图3(c)两图基本无差异,说明算法实现了高频仅保留单个扬声器单元工作。

3.4 虚拟中央声道波束形成

利用2.2节的算法进行虚拟中央声道波束形成,结果如图3(g)~(i)所示。在频段I,图3(g)的波束形成结果与1.3节的分析一致,保留了单个扬声器单元的全指向性。虽然该结果偏离半空间指向性的目标,但由于该频段的声波波长较长,由 180° 方向的波束产生的反射声的相位变化较小,不会与 0° 方向的直达声发生干涉,因此不会影响聆听者对虚拟中央声道的感知。在频段II,由图3(h)可见,由于单元的指向性逐渐由全指向变为半空间指向,因此能够实现的波束宽度逐渐由 360° 变为 180° ,逐渐符合设计目标。在频段III,由于单元的指向性变得较窄,图3(i)中的主瓣变得不光滑,但除较高频 $9 \text{ kHz} \sim 10 \text{ kHz}$ 之外的其余频率在半空间上的指向性幅度均大于 -10 dB ,符合虚拟中央声道的设计要求。

3.5 扬声器单元的工作状态分析

为进一步说明算法能够实现波束形成滤波器从低频平滑过渡到高频,图4给出了基于图3结果的滤波器系数 $|h_k|$ 随频率的变化关系。由图4可知进行左声道波束形成时,频段I处两只单元同时工作,频段II处左单元的复权重逐渐增加,右单元的复权重逐渐减小,频段III处主要由左单元工作,从而证明算法可实现滤波器从低频到高频的平滑过渡。

进行中央虚拟声道波束形成时,由于设计的双单元声系统的结构以及优化目标均关于主轴方向对称,因此两个单元的复权重完全一致。综上所述,波束形成器的滤波器系数符合前述设计方案。

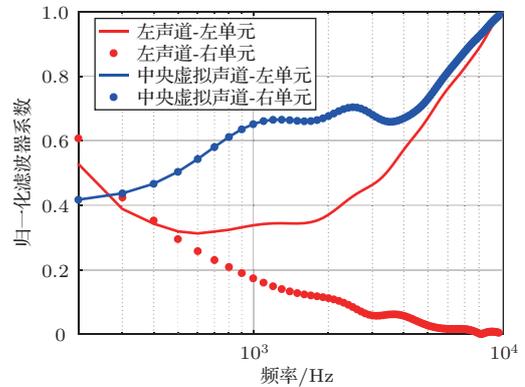


图4 双单元声系统的滤波器系数随频率的变化关系

Fig. 4 Complex weight coefficients of dual-speaker sound system

4 有限长障板的影响

考虑到实际设计双单元声系统时所用的障板并非无限长,因此本节在3.1节的模拟条件基础上假定障板的高度为 $H = 20 \text{ cm}$,利用边界元方法研究了安装于有限长圆柱形障板上单个扬声器单元的指向性,如图5(a)~(c)所示。图5(d)~(f)是基于该数据,通过选取参考频率为 $\omega_{\text{ref}} = 10 \text{ kHz}$ 进行左声道波束形成后的指向性图,图5(g)~(i)是虚拟中央声道波束形成后的指向性图。

对比图5(a)~(c)和图3(a)~(c)可见,有限长障板会导致声源存在更多的衍射路径使得单元在频段I、II的指向性变宽,在频段III的 120° 方向出现旁瓣。其对波束形成的影响具体有两方面:

(1) 对于左声道,在频段I、II,图5(d)~(e)的波束宽度窄于图3(d)~(e)的波束宽度,且在 $90^\circ \sim 120^\circ$ 方向上的旁瓣小于图3(d)~(e)。原因在于单元在该频段的指向性更接近于单极子,所构成的双单元声系统更符合偶极子的特性,因而波束形成结果优于无限长障板条件下的结果。在频段III,和图3(i)的波束形成结果一致,图5(i)基本保留了单个扬声器单元的高频指向性。原因在于障板的高度对于该频段的声波波长可近似于无限长,因此对单元高频的指向性影响较小。其在单元 120° 方向所造成的旁瓣幅度小于 -10 dB ,因而不影响频段III的波束形成结果。

(2) 对于中央虚拟声道，在频段I、II，图5(g)~(h)的波束形成结果基本为全指向，该结果与1.3节的分析一致。由于频段I、II的声波波长较长，因而该结果不会影响聆听者对虚拟中央声道的感知。在频段III，由于单元指向性变窄，图5(i)的波束形成结果依然会出现主瓣不光滑的情况，但在较

高频9~10 kHz附近，其指向性幅度均大于-10 dB。因此相较于图3(i)，图5(i)的波束宽度更符合虚拟中央声道的设计要求。

综上所述，有限障板虽然会造成单个扬声器单元的指向性整体变宽，但该结果更有利于左/右声道和中央虚拟声道的波束形成。

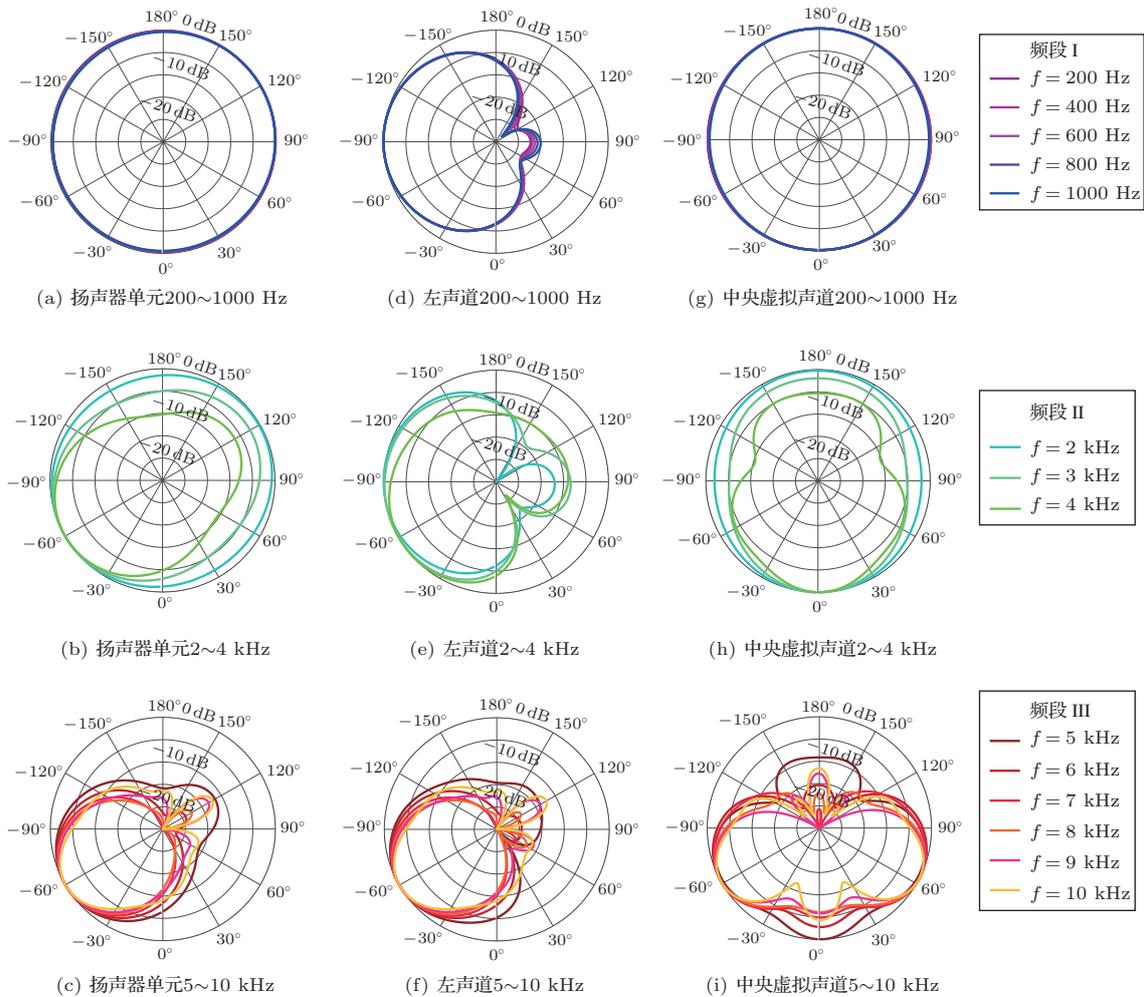


图5 有限长圆柱形障板上 ($H = 20\text{ cm}$) 扬声器单元的指向性和左声道/虚拟中央声道波束形成结果

Fig. 5 Directivity of a loudspeaker mounted on a finite cylindrical baffle ($H = 20\text{ cm}$) and beam-forming results of left/phantom center channel

5 实验

为验证算法的实际性能，本文基于第4节的模拟条件，设计并加工了一个半径 $R = 4\text{ cm}$ 、高度 $H = 20\text{ cm}$ 的圆柱形障板，两只相同型号且半径为 2.54 cm 的扬声器单元以角度间隔 120° 安装于该障板上，构成如图6(a)所示的紧凑型双单元声系统。利用如图6(b)所示的实验装置分别测量了安装于有限长圆柱形障板上单个扬声器单元的指向性、左

声道和虚拟中央声道的波束形成结果，测量结果如图7所示。

对比图7(a)~(c)和图5(a)~(c)，由于实际使用的扬声器单元并非理想的矩形活塞振动，且实际采用的障板不是标准的圆柱形，因而实测的指向性与有限元仿真结果有差异。主要表现为在频段II，实测的指向性较窄于仿真结果。

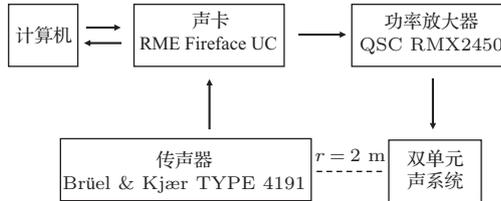
由图7(d)~(f)可见，对于左声道，算法实现了波束形成滤波器从低频平滑过渡到高频。在频段I，两

只单元同时工作以实现较窄的波束宽度;在频段II,由于扬声器单元处于由低频到高频的过渡区,因而实现的波束较宽;在频段III,由于扬声器单元的指向性较窄,因此仅保留一只单元工作。由图7(g)~(i)可见,对于中央虚拟声道,在频段I、II,与1.3节的

理论分析一致,波束形成结果基本为全指向;在频段III,波束的主瓣受单元指向性变窄的影响而变得不光滑,同时由于实际单元在该频段不是理想的活塞振动,因此在高频9 kHz以上频率,图7(i)在 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 间的指向性幅度小于 -10 dB。



(a) 紧凑型双单元声系统测量环境



(b) 指向性测量装置图

图6 实验测量装置图

Fig. 6 Diagram of experimental measuring device

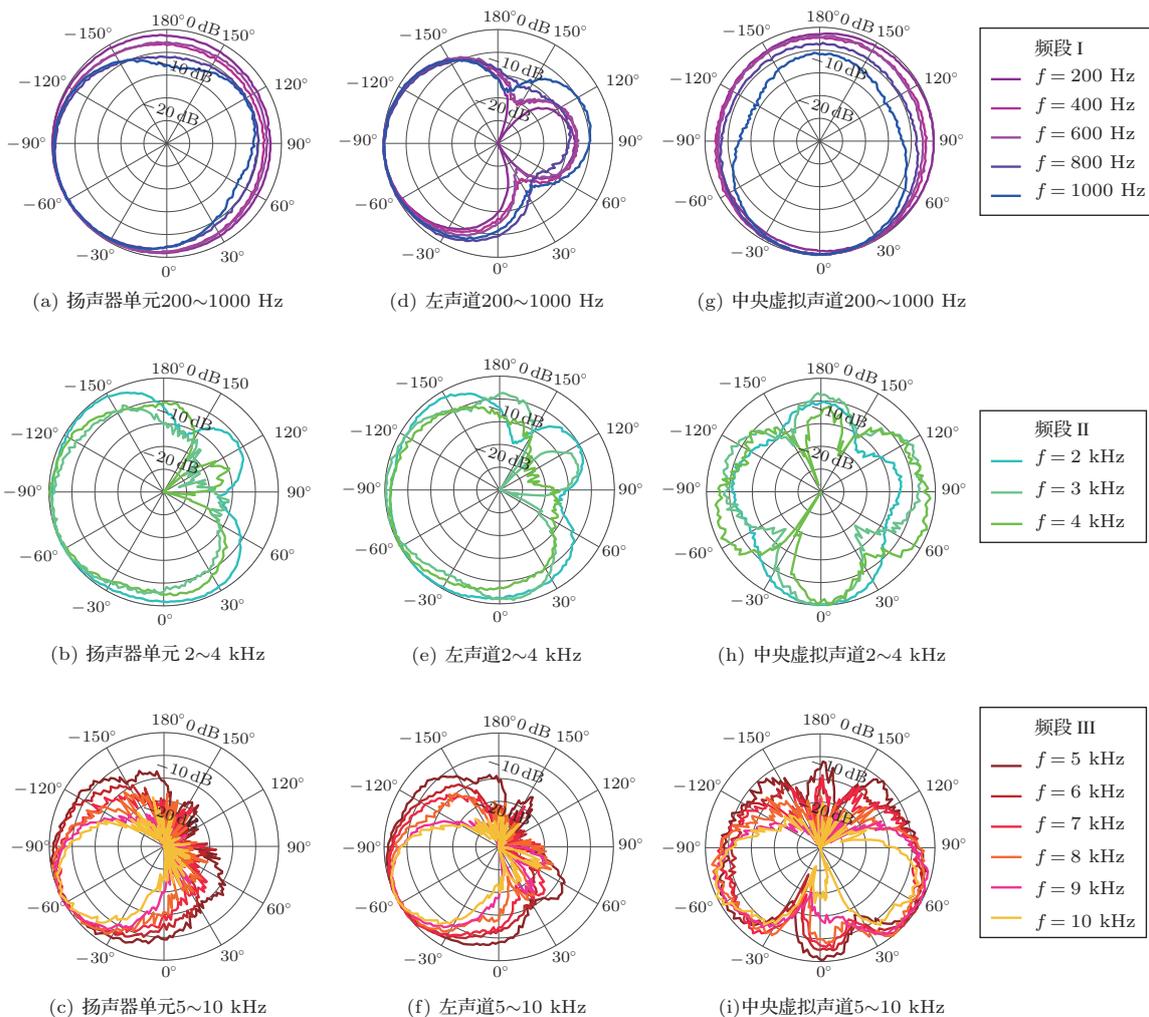


图7 实测的有限长圆柱形障板上($H = 20$ cm)扬声器单元的指向性和左声道/虚拟中央声道波束形成结果
Fig. 7 Measured directivity of a loudspeaker mounted on a finite cylindrical baffle ($H = 20$ cm) and beamforming results of left/phantom center channel

6 结论

本文针对紧凑型扬声器系统多用于家居环境音乐重放的场景,利用两只扬声器单元构建了紧凑型双单元声系统,通过波束形成实现左/右声道和中央虚拟声道,从而拓宽ASW以实现空间感增强。对于左/右声道,利用基于相位对齐的MMSE算法实现低频使用两只扬声器单元进行波束形成得到较窄的波束宽度,高频利用其窄指向性,仅使用一只扬声器单元;对于中央虚拟声道,利用MMSE算法通过设计半空间指向性的目标驱动两只单元工作进行波束形成得到较宽的波束。仿真结果显示,上述方案均获得了理想的结果。

考虑到实际设计双单元声系统时所用的障板尺寸有限,本文利用边界元方法模拟和分析了有限长障板对单个扬声器单元的指向性以及左/右声道和中央虚拟声道波束形成的影响。仿真结果表明,有限长障板的边缘衍射效应一方面会导致扬声器单元在中低频的指向性变宽,该现象有利于声系统中低频更好的实现目标;另一方面会导致扬声器单元在高频段出现旁瓣,但由于障板的高度相对于高频段的声波波长可近似于无限长,所以造成的旁瓣对波束形成结果的影响可忽略。因此,有限长障板的设计不仅更符合实际情况,而且更有利于实现波束形成。最后本文基于有限元仿真的条件实际设计了双单元声系统,通过实验测量进一步验证了本文所用算法的性能。

参 考 文 献

- [1] Long M. Architectural acoustics[M]. New York: Elsevier Academic Press, 2004.
- [2] Beranek L. Concert halls and opera houses[M]. 2nd Edition. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [3] Bradley J S, Soulodre G A. The influence of late arriving energy on spatial impression[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 97(4): 2263–2271.
- [4] Bradley J S, Reich R D, Norcross S G. On the combined effects of early-and late-arriving sound on spatial impression in concert halls[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(2): 651.
- [5] Barron M. Measured early lateral energy fractions in concert halls and opera houses[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 232(1): 79–100.
- [6] Toole F E. Sound reproduction loudspeakers and rooms[M]. Burlington: Focal Press, 2008.
- [7] Bose Home Speaker 500[DB/OL]. [2019-04-20]. https://www.bose.com/en_us/products/speakers/smart_home/bose-home-speaker-500.html
- [8] HomePod[DB/OL]. [2019-04-20]. <https://www.apple.com/cn/homepod/>.
- [9] Barron M. The subjective effects of first reflections in concert halls—The need for lateral reflections[J]. Journal of Sound and Vibration, 1971, 15(4): 475–494.
- [10] Wühle T, Merchel S, Altinsoy M E. The precedence effect in scenarios with projected sound[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2019, 67(3): 92–100.
- [11] Faller C. Compact stereo loudspeakers with Dipole processing[C]// AES 146th International Convention, 2019.
- [12] Kolundzija M, Faller C, Vetterli M. Design of a compact cylindrical loudspeaker array for spatial sound reproduction[C]// AES 130th International Convention, 2011.
- [13] Williams E. Fourier acoustics[J]. Salt Lake City: Academic Press, 1999.
- [14] 程建春. 声学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [15] Gardner M B. Historical background of the haas and/or precedence effect[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1968, 43(6): 1243.