

扬声器的优化设计

李胜波 陶擎天 王金兰

(南京大学近代声学实验室 南京 210093)

1997年9月29日收到

摘要 基于有限元法发展了扬声器的计算机辅助设计, 由此分析了扬声器的振动特征, 讨论了各参数对扬声器振动及声辐射的影响, 最后对其声压频响的优化措施作了探讨.

关键词 扬声器, CAD, 优化

Optimal design of a loudspeaker

Li Shengbo Tao Qingtian Wang Jinlan

(Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract The computer-aided design for a loudspeaker based on the finite-element method has been developed. As an application, the vibration modes of the loudspeaker is investigated and the influence of each parameter on the vibration of the loudspeaker and the resulting sound radiation are discussed. Then some approaches to improve the SPL (sound pressure level) response are explored.

Key words Loudspeaker, Computer-aided design, Optimization

1 引言

扬声器是实现电声转化的器件. 在电声转化过程中, 要使其实现规定的频响是困难的. 因此, 扬声器单元被认为是音响系统中最薄弱的环节. 如何提高扬声器电声性能成为一件十分重要的事情.

随着理论与技术的进步, 人们对它的研究手段日益提高. 过去人们对扬声器的研制靠运用建立在集总参数基础上的传输线研究方法及经验摸索, 这里, 我们借助于基于有限元原理所建立的扬声器 CAD, 可以并已经节省研制时间及费用. 使用这种方法, 只需输入有关的参数, 就可以较精确地计算出扬声器的有关特性, 于是, 就可以利用所得结果更好地分析参数对扬声器性能的影响.

本文以有限元法为基础, 讨论了各参数对扬声器振动及其声辐射的影响, 并对扬声器频响优化措施作了较为详细的探讨.

2 扬声器 CAD 原理

扬声器由输入音频电流激励振膜振动, 从而驱动空气发声. 所以对扬声器声场的预测应首先得到其机械振动, 再来计算声辐射.

我们假定扬声器是轴对称的, 在有限元方法下^[1], 按最小位能原理可得到如下的总体方程组^[2]:

$$\{[K] + j\omega[C] - [M] + [AL]\}\{\delta\} = \{f\} \quad (1)$$

其中 $[K]$ 为总刚性矩阵, $[C]$ 为衰减矩阵, $[M]$ 为质量矩阵, $\{f\}$ 为驱动力矩阵, 而 $\{\delta\}$ 为待求各节点的位移矩阵. $[AL]\{\delta\}$ 为声负载

项 [3].

组成 (1) 式的联立方程组的每个单元元 [1] 的刚度矩阵、质量矩阵如下:

$$\begin{aligned} [K_e] &= \frac{2\pi E h}{1-u^2} [B] \\ [M_e] &= 2\pi \rho h [A] \end{aligned} \quad (2)$$

$$[A] = \int_0^L [N]^T [N] r dx$$

$$[B] = \int_0^L [B]^T [D] [B] r dx$$

其中

$$[D] = \begin{bmatrix} 1 & u & 0 & 0 \\ u & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h^2/12 & uh^2/12 \\ 0 & 0 & uh^2/12 & h^2/12 \end{bmatrix}$$

[N]: 单元元形状函数

[B]: 应变与位移之间的关系函数

L: 单元元母线长度

u: 单元元泊松比

h: 单元元厚度

E: 单元元杨氏模量

ρ: 单元元密度

在声辐射的计算中, 若不考虑前室效应, 可运用 Rayleigh 积分 [4,5]:

$$P_\omega(r) = -j\omega\rho_0 \int_{s_0} \int \frac{e^{jk|r-r_0|}}{2\pi|r-r_0|} V(r_0) ds_0 \quad (3)$$

式中 ρ_0 为空气密度, $V(r_0)$ 是辐射面上 r_0 处速度的垂直分量, r 为场点与振膜中心之间的位移.

在 90° 顶角的扇形空间区域内的声辐射功率 W 为:

$$W = \frac{2\pi d}{\rho_0 c} \int_0^{45} P_\omega^2 \sin\phi d\phi$$

其中 $d = |r|$. 指向特性为:

$$D(\theta) = \frac{(P_\omega)_\theta}{(P_\omega)_{\theta=0}}$$

应用声学

θ 为场点偏离扬声器中心轴的角度.

运用上述原理编制的软件, 只要测出扬声器有关的电磁参数 (包含在 (1) 式 $\{f\}$ 矩阵中)、材料参数及几何参数在输入计算机后, 便可自动计算出各部分的位移、相位、辐射声压频响、功率、指向性等特性. 限于篇幅, 本文对指向性和功率响应不做讨论, 而以扬声器最重要的电声指标—声压频率响应为重点. 图 1 是根据 (3) 式计算及实际测量的 YD100-8S 扬声器 (其具体参数见表一) 的轴向频响, 可见二者符合很好. 其中低频的误差是由非无限大障板引起的 [6]

表 1 YD100-8S 扬声器参数表

	杨氏模量 10^8 N/m^2	密度 kg/m^3	厚度 mm	阻尼系数
折环	2.07	245	0.25	0.04
振膜	4.88	578	0.234	0.04
定心支片	2.55	593	0.14	0.07

注: 音圈质量 0.3324g 音圈直流电阻 $R=8.0\Omega$
自感 $L=0.2\text{mH}$ 电磁转换因子 $BL=2.0\text{N/A}$

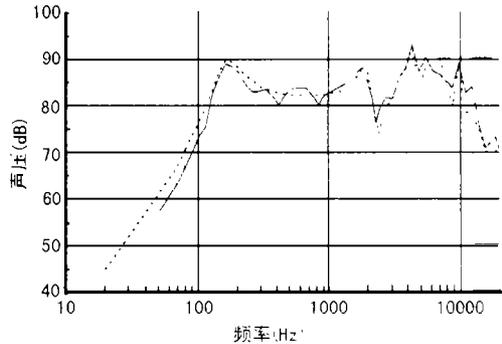


图 1 YD100-8S 扬声器轴向声压的计算值 (虚线) 及实测值 (实线)

3 扬声器振动分析

由式 (1) 计算的节点位移 $\{\delta\}$ 是一复数矩阵, 它包含了振动位移幅值及相位等信息. 图 2 是由此求得的上述扬声器沿母线的振动情况. 其横坐标表示沿母线方向 (以锥顶至外缘为正方向, 下同) 的位置 (包括振膜和折环). 纵坐标为横振动的位移和相位. 在低频段 (小于 1980Hz, 见图 2(a)(b)), 锥体各部分同相作类似活塞运动. 在 1980Hz (图 2(c)) 为第一共振频

率, 此时振膜的外沿及折环 (又称之为主区 - main section^[7]) 强烈共振, 且振膜和折环基本上同相位. 主区对声压贡献最大, 其共振便造成频响上的峰点. 随频率升高, 振动减弱, 相位差增大. 在 2450Hz(图 2(d)) 时相差提高至 180°, 此时折环与振膜作反相振动, 从而在结合处形成一个节圆, 即产生分割振动, 频响曲线上形成一个很大的谷点 (中频谷点). 4530Hz(图 2(e)) 为第二共振频率, 此时振膜上产生两个节圆, 内部 (两节圆之间) 与外部反相振动, 但内部 (主区) 振动强烈, 因此形成频响上的一个峰点; 5030 Hz(图 2(f)) 时振动微弱, 是反共振频率, 在频响上表现为一个谷点; 随着频率的

升高, 不断出现高次共振和反共振模式, 频响曲线上便出现了更多的起伏.

从物理意义上来讲, 振膜的分割振动是由于驱动力使振膜在母线上激发出弯曲波的原因. 由图 2 可见弯曲波首先在振膜的外缘出现, 随着频率的升高而逐渐覆盖整个振膜. 同时振膜靠近锥顶的内部的振动大体上是均匀的, 随着频率的增加而减小其面积. 扬声器的高频辐射主要由这部分决定. 而外缘的声短路的弯曲振动使声压频响变得不规则. 所以要改善扬声器的辐射特性, 应尽量使外缘的弯曲振动得到抑制, 而且希望分割振动频率出现得越晚越好.

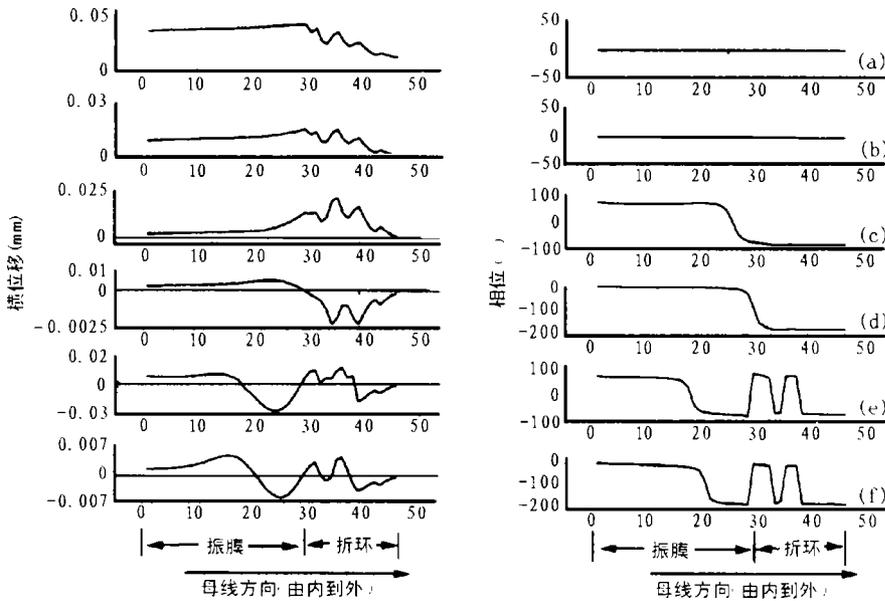


图 2 扬声器沿母线方向的横振动位移及相位

(a)—1000Hz (b)—1500Hz (c)—1980Hz
(d)—2450Hz (e)—4530Hz (f)—5030Hz

4 扬声器的优化设计

扬声器的音质是由许多因素互相影响的结果, 其牵涉面既广又深. 概括地讲, 影响到扬声器电声性能的可以测定的参数有如下几个:

物理参数: 杨氏模量 E ; 密度 ρ ; 材料损耗因子 η ; 泊松比 u .

几何参数: 膜厚度 h ; 内外半径; 母线几何

形状等.

由式 (2) 可见, 物理参数全部出现于 $[A]$ 、 $[B]$ 矩阵前的系数中, 而几何参数则存在于 $[A]$ 、 $[B]$ 矩阵的各元素中.

可以证明, 扬声器分割振动的起始频率 $f_r \propto \sqrt{E/\rho}$, 即与振膜材料的声速成正比. 所以要展宽扬声器的高频重放频率, 希望材料的

E/ρ 要大, 即杨氏模量要大, 密度要小. 而且要抑制分割振动, 使频响较为平坦, 要求材料有适当的内阻尼. 应当说明的是, 实际中材料的这些参数值的变化是有限的, 而且经常存在着顾此失彼的矛盾. 所以, 最大限度的利用现有材料, 使其表现最好的音质, 才是更重要的问题. 以下我们以四个方面为例讨论扬声器的优化设计问题.

(1) 杨氏模量沿母线的分布

由于工艺的限制, 杨氏模量沿扬声器纸盆母线方向的分布是不均匀的. 而且不同厂家的扬声器, 工艺手段不同, 分布规律也不同, 有的外缘比内缘高, 有的相反.

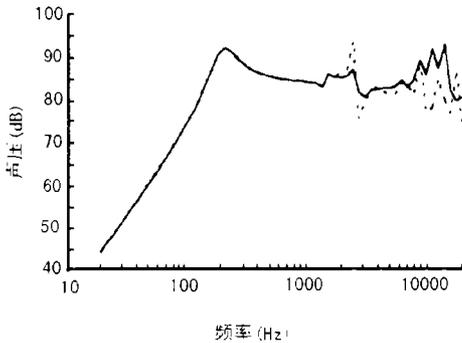


图3 杨氏模量分布对频响的影响

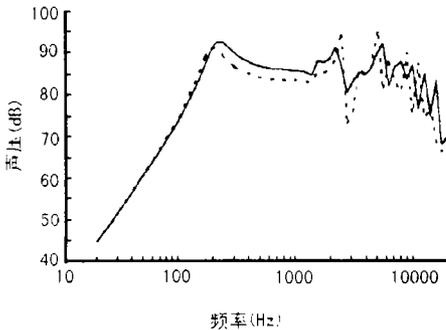


图4 厚度分布对频响的影响

由上面的讨论得知, 弯曲振动最早在振膜外缘产生. 而且我们已经证明, 弯曲谐振频率只与外侧材料参数有关. 所以要提高分割频率的出现频率, 展宽频带, 需要外部的杨氏模量要相应地大. 并且由于外部刚性较大, 弯曲振动幅度得到抑制, 使频响变得平坦. 图3的

计算结果证明了这点. 虚线为杨氏模量从内缘到外缘由 $4.88 \cdot 10^9 \text{N/m}$ 线性递减至 4.88^9N/m , 实线为杨氏模量从内缘到外缘由 4.88^9N/m 线性递增至 4.88^{10}N/m 的轴向频响.

(2) 振膜厚度沿母线的分布

理论上, 振膜的厚度要小, 这样灵敏度较高, 而且还有助于抑制弯曲振动 [7]. 但厚度太小, 则纸盆的刚度也小, 非线性振动加剧. 太厚则灵敏度下降. 图4计算了当厚度从内缘到外缘由 0.234mm 至 0.334mm 线性递增变化 (虚线) 及由 0.334mm 至 0.234mm 线性递减变化 (实线) 的轴向频响. 结果显示, 后一种情况更为有利. 即要使中频谷点减小, 改善高频的重放, 纸盆的厚度需要从外缘到锥顶逐渐加厚.

(3) 直母线扬声器的半顶角

为提高纸盆的刚性, 直母线扬声器通常作成锥形 [9]. 如图5的计算结果表明, 锥形扬声器的半顶角越小, 则其刚性越大, 分割频率出现的越晚, 频带越宽. 但半顶角减小, 其前室效应也将增大, 而且指向性也将受到影响. 所以需统筹考虑.

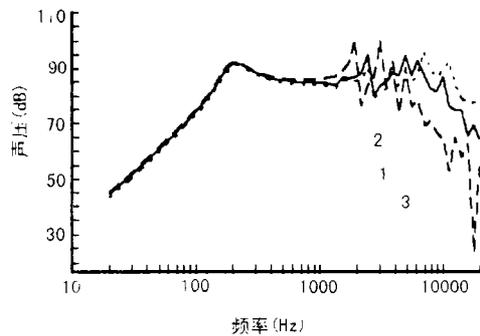


图5 半顶角 α 对频响的影响

1— $\alpha = 60^\circ$, 2— $\alpha = 70^\circ$, 3— $\alpha = 80^\circ$

(4) 振膜母线形状的优化设计

扬声器振膜的形状 (几何参数) 对其电声特性也有相当大的影响. 就母线形状而言, 除了上述直母线型外, 还有上凸形、下凹形 (通常为二次曲线) 等. 上凸形为最常见的母线形状. 这种形状使得振膜与音圈、折环衔接得更平稳, 减少交界处声波的反射, 而且顶部强度

较大, 但外缘处由于半顶角大强度较弱. 目前很少使用的下凹形的振膜, 其外缘强度大但却使整体强度变弱. 图 6 是计算得到各自的频响曲线. 由图可见, 上凸形的频响较宽但中频谷深, 而下凹形的频宽却较窄, 而且中频谷后第一个谐振点处声压有一个大的峰值, 此后声压迅速下降.

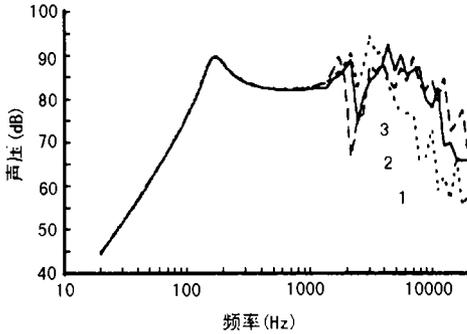


图 6 三种不同形状母线扬声器的频响
1—上凸形, 2—直线形, 3—下凹形

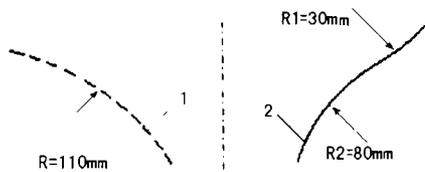


图 7 — 5in 扬声器改造前后的母线形状

1—改造前, 上凸形, 2—改造后, 内凸外凹形

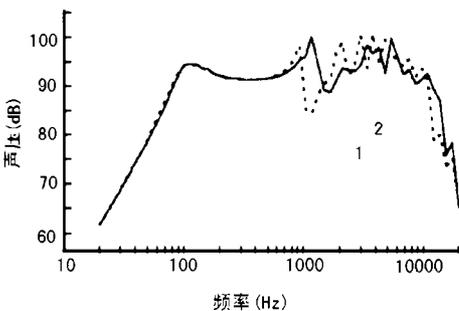


图 8 — 5in 扬声器改造前后频响比较

1—改造前, 上凸形, 2—改造后, 内凸外凹形

我们希望扬声器的频响较宽且起伏小 (尤其是中频谷点), 可设想如图 7 的母线形状. 其特点是内部曲线为上凸形, 外部曲线为内凹

形. 这样的形状使顶部和基部的强度均得到增强, 且前室效应比凹形的小, 可以预期达到较好的频响. 图 8 是一只 5 in 的扬声器原来的频响与按图 7 母线计算的频响比较. 可以看到其中频谷得到提升, 而频响也有所拓宽.

利用振膜形状的改变来改善辐射特性, 是扬声器优化设计的一个重要内容, 它不需要改变材料物理特性, 好处是显而易见的.

5 结语

扬声器频响是其电声特性的主要指标, 用经验方法通常难以控制. 利用扬声器 CAD 软件, 可以很方便地精确预测其频响. 而且只要改变输入参数, 便可得到其变化对性能的影响. 这为该技术在电声领域的应用提供了广阔的前景.

自从扬声器 CAD 理论确立以来, 人们一直在力图利用它改善扬声器的电声性能, 但除了 G.P.Geaves 利用加权随机搜寻法 (Weighted random search method) 得到的一个低通机械滤波扬声器^[10], 未见有其它有价值的结论发表. 本文所述及的几种改善措施, 旨在对扬声器的研制和生产提供指导, 同时也为扬声器 CAD 技术在该领域的应用建立基础.

参 考 文 献

- 冯肇华. 有限单元法基础. 吉林人民出版社, 1984.
- Kiyooki Suzuki, Isami Nomoto. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1982, Vol.30: 98-106.
- Shepherd I C, Alfredson R J. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1985, vol.33: 322-329.
- Kaizer Arie J M, Leeuwstein A D. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1988, Vol 36: 539-551.
- Henwood D J. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1993, Vol 41: 485-496.
- 孙广荣等. 电声技术, 1983 年第 5 期.
- Shindo T, Osamu Yashima, Suzuki H. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1980, Vol 28: 490-499.
- 弗兰克特, 赵志诚等译. 扬声器锥体振动与声辐射. 科学出版社, 1988.
- 山本武夫, 王以真等译. 扬声器系统 (上). 国防工业出版社, 1984.
- Geaves G P. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1996, Vol.44: 107-117.