

# 四阶单开口超重低音扬声器系统研究

沈 勇 薛 松

(南京大学声学研究所 近代声学国家重点实验室 南京·210093)

本文给出四阶单开口超重低音扬声器系统的声压频率响应函数和阻抗函数的计算公式。分析了声压频响曲线与阻抗曲线的对应关系。理论计算与实测结果吻合很好。

## Study on fourth-order subwoofer system with single vent

SHEN Yong, XUE Song

(Institute of Acoustics of Nanjing University, The Modern Acoustics State Key Laboratory · 210093)

Formulas which can calculate the frequency-dependent pressure response function and impedance function of fourth-order subwoofer system with a vent are derived. The relationship between the pressure response curve and the impedance curve is analysed. Theoretical and experimental results are in agreement.

### 1 引 言

四阶单开口超重低音扬声器系统早在1954年就由Lang提出,但在较长时间内一直未被推广使用。近年3D系统的兴起,家庭影院走红,尤其是Dolby AC-3技术的推广使用,使超重低音扬声器系统日益普及。1993年11月,美国高级电视顾问委员会全会正式批准在大联盟HDTV制式中采用Dolby AC-3,1994年美国开始在有线电视和卫星直播系统方面推广使用AC-3。据报道,即将全面推出的DVD将把Dolby AC-3作为关键特性。种种迹象表明,使用超重低音正成为一种潮流。本文讨论的系统结构如图1。

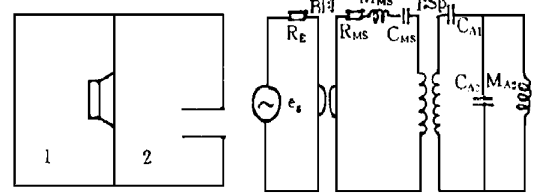


图 1

图 2

本文仅讨论音箱各种损耗可以忽略的情

况(注:Dolby AC-3提供5.1个声道,所谓5.1,即5个独立声道和1个非独立声道,此非独立声道就是超重低音声道)

### 2 基本原理

#### 2.1 声压频率响应

四阶单开口超重低音扬声器系统实际上是一种声学带通滤波器,全部声能从开口向声场辐射,该系统的电力-声类比线路如图2。

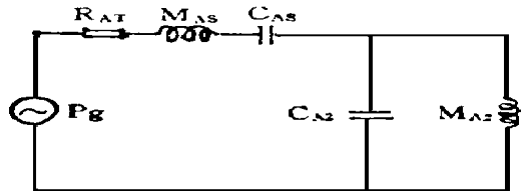


图 3

图2中符号意义是: $e_s$  信号源的电动势,  $R_E$  音圈的直流电阻,  $B$  气隙中的磁感应密度,  $l$  音圈导线的长度,  $R_{MS}$  支撑系统的力阻,  $M_{MS}$  振动系统的等效质量,  $C_{MS}$  支撑系统的等

效力顺,  $S_D$  振动系统的有效辐射面积,  $C_{A1}$  腔体 1 的声顺,  $C_{A2}$  腔体 2 的声顺,  $M_{A2}$  开口的声质量。图 2 可简化为如图 3 的等效声学线路。

图中  $P_g = e_g B l / R_E S_D$ ,  $R_{AT} = B^2 l^2 / R_E S_D^2 + R_{MS} / S_D^2$ ,  $M_{AS} = M_{MS} / S_D^2$ ,  $C_{AS} = C_{MS} C_{A1} S_D^2 / (C_{MS} S_D^2 + C_{A1})$ , 由图 3 可推导出声压频率响应函数为:

$$P(S) = \frac{kAS^2}{BS^4 + CS^3 + DS^2 + ES + 1}$$

式中:  $k = j/2r$ ,  $S = j\omega$ ,  $A = C_{AS} P_g$ ,  $B = T_s^2 T^2$ ,  $C = T_s^2 T^2 / Q_T$ ,  $D = T_s^2 + T_{2s}^2 + T_s^2$ ,  $E = T_s / Q_T$ ,  $Q_T = T_s / C_{AS} R_{AT}$ ,  $T_s^2 = C_{AS} M_{AS}$ ,  $T_{2s}^2 = C_{A2} M_{A2}$ ,  $T_{2s}^2 = C_{AS} M_{A2}$ , 空气密度,  $r$  辐射源到声场中一点的距离。

## 2.2 阻抗特性

图 2 可转化为如图 4 的电学类比线路由图 4 可推导出阻抗函数

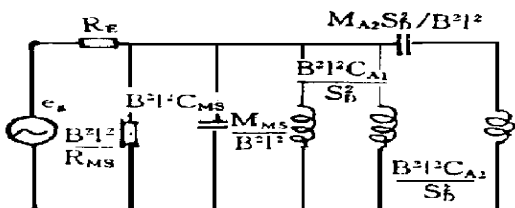


图 4

$$Z_E(S) = R_E \left( 1 + \frac{1}{Q_{es}} \frac{F(S)}{G(S)} \right)$$

式中  $F(S) = S^3 T_s T_{2s}^2 + S T_s$   
 $G(S) = S^4 T_s^2 T_{2s}^2 + S^3 T_s T_{2s}^2 / Q_{ms} + S^2 [T_s^2 + T_{2s}^2 (1 + \dots)] + S T_s / Q_{ms} + 1$   
 $= C_{AS} / C_{A2}$ ,  $Q_{es} = T_s R_E S_D^2 / B^2 l^2 C_{AS}$ ,  $Q_{ms} = T_s S_D^2 / R_{MS} C_{AS}$ 。

2.3 声压频响曲线和阻抗曲线的对应关系  
 下面分析 3 种典型的情况:

设  $f_B$  为声压频率响应的中心频率,  $f_L$  为声压频率响应的下限截止频率 (-3dB),  $f_H$  为声压频率响应的上限截止频率 (-3dB),  $f_0$  为阻抗曲线上双峰中间谷点对应的频率,  $f_1$  为阻抗曲线上峰对应的较低的频率,  $f_2$  为阻

抗曲线上峰对应的较高的频率。

在声压频率响应为 Butterworth 响应时, 有如下对应关系 (参见图 5~6):

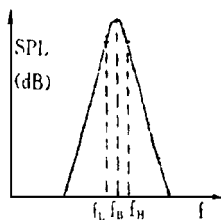


图 5

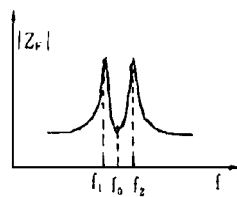


图 6

$$f_B = f_0, f_L = f_1, f_H = f_2, f_B^2 = f_L f_H$$

当声压频率响应有波纹时, 设  $f_{PL}$  为频响上峰对应的较低的频率,  $f_{PH}$  为频响上峰对应的较高的频率, 有如下对应关系 (参见图 7~8):  $f_B = f_0$ ,  $f_L < f_1 < f_{PL}$ ,  $f_{PH} < f_2 < f_H$ 。

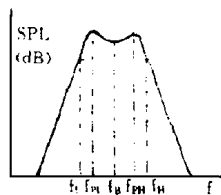


图 7

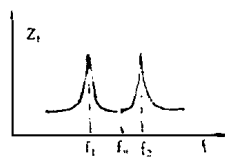


图 8

当声压频率响应出现单峰时, 有如下对应关系 (参图 9~10):

$$f_B = f_0, f_L > f_1, f_H < f_2$$

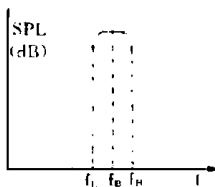


图 9

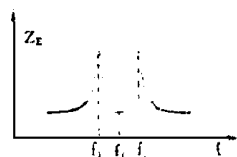


图 10

## 3 理论计算与实验验证

我们设计了两种较为实用的典型的超重低音扬声器系统, 在设计过程中, 我们注意到扬声器的参数在很大程度上决定了设计的成败。扬声器指标应予严格把关。若有条件, 可针对设计要求定制扬声器。两个腔体的容积

和开口的直径与长度可根据扬声器参数利用计算机进行设计。原则上应使两个腔的谐振频率相同。理论计算和实验验证结果如下：

### 3.1 声压频率响应为 Butterworth 响应

系统各参数如下：

扬声器参数： $f_{0s} = 80\text{Hz}$ ,  $Q_{TS} = 0.38$ ,  $V_{eq} = 3.5\text{L}$ . 箱体参数： $V_1 = 1.10\text{L}$ ,  $V_2 = 1.00\text{L}$ ,  $M_{A2} = 125\text{kg/m}^4$

计算声压频响曲线和阻抗曲线形状同图 5~6, 计算各参数如下： $f_B = 166\text{Hz}$ ,  $f_L = 107\text{Hz}$ ,  $f_H = 258\text{Hz}$ ,  $f_0 = 166\text{Hz}$ ,  $f_1 = 107\text{Hz}$ ,  $f_2 = 258\text{Hz}$ .

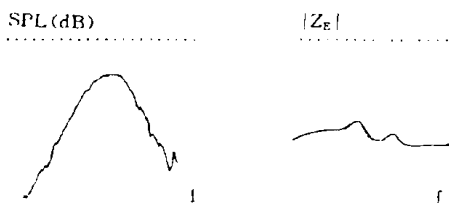


图 11

图 12

在南京大学声学研究所消声室, 使用全套 B&K 仪器进行测量。实测声压频率响应曲线和阻抗曲线如图 11~12。

实测各参数如下： $f_B = 172\text{Hz}$ ,  $f_L = 115\text{Hz}$ ,  $f_H = 266\text{Hz}$ ,  $f_0 = 175\text{Hz}$ ,  $f_1 = 112\text{Hz}$ ,  $f_2 = 264\text{Hz}$  计算结果与实测结果吻合很好。

### 3.2 声压频响曲线有波纹

系统各参数如下：

扬声器参数： $f_{0s} = 78\text{Hz}$ ,  $Q_{TS} = 0.54$ ,  $V_{eq} = 3.22\text{L}$ . 箱体参数： $V_1 = 1.01\text{L}$ ,  $V_2 = 1.12\text{L}$ ,  $M_{A2} = 125\text{kg/m}^4$ .

计算声压频响曲线和阻抗曲线形状同图

7~8. 计算各参数如下： $f_B = 159.5\text{Hz}$ ,  $f_L = 99\text{Hz}$ ,  $f_H = 259\text{Hz}$ ,  $f_{PL} = 124\text{Hz}$ ,  $f_{PH} = 207\text{Hz}$ ,  $f_0 = 159.5\text{Hz}$ ,  $f_1 = 107\text{Hz}$ ,  $f_2 = 239\text{Hz}$  实测声压频响曲线和阻抗曲线如图 13~14。

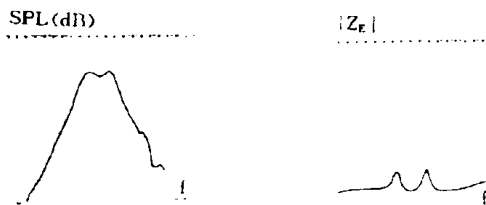


图 13

图 14

实测各参数如下： $f_B = 157\text{Hz}$ ,  $f_L = 96\text{Hz}$ ,  $f_H = 266\text{Hz}$ ,  $f_{PL} = 121\text{Hz}$ ,  $f_{PH} = 209\text{Hz}$ ,  $f_0 = 156\text{Hz}$ ,  $f_1 = 111\text{Hz}$ ,  $f_2 = 233\text{Hz}$  计算结果与实测结果吻合很好。

## 4 结 论

- (1) 本文给出了声压频率响应函数的计算公式；
- (2) 本文给出了阻抗函数的计算公式；
- (3) 分析了声压频率响应曲线与阻抗曲线在各种情况下的对应关系；
- (4) 对两种典型情况进行了验证, 理论计算与实测结果吻合很好。

### 参考文献

- 1 E. R. Geddes. An introduction to band-pass loudspeaker systems. J. A. E. S., 1989; 37(5): 308~342
- 2 曹水轩, 沙家正. 扬声器及其系统, 江苏科学技术出版社, 1991; 60~78.

(上接 72 页)

但从平均吸声系数  $\alpha$  和降噪系数来看, 空腔的变化影响不大。从总的吸声效果来看, 空腔为 230mm 左右最佳。

(3) 利用材料离刚性壁  $1/4$  估计吸声峰值频率简单方便, 估计值与实测值相符。

### 参考文献

- 1 中国建筑科学研究院建筑物理研究所, 建筑声学设计手册, 142~143, 中国建筑工业出版社, 1987年7月。
- 2 K. B. Ginn, Architectural Acoustics, P54, B&K Publications, 1978.