

24-28

● 张庆双

TN/912.2

音箱的设计、计算与制作(上)

音箱是音响和家庭影院系统中的一个重要组成部分,其性能的好坏直接影响着整套器材的播放质量。每个音响爱好者都希望拥有一套高品质的音箱系统,但市售的高品质成品音箱却价格昂贵。对于经济条件并不宽裕而又具备一定电子技术知识和动手能力的音响爱好者来说,自己制作音箱还是比较合算的。本文介绍音箱的结构组成、设计与计算方法,供大家制作音箱时参考。

一、音箱的结构组成

音箱主要由扬声器、箱体和分频器等组成。

1. 扬声器

扬声器(俗称喇叭)的作用是将功率放大器输出的电信号转换成声音信号再辐射出去。

(1) 扬声器的分类

扬声器有多种分类方式:按其换能方式可分为电动式、电磁式、压电式、数字式等多种;按振膜结构可分为单纸盆、复合纸盆、复合号筒、同轴等多种;按振膜形状可分为锥盆式、球顶式、平板式、带式等多种;按重放频带可分为高频、中频、低频和全频带扬声器;按磁路形式可分为外磁式、内磁式、双磁路式和屏蔽式等多种;按磁路性质可分为铁氧体磁体、钕铁硼磁体、铝镍钴磁体扬声器;按振膜材料可分为纸质和非纸质

扬声器……

(2) 电动式扬声器

电动式扬声器是家用音响系统中应用最多的一种,它是利用音圈与恒定磁场之间的相互作用力使振膜振动而发声的。电动式的低音扬声器以锥盆式居多,中音扬声器多为锥盆式或球顶式,高音扬声器则以球顶式和带式、号筒式为常用。

锥盆式扬声器的结构简单,能量转换效率较高。它使用的振膜材料以纸浆材料为主,或掺入羊毛、蚕丝、碳纤维等材料(或涂胶),以增加其刚性、内阻尼及防水等性能。新一代电动式锥盆扬声器使用了非纸质振膜材料,如聚丙烯、云母碳化聚丙烯、碳纤维编织、防弹布、硬质铝箔、CD 波纹、玻璃纤维等复合材料,性能进一步提高。

球顶式扬声器有软球顶和硬球顶之分。软球顶扬声器的振膜采用蚕丝、丝绸、浸渍酚醛树脂的棉布、化纤及复合材料,其特点是

重放音质柔美;硬球顶扬声器的振膜采用铝合金、钛合金及铍合金等材料,其特点是重放音质清脆。

号筒式扬声器的辐射方式与锥盆扬声器不同,它是在振膜振动后,声音经过号筒再扩散出去。其特点是电声转换及辐射效率高、距离远、失真小,但重放频带及指向性较窄。

带式扬声器的音圈直接制作在整个振膜(铝合金或聚酰亚胺薄膜等)上,音圈与振膜间直接耦合。音圈产生的交变磁场与恒磁场相互作用,使带式振膜振动而辐射出声波。其特点是响应速度快、失真小,重放音质细腻、层次感好。

2. 箱体

箱体用来消除扬声器单元的声短路、抑制其声共振,拓宽其频响范围,减小失真。

音箱的箱体外形结构有书架式和落地式之分,还有立式和卧式之分。箱体内部结构又有密闭

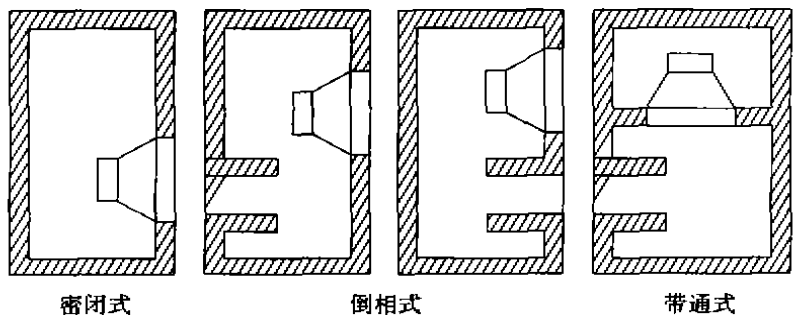


图1 密闭式、倒相式、带通式音箱



式、倒相式、带通式、空纸盆式、迷宫式、双腔双开口式、1/4 波长加载式、对称驱动式和号筒式等多种形式,使用最多的是密闭式、倒相式和带通式,如图 1 所示。

落地音箱属大型音箱,箱体高度在 750mm 以上;书架音箱的箱体高度在 750mm 以下,450 ~ 750mm 的为中型书架音箱,450mm 以下的为小型书架音箱。

家庭影院系统的前置主音箱为立式音箱,有使用书架式,也有使用落地式的,这要根据视听室面积大小、放大器功率大小及个人品味而定。通常,对于视听室在 15m² 以下的,宜选用中型书架音箱;低于 10m² 的应选用小型书架音箱;大于 15m² 的房间,可选用落地式音箱(当然,也可以用中型书架音箱再设置超重低音音箱)。中置音箱多数为卧式设计,可以置于电视机之上或卧放于电视柜上。若使用两只中置音箱,也可选用立式音箱,放置于电视机左、右各一只。环绕音箱一般可选择小型书架式音箱,若是杜比 AC-3 环绕声系统,也可以使用落地式音箱或中型书架音箱。超重低音音箱有立式和卧式两种,体积与中型书架式音箱差不多。

前置主音箱、中置音箱和环绕音箱均以倒相式设计居多,其次是密闭式和 1/4 波长加载式、迷宫式等。超重低音音箱以带通式和双腔双开口式居多,其次是倒相式、密闭式和克尔顿式等。

3. 分频器

分频器有功率分频器和电子

分频器之分,主要作用均是频带分割、幅频特性与相频特性校正、阻抗补偿与衰减等作用。

功率分频器也称无源式后级分频器,是在功率放大器之后进行分频的。它主要由电感(L)、电阻(R)、电容(C)等无源元件组成滤波器网络,把各频段的音频信号分别送到相应频段的扬声器中去重放。其特点是制作成本低,结构简单,适合业余制作,但插入损耗大、效率低、瞬态特性较差。

电子分频器也称有源式前级分频器,是由各种阻容元件与晶体管或集成电路等有源器件组成,它是置于前置放大器和功率放大器信号线路中的一种模拟电子滤波器,能把前置放大器输出的音频信号分成不同频段后,再送入功率放大器进行放大处理。其特点是各频段频谱平衡、相互干扰小、输出动态范围大,本身有一定的放大能力,插入损耗较小。但因电路复杂一些,业余制作的难度较功率分频器要大。

分频器按分频频段可分为二分频、三分频和四分频。二分频是将音频信号的整个频带划分成高频和低频两个频段;三分频是将整个频带划分成高频、中频和低频三个频段;四分频将三分频多划分出一个超低频段。业余条件下制作音箱,以二分频和三分频为主。

分频点与分频斜率是直接影响分频器的分频频率(交叉频率)。

分频点是指两个相邻扬声器

(如二分频中的高音与低音,三分频中的高音与中音、中音与低音)的频响曲线在某一频率上的相交点,通常为两个扬声器中功率输出的一半处(即 -3dB 点)的频率,要根据音箱和每个扬声器的频率特性和失真度等参数决定。通常二分频分频器的分频点取 1kHz ~ 3kHz 之间,三分频取 250Hz ~ 1kHz 和 5kHz 两个分频点。

分频斜率(也称滤波器的衰减斜率)用来反映分频点以下频响曲线的下降斜率,用分贝/倍频程(dB/oct)来表示。它有一阶(6dB/oct)、二阶(12dB/oct)、三阶(18dB/oct)和四阶(24dB/oct)之分,阶数越高,分频点后的频率曲线斜率就越大。较常用的是二阶分频斜率。高阶分频器可增加斜率但相移较大,低阶分频器能产生较平缓的斜率和很好的瞬态响应,但幅频特性较差。决定高、低音滤波的阶数主要应考虑到扬声器本身在分频点处相位的良好衔接问题。

二、箱体的设计与计算方法

音箱的箱体外形有多种形式,可以根据自己的实际需要去选择书架式或落地式、卧式、壁挂式……

下面着重介绍密闭式、倒相式和带通式音箱的箱体设计与计算方法,供大家设计音箱时参考。

1. 箱体设计所需的技术指标

音箱的箱体设计涉及到扬声器单元的谐振频率 f_0 (或 f_s)、等效顺性 (C_{mr})、总品质因数 Q_{ts} (或 Q_{θ})、等效容积 V_{eq} (或 V_{as})、等效振



表1 音箱尺寸的优选比例

深 (D)	宽 (W)	高 (H)	深 (D)	宽 (W)	高 (H)	深 (D)	宽 (W)	高 (H)	深 (D)	宽 (W)	高 (H)	深 (D)	宽 (W)	高 (H)
1.0	1.1	1.3	1.0	1.3	3.4	1.0	1.5	2.2	1.0	1.7	2.3	1.0	2.2	2.7
1.0	1.1	1.4	1.0	1.3	3.5	1.0	1.5	2.3	1.0	1.7	2.4	1.0	2.2	2.8
1.0	1.1	1.5	1.0	1.3	3.6	1.0	1.5	2.4	1.0	1.7	2.5	1.0	2.2	2.9
1.0	1.1	1.6	1.0	1.3	3.7	1.0	1.5	3.1	1.0	1.7	2.6	1.0	2.3	2.9
1.0	1.2	1.3	1.0	1.3	3.8	1.0	1.5	3.2	1.0	1.8	2.3	1.0	2.3	3.1
1.0	1.2	1.4	1.0	1.3	3.9	1.0	1.5	3.3	1.0	1.8	2.4	1.0	2.3	3.2
1.0	1.2	1.5	1.0	1.4	1.5	1.0	1.6	1.8	1.0	1.8	2.5	1.0	2.3	3.4
1.0	1.2	1.6	1.0	1.4	1.8	1.0	1.6	1.9	1.0	1.8	2.6	1.0	2.3	3.5
1.0	1.2	2.6	1.0	1.4	1.9	1.0	1.6	2.1	1.0	1.8	2.7	1.0	2.6	3.7
1.0	1.2	2.7	1.0	1.4	2.1	1.0	1.6	2.2	1.0	1.8	2.8	1.0	2.6	3.8
1.0	1.2	2.8	1.0	1.4	2.2	1.0	1.6	2.3	1.0	1.9	2.4	1.0	2.6	3.9
1.0	1.2	2.9	1.0	1.4	2.3	1.0	1.6	2.4	1.0	1.9	2.5	1.0	2.7	3.3
1.0	1.3	1.4	1.0	1.4	2.6	1.0	1.6	2.5	1.0	1.9	2.7	1.0	2.7	3.4
1.0	1.3	1.6	1.0	1.4	3.1	1.0	1.6	2.6	1.0	1.9	2.8	1.0	2.7	3.5
1.0	1.3	1.7	1.0	1.4	3.2	1.0	1.6	2.7	1.0	1.9	2.9	1.0	2.7	3.6
1.0	1.3	1.8	1.0	1.4	3.3	1.0	1.6	2.9	1.0	2.1	2.4	1.0	2.7	3.7
1.0	1.3	1.9	1.0	1.4	3.4	1.0	1.6	3.1	1.0	2.1	2.5	1.0	2.7	3.8
1.0	1.3	2.1	1.0	1.4	3.5	1.0	1.6	3.5	1.0	2.1	2.6	1.0	2.7	3.9
1.0	1.3	2.2	1.0	1.4	3.6	1.0	1.6	3.6	1.0	2.1	2.7	1.0	1.3	3.3
1.0	1.3	2.4	1.0	1.4	3.7	1.0	1.6	3.7	1.0	2.1	2.8	1.0	1.5	2.1
1.0	1.3	2.9	1.0	1.4	3.8	1.0	1.6	3.8	1.0	2.1	2.9	1.0	1.7	2.2
1.0	1.3	3.1	1.0	1.4	3.9	1.0	1.6	3.9	1.0	2.2	2.5	1.0	2.2	2.6

动半径 S_d (或 a)、等效振动质量 m_0 、线性范围 X_{max} 等指标。

谐振频率是指扬声器所能重放的最低频率,它是决定扬声器低频特性的重要参数。低音扬声器的谐振频率值通常是与其口径大小成反比。

总品质因数主要反映扬声器振动系统损耗的大小。该值与扬声器的等效质量 m_0 的平方根成

反比,与扬声器顺性的平方根成正比。

等效容积是指扬声器振动系统顺性的等效空气容积,与扬声器的等效顺性成正比,与有效振动半径的平方成反比。

等效顺性是指扬声器悬置系统的松紧度或其受力后位移的顺从性。

等效振动半径是指振膜的有

效面积,指从振膜中心到折环中间处的长度。

等效振动质量是扬声器振膜和音圈本身的质量与空气层的附加质量之和。

线性范围是指扬声器振膜的最大线性位移,该值与扬声器的口径大小和辐射效率成正比。

2. 密闭式音箱的箱体设计与计算方法

密闭式音箱的低频特性与低音扬声器单元的谐振频率 f_s 和总品质因数 Q_{ts} 有直接的影响,因此,要求低音单元的谐振频率低一些,总品质因数选择在 0.3~0.7 之间。

先求出音箱的谐振频率 f_{sc} ,一般可设定为低音单元谐振频率 f_s 的 1.2~2 倍,即:

$$f_{sc} = (1.2 \sim 2)f_s$$

计算出音箱与扬声器的声顺比 α :

$$\alpha = \left(\frac{f_{sc}}{f_s}\right)^2 - 1$$

计算出音箱的总品质因数 Q_{sc} :

$$Q_{sc} = \left(\frac{f_{sc}}{f_s}\right) \cdot Q_{ts}$$

计算出音箱的有效内容积(实际容积) V :

$$V = V_{sc}/\alpha$$

上式中: V_{sc} 为低音单元的等效容积。

确定箱体的各边尺寸和比例,可参考表 1。在计算箱体各边的实际尺寸时,应先根据箱体实际容积 V 来求出常数 N :

$$N = \sqrt[3]{1000V/(D \cdot W \cdot H)} (\text{cm})$$

上式中: D 、 W 、 H 为箱体深、宽、

表2 $Q_L = 7$ 时的应用参数表

Q_L	f_B/f_s	f_3/f_s	α	Q_L	f_B/f_s	f_3/f_s	α
0.20	1.92	2.50	7.62	0.49	0.84	0.73	0.49
0.21	1.82	2.35	6.69	0.50	0.80	0.71	0.46
0.22	1.74	2.24	6.03	0.51	0.79	0.70	0.43
0.23	1.69	2.16	5.60	0.52	0.77	0.68	0.41
0.24	1.62	2.05	4.99	0.53	0.76	0.67	0.38
0.25	1.54	1.93	4.41	0.54	0.74	0.65	0.36
0.26	1.49	1.85	4.04	0.55	0.73	0.64	0.34
0.27	1.44	1.77	3.68	0.56	0.72	0.63	0.33
0.28	1.39	1.69	3.33	0.57	0.71	0.61	0.31
0.30	1.31	1.57	2.84	0.46	0.87	0.80	0.61
0.31	1.26	1.49	2.53	0.47	0.85	0.77	0.56
0.32	1.24	1.45	2.38	0.48	0.83	0.75	0.52
0.33	1.19	1.36	2.09	0.59	0.69	0.59	0.29
0.34	1.17	1.32	1.95	0.60	0.68	0.58	0.27
0.35	1.14	1.28	1.81	0.61	0.67	0.58	0.26
0.36	1.12	1.23	1.68	0.62	0.66	0.57	0.25
0.37	1.07	1.14	1.42	0.63	0.65	0.56	0.24
0.38	1.05	1.09	1.30	0.64	0.65	0.56	0.23
0.39	1.02	1.05	1.18	0.65	0.64	0.55	0.22
0.40	1.00	1.00	1.06	0.66	0.64	0.55	0.21
0.41	0.98	0.96	0.96	0.67	0.63	0.54	0.21
0.42	0.96	0.92	0.87	0.68	0.62	0.54	0.20
0.43	0.93	0.88	0.79	0.69	0.62	0.53	0.20
0.44	0.91	0.86	0.73	0.70	0.61	0.53	0.19
0.45	0.89	0.83	0.67				

高,可以从优选比例表中选出。

计算箱体各边的实际尺寸:

高 $H' = NH(\text{cm})$

宽 $W' = NW(\text{cm})$

深 $D' = ND(\text{cm})$

再根据各边尺寸换算箱体容积 V :

$H' \times W' \times D'(\text{cm}^3) = V(\text{L})$

(1L = 1000cm³)

3. 倒相式音箱的箱体设计与计算方法

倒相式音箱较密闭式音箱增加了倒相管道,在设计上除应计算箱体的内容积外,还要算出倒相孔和倒相管的参数。在计算之前,还要确定音箱的声漏损耗(即在箱体谐振频率处漏气所产生的品质因数) Q_L 值,一般设定为 $Q_L = 7$ 。表2

是 $Q_L = 7$ 时的有关参数。其中, α 为音箱与低音扬声器的声顺比, Q_L 为扬声器的总品质因数, f_B 为倒相音箱(包括箱体和倒相管)的谐振频率, f_s 为扬声器的谐振频率, f_3 为音箱的截止频率(下限频率)。

根据低音扬声器的谐振频率 f_s 、等效容积 V_m 和总品质因数 Q_L 值从表中查出音箱与扬声器的声顺比 α 、音箱谐振频率 f_B 与扬声器谐振频率 f_s 的比值、音箱低频响应下降 3dB 时的截止频率 f_3 与扬声器谐振频率 f_s 的比值。

根据 α 值和 V_m 值计算出箱体的内容积 V :

$$V = V_m / \alpha$$

设定倒相管截面积 S 值(一般取与扬声器振膜等效振动半径相等或略小一点),并求出倒相管的长度 l :

$$l = \frac{C^2 S}{4\pi^2 f_B^2 V} - 0.82$$

上式中: C 为声速,约等于 344m/s。

计算出箱体的实际内容积 V_b :

箱体的实际内容积 V_b 是 V 与扬声器、倒相管、支撑木、吸音材料等所占容积的总和。

最后算出箱体各边的实际尺寸。

4. 密闭式超重低音音箱的箱体设计与计算方法

计算箱体容积 V_b :

$$V_b = V_m / 3$$

上式中: V_m 为扬声器的等效容积。



计算音箱的谐振频率 f_{0c} :

$$f_{0c} = 2f_0$$

上式中: f_0 为扬声器的谐振频率。

计算音箱的总品质因数 Q_{α} :

$$Q_{\alpha} = 2Q_0$$

上式中: Q_0 是扬声器的总品质因数。

计算重放下限频率(即频响下降 3dB 时的截止频率) f_3 :

$$f_3 \leq f_{0c}$$

当 $Q_{\alpha} \leq 0.7$ 时, $f_3 = f_{0c}$;

当 $Q_{\alpha} > 0.7$ 时, $f_3 < f_{0c}$ 。

计算箱体的净容积 V :

$$V = V_{0c}/4$$

5. 倒相式超重低音音箱的箱体设计与计算方法

计算音箱的重放下限频率 f_3 :

$$f_3 = f_0$$

上式中: f_0 为扬声器的谐振频率。

计算倒相音箱的谐振频率 f_B :

$$f_B = f_3$$

计算箱体净容积 V_B :

$$V_B = V_{0c}$$

上式中: V_{0c} 为扬声器的等效容积。

计算箱体的实际容积 V :

$$V = V_B + (10\% \sim 20\%) V_B$$

计算倒相管的截面积 S :

$$S = (20\% \sim 40\%) a$$

或 $S \geq 0.8 f_B \cdot a \cdot X_{max}$

上式中: a 为扬声器振膜的有效面积;

X_{max} 是扬声器为线性范围。

计算倒相管的长度 l :

$$l = \frac{30000 S}{f_B^2 V_B} - 0.825$$

6. 带通式超重低音音箱的箱体设计与计算方法

扬声器单元内置双腔单开口式带通音箱, 实际上是在普通密闭音箱的基础上增加了一个带通滤波器, 以实现增强和扩展低频的作用。在设计时, 要使用到 k 、 f_L 、 f_H 和 Q_B 几个参数。其中:

k 为通带纹波系数, 表示音箱频响特性曲线上两个 -3dB 频率点声压波动的大小, 通常取 $k = 0.6$ (曲线有 0.35dB 的纹波)。

f_L 为低频下限频率, 是 $f_0/(Q_{\alpha} \cdot f_L)$ 系数后所得。

f_H 为高频端频率, 是 $f_0/(Q_{\alpha} \cdot f_H)$ 系数后所得。

Q_B 为密闭室品质因数, 与音箱的灵敏度成正比, 与通频带宽成反比。

计算开口腔的箱体内容积 V_1 :

$$V_1 = (2k \cdot Q_B)^2 V_{0c}$$

上式中: V_{0c} 是扬声器的等效

容积。

计算密闭腔的箱体内容积

V_2 :

$$V_2 = \frac{V_{0c}}{(\frac{Q_B}{Q_{0c}})^2 - 1}$$

计算时, 应先求出 f_L 系数, 再从表 3 中查出相应的 Q_B 值。

$$f_L \text{ 系数} = \frac{f_L}{f_0/Q_{0c}}$$

计算箱体总容积 V_{Σ} :

$$V_{\Sigma} = V_1 + V_2$$

计算开口腔的谐振频率 f_B :

$$f_B = Q_B \cdot (\frac{f_0}{Q_{0c}})$$

计算倒相管的截面积 S_v :

$$S_v = \pi R^2 = \pi (D/2)^2$$

上式中: D 为倒相管直径, 可设定为扬声器锥盆有效辐射面积的 40% ~ 60%。

R 为倒相管半径。

计算倒相管的长度 l_v :

$$l_v = \frac{30000 S_v}{f_B^2 \cdot V_1} = \frac{9.425 \times 10^4 R^2}{f_B^2 \cdot V_1} - 1.595 R$$

□

表 3 $k=0.6$ (曲线有 0.35dB 的纹波) 时的应用参数表

Q_B	f_L 系数	f_H 系数	灵敏度	Q_B	f_L 系数	f_H 系数	灵敏度
0.53	0.23	1.19	-8dB	0.88	0.53	1.48	1dB
0.56	0.26	1.21	-7dB	0.94	0.57	1.53	2dB
0.59	0.28	1.24	-6dB	0.99	0.62	1.58	3dB
0.62	0.31	1.26	-5dB	1.05	0.67	1.63	4dB
0.66	0.34	1.29	-4dB	1.11	0.73	1.69	5dB
0.70	0.37	1.33	-3dB	1.18	0.79	1.75	6dB
0.74	0.41	1.36	-2dB	1.25	0.86	1.81	7dB
0.79	0.44	1.40	-1dB	1.32	0.93	1.88	8dB
0.83	0.48	1.44	0dB				