

扬声器设计与制作

俞锦元 编著

廣東省出版集團
廣東科技出版社

· 廣州 ·

序言 1

我和俞锦元先生为国光电器股份有限公司共事35年了，俞先生一直专心于技术工作。他是一位很注重基础研究工作的工程师。如何把理论用于指导实践？如何把实践中的经验总结升华为理论？扬声器和音箱让他在国光摸索了40多年。

扬声器的设计和生产工艺控制是一门理论很广泛（包括了声学、电工学、电子学、机械、化工、造纸、力学等）、很深奥（如声场的计算），又似乎很简单（5分钟就明白扬声器的发音原理，花10万元用一个月时间就可以开办一家扬声器制造厂）的学科，因而有人认为这是一门没有研究价值的课题；也有人认为虽然很深奥，但实际上要解决一个很小的问题也很难很难，可能花一辈子时间也找不到一个像小口径纸盆扬声器的 f_0 受控解决方案，不值得浪费青春……但俞先生却一辈子扎进去了，从助理技术员到总工程师，严谨的学者作风让他无数个晚上在各国资料库中寻找论点，认真的工作作风让他长期在生产线上与技工一同寻找解决难题的答案。他之所以能成为国内为数不多的扬声器专家，就是因为他有这种几十年不变的精神与作风。

扬声器的专著不多，泛泛而谈的不敢写，而要写得好又很难。这是一本好书，里面的论点、公式、建议都曾在我公司应用过，对于扬声器的理论研究、产品设计、生产和工艺管理人员确实是不可多得的好工具。

国光电器股份有限公司董事长 周海昌

2006年4月3日

序言 2

自本人进入国光电器股份有限公司从事电声设计工作的第一天起就师从俞锦元先生。俞先生对年轻一辈在技术上总是“知无不言，言无不尽”尽心教导的。此书是他多年来呕心沥血的工作经验总结，其简单实用，通俗易懂。相信广大扬声器设计人士、业余爱好者一定可以从中获益。

国光电器股份有限公司总经理 何伟成

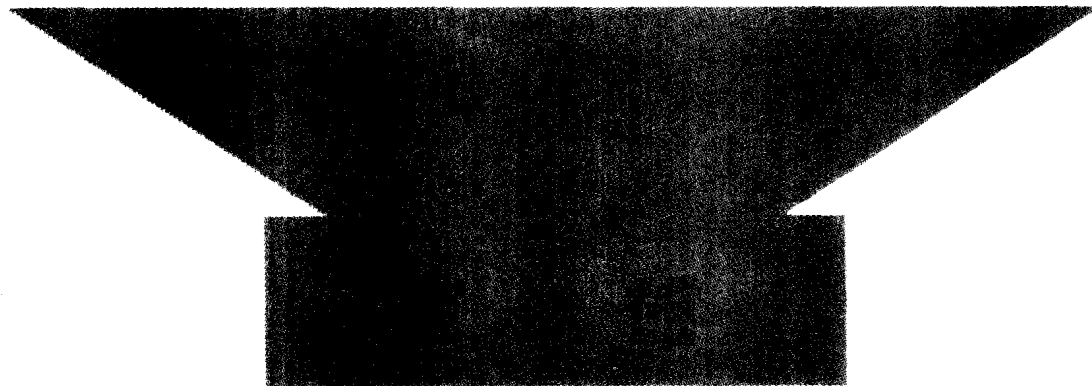
2006年4月4日

前 言

今天，扬声器已深深地进入了我们日常工作和生活当中。例如在电话机、手机、电视机、音响、手提电脑、多媒体电脑系统、家庭影院内都能见到扬声器的“芳踪”。而且，这些产品大都产自我国。在中国，扬声器业可以说是朝阳工业。

自从1874年德国人西门子（Werner von Siemens）在世界上首先获得电动式扬声器专利起，至今，扬声器发展已有130多年了。当然，在总体完善方面，我们会永远怀念1925年左右在美国通用电器公司工作的C·W·赖斯（Rice）和E·W·科洛（Kollogg）。而1953年美国E·维尔切（Villchur）制成了世界第一个高顺性扬声器（涂橡胶布边折环）也应视为扬声器发展史上的重大贡献。进入上世纪60年代，澳大利亚A.N.Thiele首次叙述了具体的现代开口式扬声器箱的分析方法。他根据电等效电路定义开口箱，并且给出了把音箱等效于理想的高通滤波器达到平直低频响应的可能。Thiele是在1961年3月悉尼无线电和电子工程会议上首次发表他的论文的。遗憾的是，当时他的论点并没有被大多数人接受，直到1971年5月和6月由美国声频工程协会杂志IAES重新发表了这篇文章才引起了普遍重视。美国R.H.Small下了许多功夫增补了Thiele的研究。Small的成果体现在1973年由IAES杂志发表的4篇论文中。他的论文揭示出开口箱是一种四阶高通滤波器，而这种滤波器在数学上的可预计的变化是可以校正的。还提出了利用驱动器（扬声器单元）的电和力学（机械）参数来设计与这一特定驱动器相匹配的箱体的数学形式。这些特性数据就是现在大家都在使用的著名的Thiele-Small（T/S）参数。Thiele和Small的工作使密闭箱、开口箱设计起了革命性的变化。而且，可以认为，现在全世界几乎所有箱体设计都来源于他俩的研究成果。对音箱设计者来说，理解倒相箱或低音反射箱（bass reflex）和开口箱（vented loudspeakers）之间的区别是重要的。两者虽然表面上相似，但是，前者往往是只限于Thiele和Small工作开发前的设计。由于Thiele和Small文章中所叙述的数学问题非常复杂，没有一定数学基础的人很难理解，而美国Vance Dickason所著《The Loudspeaker Design Cookbook》一书依据T/S参数的深入浅出的设计方法则被选为本书的主要参考资料之一。1994年，广州地区音箱音质听音评比中，国光电器股份有限公司参赛的两款音质第一名的音箱就是用本书介绍的公式设计的。编著者音箱设计的其他众多实践也证明了这点。

在编著者从事扬声器设计、制作的40余年经历中，身边有一本既有理论又有实践的参考书，那就是俄罗斯Д.Х.ШИФМАН所著的《ГРОМКОГО ВОРИТЕЛИ》（扬



声器)。该书能不断地指导编著者的工作，真可谓良师益友。因此，长期以来，也萌想完成一本中国人自己的、对扬声器设计、制作长期有用的、理论与实践兼备的专门书籍。欣慰的是，在退休返聘的两年里，公司领导安排本人为公司电声技术人员上课。这正好是总结自己在扬声器战线上努力几十年心得体会的一个机会，故而完成了全书11章的编著。要说明的是，本书内容还采撷了作者及其同事部分工作心得及自上世纪80年代起至今在《电声技术》杂志上发表的扬声器文章中的精华（有些文章曾被《国外电子文摘》杂志转载），同时在编入本书时，有的设计资料还作了补充，如无源辐射器音箱的简化设计和带通音箱的简化设计等。这些文章题目和所发表刊物、日期等详见书末的主要参考文献。

感慨岁月之匆匆，回顾本书能完成的原因不得不起几十年成长之路。首先要感谢20世纪60年代上海无线电学校的郭梅初先生——我的俄语老师，欧昌林、张孝民先生——专业老师。再就是在南京大学进修时的沙家正、曹水轩、徐柏龄等老师。在此，还要感谢本人电声的入门指引人国光电器股份有限公司(GGEC)何国熹先生，以及源朗基、周海昌先生等公司领导，正是他们，安排本人长期从事技术工作，且在工作中给予了极大支持。感谢完成本书全部插图的技术部苏伟帆先生，感谢胡小玲女士在电脑打字方面对作者的悉心指导。衷心感谢技术部其他同事的历年支持、合作。

本书得以完成，还要感谢上海飞乐厂、南京电声厂、天津真美厂、北京797厂、电声行业协会、中国电子科技集团公司第三研究所、浙江天乐技术部门诸多电声界朋友几十年来相逢相知的支持帮忙。感谢南京大学声学研究所沈勇教授给我寄来W.Klippel的原文。值得一提的是，本书第7章很多内容是南京电声厂徐世和先生提供的，在此一并致谢。

祈望本书能为我国扬声器业做大、做强贡献一份微薄的力量。由于本人水平有限，本书错误之处希望读者不吝指正。

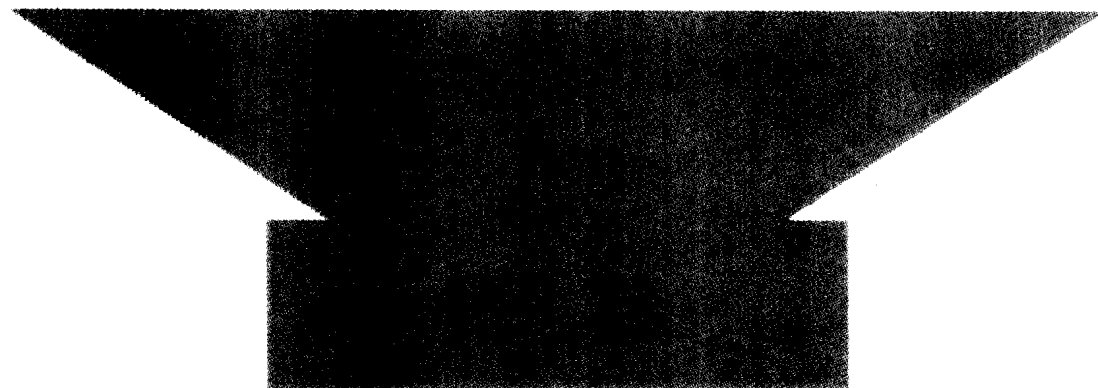
最后，谨将此书献给养育本人成长的父母亲，以及一贯支持我工作的家人和朋友！

编著者

2006年10月于广州

目 录

第 1 章 电动式纸盆扬声器的工作原理和主要特性	1
§ 1 工作原理和等效电路	1
§ 2 总阻抗	3
§ 3 扬声器的声压频响曲线(幅频响应)	5
§ 4 纸盆振动模式	7
§ 5 非线性失真	9
§ 6 扬声器的效率	11
§ 7 纸盆扬声器的指向性	12
第 2 章 薄型小口径锥盆扬声器设计与制作	15
§ 1 锥顶角或曲率半径与高频上限的关系	15
§ 2 用公式表示的高频截止频率和杨氏模量计算	16
§ 3 锥顶滤波器	17
§ 4 薄型小口径及微型扬声器可靠性提要	18
第 3 章 定芯支片的设计和应用	21
§ 1 定芯支片在扬声器中的作用	21
§ 2 定芯支片的特性要求	21
§ 3 定芯支片材料、特性和应用	23
§ 4 定芯支片顺性在扬声器振动系统顺性中的关系	24
§ 5 定芯支片设计	26
第 4 章 Thiele/Small (T/S) 参数测试方法、主要作用及计算公式	29
§ 1 T/S 参数的由来	29
§ 2 测试电路、测试步骤及计算举例	29
第 5 章 大功率低音扬声器设计 (一)	34
§ 1 音圈线径设计	34
§ 2 最大振幅与设计要点	35
§ 3 大功率时音圈热容量的计算	36
§ 4 大功率扬声器功率耗散问题 (散热问题)	38



§ 5 扬声器的热等效电路	40
第6章 大功率低音扬声器设计(二)	42
§ 1 磁路简易计算及大功率磁路设计要点	42
§ 2 磁流体简述	47
第7章 纸盆制作与设计	56
§ 1 纸盆材料及术语	56
§ 2 扬声器用的纸浆	58
§ 3 打浆	61
§ 4 捞浆成型及干燥	65
§ 5 纸盆设计	68
第8章 密闭式音箱原理和设计	74
§ 1 简介	74
§ 2 原理分析和设计	74
第9章 开口式音箱原理和设计	88
§ 1 简介	88
§ 2 分析和设计	88
第10章 音箱设计举例	108
§ 1 专家推荐的单元频响范围	108
§ 2 高保真重放的三通路音箱	108
§ 3 无源辐射器音箱的简化设计	116
§ 4 带通音箱的简化设计	120
第11章 家用扬声器的展望	127
主要参考文献	130

第 1 章 电动式纸盆扬声器的工作原理和主要特性

§ 1 工作原理和等效电路

电动式纸盆扬声器是直接向自由空间辐射声音的电声换能器。它是由辐射部分——锥形纸盆（又称锥盆、振膜）及振动组件再加上置于永久磁场中的音圈组成的，如图 1-1。

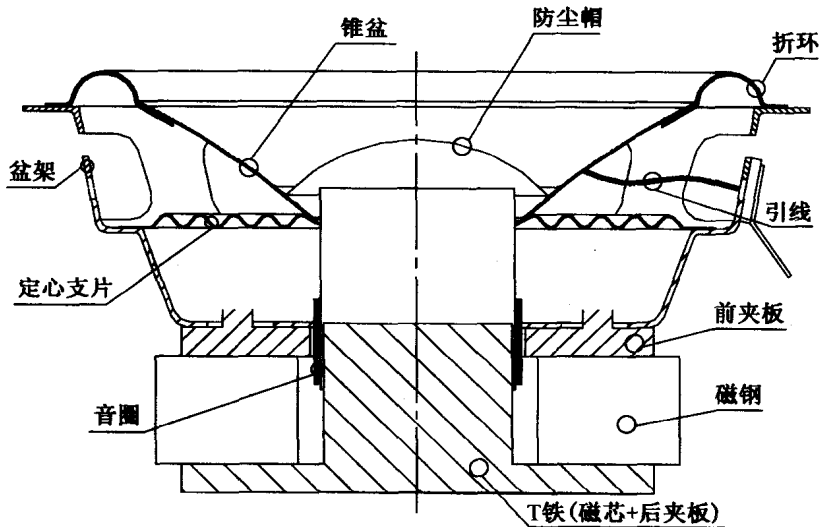


图 1-1 电动式纸盆扬声器结构

流过磁场内音圈的音频电流与永久磁场相互作用会产生使锥盆轴向振动的力。该作用力可用公式表示：

$$F = BLI \quad (\text{N}) \quad (1-1)$$

式中 B ——磁气隙中的磁感应强度 (T)；

L ——音圈导线的有效长度 (m)；

I ——流经音圈的电流 (A)。

在该作用力下，纸盆（锥盆）将如一个整体（活塞）那样运动，但仅指在某一临界频率以前。这个整体运动的频率范围常被称为锥盆的活塞振动范围。

像所有的电声换能器一样，扬声器也可以表示为电输入和力学输出的四端网络形式。四端网络可以看作变压比为 $1:BL$ 的变压器（图 1-2）。这里， BL 被称为电力耦合系数。

等效电路的左边（电气）部分包括带内阻 R_g 的放大器、电压 U 和音圈电阻 R_e 、音圈电感 L_e 。右边（力学）部分包括机械损耗电阻 R_{MS} ，辐射阻抗 R_{MR} ，支撑系统的顺性

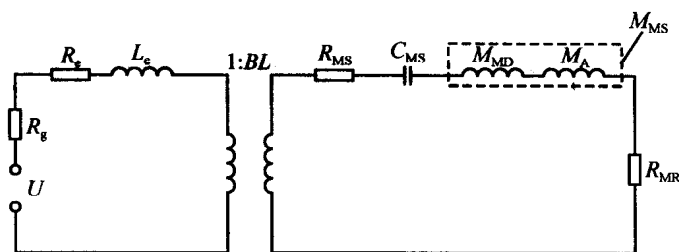


图 1-2 电动式纸盆扬声器的等效电路

C_{MS} , 振动系统的质量 M_{MS} (由纸盆静止质量 M_C 、音圈质量 M_V 组成的 M_{MD} 与空气随动质量 M_A 所构成)。

扬声器的工作可以用两个方程式来描述。

1. 等效电路的电气部分

$$U = IZ_e + BLx \quad (V) \quad (1-2)$$

式中 Z_e ——音圈的总阻抗, $Z_e = R_e + j\omega L_e$ (Ω);

ω ——角频率, $\omega = 2\pi f$ (rad/s), f 为频率 (Hz);

注意: 此式可解释扬声器阻抗为何与频率有关。

BLx ——音圈在磁场中运动所产生的电动势 (又称反电动势) (V);

x ——振动系统的振动速度 (m/s)。

这里应特别注意, 这一电动势反向出现, 可保护音圈承受大功率、大电流而不被烧毁。用电工原理是无法理解 0.3 mm 的线可承受 200 W 功率的。另外, 扬声器经例行试验后, 如解剖音圈发现音圈绕组有两头黑、中间黄的现象, 则说明绕组太长了, 超出了 BL 的作用范围。音圈绕组适当减短即可解决此问题。

2. 等效电路的力学部分

$$F = xZ_M + F_A \quad (N) \quad (1-3)$$

式中 Z_M ——振动系统的总力阻抗;

F_A ——振动系统振动时空气的声反作用力, $F_A = xZ_A$ (N), $Z_A = R_{MR} + X_{MR}$, 为总声阻抗 ($N \cdot s/m$)。

$$Z_M = R_{MS} + R_{MR} + j\left(\omega M_{MS} - \frac{1}{\omega \cdot C_{MS}}\right) \quad (N \cdot s/m) \quad (1-4)$$

$$R_{MS} = \frac{\rho_0 C^2 S_D^2}{Q_{MS} \omega_s V_{AS}} \quad (Q_{MS}, V_{AS} \text{ 符号意义见第 4 章}) \quad (\text{mech}\Omega)$$

式中 R_{MR} ——有效辐射阻抗, $R_{MR} = \rho_0 c_0 S_D R'_{MR}$ ($N \cdot s/m$);

X_{MR} ——辐射电抗, $X_{MR} = \rho_0 c_0 S_D X'_{MR}$ ($N \cdot s/m$);

ρ_0 ——空气密度, $\rho_0 = 1.21 \text{ kg/m}^3$;

c_0 ——声音在空气中传播速度 (344 m/s);

S_D ——锥盆的有效辐射面积 (m^2);

R'_{MR} ——辐射阻抗有效部分的无量纲系数;

X'_{MR} ——辐射阻抗电抗部分的无量纲系数。

图 1-3 示出了 R'_{MR} 和 X'_{MR} 与在无限大障板上锥盆的 ka 的关系曲线。

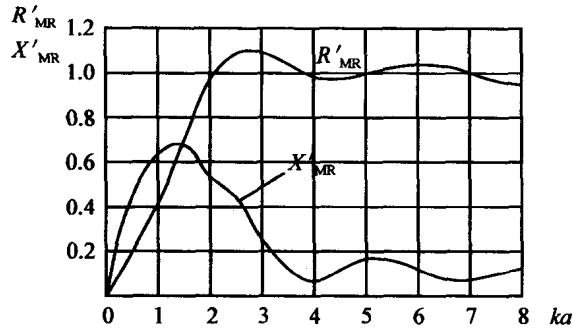


图 1-3 辐射阻抗的有效分量和电抗分量的无量纲系数

图中， k 称为波数； $k = \frac{\omega}{c_0}$ ； a 为锥盆的有效辐射半径。

由图 1-3 可看出，实际的空气有效辐射阻抗在很宽的频率范围内（低频区域）是较均匀的，故在后面的扬声器设计中不再提及。

联立方程式 (1-2) 和 (1-3)，我们可获得总电阻抗回路 (Z_{eM}) 和力阻抗回路 (Z_{Me}) 的表达式：

$$Z_{eM} = R_e + j\omega L_e + \frac{B^2 L^2}{(R_{MS} + R_{MR}) + j\left(\omega M_{MS} - \frac{1}{\omega C_{MS}}\right)} \quad (\Omega) \quad (1-5)$$

$$Z_{Me} = (R_{MS} + R_{MR}) + j\left(\omega M_{MS} - \frac{1}{\omega \cdot C_{MS}}\right) + \frac{B^2 L^2}{\frac{1}{R_e} + j\frac{1}{\omega \cdot L_e}} \quad (N \cdot s/m) \quad (1-6)$$

从所获得的公式可看出，回路总的电阻抗等于音圈阻抗加插入阻抗，而回路总的力阻抗则等于振动系统的力阻抗加上扬声器电回路的插入阻抗。

§2 总电阻抗

扬声器的总电阻抗 Z_{eM} 是加于音圈两端电压对流过音圈电流之比，其值由式 (1-5) 决定。

在 $\omega = 0$ 时，总电阻抗 Z_{eM} 等于音圈直流电阻。随着频率升高，总阻抗在振动系统的力学共振频率处产生最大值。也就是说，此时惯性阻抗等于支撑的顺性阻抗：

$$\omega_0 M_{MS} = \frac{1}{\omega_0 \cdot C_{MS}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_{MS} M_{MS}}} \quad (1-7a)$$

在这种情况下：

$$Z_{eM} = R_e + j\omega_0 L_e + \frac{B^2 L^2}{R_{MS} + R_{MR}} \quad (\Omega) \quad (1-7b)$$

如果振动系统的共振发生在低频区域，那么 $\omega_0 L_e$ 和 R_{MR} 项可以忽略，故式 (1-7b) 可简化为

$$Z_{eMO} = R_e + \frac{B^2 L^2}{R_{MS}} \quad (\Omega)$$

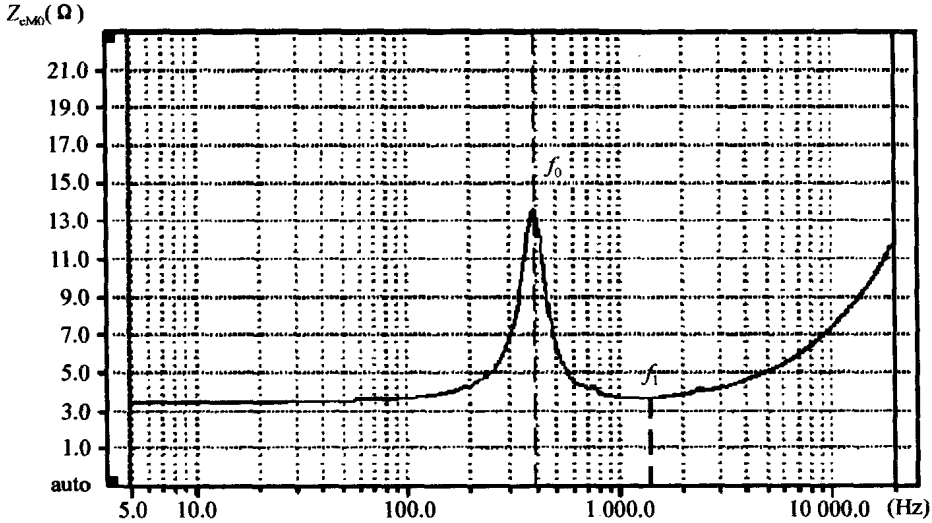


图 1-4 总阻抗的频率特性

但是，由于 $\frac{B^2 L^2}{R_{MS}} \gg R_e$ ，所以在角频率为 ω_0 时，阻抗可近似为

$$Z_{eMO} \approx \frac{B^2 L^2}{R_{MS}} \quad (\Omega)$$

在更高的频率上，式 (1-5) 中可忽略顺性抗和力学损耗，因为它们明显要比惯性抗小得多。于是

$$Z_{eM} = R_e + j \left(\omega L_e - \frac{B^2 L^2}{\omega \cdot M_{MS}} \right) \quad (\Omega)$$

在 $\omega_1 L_e = \frac{B^2 L^2}{\omega_1 \cdot M_{MS}}$ 的时候，总阻抗近似等于直流电阻。这个 f_1 频率被称为电力共振频率。此时阻抗就是扬声器的标称阻抗。通常，标称阻抗大约为直流电阻的 1.1 ~ 1.2 倍。在更高的频率上，由于音圈电感的影响和插入阻抗减小，总阻抗增大。电动式纸盆扬声器总阻抗与频率的关系示于图 1-4。

值得一提的是，为扩展扬声器的高频响应及提升高频的 SPL，扬声器厂家常常采用在磁芯上套铜短路环的工艺，使铜环中产生与频率升高的电流相反的涡流，使阻抗降低，音圈输入电流增大，从而使扬声器高频输出增加，频响展宽。这种设计还减少了谐波失真分量，从而减少失真。实践证明，在图 1-4 所示的阻抗曲线上的 f_0 处和 f_1 后的高频处采用阻抗共轭补偿对扬声器的音质改善是有效的。具体补偿方法见第 9 章。

§3 扬声器的声压频响曲线（幅频响应）

扬声器的声压频响特性就是扬声器随频率变化而在扬声器轴的某固定距离点上产生的声压 P 的关系。此时加到扬声器上的电压是不变的。图 1-5 示出了扬声器典型的声压频响曲线。

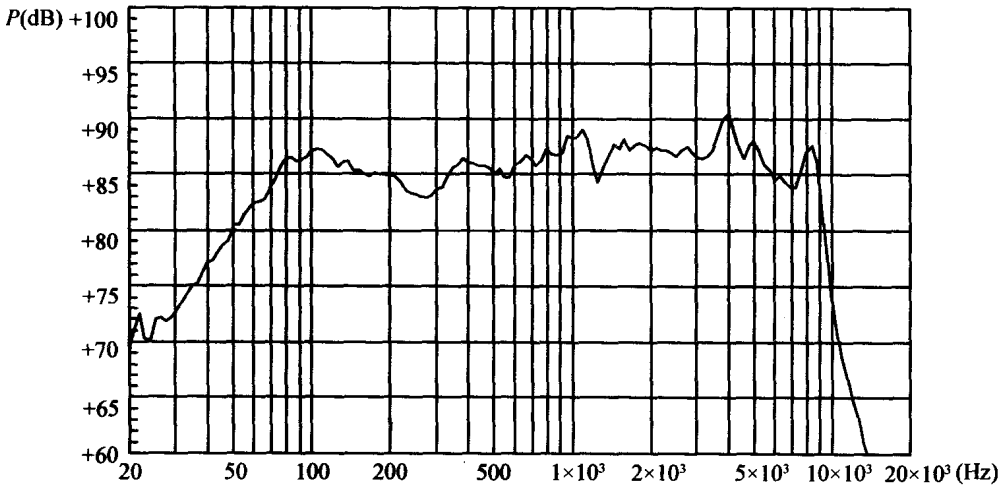


图 1-5 扬声器的声压频响曲线

图中，纵坐标是声压 P 或声压级 SPL，单位是 dB；横坐标是对数刻度的频率，单位是 Hz。为了比较不同扬声器的频率特性（灵敏度），常规定取输入功率为 1 W、测试距离为 1 m 的条件下测量频响曲线。

为了简化结论，我们设频率特性方程式的条件为：

- 1) 在研究的频率范围内纸盆作活塞振动且是无方向性声源。
- 2) 扬声器安装在无限大障板上。
- 3) 距离 r 取得相当大，观察点位于远场处。

此时，扬声器所产生的声压

$$P = \frac{XS_D f \rho_0}{r} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-8a)$$

将 X 用其值代替，从式 (1-3) 可得： $X = \frac{F}{|Z_M|}$ 。

F 由下列表达式决定：

$$F = \frac{BLU}{\sqrt{(R_g + R_e)^2 + (\omega \cdot L_e)^2}} \quad (\text{N})$$

联立式 (1-4)，可得

$$P = \frac{BLUS_D f \rho_0}{r \sqrt{(R_g + R_e)^2 + (\omega \cdot L_e)^2} \cdot \sqrt{(R_{MS} + R_{MR})^2 + \left(\omega \cdot M_{MS} - \frac{1}{\omega \cdot C_{MS}}\right)^2}} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-8b)$$

该表达式可反映扬声器的声压频响特性。

现在，让我们来看一下图 1-6 所示的 4 个工作状态。

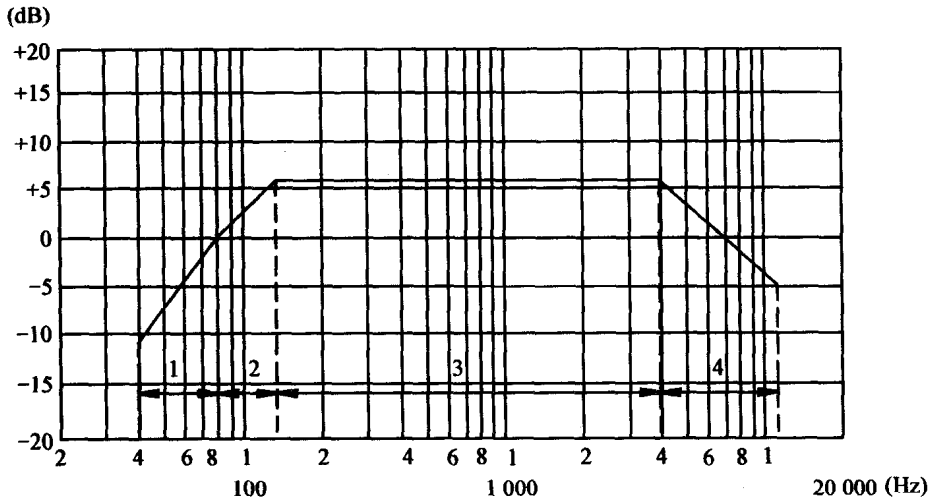


图 1-6 理想化的扬声器声压频响曲线

1) 在位于振动系统力学共振频率以下的频率上，这是支撑顺性控制区。此时可以忽略 ωL_e 、 $(R_{MS} + R_{MR})$ 和 ωM_{MS} ，式 (1-8b) 得到如下形式：

$$P_1 = \frac{2\pi BLUS_D f^2 \rho_0 C_{MS}}{r (R_g + R_e)} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-9)$$

在这种情况下， C_{MS} 的变化可以改变响应的斜率，声压随频率的平方而变化。

2) 在扬声器振动系统力学共振条件下，也就是 $\omega_0 M_{MS} = \frac{1}{\omega_0 \cdot C_{MS}}$ 时，有

$$P_2 = \frac{BLUS_D f \rho_0}{r (R_g + R_e) (R_{MS} + R_{MR})} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-10)$$

在这个区域中声压正比于频率，出现的 R_{MS} 说明此时是力阻控制，根据实际，这个区域大概为 $f_0 \pm 30\%$ 频宽，例如 $f_0 = 100$ Hz，那么频宽就是 70 ~ 130 Hz。因为是力阻控制，所以这里也是磁液作用区。

3) 在高于共振频率区域上，当系统由质量控制时，可以忽略 $\frac{1}{\omega \cdot C_{MS}}$ ， $R_{MS} + R_{MR}$ ， ωL_e 项，于是可得的频率特性方程为

$$P_3 = \frac{BLUS_D \rho_0}{2\pi r (R_g + R_e) M_{MS}} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-11)$$

这个扩展到高频前的区域称为中频区域。这是典型的 M_{MS} 质量控制区，应当注意， M_{MS} 越大，声压越低。这个区域里声压与频率无关。

在 3) 区的中频段，在试制调试中，经常出现要中频提升 2 ~ 3 dB 的情况。在 B_g 不

变时, 可用近似公式来计算^[1]:

$$M_{MS}' = \frac{M_{MS}}{10^{\frac{\Delta SPL}{20}}}$$

式中 M_{MS} ——原来振动质量;
 M_{MS}' ——变化后的振动质量;
 ΔSPL ——变化的声压级。

下面举例说明此经验公式的应用。

【例 1-1】 有一 10 in 扬声器, 原音圈重为 2.65 g, 换成扁线或减小线径后音圈重 2.1 g, 问中频段大概提高多少 dB?

解: 用近似公式计算, 得

$$2.1 = \frac{2.65}{10^{\frac{\Delta SPL}{20}}}; 10^{\frac{\Delta SPL}{20}} = \frac{2.65}{2.1}; \Delta SPL = 2 \text{ dB}$$

【例 1-2】 某 8 in 扬声器原振动系统质量为 15 g, 为提高中频灵敏度, 振动质量改为 13 g, 求提升 dB?

解: 这里, $M_{MS} = 15$, $M_{MS}' = 13$, $10^{\frac{\Delta SPL}{20}} = \frac{15}{13} = 1.154$, 两边取对数, 得

$$\frac{\Delta SPL}{20} = 0.062, \Delta SPL = 1.24 \text{ dB}$$

【例 1-3】 某 8 in 扬声器, 中频想提升 3 dB, 而原 M_{MS} 为 15 g, 要减到多少克才能提升 3 dB?

解: $M_{MS}' = \frac{15}{10^{\frac{3}{20}}} = \frac{15}{10^{0.15}} = \frac{15}{1.41} = 10.6 \text{ (g)}$

4) 如果假定, 在这个区域里 $\omega L_c \gg (R_g + R_c)$, 那么表达式 (1-11) 变成下列形式:

$$P_4 = \frac{BLUS_D \rho_0}{4\pi^2 \eta L_c M_{MS}} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-12)$$

在这种情况下, 在质量惯性作用下声压随着频率 f 的增高而减少。

§ 4 纸盆振动模式

在实际情况下, 纸盆的振动仅在它的临界频率以下才是活塞振动状态。临界频率 f_k 的计算式为

$$f_k = \frac{c_0}{2\pi a}$$

式中 c_0 ——声速, 为 344 m/s;
 a ——有效辐射半径 (m)。

在频率高于临界频率时, 纸盆各部位振动相位是不同的, 因此在声压频响曲线上出现许多峰和谷。图 1-7 上示出了口径 ϕ 180 mm, 锥顶角度 118° 纸盆的辐射振动特性。

[1] 俞锦元. 扁线音圈. 电声技术, 2002 (10)

在频率 420 Hz, 500 Hz 和 650 Hz 处发生了径向节线, 在频率 940 Hz, 1 100 Hz 以上产生同心圆节线, 在这两种情况下, 纸盆折环振动是和锥盆振动反相的, 所以在频响曲线上会出现不同程度的谷值。当频率为 2 800 Hz 和 3 800 Hz 时在锥盆上出现多个反相的节圆线。最后在最高频率处锥盆仅在靠近音圈中心的锥顶部分振动, 这就是造成辐射指向性的原因。

必须指出, 径向节振动 (radial vibration) 有的资料称为摇铃模式 (bell mode), 通常发生在较低频率处, 而同心圆模式 (concentric mode) 在较高频率处产生。国外专家在分析振动时提出了 12 种方程, 而用有限元法分析振膜和箱体振动是最有效的。经验证明, 现有的三文治锥盆, 包括发泡三文治盆和蜂窝状三文治盆等在克服节圆振动方面比其他锥盆明显要好得多。通过选择阻尼好的折环, 则可减弱径向节振动。而在锥盆中添加阻尼材料及锥盆上添加同心圆加强筋也能适当地控制同心圆的反相振动。另外, 根据测出的同心节圆位置, 选择适当尺寸的防尘帽, 盖于该位置控制节圆振动也是一个好方法, 不过, 这套激

光全息测量装置价格不菲。在试装扬声器的实践中, 如发现所测出频响曲线高端有不可容忍的谷值, 把防尘帽去掉后再测, 谷值没变, 此时, 建议用一种专门溶液涂抹纸锥顶部, 使该处变软, 节圆反相振动变弱, 再测频响时谷值变浅或消失, 那么就可以要求重做刚性均匀锥盆解决此问题了。

上述的减小径向节圆和同心圆振动的措施, 特别是不失真地展宽放音频带要付出的代价就是扬声器设计复杂化和造价提高。专家建议: 对 Hi-Fi 类扬声器应规定一个使用频率范围, 见表 1-1。

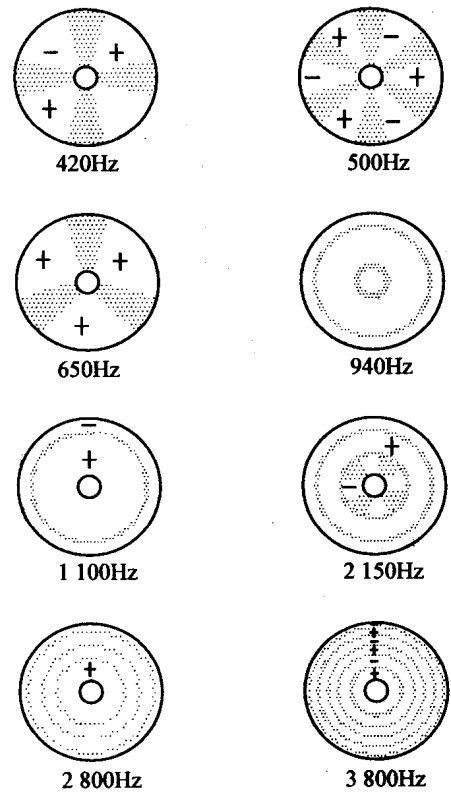


图 1-7 纸盆的振动特性

表 1-1

扬声器与频响关系

使用频率范围	扬声器名称
30 Hz ~ 1 kHz	低音; 低频
30 Hz ~ 5 kHz	低中音; 低中频
150 Hz ~ 5 kHz	中音; 中频
700 Hz ~ 10 kHz	超中音; 超中频
1 ~ 20 kHz	超中高音; 超中高频
3 ~ 20 kHz	高音; 高频
8 ~ 30 kHz	甚高音; 甚高频

§5 非线性失真

扬声器的非线性失真，是指在重放的声信号中出现了电信号中没有的附加分量。这些分量可分为谐波失真，分谐波失真，调制失真等。我们讨论的就是影响最大的谐波失真。而谐波失真是一种泛音现象。

谐波的非线性失真系数可由下式决定：

$$K_f = \frac{\sqrt{P_2^2 + P_3^2 + \cdots + P_n^2}}{\sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + \cdots + P_n^2}} \times 100\% \quad (1-13)$$

式中 P_1 ——基频声压；

P_2, P_3, P_n ——高次谐波声压。

讲到扬声器的高次谐波，国内外专家为之进行了大量的研究，并发现：只要在接收频谱中出现一定值的 11 次谐波，那就是扬声器碰音圈的特征。这一原理，现已成不少精密测量仪器工作的基础。

通常，在扬声器中出现的非线性谐波失真在低频段，特别是在靠近振动系统的共振频率处较大，所以扬声器厂家往往取 10% f_0 以上频率开始考虑非线性失真。当然若客户不同意，那么在 f_0 处的失真也必须改善。

非线性谐波失真的来源之一是支撑系统的非线性，从而在大振幅时出现三次谐波。下面举例说明。由图 1-8 (a) 可看出，某 3 in 扬声器在 92 dB 时测量的情况。当时支片较硬，400 Hz 的三次谐波失真可达 5%。而调整支片位移值后 [图 1-8 (b)]，三次谐波降到 2%。

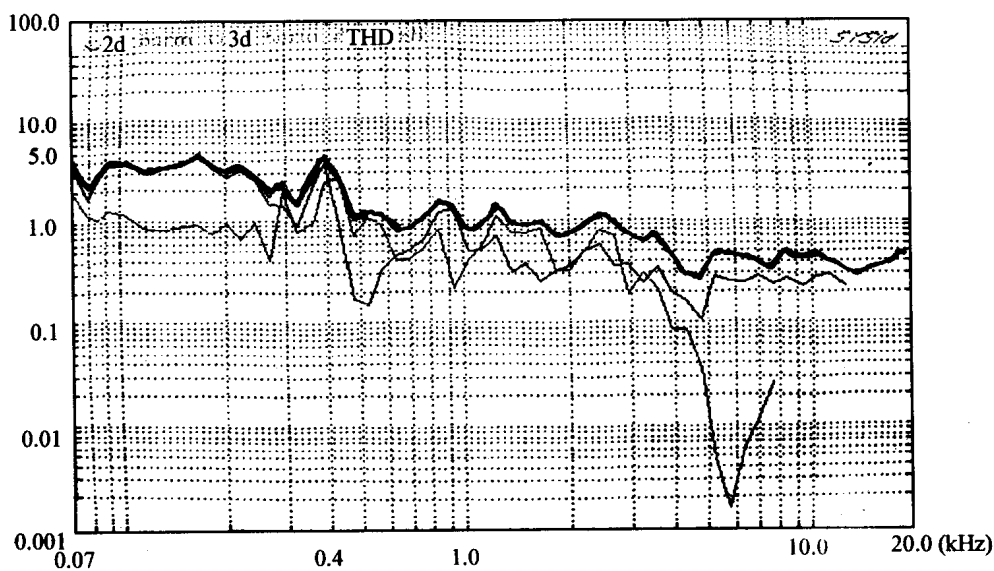
在 20 世纪 80 年代中期，国光电器股份有限公司 (GSEC) 有一种 $\phi 120$ mm 全纸盆扬声器，原来额定功率是 2 W，客户使用到 5 W，此时在纯音检听时 f_0 处出现失真声，人们常称它为“牛声”。客户表示此种声音不能接受，后经修改支撑折环尺寸，终于克服了这类失真声〔1〕。

谐波失真的第二个来源是磁路工作气隙的不均匀。在大振幅时就会出现二次谐波失真。美国 JBL 公司的 T 形对称磁路设计对降低二次谐波失真很有效。而结构相同的磁路，磁体各向异性均匀产生的二次谐波也较小。有时，我们在使用 SpeaD 软件时，磁芯凸出量除了要注意 B_g 值外，还应做相应的失真测试。

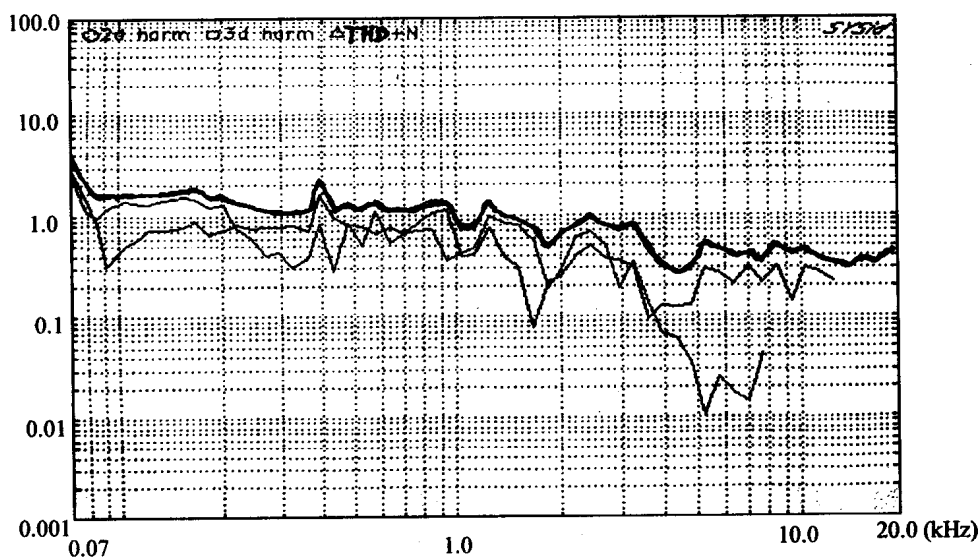
谐波失真的第三个来源是粘在纸盆锥部的防尘帽下封闭空气、定芯支片和盆架间封闭的空气弹性的非线性引起的二次谐波失真。扬声器制造厂家往往会在防尘帽下的锥部开些小孔，解决空气压缩问题，并会很注意支片的透气性，以避免空气压缩的非线性。

近两年，国内外许多扬声器生产厂家都在采用德国制的 KLIPPEL 仪器测量大信号条件下的 BL ， C_{MS} ， L_e 的变化，从中找出改进音圈位置、支撑系统位置等的最佳数据，减小大信号时扬声器的失真。这类仪器在产品开发阶段，产品质量改进是有用的工具。

〔1〕 俞锦元，何梓高。 $\phi 120$ 纸盒扬声器低频音质的改善。电声技术，1991 (5)



(a) 支片很硬时的失真曲线



(b) 调整支片后的失真曲线

图 1-8 非线性谐波失真曲线

顺便指出，根据听觉心理学和实际听觉发现，人耳能承受较大的二次谐波失真值，而对同样值的三次谐波失真却无法容忍。而电子管功放的失真主要是二次谐波，晶体管功放的失真主要是三次谐波。所以目前比较流行的说法是电子管的放音质量要比晶体管好。另外，研究表明，容许的非线性失真值与重放频率范围有关。在频率范围比较宽时可以容忍较大的非线性失真值，还可这样确定，在低频段容许比中、高频段有较大的非