

# 扬声器系统

上册

〔日〕山本武夫 编著



国防工业出版社

# 扬声器系统

(上册)

〔日〕山本武夫 编著

王以真 吴光威 译

张绍高 校

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书详细地介绍了纸盆扬声器、球顶形扬声器、号筒扬声器和各种扬声器箱的结构、工作原理及特性，以及与扬声器有关的声学知识。本书也对其他类型扬声器、分频网络、耳机，以及扬声器测量方面作了较详细的介绍。

全书共分16章，分上、下两册。上册包括1~7章，其主要内容是声音重放的物理过程；听觉心理；节目声的性质；高保真扬声器应有的性能；纸盆扬声器；球顶形扬声器；号筒扬声器。

本书可供扬声器制造厂的技术人员和工人、有关科研单位的研究人员，以及高等院校有关专业师生阅读参考。对于广大的扬声器使用者也有一定的参考价值。

スピーカー・システム (上)

山本武夫 编著

ラジオ技術社 1977

\*

扬声器系统

(上册)

〔日〕山本武夫 编著

王以真 吴光威 译

张绍高 校

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张9<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 229千字

1984年2月第一版 1984年2月第一次印刷 印数：0,001—6,100册

统一书号：15034·2562 定价：1.20元

## 译校者的话

扬声器是将电能转换为声能的电声换能器，扬声器系统则是指将几个扬声器和分频网络一起置于扬声器箱中的系统。

扬声器作为声频重放设备的最后一环，它的性能的优劣，以及使用是否得当，在极大程度上影响着放声质量。

到目前为止，国内外有关扬声器的书籍出版得不多，而且其中有些不是失之过简，就是泛泛而谈。日本山本武夫先生编著的《扬声器系统》一书，内容全面，既有理论阐述，又有对实际技术的解说，并且深入浅出，是一本较好的扬声器专著。本书的出版，希望它能对我国扬声器制造、使用，以及科研、教学方面有所促进，有所帮助。

本书在翻译过程中，得到许多同志的帮助和支持，在此一并表示感谢。

限于译校者水平，译文中难免有错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

## 编著者的话

今年刚好是托马斯·爱迪生发明留声机一百周年。世界各地都进行了纪念活动。在这一百年间，声频器件虽然没有像飞机、火箭、电子学发展得那么迅速，但也有了较大发展。爱迪生当时的发明，只能使声音重放到刚刚能被人们听到的大小，但随后就由蜡筒录声进到圆盘录声。到第二次世界大战以后，由于塑料工业的发展，在1948年出现了密纹唱片。十年以后，在1957年开始出售在一条纹槽中录有左右两声道的立体声唱片。

在这期间，扬声器也在慢慢地发展着，成为目前能适应高保真重放所需要的产品。扬声器的雏形，最初是作为电话用的耳机而发明的，以后被利用到无线电接收机中。刚开始是用来接收矿石收音机的声音，以后为了使更多的人能同时收听而发明了各种扬声器。这就是扬声器也曾被称为高声器的原因。

进入二十世纪，对于声频器件的研究，出现了繁荣景象。现在关于扬声器设计方面的理论，以及应用这些理论生产的器件，大都是1930年以前出现的。莱斯和开罗古在1925年发明了现在的动圈式电动扬声器的雏型。布拉特哈拉在1927年发明了平面驱动式电动扬声器。这是由于使整个振膜以同相驱动，不易产生分割振动而使音质优良的。平面障板在1870年就已经被洛德·瑞利解释清楚了。现在广泛使用的倒相式扬声器箱的基础，是在1930年由萨拉斯建立的。另外，号筒的基本理论是威布斯塔在1919年发表的。

这样看来，现在的扬声器可以认为是继承了1930年以前的遗产，在其后的大约四十年间得到了相当发展。在1930年以前，仅仅对基本原理作些解释说明，而目前这样大量生产的扬声器

在世界各地拥有非常多的使用者，是由于在语声、音乐信息的发展的同时，扬声器性能也随之提高的结果。

最近扬声器技术的发展，一方面是由于设计技术的发展，另一方面则是由于振膜、磁体、粘接剂等材料的发展。因此，最近高保真扬声器在提高音质的同时，容许输入功率也大幅度地提高。这是为了适应需要大声压的舞蹈音乐重放，在高保真扬声器方面的发展。

有人认为，高保真设备中对音质起主要作用的是扬声器。事实上，将扬声器切换后，音质的确会发生突然的变化。另外，除去扬声器以外的部件的优劣几乎都是由物理特性来判断的，但对扬声器却会有“物理特性好的音质并不好”的看法。这是有许多原因的。首先，测量扬声器物理特性时的条件与扬声器实际使用时的条件是不同的，物理特性未必表达了实际听到的音质。实际听到的音质，是扬声器本身的特性和听声室的声学特性共同决定的。其次，对表示扬声器音质中细微差别的物理特性，还不能被测量到，这也是事实。再有，对音质判断时，是依靠个人记忆来定出的，容易产生个人的差别，这也是原因之一。

这样，会产生在选择扬声器时应以什么为标准的问题。当然，物理特性好是优质扬声器的必要条件。在选择性能好的扬声器时，当然是在充分研究的条件下慢慢试听来决定的。在试听时，判断的标准应该是“能得到与现场演奏时同样程度优美的声音”。

判明扬声器的物理特性与音质间的关系，是从事扬声器研制、设计的技术人员多年来研究的课题。扬声器的测量方法，最近发展到应用电子计算机进行脉冲测量法。可以想像，用这种测量法会能够测得表现优良音质的物理量。这种测量法的发展，如果有一天能判明物理特性和音质之间的关系，那么就可以设计出音质优良的扬声器。希望这一天能早日到来。

本书是以回答上述有关扬声器种种疑问为目的而编写的。本书设想能成为学习声频工程的大学生和开始担任扬声器设计工作

的技术人员，以及希望对扬声器进行详细深入了解的业余爱好者的参考书。因此，虽然使用了一些大学课程内容的数学，但对数学感到理解困难的读者，或只需要理解物理意义的读者，可以跳过数学式子，只按照插图的说明加以理解。

本书第1章到第4章是对本书理解上需要的基本理论或基本概念进行解说的部分。第1章中对有关声场、机械-声音振动系统和电声换能器件的理论进行了说明。第2章中对关于听觉生理和声音心理的理论和实验结果进行了解说，并叙述了有关音质评价用语的知识。第3章中论述了作为扬声器输入信号的节目声的性质。第4章对高保真扬声器必要的性能，以物理特性为中心作了介绍。并对扬声器的物理特性与音质间现在已经明确了的关系也作了叙述。

第5章、第6章及第7章是分别对纸盆扬声器、球顶形扬声器及号筒扬声器的构造、工作原理，以及特性进行叙述的部分。这些章的叙述，是想用来作为选择和使用单元扬声器的指导方针的。

第8章中论述了扬声器箱的结构、工作原理、特性和设计方法。这一章中的后加载号筒音箱的设计法是编著者新的设想。

第9章叙述了将低音扬声器、中音扬声器和高音扬声器用网络耦合形成扬声器系统的手段。这一章是想用来作为选择高保真扬声器系统时的指针的。

第10章对监听扬声器，第11章对其他扬声器的结构、工作原理和特性作了解说。

第12章和第13章对作为扬声器系统使用上必须的知识，即放大器与扬声器的关系及扬声器与室内声学特性的关系进行了论述。

第14章叙述了使用与室内声学密切相关的扬声器系统时，关于扩声用扬声器的设计方法和安装位置等。

第15章对作为扬声器一种变形的耳机的构造、工作原理和

特性进行了介绍。

第 16 章对扬声器特性测量方法作了阐述,是想使读者能由这一章得到对产品目录中数据的阅读方法。

本书就是由上述内容组成的,如果本书能对读者在关于扬声器系统方面所存在的疑问,能提供一些解决方法,将会感到十分荣幸。

本书是由许多人分别执笔,并参考了许多先辈们的文献资料。对这些,编著者表示十分感谢。

另外,对本书由设想到发行,从始至终费尽心血的无线电技术出版社的铃木编辑主任及菅井彰吾先生致以深切谢意。

先锋公司常务董事

声学研究所所长 山本武夫

工 程 博 士

1977年 5 月



# 目 录

## 第1章 声音重放的物理过程

1.1 声波	2
1.1.1 声音	2
1.1.2 声音三要素	3
1.2 声场的理论	5
1.2.1 表示声场的方程式	5
1.2.2 速度势	9
1.2.3 平面波声场	10
1.2.4 驻波	12
1.2.5 球面波声场	14
1.2.6 声波的折射	16
1.2.7 声波的衍射	17
1.3 声音辐射系统	19
1.3.1 圆形活塞振动板产生的声场	19
1.3.2 辐射声的指向性	22
1.3.3 辐射阻抗	28
1.3.4 障板附近点声源的辐射功率	32
1.4 机械振动系统	35
1.4.1 单一自由度振动系统	35
1.4.2 膜振动	38
1.4.3 板的振动	39
1.5 声音振动系统	40
1.5.1 声管中传播的声波	40
1.5.2 声学元件	42
1.5.3 声变量器	43
1.6 电-力-声系统类比	44
1.6.1 机械系统的等效电路	45
1.6.2 声音系统的等效电路	46
1.6.3 电-力-声类比	48
1.7 电声换能器	50

1.7.1 电动式换能器 .....	51
1.7.2 静电式换能器 .....	54

## 第2章 听觉心理

2.1 人耳和听觉 .....	61
2.1.1 人耳的构造 .....	61
2.1.2 听觉的机理 .....	63
2.2 声音的属性 .....	64
2.3 听阈 .....	65
2.4 音调 (声音的高低) .....	67
2.4.1 影响音调的主要因素 .....	67
2.4.2 音调的量度 .....	67
2.5 声音的响度和等响曲线 .....	68
2.5.1 声音的强度和响度 .....	68
2.5.2 等响曲线 .....	68
2.5.3 宋尺度 .....	70
2.5.4 声音的响度和持续时间 .....	71
2.6 噪声公害 .....	72
2.6.1 噪声强度的表示方法 .....	72
2.6.2 NRN 曲线 .....	73
2.7 掩蔽 .....	74
2.7.1 掩蔽效应 .....	74
2.7.2 纯音相互间的掩蔽 .....	74
2.7.3 由掩蔽引起的音色变化 .....	76
2.7.4 临界频带的宽度 .....	76
2.8 对声音变化的感觉 .....	78
2.8.1 辨别阈 .....	78
2.8.2 频率的辨别阈 .....	78
2.8.3 声强的辨别阈 .....	79
2.8.4 调频的辨别阈 .....	79
2.8.5 调幅的辨别阈 .....	80
2.8.6 频率特性变化的辨别阈 .....	81
2.8.7 失真的辨别阈 .....	82
2.8.8 相位变化的辨别阈 .....	83
2.9 对音色的感觉 .....	86
2.9.1 关于音色 .....	86
2.9.2 决定音色的因素 .....	87
2.9.3 音质的评价术语 .....	88

2.9.4 音质评价术语与物理特性的关系 .....	93
2.10 两声道重放声的方向定位 .....	95
2.10.1 方向定位能力 .....	95
2.10.2 两声道的方向定位 .....	97
2.10.3 两声道重放 .....	98
2.10.4 关于立体声声场的牧田理论 .....	99
2.10.5 声像的性质 .....	100
2.11 多声道重放的方向定位 .....	102
2.11.1 真实声源在水平面内的方向定位 .....	102
2.11.2 合成声源在水平面内的方向定位 .....	106
2.11.3 多声道立体声用扬声器的排列 .....	108
2.11.4 各声道间的相位差和压迫感 .....	109
2.11.5 声场的广度感觉 .....	111

### 第3章 节目声的性质

3.1 声源的性质 .....	115
3.1.1 表示声源性质的方法 .....	116
3.1.2 频带 .....	116
3.1.3 动态范围 .....	116
3.1.4 指向性 .....	117
3.2 节目声的性质 .....	118
3.2.1 广播节目声性质的表示方法 .....	118
3.2.2 频谱 .....	119
3.2.3 电平分布 .....	120
3.2.4 频谱-电平分布 .....	123
3.2.5 两声道立体声与四声道信号 .....	124
3.3 试听用节目的选择 .....	125

### 第4章 高保真扬声器应有的性能

4.1 声频重放装置的组成和扬声器的任务 .....	128
4.1.1 声频重放装置的组成 .....	128
4.1.2 影响重放音质的各种因素 .....	128
4.2 输出声压级 .....	129
4.2.1 输出声压级和效率 .....	129
4.2.2 额定输入功率和最大输入功率 .....	131
4.2.3 最大输出声压级 .....	132
4.3 失真 .....	133
4.3.1 谐波失真 .....	133
4.3.2 互调失真 .....	135

4.3.3 异常声 .....	135
4.4 输出声压频率特性 .....	135
4.4.1 重放频带 .....	135
4.4.2 输出声压频率特性 .....	137
4.4.3 功率响应 .....	138
4.5 指向性 .....	139
4.5.1 高保真扬声器的指向性 .....	139
4.5.2 扩声用扬声器的指向性 .....	141
4.6 电阻抗特性 .....	142
4.7 瞬态特性 .....	143
4.8 相位特性 .....	145
4.9 扬声器系统的形状和设计 .....	148
4.10 立体声重放用扬声器应有的性能 .....	149
4.10.1 频率特性 .....	149
4.10.2 相位特性 .....	150
4.10.3 指向性 .....	151
4.11 高保真扬声器应有的音质 .....	152
4.12 扬声器系统的物理特性和综合优良度 .....	154

## 第5章 纸盆扬声器

5.1 纸盆扬声器的结构及工作原理 .....	161
5.1.1 纸盆扬声器的结构 .....	161
5.1.2 纸盆扬声器的工作原理 .....	164
5.2 振动系统的等效电路 .....	165
5.2.1 机械系统的等效电路 .....	165
5.2.2 电系统的等效电路 .....	168
5.3 低声频段的特性 .....	169
5.3.1 低频共振 .....	169
5.3.2 低声频段的特性 .....	171
5.3.3 低声频段的电阻抗特性 .....	172
5.4 中声频段的特性 .....	172
5.4.1 折环共振 .....	173
5.4.2 纸盆的分割振动 .....	174
5.5 高声频段的特性 .....	176
5.5.1 高频重放上限 .....	176
5.5.2 高声频段的特性 .....	177
5.5.3 高声频段指向性及其改善方法 .....	178

附: 纸盆的制造方法 .....	179
5.6 效率 .....	181
5.7 纸盆扬声器的失真 .....	182
5.7.1 由驱动力引起的失真 .....	182
5.7.2 由悬置系统的非线性引起的失真 .....	185
5.7.3 由纸盆引起的失真 .....	187
5.7.4 多普勒失真及其它失真 .....	188
5.8 瞬态特性 .....	190
5.8.1 猝发声的瞬态特性 .....	190
5.8.2 瞬态失真特性 .....	191
5.8.3 采用脉冲测量瞬态特性 .....	194
5.9 相位特性 .....	196
5.10 纸盆扬声器的一般特性 .....	199
5.10.1 输出声压频率特性和指向频率特性 .....	199
5.10.2 标称阻抗与阻抗特性 .....	200
5.10.3 谐波失真特性 .....	202
5.10.4 输出声压级 .....	203
5.11 纸盆扬声器的部件 .....	204
5.11.1 纸盆及悬置系统 .....	204
5.11.2 音圈 .....	215
5.11.3 磁路 .....	216
5.11.4 盆架 .....	218

## 第6章 球顶形扬声器

6.1 球顶形扬声器的结构及工作原理 .....	221
6.1.1 球顶形扬声器的结构 .....	221
6.1.2 球顶形扬声器的工作原理 .....	223
6.1.3 硬球顶形扬声器与软球顶形扬声器 .....	224
6.2 球顶形扬声器的输出声压频率特性 .....	226
6.2.1 球顶形扬声器的低声频段特性 .....	226
6.2.2 球顶形扬声器的中声频段特性 .....	227
6.2.3 球顶形扬声器的高声频段特性 .....	228
6.3 球顶形扬声器的一般特性 .....	231
6.3.1 输出声压指向频率特性 .....	232
6.3.2 电阻抗特性 .....	232
6.3.3 球顶形扬声器的失真特性 .....	234
6.4 球顶形扬声器的部件 .....	236
6.4.1 振膜与支撑材料 .....	236

## XIV

6.4.2 音圈 .....	238
6.4.3 磁路系统 .....	239
6.4.4 喉塞 .....	241
6.4.5 后腔罩 .....	241

## 第7章 号筒扬声器

7.1 号筒扬声器的结构及工作原理 .....	245
7.1.1 号筒扬声器的结构 .....	245
7.1.2 力阻抗的匹配 .....	247
7.1.3 号筒扬声器的种类 .....	248
7.2 号筒 .....	251
7.2.1 号筒内的声波方程式 .....	252
7.2.2 指数形号筒 .....	253
7.2.3 号筒长度 .....	255
7.2.4 双曲线号筒 .....	257
7.3 振动系统的等效电路与效率 .....	259
7.3.1 振动系统的等效电路 .....	259
7.3.2 号筒扬声器的电声转换效率 .....	261
7.4 号筒扬声器的特性 .....	263
7.4.1 振膜的速度频率特性 .....	263
7.4.2 输出声压频率特性 .....	266
7.4.3 指向性 .....	268
7.4.4 由于空气非线性引起的失真 .....	276
7.4.5 容许输入功率 .....	277
上册符号表 .....	279

## 第 1 章 声音重放的物理过程

一个扬声器，它所包含的部件最多不过三十个，一个扬声器系统，组成的部件也不过一百个左右。所以要想从形式上来制造出一个扬声器是不困难的。但是，正如大家所知道的，扬声器的音质是由数量不多的几个部件所左右，从而千差万别。因此，要想设计出音质良好的扬声器是相当困难的。

造成上述现象的原因是，在设计扬声器时，如果只凭基本的设计理论是不可能设计出音质优良的扬声器的。在设计中，还有赖于丰富的实践经验。但是，不运用基本设计理论来进行扬声器的设计，则不仅效率低，而且即或能制造出好的扬声器，也只能停留在这一个品种上。因此，应该在已有的理论研究成果范围内进行设计。在这基础上，再对音质细微的部分用试探法来进行改进，除此之外，别无他法。

扬声器的部件虽然比较少，但在整个声频系统中，扬声器却在极大程度上决定着音质。在扬声器中有的部件同时承担几种不同功能，所以，设计起来比较困难。如果更换使用的部件，就会使音质得到很大地改变。

扬声器包括有辐射声音的部分（声音辐射系统：振膜、倒相箱孔等）；振动部分（机械振动系统：振膜、定心支片等）；将电信号转换成机械振动的部分（电声转换系统：音圈、磁体等）；声音通路部分（声音振动系统：扬声器箱、号筒等）。

本章将对扬声器各部分的基本研究方法进行说明，以有助于对第 2 章以后内容的理解。在本章中使用了大学程度的数学，对这一部分理解困难的读者，可以跳过数学式子，只看插图的说明<sup>1)~7)</sup>。

## 1.1 声 波

声音重放装置的目的，就是要重放出优良音质的音乐。音乐中既有器乐曲又有声乐曲，最近又出现了由电子合成器产生的电子音乐，以及 SL（声音定位器）产生的人工声音。作为声频重放装置一环的扬声器，必须对各种信号有高保真重放的性能。因此，在设计扬声器或选择扬声器时，就必须了解各种输入信号的性质。在第 3 章中将详细介绍输入信号的性质，本章先对声音的基本性质进行讨论。

### 1.1.1 声音

声音是由物体振动产生的。用手接触发声物体就可感觉到振动。发低频率声音的物体有时是以肉眼能看到的振幅振动着。图 1.1 表示物体振动时，与物体相接触的空气分子受到激励而产生的空气疏密波。如图 1.2 所示，空气密度较密的地方，气压超过大气压；较疏的地方，气压低于大气压，气压的变化分量就是声压的波形。

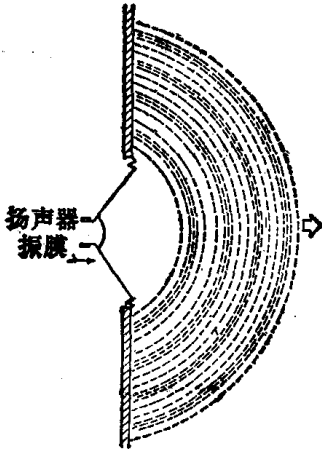


图1.1 声波的产生

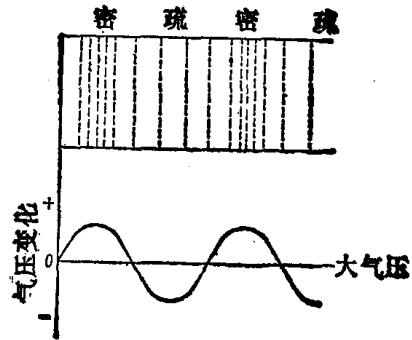


图1.2 声波引起的空气疏密与气压变化

空气的疏密波通过人的外耳道，使耳中的鼓膜振动，引起听觉。所以人耳听到的空气疏密波就是声音。人耳能听到的声音频



率是有一定范围的。比这一频率范围低或高的声音都不会引起听觉，这种超过听觉范围的振动不称为声音，而分别称为次声和超声。另外，虽然在固体和液体中也可以产生疏密波（纵波），但也不称为声音。

从各种不同角度对声音进行分类，如表 1.1 所示。

表1.1 声音的分类

由声音内容分类	<ul style="list-style-type: none"> <li>自然声（自然界发出的声音）</li> <li>乐器声（由乐器发出的声音）</li> <li>人声（由人发出的声音）</li> <li>噪声（上述以外，令人烦噪的声音）</li> </ul>
由声音频谱分类	<ul style="list-style-type: none"> <li>纯音（单一频率的声音）</li> <li>复音（由频率不同的一些纯音合成的声音）</li> <li>单音（由一个基音与它整数倍的谐音合成的声音）</li> </ul>
由声音频率范围分	<ul style="list-style-type: none"> <li>次声（人耳听不到的低频率空气振动）</li> <li>可听声（在人耳能听到频率范围内的声音）</li> <li>超声（人耳听不到的高频率空气振动）</li> </ul>
由声音时间性分类	<ul style="list-style-type: none"> <li>周期性声音（乐器声、人声等周期声音）</li> <li>非周期性声音（噪声等无周期声音）</li> <li>脉冲性声音（持续时间短促的声音）</li> </ul>

我们日常生活中，会遇到上述这些不同的声音，声频设备所重放的声音是以乐器声、人声等可听频率的复音为主的。但也有时要重放噪声，所以高保真度扬声器必须能重放出各种声音。

### 1.1.2 声音三要素

声音的性质，可以用音调、响度和音色三个要素来表示。

**音调** 音调由声音所包含的成分音●中最低频率的声音（基音）的频率来决定。基音的频率高时，音调高；基音的频率低时，音调低。音调，是以基音的频率（单位为 Hz，即赫）来表示的。

**响度** 响度由声压大小的有效值来表示。图1.2中设大气压为

● 一个声音可以认为是由一个基音和许多与基音成整倍数的谐音或不成整倍数的声音合成的，日本称合成这个声音所有的声音为这个声音的成分音，在我国没有这一名称。——校注