

---

(日)山本武夫 编著

王以真 吴光威 张绍高 译校

---

# 扬声器系统

YANGSHENGQI XITONG



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 扬声器系统

[日] 山本武夫 编著  
王以真 吴光威 张绍高 译校

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书详细介绍了纸盆扬声器、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。全书分为16章,包括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,扬声器箱、扬声器系统,监听扬声器,其他类型扬声器,放大器与扬声器,重放声音与房间的声学性质,扩声用扬声器系统,耳机和扬声器特性的测量方法。

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

著作权合同登记 图字:军-2008-071号

### 图书在版编目(CIP)数据

扬声器系统/(日)山本武夫编著;王以真,吴光威,张绍高译校. —北京:国防工业出版社,2010.1  
ISBN 978-7-118-06572-5

I. ①扬... II. ①山... III. ①扬声器系统 IV.  
①TN643

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第181756号

本书再版得到了山本先生的委托代理人日野捷吉郎的授权,版权所有,维权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 25½ 字数 575 千字  
2010年1月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 42.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422  
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474  
发行业务:(010)68472764

## 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 100 周年。世界各地都举行了纪念活动。在这 100 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被人们听到的大小,但随后就由蜡筒录声发展到圆盘录声。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。10 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。这就是扬声器也被称为高声器的原因。

进入 20 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 年发明了动圈式扬声器的雏形。布拉特哈拉在 1927 年发明了平面驱动式电动扬声器。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。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 40 年间得到了相当的发展。在 1930 年以前,仅仅对基本原理做些解释说明,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,是由于在话音、音乐信息发展的同时,扬声器性能也能随之提高的结果。

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、黏结剂等材料的发展。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的提高。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,容易产生个性的差别,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。可以想象,用这种测量法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。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,可以跳过数学公式,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试验结果进行了解说,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,以物理特性为中心做了介绍,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做了叙述。第5章、第6章及第7章是分别对锥形扬声器、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声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、工作原理和特性做了解说。第12章和第13章对作为扬声器系统使用上必需的知识,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做了阐述,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  
声学研究所所长工程博士 山本武夫  
1977年5月

## 再版序言

出版社根据读者要求,将《扬声器系统》一书再版。这本书早已售缺,有需要者只好托人复印,网上还有扫描的电子版。时间常常是考验事物价值的最好办法。20年过去了,许多事烟消云散,一本技术书还有人看、有人买,这就是价值的体现。《扬声器系统》这本书有两个特点:第一,它是由研究扬声器的专家编写;第二,它是为研究扬声器的人而编写。我们所关注的扬声器技术问题,书中几乎都曾提到。

《扬声器系统》这本书,见证了中国扬声器事业的发展。中文版出版之日,正是中国扬声器行业腾飞之时。中文版再版之时,中国已成为一个扬声器大国,出口量、产量稳居世界第一位。

现在有关扬声器的论文和书多了起来,在当时一无图纸、二无资料的时期,《扬声器系统》对中国电声技术人员是起到相当的参考作用。

当然这本书也不是完美无缺的。由于出版早,有些近年来扬声器技术的新进展,如音箱的 Thiele - Small 理论、一些设计软件、一些计算机辅助测量……都没有涉及。

对我个人来讲,还要特别感谢张绍高教授、吴光威教授两位合作者。由于张绍高教授的高风亮节、学者风度,使这本书能合作出版,从此坚定了我从事扬声器技术工作的决心,也因为这本书结交了很多电声界的朋友。飞乐公司总工程师张本厚先生,曾对本书与另一译本逐字逐句对照,对此译本大加赞扬与鼓励。

对本书再版,得到国防工业出版社姜育仁先生及许多朋友支持和协助。联系山本武夫先生、日本出版社,花了几年工夫,其中范萍女士、日野捷吉郎先生也起到关键作用。在此表示深切的感谢。

2008年11月我访问日本,带着朋友画的和平鸽国画,想借此机会拜访山本武夫先生。就在动身前夕,惊悉山本先生于2008年11月5日在东京去世。在这里再次向山本武夫先生表示哀悼。我想有这么多的中国电声界朋友读山本先生的书,是对他最好的纪念。

乘再版之际,对已发现的舛误进行修正。

王以真

2009.4.20 于天津

# 目 录

## 第 1 章 声音重放的物理过程

1.1 声波 .....	1
1.1.1 声音 .....	1
1.1.2 声音三要素 .....	2
1.2 声场的理论 .....	3
1.2.1 声场方程式 .....	4
1.2.2 速度势 .....	6
1.2.3 平面波声场 .....	7
1.2.4 驻波 .....	9
1.2.5 球面波声场 .....	9
1.2.6 声波的折射 .....	11
1.2.7 声波的衍射 .....	12
1.3 声音辐射系统 .....	13
1.3.1 圆形活塞振动板产生的声场 .....	13
1.3.2 辐射声的指向性 .....	15
1.3.3 辐射阻抗 .....	18
1.3.4 障板附近点声源的辐射功率 .....	21
1.4 机械振动系统 .....	23
1.4.1 单一自由度振动系统 .....	23
1.4.2 膜振动 .....	25
1.4.3 板的振动 .....	25
1.5 声音振动系统 .....	26
1.5.1 声管中传播的声波 .....	26
1.5.2 声学元件 .....	27
1.5.3 声变量器 .....	29
1.6 电—力—声系统类比 .....	29
1.6.1 机械系统的等效电路 .....	29
1.6.2 声音系统的等效电路 .....	30
1.6.3 电—力—声类比 .....	32
1.7 电声换能器 .....	33
1.7.1 电动式换能器 .....	34



1.7.2 静电式换能器 .....	36
参考文献 .....	39

## 第2章 听觉心理

2.1 人耳和听觉 .....	40
2.1.1 人耳的构造 .....	41
2.1.2 听觉的机理 .....	42
2.2 声音的属性 .....	43
2.3 听阈 .....	43
2.4 音调(声音的高低) .....	44
2.4.1 影响音调的主要因素 .....	44
2.4.2 音调的量度 .....	45
2.5 声音的响度和等响曲线 .....	45
2.5.1 声音的强度和响度 .....	45
2.5.2 等响曲线 .....	45
2.5.3 宋尺度 .....	46
2.5.4 声音的响度和持续时间 .....	46
2.6 噪声公害 .....	47
2.6.1 噪声强度的表示方法 .....	47
2.6.2 NRN 曲线 .....	47
2.7 掩蔽 .....	48
2.7.1 掩蔽效应 .....	48
2.7.2 纯音相互间的掩蔽 .....	49
2.7.3 由掩蔽引起的音色变化 .....	50
2.7.4 临界频带的宽度 .....	50
2.8 对声音变化的感觉 .....	51
2.8.1 辨别阈 .....	51
2.8.2 频率的辨别阈 .....	51
2.8.3 声强的辨别阈 .....	51
2.8.4 调频的辨别阈 .....	52
2.8.5 调幅的辨别阈 .....	52
2.8.6 频率特性变化的辨别阈 .....	52
2.8.7 失真的辨别阈 .....	53
2.8.8 相位变化的辨别阈 .....	54
2.9 对音色的感觉 .....	56
2.9.1 关于音色 .....	56
2.9.2 决定音色的因素 .....	56
2.9.3 音质的评价术语 .....	57

2.9.4	音质评价术语与物理特性的关系	61
2.10	两声道重放声的方向定位	62
2.10.1	方向定位能力	62
2.10.2	两声道的方向定位	63
2.10.3	两声道重放	63
2.10.4	关于立体声声场的牧田理论	64
2.10.5	声像的性质	65
2.11	多声道重放的方向定位	66
2.11.1	真实声源在水平面内的方向定位	66
2.11.2	合成声源在水平面内的方向定位	69
2.11.3	多声道立体声用扬声器的排列	70
2.11.4	各声道间的相位差和压迫感	71
2.11.5	声场的广度感觉	71
	参考文献	73

### 第3章 节目声的性质

3.1	声源的性质	75
3.1.1	表示声源性质的方法	75
3.1.2	频带	76
3.1.3	动态范围	76
3.1.4	指向性	77
3.2	节目声的性质	77
3.2.1	广播节目声性质的表示方法	77
3.2.2	频谱	78
3.2.3	电平分布	78
3.2.4	频谱—电平分布	80
3.2.5	两声道立体声与四声道信号	81
	参考文献	82

### 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	83
4.1.1	声频重放装置的组成	83
4.1.2	影响重放音质的各种因素	84
4.2	输出声压级	84
4.2.1	输出声压级和效率	84
4.2.2	额定输入功率和最大输入功率	86
4.2.3	最大输出声压级	86

4.3	失真	87
4.3.1	谐波失真	87
4.3.2	互调失真	87
4.3.3	异常声	88
4.4	输出声压频率特性	88
4.4.1	重放频带	88
4.4.2	输出声压频率特性	89
4.4.3	功率响应	90
4.5	指向性	90
4.5.1	高保真扬声器的指向性	90
4.5.2	扩声用扬声器的指向性	91
4.6	电阻抗特性	92
4.7	瞬态特性	92
4.8	相位特性	93
4.9	扬声器系统的形状和设计	95
4.10	立体声重放扬声器应有的性能	95
4.10.1	频率特性	95
4.10.2	相位特性	96
4.10.3	指向性	97
4.11	高保真扬声器应有的音质	98
4.12	扬声器系统的物理特性和综合优良度	99
	参考文献	102

## 第5章 锥形扬声器

5.1	锥形扬声器的结构与工作原理	103
5.1.1	锥形扬声器的结构	103
5.1.2	锥形扬声器的工作原理	105
5.2	振动系统的等效电路	105
5.2.1	机械振动系统的等效电路	106
5.2.2	电系统的等效电路	107
5.3	低声频段的特性	108
5.3.1	低频共振	108
5.3.2	低声频段的特性	109
5.3.3	低声频段的电阻抗特性	110
5.4	中声频段的特性	111
5.4.1	折环共振	111
5.4.2	锥体的分割振动	112
5.5	高声频段的特性	113

5.5.1	高声频重放上限	113
5.5.2	高声频段的特性	114
5.5.3	高声频段指向性及其改善方法	114
5.6	效率	116
5.7	锥形扬声器的失真	116
5.7.1	由驱动力引起的失真	117
5.7.2	由悬置系统的非线性引起的失真	119
5.7.3	由锥体引起的失真	120
5.7.4	多普勒失真及其他失真	120
5.8	瞬态特性	122
5.8.1	猝发声的瞬态特性	122
5.8.2	瞬态失真特性	123
5.8.3	采用脉冲测量瞬态特性	124
5.9	相位特性	125
5.10	锥形扬声器的一般特性	127
5.10.1	输出声压频率特性和指向频率特性	127
5.10.2	标称阻抗与阻抗特性	127
5.10.3	谐波失真特性	128
5.10.4	输出声压级	129
5.11	锥形扬声器的部件	130
5.11.1	锥体及悬置系统	130
5.11.2	音圈	136
5.11.3	磁路	137
5.11.4	盆架	139
	参考文献	139

## 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	141
6.1.1	球顶形扬声器的结构	141
6.1.2	球顶形扬声器的工作原理	142
6.1.3	硬球顶形扬声器与软球顶形扬声器	143
6.2	球顶形扬声器的输出声压频率特性	144
6.2.1	球顶形扬声器的低声频段特性	144
6.2.2	球顶形扬声器的中声频段特性	145
6.2.3	球顶形扬声器的高声频段特性	145
6.3	球顶形扬声器的一般特性	147
6.3.1	输出声压指向频率特性	148
6.3.2	电阻抗特性	148

6.3.3 球顶形扬声器的失真特性 .....	149
6.4 球顶形扬声器的部件 .....	150
6.4.1 振膜与支撑材料 .....	150
6.4.2 音圈 .....	152
6.4.3 磁路系统 .....	152
6.4.4 喉塞 .....	153
6.4.5 后腔罩 .....	154
参考文献 .....	155

## 第7章 号筒扬声器

7.1 号筒扬声器的结构及工作原理 .....	156
7.1.1 号筒扬声器的结构 .....	157
7.1.2 力阻抗的匹配 .....	158
7.1.3 号筒扬声器的种类 .....	159
7.2 号筒 .....	160
7.2.1 号筒内的声波方程式 .....	161
7.2.2 指数形号筒 .....	161
7.2.3 号筒长度 .....	163
7.2.4 双曲线号筒 .....	164
7.3 振动系统的等效电路与效率 .....	165
7.3.1 振动系统的等效电路 .....	165
7.3.2 号筒扬声器的电声转换效率 .....	166
7.4 号筒扬声器的特性 .....	168
7.4.1 振膜的速度频率特性 .....	168
7.4.2 输出声压频率特性 .....	170
7.4.3 指向性 .....	172
7.4.4 由于空气非线性引起的失真 .....	174
7.4.5 容许输入功率 .....	175
参考文献 .....	176

## 第8章 扬声器箱

8.1 扬声器箱的种类 .....	177
8.2 障板 .....	178
8.2.1 平面障板 .....	178
8.2.2 敞开式扬声器箱 .....	179
8.3 封闭式扬声器箱 .....	181
8.3.1 安装在封闭式声箱中的扬声器的等效电路 .....	181

8.3.2	设计扬声器箱时所需的扬声器参数 .....	182
8.3.3	封闭式声箱的设计 .....	183
8.3.4	书架式扬声器箱 .....	186
8.4	倒相式扬声器箱 .....	187
8.4.1	装入倒相式扬声器箱中的扬声器的等效电路 .....	188
8.4.2	倒相式扬声器箱的理想条件 .....	189
8.4.3	非理想条件时的特性 .....	191
8.4.4	倒相式扬声器箱的优点 .....	193
8.4.5	倒相式扬声器箱的设计 .....	193
8.5	特殊障板 .....	198
8.5.1	倒相式扬声器箱的变形 .....	198
8.5.2	前加载号筒扬声器箱 .....	201
8.5.3	后加载号筒扬声器箱 .....	203
8.5.4	无指向性扬声器箱 .....	209
8.6	扬声器箱的外形 .....	210
8.6.1	声箱外形对低声频特性的影响 .....	211
8.6.2	扬声器箱的尺寸比 .....	211
8.6.3	安装孔及安装方法 .....	212
8.7	扬声器箱用材料 .....	213
8.7.1	板材 .....	213
8.7.2	板振动与加固材料 .....	214
8.7.3	吸声材料及其效果 .....	215
8.7.4	网罩 .....	218
8.7.5	箱体的加工及声压泄漏的影响 .....	219
	参考文献 .....	220

## 第 9 章 扬声器系统

9.1	组合型的目的 .....	221
9.1.1	高保真扬声器的条件 .....	221
9.1.2	单锥形扬声器存在的问题 .....	221
9.1.3	组合扬声器的优点 .....	224
9.2	扬声器系统的组成方法 .....	224
9.2.1	频段的划分法 .....	224
9.2.2	低音扬声器必须具备的性能 .....	225
9.2.3	中、高音扬声器必须具备的性能 .....	228
9.2.4	各频段扬声器的组合方法 .....	229
9.2.5	各频段扬声器的排列方法 .....	230
9.2.6	组合扬声器系统的种类 .....	232

9.3	分频网络	232
9.3.1	定阻型分频网络	232
9.3.2	扬声器阻抗的校正	236
9.4	网络用元件	237
9.4.1	电容器	237
9.4.2	线圈	239
9.4.3	衰减器	241
9.5	多路放大器用滤波器	242
9.5.1	多路放大器用滤波器的基本单元	242
9.5.2	NF型RC滤波器组成的注意事项	244
9.5.3	各种截止特性的组成法	244
9.6	扬声器系统的一般特性	245
9.6.1	输出声压频率特性及指向频率特性	247
9.6.2	谐波失真特性	249
9.6.3	瞬态特性	250
9.6.4	电阻抗特性	251
	参考文献	252

## 第10章 监听扬声器

10.1	对监听扬声器所要求的性能	253
10.2	对监听扬声器所要求的音色	256
10.3	监听扬声器的组成	257
10.3.1	组成	257
10.3.2	箱体	257
10.3.3	对驱动放大器要求的条件	258
10.4	监听扬声器的实例	258
10.4.1	录声室用监听扬声器	259
10.4.2	广播电台用监听扬声器	261
10.5	监听扬声器与高保真扬声器的不同点	263
	参考文献	263

## 第11章 其他类型扬声器

11.1	扬声器的种类	264
11.2	海尔扬声器	265
11.3	电磁扬声器	266
11.4	静电扬声器	267
11.4.1	单端静电扬声器	267

11.4.2 推挽静电扬声器 .....	268
11.4.3 驻极体静电扬声器 .....	269
11.5 压电扬声器 .....	270
11.5.1 纵振动子型扬声器 .....	271
11.5.2 双压电晶片扬声器 .....	272
11.5.3 高分子压电扬声器 .....	272
11.6 放电型扬声器 .....	274
11.7 带式扬声器 .....	275
11.8 平板扬声器 .....	276
11.9 乐器用扬声器 .....	278
11.9.1 对乐器用扬声器所要求的性能 .....	278
11.9.2 乐器用扬声器的结构 .....	278
参考文献 .....	279

## 第 12 章 放大器与扬声器

12.1 主放大器与扬声器的关系 .....	280
12.1.1 主放大器的最大输出功率与扬声器所能承受的输入功率 .....	280
12.1.2 主放大器的输出阻抗与扬声器的特性 .....	282
12.1.3 主放大器与扬声器产生的特殊现象 .....	283
12.2 扬声器的连接法 .....	284
12.2.1 几个扬声器的连接方法 .....	284
12.2.2 音量调整方法 .....	285
12.3 动反馈扬声器 .....	287
12.3.1 动反馈(MFB)的原理 .....	287
12.3.2 动反馈的方式 .....	287
参考文献 .....	290

## 第 13 章 重放声音与房间的声学特性

13.1 瞬态声场 .....	291
13.1.1 室内声音的建立和衰减 .....	292
13.1.2 混响声 .....	292
13.1.3 混响时间与房间的关系 .....	293
13.1.4 最佳混响时间 .....	294
13.1.5 直达声和混响声(分散声) .....	295
13.2 稳态的声场 .....	297
13.2.1 房间的声压分布 .....	297
13.2.2 指向性的影响 .....	298



13.3	房间的波动现象	299
13.3.1	房间的固有振动	300
13.3.2	固有振动的简并	300
13.3.3	房间的大小与固有振动密度	301
13.3.4	驻波的防止方法	302
13.4	扬声器的放置地点及特性	303
13.4.1	镜像	303
13.4.2	扬声器放置地点与特性	304
13.5	吸声和隔声	306
13.5.1	吸声和吸声材料	306
13.5.2	隔声和隔声材料	308
13.6	立体声听声范围的扩大	309
13.6.1	立体声听声位置与声压级差	309
13.6.2	利用指向性扩大听声范围	311
13.6.3	利用反射声的方法	313
13.6.4	利用指向性和反射声的方法	314
	参考文献	315

## 第 14 章 扩声用扬声器系统

14.1	扩声用扬声器的布置设计	317
14.1.1	房间形状与扩声用扬声器的布置方式	318
14.1.2	关于声压级的研究	319
14.1.3	关于声压分布的研究	320
14.2	扩声用扬声器	321
14.2.1	对扩声用扬声器所要求的性能	321
14.2.2	指向性设计	321
14.2.3	剧场用扬声器的种类及其举例	326
14.3	抑制啸叫型扬声器	329
14.3.1	扩声装置的啸叫	329
14.3.2	抑制啸叫型扬声器	331
14.3.3	厅堂中的实际应用	333
14.4	扩声用扬声器的施工方法	335
	参考文献	338

## 第 15 章 耳机

15.1	耳机的结构和工作原理	340
15.2	对耳机所要求的性能	341