

数字扩声

工程设计与应用

◎ 谢咏冰 张飞碧 池文忠 罗蒙 刘炯 编著 ◀

DESIGN AND APPLICATION OF
DIGITAL SOUND REINFORCEMENT ENGINEERING



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

数字扩声工程设计与应用

谢咏冰 张飞碧 池文忠 罗 蒙 刘 炯 编著



机械工业出版社

本书从最基础和最本质的扩声知识着手,逐步展开和深化,既有工程计算,又有实践应用。全书分基础篇和应用篇两部分:基础篇以声学基础知识、数据通信网络和最新数字扩声技术为主题,引用了许多实用的计算公式和计算曲线;应用篇对扩声系统设计中有关参量的工程计算和系统设计、安装、测试做了详细论述,列举了剧场、体育场馆扩声工程、网络数字会议工程和数字公共广播工程等重大项目应用案例,以实用性、先进性和新颖性为宗旨,内容丰富全面。

本书主要特点是:基本原理清晰、概念准确、论述严谨、内容新颖、图文并茂、深入浅出、具有较强的系统性和实用性,可供从事数字扩声系统工程专业人员及扩声产品开发、销售人员学习使用,也可作为高等院校相关专业的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字扩声工程设计与应用/谢咏冰等编著. —北京:机械工业出版社, 2017. 2
ISBN 978-7-111-56008-1

I. ①数… II. ①谢… III. ①数字技术-应用-扩声系统-研究 IV. ①TN912.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第027086号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:何文军

责任编辑:何文军 张利萍

责任校对:樊钟英 杜雨霏 封面设计:张 静

责任印制:李 飞

北京铭成印刷有限公司印刷

2017年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·38.5印张·3插页·1074千字

0 001—3500册

标准书号:ISBN 978-7-111-56008-1

定价:149.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

序 言

扩声工程又称专业音响系统工程,广泛用于广电系统和文艺演出,是电子声学、建筑声学、听觉生理学和声乐艺术等多种知识学科结合的一种边缘科学。系统设计师和工程技术人员必须熟悉和掌握基础知识,才能更好地完成有良好效果的扩声工程。

模拟音响系统已有几十年的发展历史,各项技术已很成熟,但由于其技术本身的局限性,面对日益发展的不同空间、不同应用的需求,模拟技术显得越来越力不从心。例如,模拟扩声系统的设备组合模式是固定的,不能适应不断变化的应用需求,每次活动调试之后的调整工作都需要操作者花费许多时间和精力。

数字音响系统是以数字技术、网络传输和计算机控制为基础,特有的“软跳线”路由功能,无需改变物理连接,各种调整改变过程只需单击鼠标或在触摸屏上操控,不必改动系统设备间的任何连接,即可完成不同空间的不同应用,可以存储大量预置场景随时调用,还可实现系统和系统间的灵活简便组网和操作、编辑、存储、场景调用、系统扩展、系统升级、多路复用传输网络、远程监控和管理、系统和系统间资源共享等,实现了模拟扩声系统无法完成的工作。正是这些无与伦比的优异特性,推动了代表时代特征的数字扩声技术飞速发展。扩声系统数字化已成为扩声系统发展的必然。

在作者早年的工作过程中,一直缺乏较为系统的扩声工程设计和应用的理论参考书籍。随着近些年行业技术的高速发展及演出市场的迅猛增长,对此类书籍的需求较为迫切。

作者在26年的剧院演出系统建设工作中,先后考察了欧美等地的剧院建设和演出市场的状况,根据国内外演艺市场和技术的发展,结合近年国内完成的一些优秀剧院工程项目成功案例,以及国内外各类演出形式的发展趋势,着手编制本书。希望能为舞台扩声工艺设计和应用出一些微薄之力。

本书撰写团队除了两位经验丰富的行业资深人士罗蒙先生和刘炯先生外,还有中国演艺设备技术协会的元老、中国录音师协会专家、我国著名演出系统技术专家、信息技术专家、北京理工大学教授张飞碧先生和演艺行业著名音响师、资深专家池文忠先生。

全书共分15章。第1~10章为基础篇,以声学基础知识、数字音频技术、数据通信网络和最新数字扩声技术为主题,从最基础和最本质的知识逐步展开和深化分析,引用了许多实用的计算公式和计算曲线,这些基础知识可能会感到有些枯燥,但对从事专业扩声的工程技术人员是极为重要的;第11~15章为应用篇,详细论述了声音传播中有关参量的工程计算和系统设计、安装和测试,列举了剧场扩声工程、体育场馆工程、网络数字会议工程和数字公共广播工程等很多大型扩声工程应用案例。内容丰富全面。

本书的编撰得到以下行业著名专家和企业家的帮助和指导,排名不分先后,特此鸣谢!

中国演艺设备技术协会理事长朱新村和副理事长熊英、周春志,中国舞台美术学会会长曹琳和秘书长张旭,中国录音师协会秘书长高雨春,主任蒋伟人,执行主任兼秘书长赵同华,中国演艺设备技术协会演出场馆设备专业委员会副主任柳得安教授、赵其昌教

授,中国舞台美术学会剧场专业委员会副主任穆怀恂,中国演出行业协会会长朱克宁,上海市舞美协会会长韩生,上海电影电视技术学会副理事长朱觉,上海声学学会秘书长龚农斌教授,上海演艺协会副会长黄保娣、黄应岐、石士昌、郑善明、秘书长周建国及副秘书长马为民,上海演出行业协会会长蔡正鹤和副会长蔡建勇,上海章奎声声学顾问有限公司教授章奎声和博士宋拥民,华东建筑设计研究院声学所所长杨志刚和高级工程师周际,同济大学声学研究所蒋国荣教授、刘海生教授,同济设计院声学研究所高级工程师王静波,上海保利佳房地产开发有限公司董事长赵国昂,北京保利剧院建设有限公司董事长武晟,安恒利(国际)有限公司副总裁卢志强、曹荣臻、吕汉连、项珏和技术副总经理吴晓路,广东三基音响公司董事长闻克俭、总经理刘恩海,广州锐丰音响公司董事长王锐祥、总经理凌子斌,深圳市迪斯声学公司董事长熊孟生,深圳市易科声光科技有限公司董事长祝晓军、技术总监张涛,总装备工研院高级工程师石俊,南京视野工程有限公司董事长杨寒松,上海舞台技术研究所所长薛懿华,上海仁添灯光音响有限公司董事长杨育斌,江苏国贸酃领智能科技有限公司董事长陈宏庆,广州科显音响设备有限公司董事长严文昌。

我国扩声行业著名专家(顺序按姓氏拼音):陈一民、董滨生、费晓路、顾伟林、郭丰、何小中、刘豪、陆才根、蓝焰、马云龙、潘桂华、秦臻、任大铭、山连根、石亮光、石敏、史汇荣、侍洪勋、谈平、王福宁、王朝阳、王明义、王琦珣、魏为民、吴国强、奚永福、姚金毅、严雷、阎常青、杨翎翔、杨少华、张顺昌、张学林、张耀民、张钰、赵康康、钟建樑、周际、朱今中、左晶等。

在此有必要说明一下的是,数字音频系统以及数字扩声系统,最早在广电部门广泛使用,基于广电部门对音频信号在音质和安全等各方面的使用要求,对于系统的每个环节都提出了相应的高标准和高要求,撰写团队成员先后和南昌市、江苏省、福建省、安徽省、天津市等省市电视台及中央电视台的专家老师一起工作,学习和积累了广电数字音频系统应用的知识 and 经验。在此特别鸣谢:中央电视台荆礼甫、李枫、刘一兵,江苏省广电中心薛兵、赵镡、周克胜、沈劲松,南昌电视台徐海霞,河南电视台张玉星,新疆电视台艾可帕,重庆电视台惠愚,上海电视台徐济众、尚峰、沈大庆、陈锡云,福建省广电中心吴榕顺、林刚,安徽省广电中心潘晓军、李云光,天津市广电中心郝学术等专家的帮助和指导。

上海永加灯光音响工程有限公司王静英、余文华、吴保骏、吕建平、王新海、王正超、高宇翔、杨颖、刘玲等在提供和整理资料工作方面给予极大帮助。在此一并深表感谢。

作者借此机会,向为我国舞台扩声事业做出贡献的广大专家老师、企业家以及所有从业人员致敬!我们有缘生活在这一时代,有幸共同见证我国舞台扩声事业伴随国家改革开放的光辉历程!

由于作者水平有限,编写过程中可能有不足、不当之处,敬请专家、同行和广大读者不吝赐教和指正。

作者
2017年1月

目 录

序 言

基 础 篇

第1章 声学基础	1	1.10.6 声音的掩蔽和哈斯效应	31
1.1 声音信号的特性	1	1.11 建筑声学设计的必要性	33
1.1.1 音频信号的频谱范围	1	1.11.1 吸声材料和吸声结构	33
1.1.2 复杂信号波形的频谱	3	1.11.2 特殊吸声结构	37
1.2 声波的波长、频率和传播速度	4	第2章 音响系统技术指标测量方法和音质评价	40
1.3 声波的反射、绕射和折射	5	2.1 音响工程的客观测量	40
1.3.1 声波的反射和绕射	5	2.1.1 厅堂音响工程声学特性指标的测量方法	41
1.3.2 声波的折射	6	2.1.2 声音的清晰度和可懂度	48
1.4 声波在自由声场中的传播特性	6	2.1.3 声音清晰度的评价标准	52
1.4.1 传播方式和传播衰减	7	2.1.4 提高声音清晰度的主要技术措施	54
1.4.2 近场和远场的传播衰减	8	2.2 音质主观听音评价	55
1.4.3 平方反比定律	8	2.2.1 声音组成的三要素——音调、音色和音量	55
1.4.4 大气对高频的附加吸收衰减	9	2.2.2 频率响应特性对音质的影响——声波的音感分析	56
1.4.5 声压级叠加	9	2.2.3 人耳对失真的感觉度	58
1.5 声源的指向特性	10	2.2.4 音量对听感的影响	58
1.5.1 指向性指数 DI	10	2.2.5 音质主观评价专用节目源	58
1.5.2 指向性因数 Q	10	2.2.6 音质主观评价术语及含义	59
1.6 室内声场分布	13	2.2.7 音质主观评价的方法	61
1.6.1 室内声场的增长和衰减	13	第3章 数字音频技术基础	64
1.6.2 室内声场的结构	13	3.1 数字音频信号的数据率	64
1.6.3 指向性声源的直达声场和混响声场	15	3.2 音频信号数据压缩的依据	64
1.6.4 混响时间计算	19	3.3 实现数字化的方法	65
1.7 两个延时的“相干”宽频带音频信号的合成	21	3.3.1 取样	66
1.7.1 梳状滤波器频率和振幅的计算	23	3.3.2 量化	68
1.7.2 梳状滤波器特性对系统的影响和改进措施	24	3.3.3 编码	69
1.8 本底噪声	25	3.4 信号的频域概念和时域概念	71
1.9 倍频程频带和 $1/3$ 倍频程频带	26	3.4.1 频域概念	71
1.10 听觉生理学和心理声学	27	3.4.2 时域概念	72
1.10.1 声压级	28	3.5 数字音频压缩编码标准	73
1.10.2 响度级	28	3.5.1 MPEG-1 音频压缩编码	73
1.10.3 响度	29	3.5.2 MPEG-1 数据码流	74
1.10.4 等响度曲线	29		
1.10.5 声级计的计权曲线	29		

3.5.3	MPEG-2 音频编解码系统	75	4.9.2	同轴电缆传输网络	151
3.5.4	MPEG-4 音频压缩编码	77	4.9.3	光缆传输网络	154
3.6	MP3 数字音乐压缩技术	77	4.9.4	无线传输网络	157
3.7	常用音频文件格式	78	第5章 数字音频传输技术		160
3.7.1	声音文件	78	5.1	AES/EBU 标准	160
3.7.2	MIDI 文件	79	5.1.1	AES/EBU 的数据结构	160
3.7.3	MIDI 技术规范	80	5.1.2	AES/EBU 编码器和数据 传输系统	162
3.8	数字音频接口卡	83	5.2	CobraNet 数字音频传输技术	163
3.8.1	音频卡(声卡)	83	5.2.1	CobraNet 数据帧结构	164
3.8.2	数字音频接口	85	5.2.2	CobraNet 设备	166
第4章 数据通信网络		86	5.2.3	CobraNet 的网络架构	166
4.1	数据通信系统	86	5.3	EtherSound 数字音频传输技术	167
4.1.1	数据通信系统模型	86	5.4	Dante 数字音频传输技术	169
4.1.2	数据通信的信道概念	87	5.4.1	Dante 网络的连接方式	170
4.2	模拟传输系统	89	5.4.2	网络延时	170
4.2.1	频分复用技术	89	5.4.3	时钟同步	172
4.2.2	波分复用技术	90	5.4.4	单播、多播(组播)、广播通信	173
4.3	数字传输系统	91	5.4.5	音频信息传送的路由和控制	175
4.3.1	时分复用技术	91	5.4.6	三种以太网传输技术对比	175
4.3.2	统计时分复用技术	93	5.5	Ethernet AVB 以太网音视频 桥接技术	175
4.3.3	码分多址复用技术	94	5.5.1	Ethernet AVB 网络的构成	176
4.4	同步通信和异步通信	95	5.5.2	AVB 网络协议概要	177
4.4.1	三种基本同步方式	95	5.5.3	AVB 网络	179
4.4.2	同步通信和异步通信实施方案	95	5.6	串行多路音频数字接口	181
4.5	数据通信接口	96	5.7	HiQnet 接口	181
4.6	计算机互联网通信体系	100	第6章 传声器		182
4.6.1	电路交换和分组交换	100	6.1	传声器的分类和基本原理	182
4.6.2	计算机互联网体系和通信协议	101	6.1.1	传声器分类	182
4.7	局域网和以太网传输系统	104	6.1.2	工作原理	182
4.7.1	局域网传输系统	104	6.2	传声器的主要技术特性参数	186
4.7.2	以太网传输系统	106	6.2.1	指向特性	186
4.7.3	高速以太网	109	6.2.2	频响特性	188
4.7.4	无线局域网	116	6.2.3	开路灵敏度	189
4.8	互联网传输	118	6.2.4	动态范围和失真度	191
4.8.1	因特网的层次结构	119	6.2.5	输出阻抗	191
4.8.2	因特网的网际协议	120	6.3	传声器使用中的若干问题	191
4.8.3	因特网的传输控制协议	124	6.3.1	多途径声波对传声器频响 特性的影响	191
4.8.4	用户数据报协议	127	6.3.2	电容传声器的幻象供电	193
4.8.5	因特网地址	129	6.3.3	传输电缆的线路损失	193
4.8.6	因特网的域名系统	136	6.3.4	多传声器对系统传声增益的 影响	194
4.8.7	因特网地址空间的扩展	138	6.4	无线传声器系统	195
4.8.8	路由技术	141			
4.8.9	因特网接入	143			
4.9	传输介质	144			
4.9.1	双绞线缆传输网络	145			

6.4.1 无线传声器的主要技术指标	196	8.1.2 数字类功率放大器	323
6.4.2 优质无线传声器采用的 相关技术	197	8.1.3 网络功率放大器	327
6.4.3 正确使用无线传声器系统	199	8.2 现代扩声系统对音频功率 放大器的要求	330
6.5 常用传声器产品的技术特性	202	8.2.1 电性能指标	330
6.5.1 森海塞尔传声器	202	8.2.2 可靠性和耐用性指标	332
6.5.2 舒尔传声器	207	8.2.3 增加功率放大器的输出功率	333
第7章 扬声器系统	218	8.3 确定功率放大器与扬声器之间的 连接电缆	334
7.1 高频扬声器	218	8.4 典型产品	335
7.1.1 压缩驱动器的主要技术特性	219	8.4.1 数字类功率放大器	336
7.1.2 高音号筒类型	223	8.4.2 网络类功率放大器	351
7.1.3 高音号筒扬声器的组合应用	227	8.4.3 多通道模拟类功率放大器	353
7.1.4 其他类型的高频扬声器系统	230	第9章 调音台	356
7.2 低频扬声器系统	232	9.1 调音台的基本功能	356
7.2.1 低频扬声器单元	232	9.2 调音台分类	357
7.2.2 低频扬声器系统	233	9.3 调音台的结构	358
7.2.3 低频扬声器阵列	238	9.3.1 通道输入组件	360
7.3 中频扬声器系统	241	9.3.2 输出组件	360
7.3.1 中频压缩驱动器+中频号筒	242	9.3.3 控制和显示组件	361
7.3.2 中频扬声器阵列	242	9.4 模拟调音台的主要技术参数	362
7.4 扬声器系统的分频网络	243	9.5 数字调音台	363
7.4.1 内置无源分频网络 (功率分频器)	244	9.5.1 实况数字调音台的基本组成	364
7.4.2 电子分频器	247	9.5.2 数字调音台的功能模块	368
7.5 全频扬声器系统的结构类型	247	9.5.3 数字调音台的输入/输出接口 以及参数设置	370
7.5.1 倒相式全频扬声器系统	247	9.5.4 数字调音台的扩展、备份和 软件升级	371
7.5.2 同轴扬声器系统	247	9.6 选择调音台	371
7.5.3 恒指向性扬声器系统	248	9.7 数字调音台典型产品	373
7.6 全频扬声器阵列	248	9.7.1 DiGiCo 数字调音台	373
7.6.1 水平全频扬声器阵列	249	9.7.2 Studer Vista 8 数字调音台	377
7.6.2 垂直全频扬声器阵列	255	9.7.3 Soundcraft Vi6 数字调音台	381
7.6.3 线声源全频扬声器阵列	256	9.7.4 Stagetec 数字调音台	384
7.7 扬声器系统主要技术参数	264	9.7.5 Allen & Heath 数字调音台	394
7.8 正确选用扬声器系统	267	第10章 周边设备的原理与应用	402
7.9 典型产品	271	10.1 频率特性均衡器	402
7.9.1 d&b audiotechnik 扬声器系列	271	10.2 混响效果器	407
7.9.2 LA (L-Acoustics) 扬声器	275	10.2.1 混响效果器的原理	407
7.9.3 Meyer Sound 扬声器	279	10.2.2 混响效果器的应用和连接方法	409
7.9.4 EAW 扬声器系统	292	10.2.3 声源效果器主要技术规格	410
7.9.5 美国 JBL 扬声器	304	10.3 数字延时器	412
7.9.6 贝塔斯瑞 (β_3) 线阵列扬声器	304	10.4 声音激励器	415
7.9.7 LAX 大功率专业扬声器	314	10.5 反馈抑制器	416
第8章 音频功率放大器	321	10.5.1 产生声反馈啸叫的原因及	
8.1 各类音频功率放大器的原理和特点	321		
8.1.1 模拟类晶体管功率放大器	322		

解决方案	416	10.9 数字音频工作站	434
10.5.2 FBX 自动反馈抑制器的原理和 应用	417	10.9.1 Power-Q ADF-4000 数字音频 工作站的功能	435
10.6 信号动态处理装置	419	10.9.2 Power-Q ADF-4000 数字音频 工作站的基本工作原理	435
10.6.1 信号动态处理器的四种 工作模式	420	10.9.3 Power-Q ADF-4000 数字音频 工作站的使用要点	437
10.6.2 调节信号动态处理装置	422	10.10 网络数字音频处理器	439
10.6.3 信号动态处理装置的应用	424	10.10.1 网络数字音频处理器的特点 ..	440
10.6.4 典型产品技术特性	425	10.10.2 网络数字音频处理器的 功能模块	441
10.7 系统电子控制器	427	10.10.3 网络数字音频处理器的控制及 编程方法	442
10.7.1 系统电子控制器功能	427	10.10.4 网络数字音频处理器的接口 ..	444
10.7.2 DSC 260 数字系统控制器	428	10.10.5 典型产品	444
10.7.3 DSC 260 数字系统控制器 编程要点	428	10.11 Symetrix 数字音频处理器	452
10.8 可编程的数字音频处理器	431	10.12 Q-Sys 音频处理平台	456
10.8.1 系统配置	432		
10.8.2 系统特点	434		

应 用 篇

第 11 章 数字扩声工程设计	464	12.2.1 系统设计方案	486
11.1 数字扩声系统的功能特征	464	12.2.2 扬声器选型及声场覆盖	488
11.1.1 数字音频技术的优点	464	12.2.3 声场设计	492
11.1.2 数字扩声系统的功能特征	465	12.2.4 功率放大系统	495
11.1.3 数字调音台	466	12.2.5 数字调音台	496
11.2 数字扩声系统组成	466	12.2.6 系统数字音频处理系统	497
11.3 扩声工程分类	467	12.2.7 传声器和节目播放器	497
11.4 扩声工程设计	468	12.2.8 内部通信系统	498
11.4.1 扩声系统设计	469	12.3 上海大剧院扩声系统升级更新改造 ..	500
11.4.2 EASE 电声工程模拟设计软件 ..	470	12.3.1 大剧场扩声系统升级更新改造 ..	501
11.5 各类扩声系统的功能特征和 典型结构	471	12.3.2 系统设计和设备选型	502
11.5.1 剧场类实况数字扩声系统	471	12.3.3 系统测试数据	507
11.5.2 体育场馆数字扩声系统	474	12.3.4 系统评价	508
11.5.3 多媒体数字会议系统	476	12.4 安徽省广电新中心 3600m ² 电视演播剧场 扩声系统	508
11.5.4 流动演出数字扩声系统	478	12.4.1 演播剧场的声场设计	510
第 12 章 剧场类数字扩声工程	480	12.4.2 多工位调音系统	511
12.1 上海保利大剧院	480	12.4.3 数字信号处理器系统	512
12.1.1 大剧场扩声系统组成	481	12.4.4 传声器、音源设备	513
12.1.2 扬声器系统	481	12.4.5 信号传输分配	514
12.1.3 功率放大器	482	12.4.6 不间断电源	514
12.1.4 调音台	483	12.5 天津数字电视大厦多功能剧场	515
12.1.5 音源设备	484	12.5.1 扩声系统构成	515
12.1.6 HiQnet 实时监控平台	485	12.5.2 扬声器选型及布局	516
12.2 上海国际舞蹈中心大剧院	486	12.5.3 声场设计	517

12.5.4	调音台系统	519	14.2	多媒体数字会议系统分类	561
12.5.5	系统安全性设计	520	14.3	数字会议子系统设计	563
12.5.6	传声器和播放器	522	14.4	红外线同声传译系统设计	568
12.5.7	内部通信系统	523	14.4.1	有线同声传译系统	568
12.6	江苏大剧院歌剧厅	526	14.4.2	无线同声传译系统	568
12.6.1	歌剧厅扩声系统声场设计	528	14.4.3	红外辐射功率、通道数量、S/N 与 覆盖区/最大作用距离的关系	571
12.6.2	调音台系统	529	14.4.4	减少光干扰	573
12.6.3	观众厅扩声系统的信号处理及 功率驱动	530	14.5	无纸化多媒体会议系统	573
12.6.4	传声器、放音及周边设备	530	14.6	数字红外无线会议系统	577
12.7	社区剧院	531	第 15 章 公共广播系统	581	
第 13 章 体育比赛场（馆）数字 扩声系统	536		15.1	公共广播系统的特点	581
13.1	江阴市体育中心体育场扩声系统	541	15.2	公共广播系统的功能要求	581
13.1.1	设计方案	541	15.3	系统架构	582
13.1.2	主扩声扬声器系统的布置方式	543	15.3.1	基本小系统	582
13.1.3	信号输入/输出接口	545	15.3.2	标准系统	583
13.1.4	重点技术措施	546	15.3.3	通用系统	584
13.2	上海旗忠森林网球中心主体育馆 扩声系统	546	15.3.4	智能公共广播系统	586
13.2.1	扬声器选型和布局	547	15.3.5	传输网络	588
13.2.2	信号分配、处理、传输和 远程监控	548	15.3.6	局域网和互联网传输的 公共广播系统	588
13.2.3	自适应音量控制系统	549	15.4	公共广播系统设计	590
13.2.4	扩声系统主要设备配置	549	15.4.1	广播扬声器的选用	590
13.2.5	系统测试报告	549	15.4.2	广播区域的声压级计算	591
13.3	上海市八万人体育场扩声系统改造	550	15.4.3	广播功放与扬声器的功率匹配	591
13.3.1	系统改造措施	550	15.4.4	传输线路截面积计算	593
13.3.2	现场测试结果	554	15.4.5	紧急广播的强制切换（强插） 控制电路	594
13.4	徐州奥体中心扩声系统工程	554	15.5	公共广播应用举例	595
13.4.1	工程概述	555	15.5.1	会展中心智能广播系统	595
13.4.2	扩声系统设计	555	15.5.2	大型动物园智能广播系统	596
13.4.3	效果评价	558	15.5.3	机场公共广播系统	597
第 14 章 多媒体数字会议系统	559		15.5.4	常用公共广播系统产品简介	598
14.1	多媒体数字会议系统的组成及 基本功能	559	参考文献	604	
			作者简介	605	

基 础 篇

第1章 声学基础

专业扩声系统又称音响系统，是电声、建声和乐声等多种学科结合的一种边缘科学。系统设计必须熟悉和掌握声学基础知识、建筑声学、听觉生理学和声乐艺术等多种知识，才能完成有良好效果的音响工程。对于专业音响工作者来说，掌握一些物理声学和听觉心理学方面的知识至关重要。

本章从最基础和最本质的声学知识着手，主要阐述与扩声工程声场设计密切相关的声频信号的特性，声波的绕射和折射，声波的传播衰减，线声源和面声源，声源的指向特性，混响时间，以及听觉心理学和建筑声学设计等方面的问题。

1.1 声音信号的特性

语言和音乐信号都是连续变化的随机信号，由基频信号和多次谐波（又称泛音）组成。如果要“原汁原味”地重放这些随机信号，扩声系统必须具有符合语言和音乐的三个基本特性：均衡的频率响应特性和正确的相位特性、适宜的平均声压级和足够的声音动态范围。

1.1.1 音频信号的频谱范围

音频信号包括语音、演唱、乐声和自然界中的各种声音，信号振幅和包含的频谱随时都在变化，是一种典型的随机信号。

1. 语音

语音的频率范围为 $130\text{Hz} \sim 4\text{kHz}$ ，如图 1-1 所示。正常讲话时的声功率约为 $1\mu\text{W}$ ；与讲话者相距 200mm 时的平均声压级为 $65 \sim 69\text{dB}$ 。

语音的动态范围（即最大声压级与最小声压级的比值）为 $15 \sim 40\text{dB}$ 。

2. 演唱

歌声的频率范围比较宽，包括男低音、男中音、男高音、女中音、女高音等多个声部，基音频率范围为 $80 \sim 1100\text{Hz}$ 。男低音的基音频率范围为 $82 \sim 294\text{Hz}$ ；男中音的基音频率范围为 $110 \sim 392\text{Hz}$ ；男高音的基音频率范围为 $147 \sim 523\text{Hz}$ ；女中音的基音频率范围为 $196 \sim 698\text{Hz}$ ；女高音的基音频率范围为 $262 \sim 1047\text{Hz}$ 。演唱的全部频率范围（基音 + 泛音/谐波）可达到 $80 \sim 8000\text{Hz}$ 。

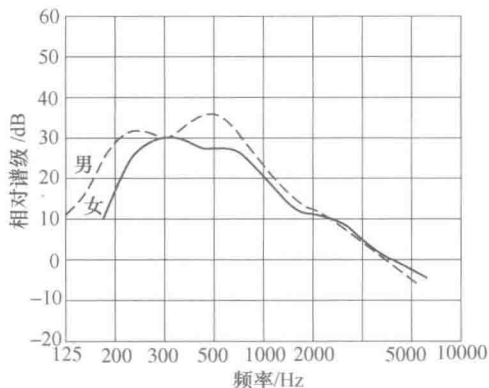


图 1-1 汉语普通话的平均频谱范围

3. 音乐信号

音乐信号的频谱范围较宽，与乐器的类型有关。在乐器中，管风琴具有最宽的基音频率范围，为 16 ~ 9000Hz；其次是钢琴，它的基音频率范围为 27.5 ~ 4136Hz；民族乐器的基音频率范围为 100 ~ 2000Hz；打击乐器可产生更高频率的基音频率；所有乐器都包含丰富的谐波，频谱的上限范围可扩展到 15000 ~ 20000Hz。

单件乐器的发声功率在 0.01 ~ 100mW 范围；大型交响乐队的声功率可达到 10W 以上。15 ~ 18 件乐器的乐队演出时，离声源 10m 处的平均声压级约为 95dB；75 件乐器的交响乐队演出时，离声源 10m 处的平均声压级约为 105dB。

乐器信号的动态范围与乐器的类型有关。木管类乐器的信号动态范围约为 50dB；一般乐器的动态范围为 40 ~ 60dB；大型交响乐队的声音动态范围可达到 100dB 以上。

高质量扩声系统的频率响应特性范围应不小于 40 ~ 18000Hz。信号动态范围至少应不小于 80dB。描述音乐信号的特征还有一些反映音乐瞬态特性的参量，例如颤音特性、持续时间及声音的建立和衰减时间等。图 1-2 是音乐节目的平均频谱。表 1-1 是语言和音乐信号的声学特性。

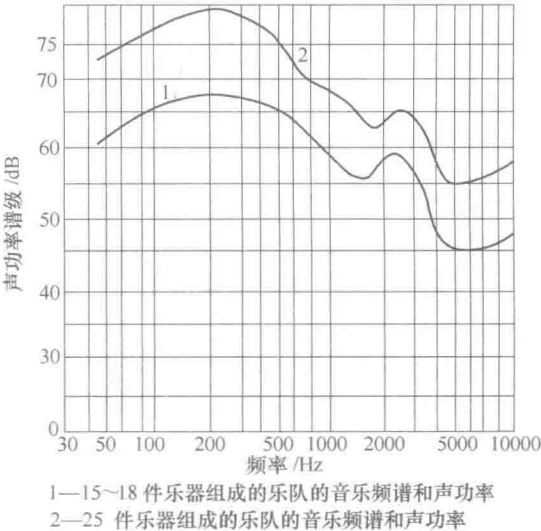


图 1-2 音乐节目的平均频谱

表 1-1 语言和音乐信号的声学特性

名称	基音频率/Hz	频率范围/Hz	声功率/mW	声压级/dB	动态范围/dB
语言	130 ~ 350	130 ~ 4000	正常讲话: 10^{-3} 大声喊话: 1.0	距声源 200mm 处的平均 声压级: 65 ~ 69dB	15 ~ 20
演唱	80 ~ 1100	80 ~ 8000			30 ~ 40
乐器	16 ~ 4000	30 ~ 18000	单件乐器: 0.01 ~ 100		30 ~ 50
交响乐		30 ~ 20000	大中型交响乐: 10W	距 15 ~ 18 件乐器的乐 队 10m 处的平均声压 级: 95 ~ 105dB	40 ~ 60
听觉		20 ~ 20000	痛阈 值: $1.0\text{W}/\text{m}^2$		120
Hi-Fi 系统		40 ~ 18000			50 ~ 55
数字扩声系统		20 ~ 20000			70 ~ 90

声音信号还有一个重要特性称为峰值因子，即最大声压级（持续时间较短的瞬态峰值信号）与长时间内的平均声压级之比，单位为 dB，如图 1-3 所示。不同节目源有不同的峰值因子。粉红噪声的峰值因子为 5.0 ~ 6.8dB，平均值为 6.0dB。扩声系统设计时，它的最大声压级必须满足峰值因子要求。否则在最大峰值信号时将会产生失真。

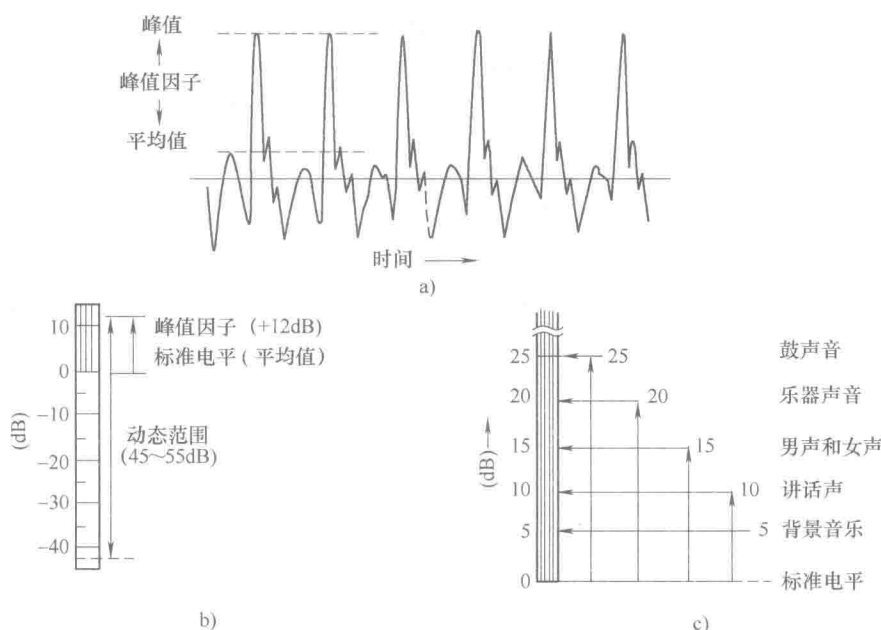


图 1-3 音频信号的峰值因子和信号的动态范围

a) 复杂信号波形 b) 峰值因子 c) 各种信号的峰值因子

统计数据表明, 语言信号的声音能量集中在 $130 \sim 4000\text{Hz}$ 频段范围内; 音乐信号声音能量的分布范围很宽, 包含在 $30 \sim 16000\text{Hz}$ 频带内, 声音能量随着频率的升高而降低。低于 100Hz 的低音和超低音频段包含的声能最大; 中音频段包含的声能开始逐步减少; 超过 4000Hz 的高音频段的声能迅速下降。自然界中这种声能变化规律恰与扬声器箱中的低音单元、中音单元和高音单元的额定功率相匹配。

1.1.2 复杂信号波形的频谱

自然界中的各种声音都不是单音 (即单频正弦波), 而是包含很多谐波的复合音。任何一种复合音, 都可分解为很多强弱不同的单音。声音的音色主要由这些谐波的数量、强度、分布和它们之间的相位关系所决定。图 1-4 是一种周期性重复的非正弦波波形, 它包含基波频率 f_0 的正弦波、相关的 $2f_0$ 、 $3f_0$ 和 $4f_0$ 多个谐波频率成分。

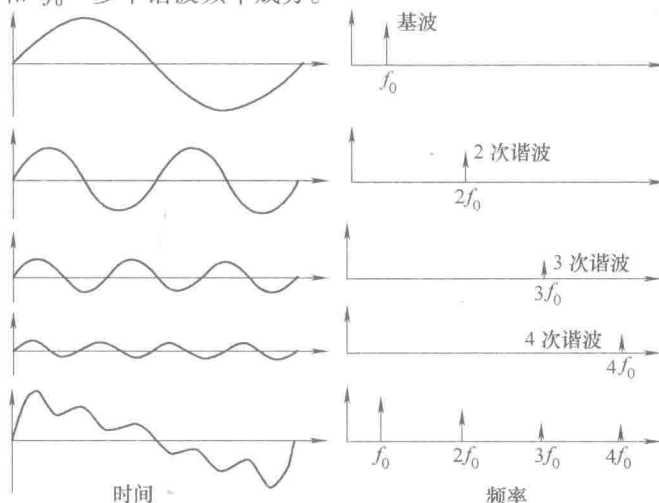


图 1-4 复杂波形的频谱图

图 1-5a 是周期性重复的锯齿波的频谱图；图 1-5b 是周期性重复的方波的频谱图，由 f_0 和 $3f_0$ 、 $5f_0$ 、 $7f_0$ 等奇次谐波组成；图 1-5c 是白噪声的频谱图，与可见光的频谱结构相同，故称为白噪声，白噪声频谱的特点是：在系统包含的频率范围内，每个频率的能量相等；图 1-5d 是粉红噪声的波形图和频谱图，它的特点是每个倍频程带宽内（即乐声中每个 8 度音所包含的频率）的频谱能量相等，这种频谱结构与自然界中各种声音频谱的结构基本相同，因此，扩声系统通常把粉红噪声作为扩声系统的测试信号源。

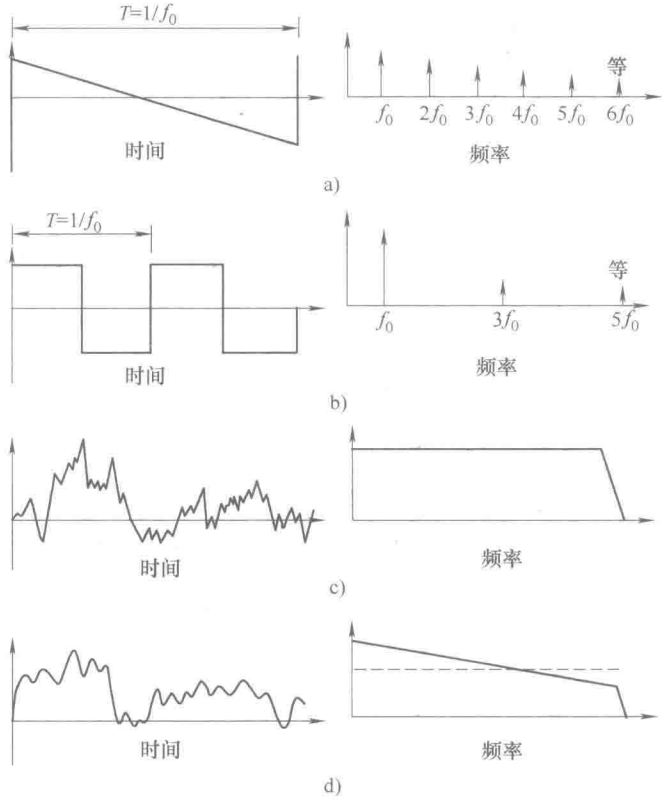


图 1-5 几种典型波形的频谱图
a) 锯齿波的频谱 b) 方波的频谱 c) 白噪声的频谱 d) 粉红噪声的频谱

1.2 声波的波长、频率和传播速度

点声源发出的声波在大气中以球面波的方式向四周扩散传播，如图 1-6 所示。人耳可闻声音的频率范围是 20Hz ~ 20kHz；声音的波长 λ 与频率 f 成反比，与其在介质中传播的速度 v 成正比，即

$$\lambda = v/f \tag{1-1}$$

式中 λ ——声波波长 (m)；
 f ——声波频率 (Hz)；
 v ——声波速度 (m/s)。

在海平面高度的普通大气中，声波的传播速度 v (m/s) 由下式确定：

$$v = 331.4 + 0.607T \tag{1-2}$$

式中 T ——摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

表 1-2 是声波在大气中传播的频率与波长对照表。

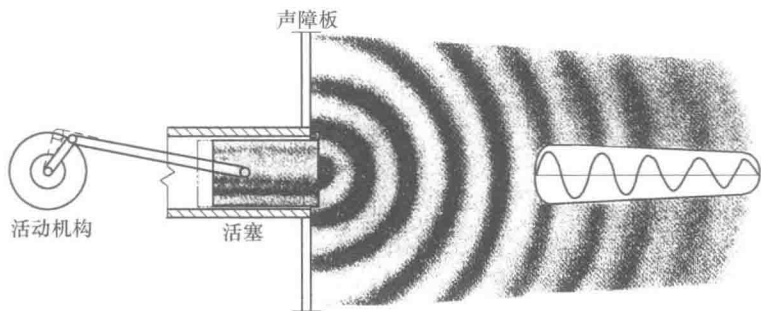


图 1-6 声波在大气中的传播

表 1-2 声波在大气中传播的频率与波长对照表

声波频率/Hz	20	50	100	500	1000	2000	5000	10000	20000
声波波长/m	17.20	6.88	3.44	0.68	0.344 (344mm)	0.172 (172mm)	0.0688 (68.8mm)	0.0344 (34.4mm)	0.0172 (17.2mm)

在一般设计中，式 (1-2) 的声波传播速度计算值已相当精确。在 21°C 的空气环境中，声波的传播速度为 $v = 344\text{m/s} = 0.344\text{km/s}$ 。声波在不同介质中传播的速度和波长是不一样的，图 1-7 是声波在不同传播介质中的传播速度。

由于声波的波长与声波的传播速度成正比，因此同样频率的声波，在不同介质中传播的波长是不同的，其相对应波长可用式 (1-1) 计算。例如：10kHz 的声波在空气中传播的波长为 $\lambda = 344/10000\text{m} = 34.4\text{mm}$ 。在游泳池水中的传播波长为 $\lambda = 1480/10000\text{m} = 148\text{mm}$ 。由此可见，传播介质的密度越高，声波的波长越长。

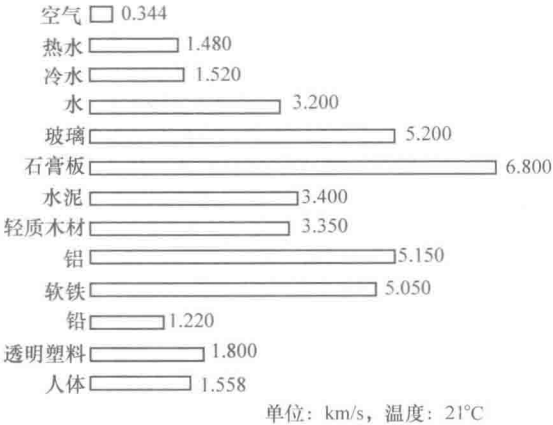


图 1-7 声波在不同传播介质中的传播速度

1.3 声波的反射、绕射和折射

1.3.1 声波的反射和绕射

如果在声波传播路径上遇有障碍物会发生怎样的情况呢？当障碍物的尺寸小于声波波长时，声波将不受阻挡继续传播（声波的绕射特性），如图 1-8a 所示；如果障碍物尺寸大于声波波长，部分声波会受阻，如图 1-8b 所示；当声波波长大于多孔障板的孔径时，大部分声波被反射；当声波波长大于多孔障板的孔距时，部分声波可以绕射通过这些小孔继续传播，声波的绕射性能与穿孔板的孔密度成正比，如图 1-8c 所示。声波的绕射特性，广泛用于扬声器箱金属面板的透声孔设计和室内建声设计，利用共振结构原理吸收中高频反射声能量，可以有效减小室内混响时间。

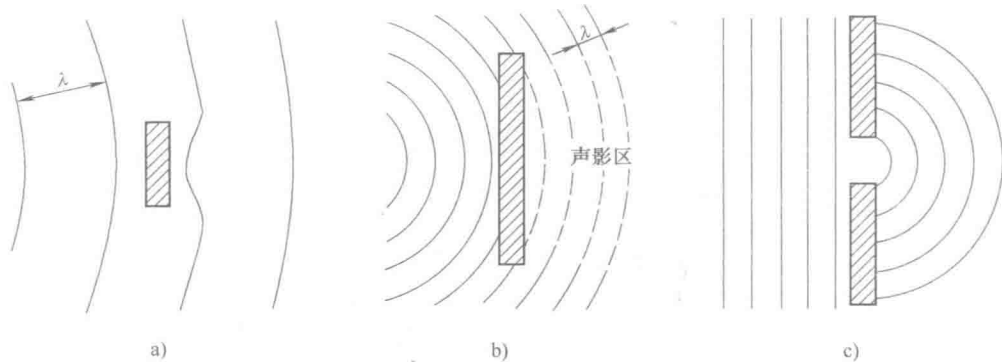


图 1-8 声波传播与绕射

a) 障碍物尺寸 < 声波波长 b) 障碍物尺寸 > 声波波长 c) 声波通过多孔板的绕射

1.3.2 声波的折射

声波的折射是指声波从一种媒质传播到另一种媒质或遇到空气层的温度、风向等实质性变化时，使声波的传播速度和传播方向发生变化的特性。此特性对室外扩声系统设计很重要。

图 1-9 是温度梯度和风速梯度对声波传播方向产生的影响。图 1-9a 是傍晚时空气温度已逐渐降下来，而大地仍然是热土的情况。图 1-9b 的情况常常发生在早上，此时地面的温度是冷的，因此声波传播可能会发生“向上跳跃”的特性，使收听区域内形成“热点”。图 1-9c 说明风向对声音传播产生的影响。如果风向是水平方向的，风速随高度的升高而增加。顺风传播时，传播速度增加，声线向地面折射；逆风传播时，声线向上折射，使地面的收听区产生阴影区，阴影区的声压级衰减可达 20dB 以上。因此顺风传播比逆风传播更有利于收听。图 1-9d 说明侧风对声音传播方向产生的影响。

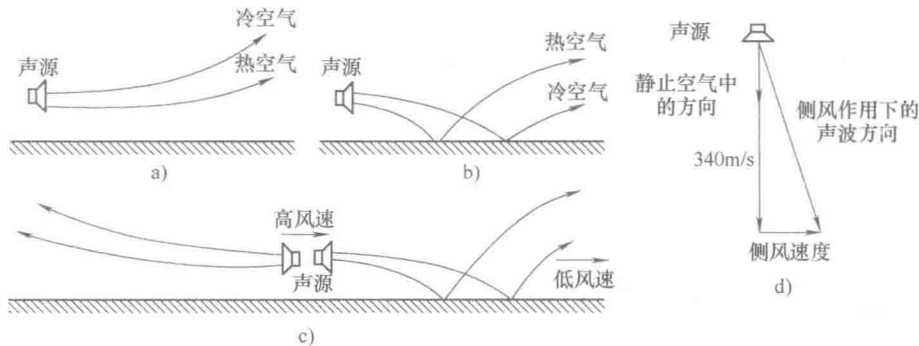


图 1-9 声波折射

a) 傍晚空气温度梯度的影响 b) 早上空气温度梯度的影响 c) 风向对声音传播的影响 d) 侧风对声音传播方向的影响

1.4 声波在自由声场中的传播特性

声波是一种行波，通过媒质的质点运动，以行波方式向空间扩散。由相位相同的各点行波构成的轨迹曲面称为“波阵面”，波阵面垂直于声波传播的方向。

1.4.1 传播方式和传播衰减

声波可以自由传播的无声障区域称为自由声场。声波在自由声场中的传播方式与声源的特性有关，不同类型的声源有不同的传播方式，可分为球面波、柱面波和平面波三种，如图 1-10 所示。

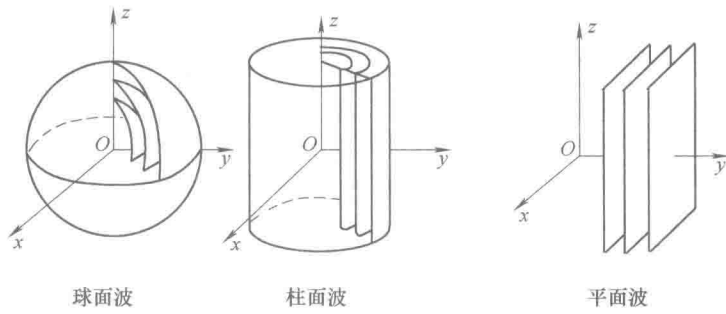


图 1-10 声波的三种传播方式

1. 球面波 (Wave spherical)

点声源以声源为球心，以球面波波阵面向四周空间扩散的声波称为球面波。点声源在自由声场中的传播衰减与距离的二次方成反比（简称平方反比定律），即传播距离每增加 1 倍，传播衰减增加 6dB。

如果声源的尺寸 L 比宽带信号中最高频率 $f_{\max}$ 声波的波长 $\lambda_{\min}$ 小 10 倍以上，则此声源可看作点声源。

2. 柱面波 (Wave cylinder)

以同轴柱面波阵面向空间扩散的声波称为柱面波。柱面波的传播衰减在近场区内每增加 1 倍距离，传播衰减增加 3dB。在远场区内，传播衰减遵守平方反比定律。

根据 Rathe 的理论，当线声源的传播距离增加到超过 L/π 时（ L 是线声源的长度），将开始遵守平方反比定律特性，即传播距离每增加 1 倍，声压级衰减增加 6dB。图 1-11a 是线声源的传播衰减曲线。

如果线阵列的长度比宽带信号中最低频率声波的波长 $\lambda_{\max}$ 大 10 倍以上，则此声源可看作线声源。

3. 平面波 (Wave plane)

以平面波阵面向空间扩散的声波称为平面波。平面波的传播衰减不遵守平方反比定律，从图 1-11b 中可看到，在 A/π 距离内，声音没有衰减； $A/\pi \sim B/\pi$ 之间（ B 为扬声器阵列的长边尺寸）距离范围内，每增加 1 倍距离，声压级衰减 3dB；当离面声源的距离超过 B/π 之后，声音的传播距离衰减将遵守平方反比定律特性，每增加 1 倍距离，声压级衰减 6dB。

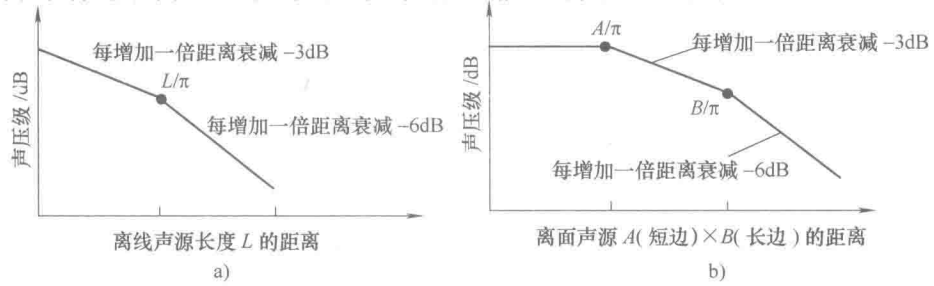


图 1-11 线声源和面声源的传播衰减特性
a) 线声源的传播衰减 b) 面声源的传播衰减