

江苏省高等学校立项建设精品教材
高等院校通信与信息专业规划教材

数字音频原理及应用

第2版

DIGITAL AUDIO
PRINCIPLES AND APPLICATIONS



卢官明 宗昉 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书赠送电子教案
www.cmpedu.com

江苏省高等学校立项建设精品教材
高等院校通信与信息专业规划教材



数字音频原理及应用

第2版

卢官明 宗 昉 编著



机械工业出版社

本书为江苏省高等学校立项建设精品教材，是《数字音频原理及应用》（卢官明、宗昉编著）的修订版。

本书系统全面地介绍了数字音频技术的基础理论、数字音频设备的工作原理及性能指标、数字音频文件格式、数字声音广播的系统组成及关键技术。全书共分11章，主要介绍了声学基础知识、音频信号的数字化、数字音频压缩编码的基本原理及相关标准、信道编码与调制技术、光盘存储技术、电子乐器数字接口（MIDI）、数字音频文件格式、音频处理与控制设备、数字音频工作站、数字声音广播、音频测量与分析等内容。每章都附有小结与习题，以指导读者加深对本书主要内容的理解。

本书注重选材，内容丰富，层次分明。在加强基本概念、基本原理的同时，注重理论与实际应用相结合，有很强的实用性。

本书可作为高等院校广播电视工程、现代教育技术、电子信息和通信类专业的本科生教材或教学参考书，也可作为数字音响工程、影视节目制作、多媒体应用与开发等领域的技术人员的岗位培训和自学用书。

图书在版编目（CIP）数据

数字音频原理及应用 / 卢官明，宗昉编著. —2版. —北京：机械工业出版社，2012.7

江苏省高等学校立项建设精品教材 高等院校通信与信息专业规划教材
ISBN 978-7-111-38892-0

I. ①数… II. ①卢… ②宗… III. ①数字技术-应用-音频设备-高等学校-教材 IV. ①TN912.271

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 132457 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：李馨馨 责任编辑：李馨馨 版式设计：纪敬
责任校对：陈越 封面设计：鞠杨 责任印制：乔宇

北京汇林印务有限公司印刷

2012 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm 22.75 印张·562 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-38892-0

定价：47.00 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

社服务中心：（010）88361066

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：（010）68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：（010）88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：（010）88379203

封面无防伪标均为盗版

高等院校通信与信息专业教材

编委会名单

(按姓氏笔画排序)

编委会主任	乐光新	北京邮电大学
编委会副主任	王金龙	解放军理工大学
	刘 陈	南京邮电大学
	张文军	上海交通大学
	张思东	北京交通大学
	杨海平	解放军理工大学
	徐澄圻	南京邮电大学
	彭启琮	电子科技大学
	曾孝平	重庆大学
编委会委员	王成华	南京航空航天大学
	王建新	南京理工大学
	冯正和	清华大学
	卢官明	南京邮电大学
	刘富强	同济大学
	刘增基	西安电子科技大学
	余 翔	重庆邮电大学
	张邦宁	解放军理工大学
	张玲华	南京邮电大学
	李少洪	北京航空航天大学
	邹家禄	东南大学
	南利平	北京信息科技大学
	赵 力	东南大学
	赵尔沅	北京邮电大学
	徐惠民	北京邮电大学
	舒 勤	四川大学
秘 书 长	胡毓坚	机械工业出版社
副 秘 书 长	许晔峰	解放军理工大学

出版说明

为了培养 21 世纪国家和社会急需的通信与信息领域的高级科技人才，为了配合高等院校通信与信息专业的教学改革和教材建设，机械工业出版社会同全国在通信与信息领域具有雄厚师资和技术力量的高等院校，组成阵容强大的编委会，组织长期从事教学的骨干教师编写了这套面向普通高等院校的通信与信息专业系列教材，并且将陆续出版。

这套教材将力求做到：专业基础课教材概念清晰、理论准确、深度合理，并注意与专业课教学的衔接；专业课教材覆盖面广、深度适中，不仅体现相关领域的最新进展，而且注重理论联系实际。

这套教材的选题是开放式的。随着现代通信与信息技术日新月异地发展，我们将不断更新和补充选题，使这套教材及时反映通信与信息领域的新发展和新技术。我们也欢迎在教学第一线有丰富教学经验的教师及通信与信息领域的科技人员积极参与这项工作。

由于通信与信息技术发展迅速，而且涉及领域非常宽，这套教材的选题和编审中难免有缺点和不足之处，诚恳希望各位老师和同学提出宝贵意见，以利于今后不断改进。

机械工业出版社
高等院校通信与信息专业规划教材编委会

第2版前言

本书第1版于2005年1月出版。由于数字音频及相关技术发展迅速，新的应用系统和标准不断涌现，作者根据最近几年的教学和科研实践，对第1版的内容进行了更新和补充，以适应新的形势和教学要求。

本书第2版在继承第1版的系统性与完整性的基础上，保留了第1版中的大部分内容，删除了一些陈旧的内容，增补了不少新的内容，同时在章节的安排上也作了适当的调整，使得层次结构更加分明。例如，将原先分散在各个章节中的一些声学基础知识集中在一起，并增补相关的内容，重新组织构成第1章声学基础知识；在第3章数字音频压缩编码中，增加了相干声学编码、MLP无损音频编码、Enhanced aacPlus编码技术、AVS音频立体声编码标准、DRA多声道数字音频编解码标准、新一代环绕多声道音频编码格式等内容；在第4章信道编码与调制技术中，删除了一些与先修课有重复的内容，增加了在蓝光光盘（BD）系统中采用的警哨码（Picket Code）、17PP调制码以及在CMMB系统中采用的LDPC码等内容；将第5章数字音频记录重放系统改名为光盘存储技术，删除了微型光盘（MD）、数字录音机，增加了数字通用光盘（DVD）、蓝光光盘（BD）和中国蓝光高清光盘（CBHD），着重介绍了光盘存储技术原理和最新成果；对第6章电子乐器数字接口（MIDI）的内容作了更新和补充；将第7章数字音频文件格式与接口标准改名为数字音频文件格式，将其中“数字音频接口标准”的内容调整到第9章数字音频工作站中，在第7章数字音频文件格式中重点介绍了资源交换文件格式（RIFF）、WAV文件格式、MP3文件格式和MIDI文件格式；在第9章数字音频工作站中，增加了音频处理接口与计算机的连接方式、音频接口连接器的种类，AES/EBU（AES3）、S/PDIF、SPDIF-2、MADI、IEEE 1394、HDMI等数字音频接口，以及Adobe Audition 3.0、Cubase SX 3和Nuendo 3等音频处理软件的内容；在第10章数字声音广播中，增加了DAB+、DRM+、CMMB系统等新的内容。每章都附有练习题，以指导读者加深对本书主要内容的理解。

本书以“音频信号数字化→压缩编码→数字存储→广播传输→指标测量”为主线，系统全面地介绍了声学基础知识、A/D和D/A转换、音频压缩编码、信道编码与调制、数字存储、数字音频文件格式、数字音频设备的工作原理及性能指标、数字声音广播的系统组成及关键技术，充分吸收相关领域的新理论、新技术、新标准和新成果，注重理论与实际应用相结合。本书可作为高等院校广播电视、电子信息、通信和计算机类专业的本科教材，也可供从事相关领域的工程技术人员和技术管理人员阅读参考。

在本书的编著过程中，作者参考和引用了前人的一些研究成果、著作和论文，具体出处见参考文献。在此，作者向这些文献的著作者表示敬意和感谢！此外，本教材作为2009年江苏省高等学校立项建设精品教材和南京邮电大学“十二五”重点规划教材，得到了江苏省教育厅和南京邮电大学的立项资助，作者在此向南京邮电大学的领导表示衷心的感谢！

鉴于作者水平所限，加之数字音频技术涉及面广，相关技术发展迅速，书中难免存在不妥之处，敬请同行专家和广大读者批评指正。

作者
2011年7月

第 1 版前言

广播电视是当今最具影响力和竞争力的现代化大众传播媒体，因其丰富的信息资源和庞大的受众群体而成为具有深远社会影响和巨大经济价值的重要信息行业。20 世纪末，一场席卷全球的数字风暴引发了广播电视行业的革命。这场以数字技术、网络技术为主的变革最先冲击了广播电视技术平台，涉及广播电视节目的采集、制作、存储、播出、传输及接收各个环节。数字化、网络化不仅使整个广播电视节目制作和传输质量都有了显著改善，信道资源利用率大大提高，更重要的是使传统的广播电视媒体从形态、内容到服务方式发生了革命性的改变。

为了适应我国广播影视业飞速发展的需要，迫切需要一大批具备广播电视工程的基本理论、基本知识和基本技能的高级专门人才。为此，多所高校最近设立了广播电视工程专业，与此同时相应地要进行课程建设。为了满足本科教学和相关专业人员自学的需求，笔者根据近年来的教学和科研经验，结合当今最新的技术发展，编写了本书。本书可作为高等院校广播电视工程、现代教育技术、电子信息和通信类专业的本科生教材或教学参考书，也可作为数字音响工程、影视节目制作、多媒体应用与开发等领域的技术人员岗位培训和自学用书。

本书共分 11 章，其中第 1 章概述了数字音频技术的发展、所涉及的关键技术及应用领域；第 2 章讲述了音频信号的数字化，介绍了 A/D、D/A 转换器的原理及性能指标；第 3 章介绍了数字音频压缩编码的基本原理以及 MPEG-1/-2/-4 和 AC-3 音频压缩编码标准；第 4 章讲述了信道编码与调制技术；第 5 章介绍了数字音频记录重放系统；第 6 章介绍了电子乐器数字接口；第 7 章介绍了数字音频文件格式与接口标准；第 8 章讲述了音频处理与控制设备的工作原理、性能指标及操作方法；第 9 章介绍了数字音频工作站的组成及主要功能；第 10 章介绍了数字音频广播（DAB）、数字中短波调幅广播（DRM）及网络广播的系统组成、关键技术及特点；第 11 章介绍了音频系统的性能指标测量与分析。从第 2 章起，每章都附有小结与习题，以指导读者加深对本书主要内容的理解。

在本书的编著过程中，参考和引用了前人的研究成果、著作和论文，具体出处见参考文献。在此，谨向这些文献的著作者表示敬意和感谢！

本书除第 8 章由宗昉编写外，其余各章由卢官明编写，宗昉也参加了资料的收集、整理工作。

由于时间仓促，作者的理论水平和教学经验有限，错误、疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正，提出宝贵意见和建议。

作 者

目 录

出版说明

第2版前言

第1版前言

第1章 声学基础知识····· 1

1.1 声波、声音与声学的概念····· 1

1.2 声音的参数与度量····· 2

1.2.1 频率、频谱、频程及相位····· 2

1.2.2 声压及声压级····· 5

1.2.3 声音的主观感觉····· 6

1.3 室内声学基础····· 8

1.3.1 室内声的组成····· 8

1.3.2 混响时间····· 9

1.4 人耳的听觉特性····· 11

1.4.1 人耳的听觉范围····· 11

1.4.2 听觉掩蔽效应····· 12

1.4.3 听觉延时效应····· 15

1.4.4 双耳效应····· 16

1.4.5 德·波埃效应····· 18

1.5 声音质量的评价····· 18

1.5.1 音质主观评价用语····· 19

1.5.2 音质主观评价用语与客观技术指标的关系····· 22

1.6 小结····· 22

1.7 习题····· 23

第2章 音频信号的数字化····· 25

2.1 音频信号的数字化概述····· 25

2.1.1 采样及采样频率····· 25

2.1.2 量化及量化误差····· 31

2.1.3 编码····· 33

2.2 A/D转换器····· 33

2.2.1 逐次比较式A/D转换器····· 33

2.2.2 A/D转换器的主要技术指标····· 35

2.3 D/A转换器····· 37

2.3.1 D/A转换器的基本原理····· 37

2.3.2 权电阻式D/A转换器····· 38

2.3.3 R-2R梯形网络式D/A转换器····· 38

2.3.4 D/A转换器的主要技术指标····· 39

2.4 过采样 Δ - Σ 调制A/D、D/A转换器····· 40

2.4.1 过采样····· 40

2.4.2 Δ - Σ 调制和噪声整形····· 41

2.4.3 1比特A/D转换器和D/A转换器····· 44

2.5 小结····· 46

2.6 习题····· 46

第3章 数字音频压缩编码····· 47

3.1 数字音频编码概述····· 47

3.1.1 音频信号的分类····· 47

3.1.2 数字音频压缩编码的机理····· 47

3.1.3 音频编解码器的性能指标····· 49

3.1.4 数字音频编码技术的分类····· 51

3.2 常用数字音频编码技术····· 53

3.2.1 线性预测编码····· 53

3.2.2 矢量量化····· 55

3.2.3 CELP编码····· 57

3.2.4 感知编码····· 58

3.2.5 子带编码····· 59

3.2.6 相干声学编码····· 61

3.2.7 MLP无损音频编码····· 65

3.3 MPEG-1音频编码标准····· 67

3.3.1 MPEG-1音频编码算法的特点····· 67

3.3.2 MPEG-1音频编码的基本原理····· 68

3.4 MPEG-2音频编码标准····· 73

3.4.1 MPEG-2 BC····· 74

3.4.2 MPEG-2 AAC····· 74

3.5 MPEG-4音频编码标准····· 78

3.5.1 自然音频编码····· 79

3.5.2 合成音频编码····· 82

3.5.3 合成/自然音频混合编码····· 84

3.6 Enhanced aacPlus编码技术····· 84

3.6.1 概述····· 84

3.6.2 谱带复制技术	85	5.2.2 CD 盘的数据记录和读出原理	136
3.6.3 参数立体声编码	88	5.2.3 CD-DA 标准摘要	138
3.7 中国制定的音频编码标准	89	5.2.4 CD-DA 的物理格式	139
3.7.1 AVS 音频立体声编码标准	89	5.3 超级音频 CD (SACD)	141
3.7.2 DRA 多声道数字音频编解码标准	91	5.3.1 SACD 的物理格式	141
3.8 新一代环绕多声道音频编码格式	95	5.3.2 1bit DSD 编码技术	142
3.8.1 Dolby Digital Plus	95	5.3.3 DST 无损压缩算法	143
3.8.2 Dolby TrueHD	96	5.3.4 版权保护技术	143
3.8.3 DTS-HD	97	5.3.5 SACD 播放机	143
3.9 小结	98	5.4 数字通用光盘 (DVD)	144
3.10 习题	98	5.4.1 DVD 简介	144
第4章 信道编码与调制技术	100	5.4.2 DVD-Audio	148
4.1 数字音频信号的处理流程	100	5.5 蓝光光盘 (BD) 和中国蓝光高清光盘 (CBHD)	151
4.2 信道编码	101	5.5.1 BD 光盘的发展简史	151
4.2.1 误码产生的原因及特点	101	5.5.2 BD 光盘的物理格式与技术特点	153
4.2.2 RS 码	101	5.5.3 中国蓝光高清光盘 (CBHD)	153
4.2.3 CIRC 纠错技术	106	5.4 小结	155
4.2.4 RSPC 码	109	5.5 习题	155
4.2.5 警哨码	111	第6章 电子乐器数字接口	157
4.2.6 卷积码	114	6.1 电子乐器数字接口概述	157
4.2.7 低密度奇偶校验码	116	6.1.1 MIDI 的概念	157
4.3 数字调制	117	6.1.2 MIDI 相关术语	158
4.3.1 调制的概念和目的	117	6.1.3 MIDI 的发展	160
4.3.2 8-10 调制	119	6.2 MIDI 乐音合成器原理	162
4.3.3 EFM 编码	119	6.2.1 频率调制合成法	162
4.3.4 EFM+ 编码	121	6.2.2 波形表合成法	163
4.3.5 17PP 调制码	121	6.3 通用 MIDI 标准	165
4.3.6 OFDM 和 COFDM 技术	122	6.3.1 MIDI 消息格式	165
4.4 小结	127	6.3.2 MIDI 系统消息	167
4.5 习题	127	6.4 MIDI 系统中的设备配置	167
第5章 光盘存储技术	128	6.4.1 MIDI 消息输入设备	168
5.1 光盘存储器概述	128	6.4.2 音序器	169
5.1.1 光盘存储技术的原理	128	6.4.3 声卡	169
5.1.2 光盘存储器的类型	129	6.4.4 音源	170
5.1.3 光盘存储系统的性能指标	131	6.4.5 采样器	170
5.1.4 光盘存储技术的发展简史	132	6.4.6 MIDI 合成器	171
5.2 激光光盘 (CD)	135	6.5 MIDI 系统连接	171
5.2.1 CD 系列产品简介	135		

6.5.1	MIDI 端口	171	8.3	均衡器	211
6.5.2	连接方式	171	8.3.1	均衡器的作用	211
6.5.3	MIDI 的通道	173	8.3.2	均衡器的种类	212
6.5.4	MIDI 系统连接实例	173	8.3.3	均衡器的基本原理	214
6.6	MIDI 设备的同步	175	8.3.4	均衡器的技术指标	215
6.6.1	SMPTE 时间码	175	8.4	声反馈抑制器	216
6.6.2	MTC 时间码	176	8.4.1	声反馈的产生原因及预防措施	216
6.7	常见的 MIDI 应用软件	177	8.4.2	声反馈抑制器的工作原理	217
6.7.1	Cakewalk Sonar	177	8.4.3	FBX-901 型声反馈抑制器	218
6.7.2	Cubase SX	177	8.5	效果处理器	219
6.7.3	CuteMIDI	177	8.5.1	室内声对调音的影响	219
6.7.4	乐音 Eyesong	178	8.5.2	延时器	220
6.7.5	作曲大师	178	8.5.3	混响器	223
6.8	小结	178	8.6	听觉激励器	226
6.9	习题	179	8.6.1	听觉激励器的作用	227
第 7 章	数字音频文件格式	180	8.6.2	听觉激励器的工作原理	227
7.1	资源交换文件格式	180	8.6.3	听觉激励器上的功能键及 调试方法	228
7.2	WAV 文件格式	182	8.6.4	听觉激励器的应用	228
7.2.1	WAV 文件的结构	182	8.7	调音台	229
7.2.2	写声音数据到 WAV 文件	185	8.7.1	调音台的基本功能	229
7.3	MP3 文件格式	187	8.7.2	调音台的分类	231
7.3.1	概述	187	8.7.3	调音台的基本构成	232
7.3.2	MP3 文件的结构	188	8.7.4	调音台的信号流程	236
7.3.3	MP3 文件实例剖析	192	8.7.5	调音台的技术指标	237
7.4	MIDI 文件格式	193	8.7.6	调音台使用中的注意事项	238
7.4.1	MIDI 文件的结构	193	8.7.7	调音台与效果处理器的 连接方式	240
7.4.2	MIDI 文件中的头块格式	194	8.7.8	数字调音台	241
7.4.3	MIDI 文件中的音轨块格式	196	8.8	小结	245
7.4.4	MIDI 文件实例	199	8.9	习题	245
7.5	其他音频文件格式	200	第 9 章	数字音频工作站	247
7.6	小结	203	9.1	概论	247
7.7	习题	203	9.2	数字音频工作站的主要功能	247
第 8 章	音频处理与控制设备	204	9.3	数字音频工作站的组成	249
8.1	音响设备的分类	204	9.3.1	主机	249
8.2	信号动态处理设备	206	9.3.2	音频处理软件	250
8.2.1	压缩器	206	9.3.3	音频处理接口	250
8.2.2	压限器	209	9.3.4	数字音频工作站的附件	255
8.2.3	扩展器与噪声门	209			
8.2.4	自动增益控制器	211			

9.4 数字音频接口标准	257	10.3.2 DRM 系统的构成	300
9.4.1 AES/EBU (AES3) 接口标准	257	10.3.3 DRM 系统的技术特点	303
9.4.2 S/PDIF 接口 (IEC 60958 民用格式)	259	10.3.4 DRM + 系统及其技术特点	304
9.4.3 SPDIF-2 接口	260	10.4 中国移动多媒体广播 (CMMB)	305
9.4.4 多通道音频数字接口	261	10.4.1 CMMB 概述	305
9.4.5 IEEE 1394 接口	262	10.4.2 CMMB 的发展历程	307
9.4.6 高清晰度多媒体接口	264	10.4.3 CMMB 系统的传输技术	309
9.4.7 其他接口	265	10.4.4 CMMB 系统的业务复用	314
9.5 音频设备间的同步实现	266	10.4.5 CMMB 系统的参数和指标	316
9.5.1 模拟设备之间的同步	266	10.5 小结	318
9.5.2 模拟设备与数字设备之间的同步	266	10.6 习题	319
9.5.3 数字音频设备之间的同步	267	第 11 章 音频测量与分析	320
9.5.4 同步方法综合运用实例	268	11.1 电平测量	320
9.6 音频处理软件	268	11.1.1 测量方法	320
9.6.1 效果器插件	268	11.1.2 电平测量单位	322
9.6.2 Adobe Audition 3.0	271	11.1.3 声音电平的监测仪表	324
9.6.3 Cubase SX 3 和 Nuendo 3	279	11.2 串音和隔离度测量	327
9.7 小结	282	11.3 噪声的测量	328
9.8 习题	282	11.4 相位和频率测量	329
第 10 章 数字声音广播	283	11.4.1 引言	329
10.1 概述	283	11.4.2 相位测量	330
10.1.1 Eureka-147 DAB 系统	283	11.4.3 频率测量	331
10.1.2 卫星数字声音广播系统	285	11.5 信号频谱分析	332
10.1.3 数字调幅广播系统	286	11.5.1 时域和频域的关系	332
10.1.4 带内同频道系统	287	11.5.2 周期性矩形脉冲的频谱	333
10.1.5 中国移动多媒体广播系统	287	11.5.3 谐波分析仪	334
10.2 数字音频广播	288	11.5.4 频谱分析仪	334
10.2.1 DAB 系统的构成	288	11.6 非线性失真的测量	335
10.2.2 DAB 系统的技术参数	290	11.6.1 基波抑制法	336
10.2.3 DAB 的覆盖方式	291	11.6.2 交互调制法	337
10.2.4 DAB 数据广播	292	11.6.3 白噪声法	339
10.2.5 DAB 接收机原理	293	11.7 眼图及抖动测量	339
10.2.6 DAB 系统的特点	296	11.7.1 眼图	339
10.2.7 新一代数字音频广播 DAB+	297	11.7.2 抖动	341
10.3 数字调幅广播 (DRM) 系统	298	11.8 小结	343
10.3.1 调幅广播的发展历程	298	11.9 习题	343
		附录 缩略语英汉对照	344
		参考文献	351

第 1 章 声学基础知识

本章学习目标:

- 了解声波、声音与声学的概念。
- 熟悉声音的特性及物理参量、声音的主观感觉及三要素。
- 了解室内声的组成及混响时间的计算。
- 熟悉人耳的听觉范围以及听阈、痛阈的概念。
- 重点掌握人耳的听觉特性，包括听觉掩蔽效应、听觉延时效应（哈斯效应）、双耳效应和德·波埃效应。
- 了解音质的主观评价用语。

1.1 声波、声音与声学的概念

声，有双重的含义：一是指弹性介质中传播的压力、应力、质点位移和质点速度等的变化。二是指上述变化作用于人耳所引起的感觉。为了清楚起见，前者可称为声波，后者则称为声音。

语音、音乐以及自然界的各种声音，都是由物体振动产生的。例如，我们讲话时，如果将手放在喉部，就会感到喉部在振动；用弓拉琴，琴弦发生振动而发声；把音频电流送入扬声器，扬声器的纸盆发生振动而发声。人的发声器官（声带），乐器的弦、击打面、薄膜等，当它们振动时，都会激励着周围的空气质点振动，由于空气具有惯性和弹性，在空气质点的相互作用下，振动物体四周的空气就交替地产生压缩与膨胀，并且逐渐向外传播形成声波。一般说来，凡是有弹性的物质，如液体和固体等，都能传播声波。

在振动介质（空气、液体或固体）中某一质点沿中间轴来回发生振动，并带动周围的质点也发生振动，逐渐向各方向扩展，这就是声波。声波的传播不是介质分子的直接位移，而是能量以波动形式的扩展。声波的能量随扩展的距离逐渐消耗，最后消失。连续振动的音叉，使周围的空气分子形成疏密相间的连续波形，如图 1-1 所示。

在空气中传播的声波是纵波，在纵波中，介质分子的振动方向和波前进的方向平行。声波传播时，介质中每个质点都是在自己的平衡位置做往返的简谐运动，所谓简谐运动就是质点的位移幅度与时间变化的关系呈正弦函数关系，如图 1-2 所示。

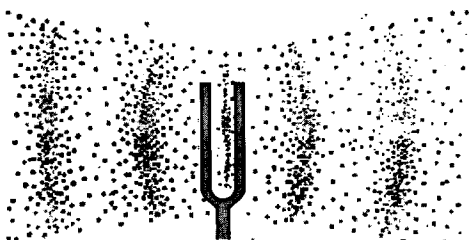


图 1-1 振动的音叉形成的声波示意图

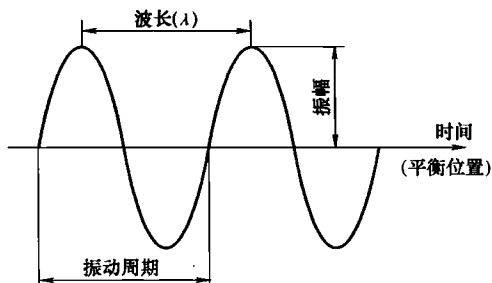


图 1-2 质点的位移幅度与时间变化的关系

产生声波的振动体称为声源（如人的声带、乐器等），声波传播的空间称为声场，声场中能够传递上述扰动的介质称为声场介质。要听到声音，必须具备三个基本条件：首先是存在声源；其次是要有传播过程中的弹性介质，即传声介质，如空气、水等；最后，要通过人耳听觉系统产生声音的主观感觉。

那么声波传播到人耳后，人耳是怎样听到声音的呢？

有关听觉产生的机理包括物理学、生理学、心理学等几个学科的交叉。我们知道，人耳是由外耳、中耳、内耳组成的。外耳和中耳之间有一层薄膜，叫做耳膜（鼓膜）。平常我们看到的耳朵就是外耳，它起着收集声波的作用。首先外面有声音进入到耳朵里来，通过外耳道传到鼓膜，使鼓膜产生相应的振动，带动耳膜后的耳骨运动，这是一个物理过程。耳骨的运动在耳蜗中产生一个响应，耳蜗周围有一些毛细胞，会刺激里面的皮层，然后产生电响应，到了这样的层次，就变成了一个生理过程，也就是说声波传播到了耳蜗，就属于生理声学研究的范畴了。声信号变成了电信号，经耳蜗神经传入人的大脑，就会产生听觉响应，这就属于心理声学研究的范畴了。所以听觉产生的机理是从物理声学到生理声学，然后再到心理声学的过程。

声学是研究声波的产生、传播、接收和效应等问题的科学。从 20 世纪以来，随着电子学的出现和放大器的应用，应用声学得到迅速发展。如今对任何频率、波形和强度的声波都可以产生、接收、测量和利用。近代声学根据研究的方法、对象和频率范围可以分成许多分支，如理论声学、电声学、建筑声学、心理声学、语言声学、水声学、超声学、分子声学、噪声学和音乐声学等。20 世纪以来，声学在工程技术和国防建设上已得到了广泛应用。

1.2 声音的参数与度量

1.2.1 频率、频谱、频程及相位

1. 频率

频率是电学和声学中的一个基本量。很多声学量都与频率有关，传声器灵敏度的校正、电声换能器频率特性的测量、厅堂音质的鉴定以及信号的分析等都离不开频率。

频率是某一质点以中间轴为中心，1s 内来回振动的次数，一般用 f 表示，单位为赫兹（Hz）。而质点完成一次全振动经过的时间为一个周期 T ，单位为秒（s）。显然， $f=1/T$ 。

在声学和电学领域里，频率一般是指正弦波信号的频率。任何信号都可以认为是各种频率的正弦波的叠加，或者说任何信号都含有正弦波的各种频率成分。人们通过对各种频率成分含量的分析，可以了解该信号的许多特性。例如，人的声音信号可以分解为各种频率正弦信号的叠加，通过频谱分析我们可以知道，男声的高频成分要比女声的高频成分少且幅度小，男声的低频成分要比女声的低频成分多且幅度大，故男声较低沉浑厚，女声较尖细。由此可见，对信号频率的分析是非常重要的。

声波的频率范围相当宽，为 $10^{-4} \sim 10^{12}$ Hz。按照频率范围可将声波分为次声（ $10^{-4} \sim 20$ Hz）、可听声（ $20 \sim 2 \times 10^4$ Hz）、超声（ $2 \times 10^4 \sim 5 \times 10^8$ Hz）和特超声（ $5 \times 10^8 \sim 10^{12}$ Hz）。

人耳可听到的频率范围是 $20 \sim 2 \times 10^4$ Hz。当然这只是一个大概的范围，实际上每个人听到的频率范围并不相同。一般来讲，青年人要比老年人听到的频率范围宽，因为随着年龄

的增长，人耳对高频声的听力会逐渐降低。

声音可以是单一频率的声音，称为纯音。而包含有几种不同频率成分的声音，则称为复合音（或称复音）。除音叉等外，大多数声源发出的声音都不是单一频率的纯音，而是由多个频率成分组合而成的复合音，如语言、音乐或噪声大多是复合音。复合音都可以分解为许多纯音之和。如果复合音的大多数纯音都集中在高频部分，就称为高频声；集中在低频部分，就称为低频声。当然，所谓高频声和低频声都是相对而言的，我们习惯上把频率低于60Hz的声音称为超低音，把60~200Hz的声音称为低音，把200~1000Hz的声音称为中音，把1000~5000Hz的声音称为中高音，而把5000Hz以上的声音统称为高音。

2. 频谱

复合音是由频率不同、振幅不同、相位不同的正弦波叠加形成的，它也是一种周期性的振动波。任何复杂的周期性振动波都可以分解为许多谐波，这称为傅里叶定律。把复杂的振动波分解成各种频率成分的过程称为傅里叶分析，也称频谱分析。在复合音中频率最低的成分（分音）称为基音。频率与基音成整倍数的分音称为谐音（谐波）。频率为基音的2倍或3倍的分音分别称为二次或三次谐音。复合音的振幅是由基音的振幅和各次谐音的振幅叠加而成的。若振幅方向相同则可相加；若振幅方向相反则要相减。图1-3给出了一个复合音被分解成基音和四次谐音的例子。

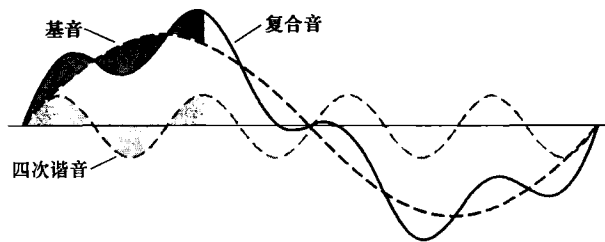


图 1-3 复合音被分解成基音和四次谐音的示意图

在复合音中，不同频率成分的声音具有不同的能量，这种频率成分与能量分布的关系称为声音的频谱。各频率成分与能量分布关系的图形称为频谱图。频谱图通常是先测定出该声音的各频率成分与相应的声压级，然后以频率为横坐标，以声压级为纵坐标进行绘图而得到。

声音（复合音）的频谱结构是用基音、谐音数目、各谐音幅度大小及相位关系来描述的。声音的音色就是由其频谱成分决定的，音调相同而音色不同的声音就是由于它们的谐音数目、谐音振幅及其随时间衰减的规律不同而产生的。各种乐器都有其特定的音色。每个人的声音都有自己独特的频谱结构，即每个人的声音都有自己的特色，正是因为这一特色的存在，我们才能从电话的声音里立即听出是谁在同自己讲话。

3. 频段

音频技术的研究和应用离不开声学测量，人耳能听到的频率范围对声学测量来说已经是很宽的了。在实际的频谱分析中，人们不需要也不可能对20~20000Hz范围内每一个频率点都进行测量。为了方便起见，同时也为了提高测量结果的可比性，人们把20~20000Hz的频率范围分为若干个频段，被划分的每一个具有一定频率范围的频段（频带）称为一个频段。

频段的划分方法通常有两种。一种是采用恒定带宽的划分方法，即每个频段的上、下限

频率之差为一常数。另一种是恒定带宽比的划分方法，即保持频程的上、下限频率之比为一常数。实验证明，当声音的声压级不变而频率提高一倍时，听起来音调也提高一倍（音乐术语上称提高八度音程）。为此，频程的划分采用恒定带宽比，即保持频程的上限频率 f_2 与下限频率 f_1 之比为一常数。

若使每一频程的上限频率比下限频率高一倍，即 $f_2 = 2f_1$ ，这样划分的每一个频程称为1倍频程，简称倍频程。为了简明起见，每个倍频程用其中心频率 f_c 来表示

$$f_c = \sqrt{f_1 f_2} \quad (1-1)$$

即中心频率用上、下限频率的几何平均表示。

我国规定的倍频程的部分频率范围及中心频率如表 1-1 所示。由该表可见，相邻两个倍频程的中心频率之比是 2 : 1。

表 1-1 倍频程的频率范围及其中心频率 (单位: Hz)

下限频率	45	90	180	355	710	1400	2800	5600
上限频率	90	180	355	710	1400	2800	5600	11200
中心频率	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000

如果对测量精度的要求高，可以增加测试频率点，如在一个倍频程的上、下限频率之间再插入两个频率点，使 4 个频率之间的比值由小到大，依次排列。这样将一个倍频程划分为 3 个频程，称这种频程为 1/3 倍频程，每个 1/3 倍频程也用其中心频率来表示。按照 1/3 倍频程的方法，可将声频范围分为更多的频带，便于较仔细地研究。表 1-2 列出了我国规定的 1/3 倍频程的部分频率范围及相应的中心频率。

表 1-2 1/3 倍频程的部分频率范围及其中心频率 (单位: Hz)

下限频率	56.2	70.8	89.1	112	141	178	224	282	355	447	562	708	891	1122	1413	1778
上限频率	70.8	89.1	112	141	178	224	282	355	447	562	708	891	1122	1413	1778	2239
中心频率	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000

上限频率和下限频率的一般关系为

$$f_2 = 2^n f_1 \quad (1-2)$$

式中， n 为倍频程的系数，即倍频程数，如对 1 倍频程，则 $n = 1$ ；对 1/3 倍频程，则 $n = 1/3$ 。

由式 (1-2) 不难得出

$$n = \log_2 \frac{f_2}{f_1} = 3.321 \lg \frac{f_2}{f_1} \quad (1-3)$$

已知中心频率，由式 (1-1) 和式 (1-2) 可以计算出上、下限频率

$$f_2 = \sqrt{2^n} f_c \quad (1-4)$$

$$f_1 = \frac{1}{\sqrt{2^n}} f_c \quad (1-5)$$

则相应的频程带宽

$$BW = f_2 - f_1 = \left(\sqrt{2^n} - \frac{1}{\sqrt{2^n}} \right) f_c = \beta f_c \quad (1-6)$$

显然，对于规定好的倍频程， β 是常数，也就是说， n 倍频程的带宽是一个恒定的百分率带宽。对于 $1/3$ 倍频程， $\beta = 0.231$ ；对于倍频程， $\beta = 0.707$ 。随着中心频率的增加，带宽是按一定比例增加的。

4. 相位

相位简称为相。声波的相位是用来描述简谐振动（正弦振动或余弦振动）在某一个瞬间的状态的。相位用相位角表示。理解相位的物理概念，对于理解声波的叠加、干涉，以及电声设备（如扬声器等）的正确连接都有重要意义。在音响系统中，音质的改变与声音信号的相位有很大的关系，许多环绕声处理器就是通过一系列的处理过程，对声波的相位进行了相应的改变，最后进行合成而形成的。

1.2.2 声压及声压级

1. 声压

对于空气介质，当没有声波时，空气处于平衡状态，其静压强一般等于大气压。当有声波传播时，介质各部分能产生压缩和膨胀的周期性变化。压缩时压强增加，大于静压强，这时压强差为正；膨胀时压强减小，小于静压强，这时压强差为负。声压是指声波传播时介质中心的压强与无声波传播时的静压强之差。声压的大小反映了声音振动的强弱，同时也决定了声波的振幅大小。

为了更具体地描述变化部分压强，可以用瞬时声压、峰值声压和有效声压等概念。瞬时声压是某点的瞬时总压强减去静压强。在某一时间间隔中最大的瞬时声压称为峰值声压。在一定时间内，瞬时声压对时间取均方根值，称为有效声压。对于周期波，在某一周期内的极大声压是这一周期中瞬时声压的极大绝对值；如所取时间等于整个周期，峰值声压就和极大声压相同。对于简谐波，峰值声压是声压的幅值，等于有效声压的 $\sqrt{2}$ 倍。如果没有特别说明，一般所称的声压指的就是有效声压，用电子仪器测量得到的通常是有效声压。声压一般用符号 p 表示，单位是帕（Pa）或微巴（ μbar ）。

声压是一个重要的声学基本量，在实际工作中经常会用到。例如，混响时间是通过测量声压随时间的衰减来求得的，扬声器频响是扬声器辐射声压随频率的变化，声速则常常是利用声压随距离的变化（驻波表）间接求得的。

2. 声压级

实验表明，人们对声音强弱的主观感觉并不正比于声压的绝对值，而是大致正比于声压的对数值。另外，人耳能感知的声压动态范围非常大，从能听到的最小声压 $2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 到能承受的最大声压 20Pa ，两者相差高达 100 万倍。所以，用声压的绝对值来表示声音的强弱显然是很不方便的。基于以上两方面的原因，常采用按对数方式分级的办法表示声音的强弱，这就是声压级。声压级用符号 L_p 表示，单位是分贝（dB），可用下式计算：

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_{\text{ref}}} \quad (1-7)$$

式中； p 为有效声压值； p_{ref} 为基准声压，一般取 $2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ ，这个数值是人耳所能听到的 1kHz 声音的最低声压，低于这一声压，人耳就无法觉察出声波的存在了。

当某声压为基准声压的 10 倍时，声压级为 20dB。同理，如果某声压为基准声压的 100、1000 或 10000 倍时，相应的声压级分别为 40dB、60dB 或 80dB。需指出的是，0dB 的声压级