

实用音响技术

SHIYONG YINXIANG JISHU

葛中海 主编



WWW

赠电子资源包



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



实用音响技术

主 编 葛中海
副主编 熊 宇
参 编 闫胜利 何立基
彭建宇 尹细妹



机械工业出版社

本书主要讲述音响设备的电路结构,以具体电路为载体,以信号流程为主线,详细地介绍了音响系统的音源设备及其选择、差动放大器与前置放大器、功率放大器设计、功率放大器制作实例、卡拉 OK 电路原理、扬声器及音箱系统,以及音响设备常见故障检修,最后介绍了一些新型数码音响。

为了提升读者的学习兴趣和实际动手能力,本书专设第 6 章,介绍了几款功率放大器的制作实例,以此希望引领读者进入功率放大器设计的实战天地。

本书形式新颖、图文并茂、分析透彻,可作为高职高专、中职中专院校电子信息类及相关专业的教学用书,并可作为广大电子爱好者、家电维修从业人士的业务参考及培训用书。

为方便读者学习,本书配有电子资源包,凡购买本书的读者可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com,免费注册下载,流程见本书最后一页。

图书在版编目 (CIP) 数据

实用音响技术/葛中海主编. —北京:机械工业出版社,2011.7
ISBN 978-7-111-34491-9

I. ①实… II. ①葛… III. ①音频设备-教材 IV. ①TN912.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 103736 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:张值胜 责任编辑:张值胜 王 琪 版式设计:霍永明
责任校对:申春香 封面设计:马精明 责任印制:杨 曦

北京双青印刷厂印刷

2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 10.5 印张 · 259 千字

0 001 — 3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-34491-9

定价:29.50 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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

《实用音响技术》从声学的基础知识开始讲起，对构成音响系统的基本单元电路，如拾音器和音源选择器、差动放大器、前置放大器逐一展开讲述，然后再讲解集成运算放大器、功率放大器和音箱系统等，结合电路基本理论就其原理、设计、使用维护和检修作了系统的介绍。希望本书能给喜爱音响的读者一些帮助。

本书共分为 10 章，系统、全面地介绍了音响电路的知识，具体如下：

章号	题 目	内 容 介 绍
1	概 述	提出音响基本概念,简单介绍音响的发展历史、分类和未来发展趋势
2	声学知识	介绍声学的基础知识、声音的度量和人耳的听觉效应
3	音源设备及其选择	介绍拾音器和音源设备的选择
4	差动放大器与前置放大器	讲述功率放大器的基本单元电路,如差动放大器、恒流源和前置放大器,作为学习后续章节的知识准备
5	功率放大器设计	1. 简单介绍功率放大器的基础理论和 OTL、OCL 及 BTL 模型电路 2. 以一个典型的实用功率放大器为例,详细介绍电路结构、元器件作用、参数选择的理论依据。然后逐次递进,引申出一系列功率放大器,具有很强的理论指导价值和实战意义
6	功率放大器制作实例	介绍几款笔者设计的实用功率放大电路,通过对它们的实际测试,引领读者进入功率放大器设计的实战天地
7	卡拉 OK 电路原理	以国内电子公司普遍采用的 PT2399 混响 IC 为核心器件,介绍卡拉 OK 电路的结构、原理和设计依据等
8	扬声器及音箱系统	介绍扬声器的分类、结构和主要参数,组成音箱系统的两类分频器、分频网络的特点,以及分频点的估算及扬声器补偿等
9	音响设备常见故障检修	介绍音响设备常见故障的一般检修流程及方法
10	新型数码音响	简单介绍目前市面上流行的新型数码音响产品,如 MP3、MP4 和 MP5,激发电子爱好者对音响技术的兴趣

与传统音响技术书籍比较，本书的特点如下：

- 1) 本书中设置以“*”标记的选读拓展性质内容，作为喜爱钻研的读者的补充阅读材料。
- 2) 引入计算机仿真波形图，作为理论分析的验证与补充，具有直观性和说服力。
- 3) 各章节内容或插图相互链接、互为借用。
- 4) 正文后面必要处用楷体字补缀“注”和“说明”等文字，介绍与正文相关的技术细节或背景资料。

5) 用元器件的 PDF[⊖] 技术参数作为元器件的补充说明, 真实、直观、具体。

为便于学习和查阅, 本书中仿真电路和 PDF 的截图所用的元器件符号 (包括图形符号、文字符号) 等技术说明有不符合现行国家标准之处未做规范及统一, 特此说明。

本书的主要素材均来源于电子产品的实际电路或教师多年的经验积累。其中第 1、2 章由中山职业技术学院闫胜利编写; 第 3、4 章由中山市火炬职业技术学院熊宇和彭建宇编写; 第 5 章由中山市技师学院尹细妹编写; 第 6、7、10 章由中山市技师学院葛中海编写; 第 8、9 章由中山市技师学院何立基编写; 葛中海任主编, 负责全书的统稿、审读和核校。

由于作者能力有限, 错误和不妥之处在所难免, 恳请广大读者提出批评指正。

编 者

⊖ PDF (Portable Datasheet File) 是一种特殊的文件格式, 直译为“便携式数据文件”, 意译为“可移植文档格式文件”, 可用 Adobe Reader 或 Adobe Acrobat 软件打开。几乎所有元器件的 Datasheet (数据文档) 和上市公司的财务报表都以 PDF 文件格式定制。

目 录

前言

第 1 章 概述 1

第 2 章 声学知识 4

2.1 声音的性质 4

2.1.1 声波的产生与传播 4

2.1.2 声波的特性 5

2.1.3 描述声波的物理量 6

2.2 声音的度量 6

2.2.1 声压 6

2.2.2 声压级 7

2.3 人耳的听觉效应 8

2.3.1 人耳与声音 8

2.3.2 声音的三要素 8

2.3.3 声音质量的度量 10

2.3.4 人耳的听觉效应* 11

第 3 章 音源设备及其选择 14

3.1 传声器 14

3.1.1 传声器的分类 14

3.1.2 传声器的结构和工作原理 16

3.1.3 驻极体传声器的连接方式 17

3.1.4 传声器的技术指标 18

3.2 音源选择电路 21

3.2.1 分立元器件互锁选择电路 21

3.2.2 集成运放互锁选择电路 22

3.2.3 模拟电子开关选择电路 26

第 4 章 差动放大器与前置放大器[⊖] 30

4.1 差动放大器 30

4.1.1 差动放大器的基本结构 30

4.1.2 共模信号和差模信号 31

4.1.3 差动放大器的 4 种接法* 33

4.1.4 改进型差动放大器* 33

4.2 恒流源 35

4.2.1 镜像恒流源 36

4.2.2 比例恒流源 36

4.2.3 微变恒流源 37

4.2.4 加射极输出器的恒流源 37

4.2.5 多路恒流源 39

4.2.6 恒流源在正、负电源侧的结构 39

4.3 集成运算放大器* 39

4.3.1 认识集成运算放大器 39

4.3.2 MC4558 集成运算放大器内部 电路分析 41

4.3.3 LM358 集成运放内部电路分析 45

4.3.4 TL084 集成运放内部电路分析 46

4.4 前置放大器 47

4.4.1 集成前置放大器 48

4.4.2 分立元器件前置放大器 50

第 5 章 功率放大器设计 52

5.1 功率放大器基础理论 52

5.1.1 功率放大器的主要技术要求 52

5.1.2 功率放大器的分类 53

5.1.3 输出无变压器 (OTL) 功率 放大器 54

5.1.4 输出无电容 (OCL) 功率 放大器 56

5.1.5 桥式推挽 (BTL) 功率放大器 57

5.2 功率放大器设计 58

5.2.1 功率放大器基本电路 58

5.2.2 功率放大器改进电路 62

5.2.3 输入级采用集成运放的电路 65

5.2.4 输入级采用差动方式的电路 67

5.2.5 输入级采用恒流源差动放大的 电路* 70

5.2.6 输入级采用镜像恒流源并带有 输出限流保护的电路* 72

5.2.7 场效应晶体管功率放大器* 74

5.2.8 国产功率放大器实例分析 76

第 6 章 功率放大器制作实例 80

6.1 用 TDA1308 制作助听器 80

6.1.1 传声器输入放大 81

⊖ 本章部分内容发表在 2010《无线电》第 10 和 11 期，本书有适当更改。

6.1.2 二级电压放大	83	8.1.2 扬声器的结构与原理	124
6.1.3 功率放大电路	83	8.1.3 扬声器的主要技术参数	125
6.2 用 TDA2822 制作两种功率放大器	85	8.2 音箱系统	127
6.2.1 TDA2822 简介	85	8.2.1 音箱的分类、结构与原理	127
6.2.2 TDA2822 构成 OTL 功放电路	86	8.2.2 音箱的主要技术参数	129
6.2.3 TDA2822 构成 BTL 功放电路	89	8.2.3 音箱的分频网络	129
6.3 用 LM391 制作单声道功率放大器	91	8.2.4 分频网络设计*	133
6.3.1 LM391 简介	91	8.2.5 扬声器分频网络补偿电路*	134
6.3.2 工作原理	92	第 9 章 音响设备常见故障检修	136
6.3.3 元件参数设计依据	94	9.1 常见故障的检修流程及方法	136
6.3.4 实际测试	95	9.1.1 检修流程	136
6.4 用 LM3886 制作立体声功率放大器	97	9.1.2 检修方法	138
6.4.1 LM3886 简介	97	9.2 具体故障的检修方法*	139
6.4.2 工作原理	98	9.2.1 音源选择电路故障检修	139
6.4.3 实际测试	103	9.2.2 前置放大器故障检修	139
6.5 用分立元器件制作甲类功率放大器*	105	9.2.3 功放电路故障检修	141
6.5.1 甲类功放概述	105	9.2.4 卡拉 OK 电路故障检修	143
6.5.2 工作原理	106	9.2.5 音箱系统故障检修	143
6.5.3 实际测试	109	第 10 章 新型数码音响*	147
6.5.4 音响发烧友经验问答	110	10.1 MP3 的定义	147
第 7 章 卡拉 OK 电路原理	113	10.2 MP3 播放器的原理	147
7.1 传声器信号放大电路	113	10.3 MP3 播放器的常用功能及相关技术术语	151
7.2 延时反馈混响电路	117	10.4 MP4 播放器	153
7.3 MIC 声音检测电路	121	10.5 MP5 播放器	154
第 8 章 扬声器及音箱系统	123	附录	156
8.1 扬声器	123	参考文献	160
8.1.1 扬声器的分类	123		

第1章 概述

1. 音响的基本概念与常见迷你音响

音响（Audio）是指经过加工修饰的、达到一定电声指标并满足特定环境需要的声响，是现代科学技术和艺术相结合的产物。

最简单的迷你组合音响一般包括 AM/FM 调谐器、CD 播放器与两个单独的扬声器；而功能更强大的则相应增加 DVD 播放器、环绕超重低音音箱，并向下兼容播放其他格式的光盘等；还有一部分迷你组合音响带有刻录机或网络收音等功能。随着人们审美观念的变化，精美、小巧的迷你音响渐渐走进许多家庭，如图 1-1 所示。

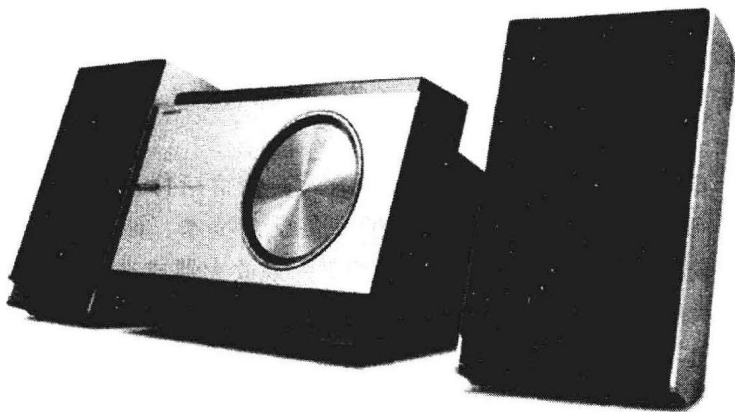


图 1-1 迷你音响

迷你音响具有外观精致、体积小等特点，可以摆放在书房的书架上，也可以安置在卧室的低柜上；另外，虽然迷你音响在体积上大大的缩小了，但是组成部分一般来说是不会缩水的，功能性也不会减少，可谓是麻雀虽小、五脏俱全。

迷你组合音响并不追求功率强劲，而是以体积小、造型美观、音质纯美、摆设方便、操作简单吸引广大消费者。目前，市场上的迷你音响品牌繁多、款式新潮。迷你音响机身虽小，但音质优美，因此选择迷你音响要以音质为主；其次，还要考虑是否有完善的售后服务，因为迷你音响体积较小，但电路设计精密，所以对其售后服务要求非常严格。

雅马哈、天龙、安桥、马兰士等厂家大多以生产专业音响为主，它们的产品造型大方、音质还原绝佳、做工考究、设计精良，在业界有广泛好评，但价格较高，多被专业人士选择。

先锋、JVC、建伍等厂家大都致力于迷你音响的开发与推广，型号繁多、产品线比较丰富，这类产品外观设计时尚超前，近乎专业音质，价格适中。另外，索尼、松下、夏普、三星、飞利浦等品牌技术精湛、设计一流，市场占有率也很高。

近些年，以奇声、步步高为代表的国产品牌虽然和国际品牌尚有一定差距，但是也加快了发展速度，同时依靠良好的本土化服务和价格优势，在市场上也占有一席之地。

2. AV 音响与 Hi-Fi 音响的区别

严格来说,只要看得见图像,听得到声音,我们就可以把这种场景叫做 AV (Audio/Video),而 Hi-Fi 是高度保真的意思。

AV 音响与 Hi-Fi 音响的区别并不是每一个普通消费者都能了解,在这里简单地介绍一下。

首先,AV 音响的价格与 Hi-Fi 音响有很大的差距,一套中高档 AV 音响的价格往往只能购买一套入门级的 Hi-Fi 系统,所以价格是 AV 音响与 Hi-Fi 音响的一个重要区别。

其次,在音箱的数量和品质要求上,AV 音响与 Hi-Fi 音响的要求完全不同。AV 音箱一般多是由几个音箱构成,这些音箱包括了卫星环绕音箱和重低音箱,这些音箱与 Hi-Fi 音箱相比,更注重音箱的功率、频响、失真效果要求等指标。

除了这些以外,AV 音箱更注重多音箱之间的协同配合效果,而 Hi-Fi 音箱则是与 AV 音箱完全相反。Hi-Fi 音箱是由两个音箱组成,它们都具有音乐还原能力和立体声效果,不具有声音渲染能力,可以保证比较高的声音真实重放效果。

3. 音响发展历史

音响技术的发展历史可以大致分为电子管、晶体管、集成电路、场效应晶体管 4 个阶段。

(1) 电子管 电子管又称胆管,1906 年美国人德福雷斯特发明了真空三极管,开创了人类电声技术的先河。1927 年贝尔实验室发明了负反馈技术,使音响技术的发展进入了一个崭新的时代,比较有代表性的有威廉逊放大器^①,该放大器成功地运用了负反馈技术,使放大器的失真度大大降低。20 世纪 50 年代,电子管放大器的发展进入了一个高潮时期,各种电子管放大器层出不穷。听过电子管音响的发烧友,大都为其甜美、柔润、醇厚的音色所折服。但真正制作一款 Hi-Fi 电子管音响,又会遇到选用高耐压、大容量的滤波电解电容,以及高质量电源变压器和输出变压器的困惑,而且其制作成本也很高,令许多业余发烧友望而却步,这也是电子管放大器难以普及的重要原因。

(2) 晶体管 20 世纪 60 年代,晶体的出现使广大音响爱好者进入了一个更为广阔的音响天地。由于晶体管放大器的价格低廉、音色细腻动人、失真较小、频响较宽及大动态范围等特点,使其成为现今最普及的音频功率放大器。

(3) 集成电路 20 世纪 60 年代初,美国首先推出音响技术中的新成员——集成电路。到了 70 年代初,集成电路以其质优价廉、体积小、功能多等特点,逐步被音响界所认可。发展至今,厚膜集成电路、集成运算放大电路已被广泛用于音响。

(4) 场效应晶体管 20 世纪 70 年代中期,日本生产出第一只场效应晶体管。由于场效应晶体管具有电子管音色温润醇厚的特性,又兼具晶体管动态大、瞬态好、高频特性好等特点,很快在音响界流行。现今的许多音频功率放大器中都采用了场效应晶体管作为末级输出。

4. 组合音响的分类

在民用音响中,前级和后级的组合有两种方式:一种把前、后级装在一起成为一个单元,

^① 1947 年 4 月,英国《无线电世界》杂志发表了 D. T. N 威廉逊的文章《高质量放大器设计》,文中详细地介绍了一款带有大环负反馈的优秀功率放大器,这就是令世人瞩目的“威廉逊功效”。

称为合并式放大器或扩音机，这种组合结构较简单，应用较普遍；另一种把前级与后级分开装成两台设备，这时的功率放大器常称为“纯后级”，这种组合结构较复杂，成本较高，但搭配较灵活。专业音响系统中则几乎全部是前、后级分开，而且大多数情况下是由调音台代替了前置放大器。

5. 音响的发展趋势

微型化、数字化、专业化、影视化是家庭音响必然的发展趋势。

(1) 微型化音响 微型台式组合音响已有较长的发展史，在 10 多年前就已经出现高级超小型组合音响，但由于扬声器、立体声电唱机、录音卡座没有很好解决，所以一直停留在较低的档次上。为了创造小巧的音响世界，不但要从放大器、控制部件、左右音箱上下功夫，还得从调谐器、CD 唱机和录音卡座方面一起考虑。

(2) 数字化音响 数字化音响的代表产品是 MP3、MP4 和 MP5。数字技术是一种新技术，数字音响是以解决模拟音响噪声的失真问题为契机发展而成。音响采用了数字技术之后，记录的数字信号从取样频率到量化特性都有清晰的解析度。随着电声技术、影视技术、计算机技术的发展，数字音响可以构成浑然一体的多媒体影视音频系统，通过电脑处理就能使受众看到各种图像和听到各种声音。

第2章 声学知识

声音 (sound) 是由物体振动产生的, 而振动在弹性介质中的传播形式就是声波, 处于一定频率范围内 ($20 \sim 20000\text{Hz}$) 的声波作用于人耳就产生了声音的感觉。人们拨动琴弦, 琴弦振动并发出声音, 这里琴弦的振动就是产生声音的根源。

如果将一个发声物体置于一个真空的罩子内, 声音则传不出来, 即声音的产生除了要有振动的物体外, 还必须要有传播声音的媒介物质, 它可以是空气、水等流体也可以是钢铁、玻璃等固体。

物体振动是产生声音的根源, 但并不是物体产生振动后一定会使人们得到声音的感觉。因为人耳能感觉到的声音频率范围只是在 $20 \sim 20000\text{Hz}$ 之间, 这个频率范围内的声音称为可听声, 频率低于 20Hz 的声音称为次声, 频率高于 20000Hz 的声音称为超声。次声和超声对于人耳来说都是感觉不到的。

描述声音高低的物理量是频率, 描述声音强弱的物理量有声压、声强以及各自相应的级, 描述声音大小的主观评价量是响度、响度级。

2.1 声音的性质

2.1.1 声波的产生与传播

1. 声波的产生

从物理学的角度来解释, 物体振动后接触到空气而促成空气压力的波动, 产生稠密层与稀疏层。空气密度大时气压高于稳态大气压力, 密度小时气压低于稳态大气压力, 这种压力波动就是造成声波传播的原因。

2. 声波的传播

声波的传播类似于石子掉入水池中造成的向四面扩散的涟漪, 即由石子的落水点开始形成一环环的同心涟漪向四面扩散, 如图 2-1 所示。

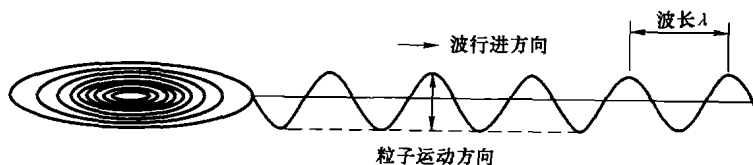


图 2-1 水波 (横波) 传播示意图

如果用图示来表示的话, 涟漪呈圆环状, 高于水平面的是波峰、低于水平面的是波谷, 波质点的振动方向与波的传播方向垂直, 所以水波是横波, 如图 2-2a 所示。声波的传播是由声源向各方向把空气交替地压紧与放松, 自声源开始形成一层层的同心球面向四面扩散, 这一层层压紧和放松的空气类似于软质弹簧的压缩和拉伸, 如图 2-2b 所示。如果用图示来

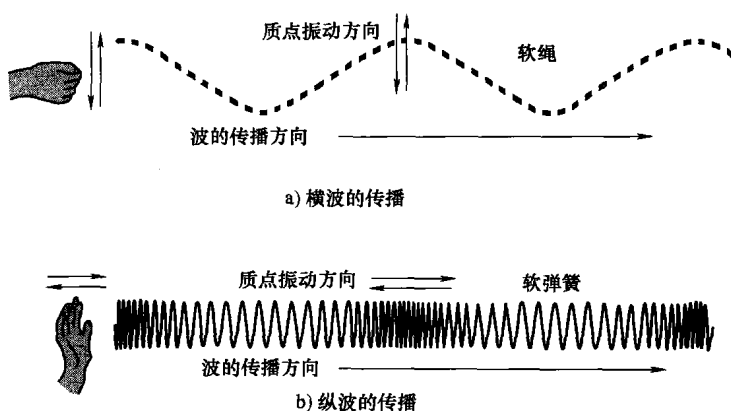


图 2-2 横波和纵波传播示意图

表示的话，声波呈球面状，空气压紧为波峰、放松为波谷，波质点的振动方向与波的传播方向平行，所以声波是纵波。

3. 声波的基本性质

- 1) 声波是由于物体（声源）的振动而产生。
- 2) 声波的传播应有相应的媒质起作用，离开传声媒质，声波无法传播。
- 3) 声波是一种机械波，因此波所具有的干涉、衍射等性质，声波也同样具有。

2.1.2 声波的特性

1. 声波的辐射

声波的辐射是指声源振动时，将一部分能量通过与其接触的弹性媒质（如水，空气）以声波的形式向四周传导的过程。

2. 声波的绕射（衍射）

“闻其声而不见其人”，这种司空见惯的现象就是声波的绕射（衍射）现象。

当声波遇到障碍物，且其尺寸 a 比声波波长小得多时，声波将产生绕射（衍射），即声波将绕过障碍物继续前进。若孔洞尺寸（直径 d ）比声波波长 λ 小得多，声波通过孔洞并不像光线那样直线传播，而是绕到障板的背面改变原来的传播方向。这时小孔处的质点可近似看作一个新声源，产生新的球面波，而与原来的波形无关。人们在墙的一侧能听到另一侧的声音，就是声波绕射的结果。声波绕射现象如图 2-3 所示。

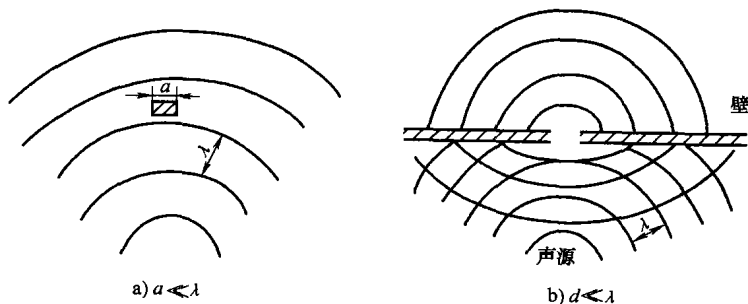


图 2-3 声波的绕射（衍射）

3. 声波的反射和折射

声波在传播过程中因介质的变化引起传播方向改变的现象，叫声波的折射。声波在不同介质中传播时，在介质的分界面上会同时发生反射与折射现象，如图 2-4 所示。

实践证明：凸形反射面对入射声波有散射作用，这将有助于使声场扩散均匀；凹形反射面会使声音在某一区域中汇聚，使得声场分布不均，这在室内声场设计中应注意避免。

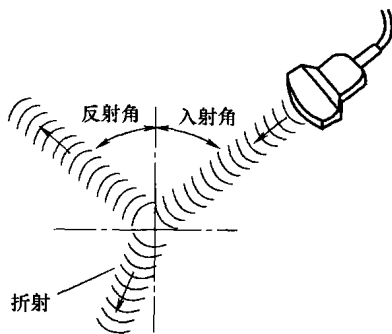


图 2-4 声波的反射和折射示意图

2.1.3 描述声波的物理量

1. 频率

声波在单位时间内波动的次数称为声波的频率，用符号 f 表示，单位是赫兹（Hz）。声波的频率等于声源振动的频率，声波的频率与振动的周期呈倒数关系： $f=1/T$ 。

2. 波长

一个波动周期内声波在介质中传播的距离，称为声波的波长，记为 λ ，单位是米（m）。

3. 声速

又称音速，指声波在介质中的传播速度，通常用符号 c 表示，单位是米/秒（m/s）。从本质上讲，声速是介质中微弱压强扰动的传播速度，不是介质振动的速度；声速的大小与介质振动的特性无关，与介质的弹性、密度和环境温度有关。常温下，声速为 340m/s。真空中无法实现声音传播。

在环境温度一定、介质确定的条件下，声速为常数，声速、频率、波长与周期之间的关系可表示为

$$c = f\lambda \quad (2-1)$$

$$\lambda = cT \quad (2-2)$$

研究表明：声速与温度成正比。例如，在近地层中，当气温随高度增加而降低，声音的传播速度随高度增加而减小，声波的射线就会向上弯曲（俗称“声音起飞了”）；反之，当气温随高度增加而升高，声音的传播速度就会随高度增加而增加，声波的射线就会向下弯曲，给人的感觉就是“声音在下沉”。

在日常生活中，常会遇到温度变化对声音的传播的影响。例如，在阴雨天气的白天，空气温度相对较低，越靠近地面空气温度较高，声波的射线向空中弯曲，人们就不容易听到远处的声音；而在天气晴朗时的傍晚，地面热量向空中辐射，使得在一定范围内，空气温度随着高度增高而上升，声波射线向下方弯曲，声波大多沿地面传播，能量损失小，人耳便更容易听到声音。

2.2 声音的度量

2.2.1 声压

音源振动带动周围的介质（如空气）产生压缩与膨胀。当空气中不存在声波时，空气

中的压强为标准大气压（静压），一个标准的大气压为 $101.3\text{kPa}^\ominus$ 。当声波传播时，空气的疏密变化将在原来的静压上叠加一个变化的压强，这个叠加的压强就是声压，声压的单位也是 Pa。

根据统计，在频率 1kHz 时人耳所能听到的最小声压为 $2 \times 10^{-5}\text{Pa}$ ，这个声压也称为参考声压 P_0 。当声压达到 20Pa 时，人们会感到声音很大，开始令人不易忍受，若声压进一步加大，将有可能对人耳造成永久性的损伤。

2.2.2 声压级

人耳所能听到的下限声压为 $2 \times 10^{-5}\text{Pa}$ ，而感到耳膜不适的上限声压约为 20Pa ，二者相差百万倍，因此用声压来表示声音的大小很不方便；并且人的听觉与声压并不成正比，而是与声压的对数成正比，因此，用声压级 L_p 作为表示声音大小的单位较为合适， L_p 的单位是分贝（dB），即

$$L_p = 20\lg(P/P_0) \quad (2-3)$$

式（2-3）中， P 为被指定的声压； P_0 为参考声压， $P_0 = 2 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 。这样，原来百万倍的变化转化为 $0 \sim 120\text{dB}$ 的变化。

表 2-1 列出了按普通人的声压级强度听觉反应，即声压级强度与人的感觉之间的关系。

表 2-1 普通人的声压级强度听觉反应

1	0 ~ 20dB	很静,几乎感觉不到
2	20 ~ 40dB	安静,犹如轻声絮语
3	40 ~ 60dB	一般,普通室内谈话
4	60 ~ 70dB	吵闹,有损神经
5	70 ~ 90dB	很吵,神经细胞受到破坏
6	90 ~ 100dB	吵闹加剧,听力受损
7	100 ~ 120dB	难以忍受,持续 1min 即暂时致聋

表 2-2 列出了一些典型声源所对应的声压级。

表 2-2 典型声源所对应的声压级

	声压 P/Pa	声压级 L_p/dB	声 源 举 例
1	0.00002	0	可听阈
2	0.0001	14	高级播音室安静时
3	0.001	34	乡村静夜
4	0.01	54	普通办公室
5	0.1	74	对话
6	1	94	广播集会
7	10	114	织布车间噪声
8	100	134	小口径炮声
9	1000	154	喷气式飞机
10	10000	174	雷击周围
11	100000	194	航天飞机推进器

$^\ominus$ Pa（帕）是压强的单位， $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ （牛顿/米²）。

2.3 人耳的听觉效应

听觉是人们对声音的主观反映，它不仅与声音的振幅、频率、频谱等客观物理量有关，还与听者的主观心理因素有关。其中的主观感觉一般用响度、音调和音色来表示，同时人耳的结构、听音者与声源的关系也会对人的听觉产生相应的影响。

2.3.1 人耳与声音

1. 人耳感知声音的路径

人耳的结构如图 2-5 所示，由外耳道、鼓膜（耳膜）、中耳腔、咽鼓管、听小骨、半规管和内耳的耳蜗等组成。声波由空气传送到耳膜，耳膜因声压的变化而振动，由中耳腔内的听小骨传到内耳蜗听觉神经，它就是我们觉察到的声音。内耳工作的原理与传声器捕获声波或扬声器的发音一样，它利用的是移动的机械部分与气压波之间的关系。

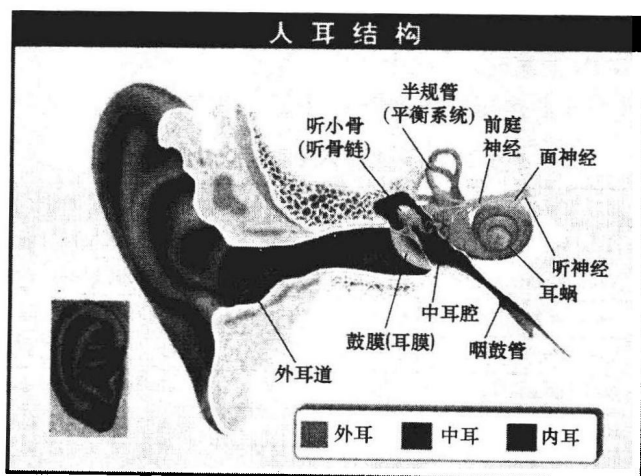


图 2-5 人耳的结构示意图

2. 人耳内的阻抗变换

耳膜振动传到耳蜗时，耳膜的机械阻抗较低，而充满淋巴液的耳蜗机械阻抗较高，为了传达的效率，需要人耳中的阻抗匹配变压器——鼓腔内的听小骨。耳膜的面积为 50mm^2 ，而镫骨（听小骨的一部分）的面积为 3.2mm^2 ，因此可以进行面积比的阻抗变换。

3. 人耳的可听频率范围

人耳能听到的频率范围是很有限的，因此通常所说的声音，是以能被人耳感觉的振动频率而言，不能引起人耳听觉反应的更高或更低的频率不能称为声音。超过人耳低频感觉以外的称为次声波（Subsonic），超过人耳高频感觉以外的称为超声波（Ultrasonic）。

人耳可以听到的频率范围为 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ （波长 $17\text{mm} \sim 17\text{m}$ ），其可听的高频部分会因人而异，并会随着年龄增高而递减，年龄越高，能听到的高频成分就越少。

2.3.2 声音的三要素

就听觉心理的性质而言，声音的三要素即响度、音调与音色；就物理特性而言，声音是

一种振动，如果用表示振动状态的基本要素度量，有强度、频率和波形三种。声音的响度大概相当于振动的强度，音调大概相当于频率，音色近似于波形。

1. 响度

人耳对声音的感觉，不仅和声压有关，还和频率有关。声压级相同、频率不同的声音，听起来响亮程度也不同。比如，空压机与电锯声压级同为 100dB，但听起来电锯声要响得多，这就是因为频率不同。按人耳对声音的感觉特性，依据声压和频率定出人对声音的主观音响感觉量，称为响度级，单位为方 (phon)。

把频率为 1kHz 的纯音作为基准音，其他频率的声音听起来与基准音一样响，该声音的响度级就等于基准音的声压级。例如，某声音的频率为 100Hz、声压级为 50dB，其响度与频率为 1kHz、声压级为 20dB 的纯音相同，则该声音的响度级为 20phon。

由响度级相同的各频率纯音的声压级连成的曲线称为等响曲线。在该曲线上，横坐标为各纯音的频率，纵坐标为达到各响度水平所需的声压级 (dB)，每一条曲线代表一个响度水平，曲线上不同频率的声压级是不相同的，但人耳感觉到的响度却是一样，因此称为等响曲线。等响曲线反映了人耳听觉感受的响度与实际声压和频率之间的关系，如图 2-6 所示。

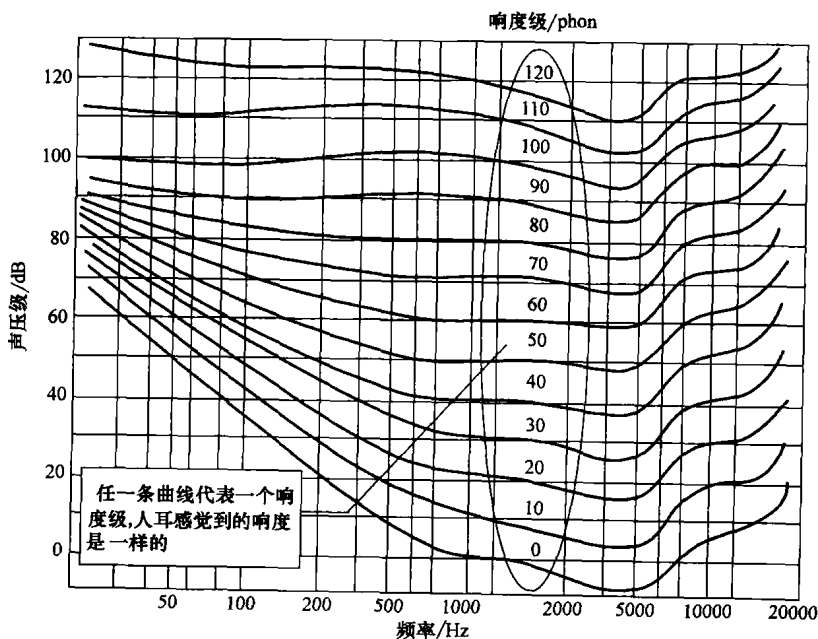


图 2-6 人耳听觉等响曲线

人耳对于 1 ~ 5kHz 的声音比较敏感。例如，同是 40phon 的响度级，对 1kHz 声音来说，声压级是 40dB，4kHz 声音的声压级则是 37dB，100Hz 声音的声压级是 52dB；30Hz 声音的声压级是 78dB。也就是说，低频的声压级为 80dB 的声音，听起来和高频的 37dB 的声音感觉是一样的。而当声压级在 80dB 以上时，各个频率的声压级与响度级的数值就比较接近了，这表明当声压级较高时，人耳对各个频率的声音的感觉基本是一样的。

人耳的上述听觉响应，对聆听高保真音乐节目的效果影响很大。人们在重放高保真音乐节目时，如果把放音设备的音量开得很大，则会感到高低音都很丰满。如果把音量开得较

小，由于人耳对低音和高音感觉较迟钝，则会感到声音的频带变窄，高、低音都减少了，特别是低音几乎听不出来，这正是等响曲线所反映的特性。

2. 音调

钢琴右键的声音比左键的声音高，女生的声音比男生高，这就是音调带来的直观感受，它是由声源在单位时间内振动次数（频率）不同所造成的。还有一个听觉的经验，就是较大物体振动的音调较低，而较小物体振动的音调较高。例如，大鼓振动声的音调较低，余振也较长；小鼓的音调较高，余振也较短。

3. 音色

人的耳朵是非常灵敏的，人耳听到声音时，立即可以辨别是哪种声音，例如是人声、乐器声、汽车声还是狗叫声等；人耳也可以辨别人声是男声或女声，是张三声还是李四声；还可以辨别敲击不同材质物体的声音，如敲铜声、敲铁声、敲木头声或敲石头声等。人耳可辨识几乎无限多种声音，对应于这种辨认的听觉印象即为音色。

自然界中没有正弦波的纯音声波，物体所发出的声音皆为复杂的波形，这种复杂的波形除了基本频率的波形之外，还会有一系列的谐振频率，也就是所谓的「泛音」（Harmonic），它与主音调有一定的「倍频」关系。例如，某物体振动的基本频率为 240Hz，也会产生 480Hz（240Hz 的二次谐波），720Hz（240Hz 的三次谐波）等频率。每一个物体的倍频的组成成分都不相同，这种不同物体发生的不同倍频成分以及各个倍频信号的幅度就是音色（Timbre）。

乐器的基音音频范围在 20Hz ~ 4kHz 之间，而音响系统的频率响应需到 20kHz 才够，这是因为乐器的声音除了基音之外，也有一系列的泛音存在。例如，钢琴的基音最高为 4186Hz，但是泛音却可以高达 16kHz，而且每一种乐器的泛音的组成成分和比例也都不一样，所以每一种乐器的音色也都不一样，这就是乐器发出的声音变化无穷、不可捉摸的地方。若音响系统的响应做不到 20kHz，乐器的高倍频泛音将会丢失，人们就听不到充分体现乐器特征的音色了。

2.3.3 声音质量的度量

评价声音的质量是一个很困难的问题，目前还在持续研究当中。一般来说，声音质量最常采用声音信号的带宽来衡量，等级由高到低依次是 DAT、CD、FM、AM 和数字电话。此外，还有两种基本的方法：一种是客观质量度量，另一种是主观质量度量。

声音客观质量的度量主要用信噪比 SNR（Signal to noise ratio），与用 SNR 度量相比较，人的感觉（如听觉）更具有决定意义。主观上的测试应该成为评价声音质量不可缺少的部分。有的学者认为，在语音和图像信号编码中使用主观度量比使用客观度量更加恰当、更有意义。

电视节目中的歌手比赛，由评委对每个歌手的表现进行评分，然后求出平均值，对声音质量的主观度量也可以采用类似的方法，召集若干实验者，由他们对声音质量的好坏进行评分，求出平均值作为对声音质量的评价。这种方法称为主观平均判分法，所得的分数称为主观平均分。现在对声音主观质量的度量比较通用的标准是 5 分制，各档次的评分标准见表 2-3。