

Audiology 高等院校听力学专业系列教材

实用听力学基础

B a s i c t h e o r y o f a u d i o l o g y

主 编 徐 飞
副主编 赵乌兰 田成华



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

高等院校听力学专业系列教材

实用听力学基础

主 编 徐 飞

副主编 赵乌兰 田成华



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

实用听力学基础/徐飞主编. --杭州:浙江大学出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-308-07895-5

I. ①实... II. ①徐... III. ①听觉—教材 IV. ①R339.16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 157785 号

实用听力学基础

主 编 徐 飞

副主编 赵乌兰 田成华

责任编辑 张 鸽

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 星云光电图文制作工作室

印 刷 杭州日报报业集团盛元印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 6.25

字 数 160 千字

版 印 次 2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-07895-5

定 价 13.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

前言

听力学(audiology)是一门研究听觉和听觉障碍的科学。第二次世界大战后,由于大量退伍军人伴有听力障碍,许多欧美国家成立了听力研究与康复机构。由此听力学逐渐脱离其他学科迅速发展起来,成为一门新兴的交叉学科。在欧美国家,听力学教育已有60余年的发展历史,已经成为一门独立学科,有完整的教育体系、执业考核体系及数量庞大的服务队伍。但在我国,在2000年以前,听力学还不是高等教育中独立的专业学科。虽然近几年来我国听力学的学科发展迅速,但服务于基层的人才匮乏、素质有限,严重影响了我国听力学的学科发展,更制约了听障人士的听觉康复。

听力学专业人才的培养,需要相配套的教材,然而在国内并没有相应的系列教材。原因在于:①听力学教育处于起步阶段,许多地方缺乏专门从事听力学教育的人员;②听力学在国内的受重视程度不高,使得听力学教育被当作医学或耳鼻咽喉科学教学的一部分,因此学生多采用医学相关教材,而没有用听力学专业教材。虽然听力学与耳科学有相同之处,但各自有不同的侧重点:耳科学教育以耳的解剖、病理生理特点为主,目标是培养具有诊断、治疗耳科疾病及施行耳科手术能力的医生;而听力学教育的目标是培养对患者听觉功能进行诊断并对其听觉功能障碍进行各种策略干预的听力学人才,更侧重培养学习者对听觉功能形成过程以及各种影响因素的了解。因此,听力学应当有本学科相应的基础理论、临床教材,并且这一教材应当符合以下要求:

1. 适应国内听力学发展现状。我国当前需要的听力学人才以应用型人才为主,因此听力学教育不能与培养耳科医生重叠,也不仅仅是培养听觉生理、物理的研究者。应该明确本学科的服务对象、工作范围,把重点放在解决听障人士的需求上。

2. 适应我国听力学教育要求。不同于国外硕士、博士的高学历要求,当前我国的听力学教育仍然以大学本科教育为主。在更好地服务于大众的同时,也需要培训其他各层次水平的听力学应用型人才。因此,在传授的相关知识时应明晰易懂,使初学者能轻松地学习掌握听力学基本理论。

3. 与国外听力学教育接轨。我国的听力学教育不仅要考虑国情需要、受教育者的水平,还需要考虑学习者继续发展的要求,应当为其在听力学领域的进一步深造

奠定基础。

根据上述要求,通过吸收不同专家的观点,我们编写了这本《实用听力学基础》教材。该教材的特点在于既向读者介绍了实用的听力学理论,又没有脱离听力学而过度涉及相关学科的深度研究。

本教材根据组成听力学基础理论的学科知识编排,即主要介绍听觉相关的声学、解剖学、生理学和心理学理论。其中,解剖和生理学的知识按照耳的结构特点合并介绍。因此,全书共分6章,第1章介绍了听觉声学的基本内容,第2~4章主要阐述了听觉系统解剖及相关的听觉生理学知识,第5章讨论了前庭系统结构与平衡功能的一些特点,第6章叙述听觉心理学的基本理论及运用。

本书的主要任务是为学习者建立实用的听力学基础知识框架,力求文字通俗易懂,由浅及深,密切联系工作实践。本书可作为听力学专业学习的基础教材,适合听力学专业学生、医院听力学工作人员、听力服务机构人员以及其他对听力学感兴趣的读者。

本书的编写得到了浙江中医药大学耳聋康复研究所王永华教授的大力支持,在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中,参考的大量科研成果和相关文献,在本书文献中未能一一列出,在此对文献作者表示深深的谢意。限于编者水平,书中不当之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见,以便再版时修正。

编者

2010年8月20日

目 录

第 1 章 听觉的声学基础	1
1.1 声音的本质	1
1.1.1 声音的本质含义	1
1.1.2 简谐振动	1
1.1.3 声波的传播	2
1.1.4 声波的表现形式	3
1.1.5 声音的参量	4
1.1.6 复合音	5
1.1.7 共振和驻波	9
1.2 声音的量度	11
1.2.1 分贝、声强级、声压级	11
1.2.2 反平方定律和声强叠加原理	12
1.3 声导抗	14
第 2 章 外耳与中耳	16
2.1 外耳的结构	16
2.1.1 耳廓	16
2.1.2 外耳道	17
2.2 外耳的生理	18
2.2.1 耳廓的生理作用	18
2.2.2 外耳道的生理作用	19
2.3 中耳的结构	20
2.3.1 鼓室	20
2.3.2 咽鼓管	23
2.3.3 鼓室与乳突	24
2.4 中耳的生理	24
2.4.1 声波在耳内传播的阻抗差异	24
2.4.2 鼓膜对声压的放大作用	25
2.4.3 听骨链的声压杠杆原理	25
2.4.4 中耳的听觉保护机制	26
2.5 中耳肌的生理作用	26



2.5.1 中耳肌收缩的声音刺激	27
2.5.2 中耳肌反射的反射弧	27
2.6 咽鼓管的生理	28
2.6.1 咽鼓管的大体结构	28
2.6.2 咽鼓管的生理功能	28
第3章 内耳	30
3.1 内耳的结构	30
3.1.1 前庭	30
3.1.2 半规管	31
3.1.3 耳蜗	31
3.1.4 耳蜗螺旋器	33
3.2 耳蜗生理机制的研究简史	35
3.3 耳蜗的机械力学	38
3.4 耳蜗的微机械运动	41
3.5 耳蜗的主动机制	42
3.6 耳蜗内环境与毛细胞转导	44
3.6.1 耳蜗内环境	44
3.6.2 毛细胞的换能机制	45
3.6.3 内耳生物电	48
第4章 听觉神经系统生理	51
4.1 听神经的生理	51
4.1.1 耳蜗毛细胞的神经支配	51
4.1.2 听神经对声音的反应	52
4.1.3 听觉的神经传导通路	56
4.2 听觉中枢的生理	57
4.2.1 耳蜗核	57
4.2.2 上橄榄复合体	57
4.2.3 外侧丘系	58
4.2.4 下丘	58
4.2.5 内侧膝状体	59
4.2.6 大脑听觉皮层	59
第5章 前庭生理学	60
5.1 前庭生理学与维持人体平衡	60
5.1.1 前庭生理学概述	60
5.1.2 人体平衡的维持	60
5.2 前庭感受器的生理	61
5.3 前庭中枢生理	61
5.3.1 前庭与眼外肌运动核的联系	61



5.3.2 前庭与脊髓运动神经元的联系	62
5.3.3 前庭与小脑间的关系	62
5.3.4 前庭与脑干网状结构的联系	62
5.4 特殊的前庭生理现象	62
5.4.1 前庭疲劳与习服现象	62
5.4.2 前庭功能代偿现象	62
5.4.3 冲动复制现象	62
第6章 听觉心理学	63
6.1 感觉心理的一般规律	63
6.1.1 感受性与感觉阈限	63
6.1.2 感觉适应	64
6.1.3 感觉对比	64
6.1.4 联觉	65
6.2 听觉心理学的测试方法	65
6.2.1 测量尺度的选择	65
6.2.2 主要测量方法	65
6.3 听觉范围	69
6.3.1 最小可听强度	69
6.3.2 听觉上限	70
6.3.3 时间总和效应	70
6.4 听觉差别感受	71
6.4.1 听觉差别感受的特点	71
6.4.2 听觉的强度差别阈	71
6.4.3 听觉的频率差别阈	71
6.4.4 听觉的时域分辨	71
6.5 响度与音调	72
6.5.1 响度	72
6.5.2 临界带宽	75
6.5.3 音调	77
6.6 听觉畸变现象	78
6.7 掩蔽现象	79
6.7.1 同时掩蔽	79
6.7.2 掩蔽的临界频带	82
6.7.3 心理声学调谐曲线	84
6.7.4 中枢掩蔽与非同时掩蔽	84
6.8 双耳听觉	84
参考文献	88

第1章 听觉的声学基础

1.1 声音的本质

声学是物理学的一个分支,可划分为几何声学、物理声学、心理声学、生理声学、超声学、水声学、建筑声学、电声学等。由于声音与言语、听觉之间有着紧密的联系,所以听觉声学的几个重要组成部分包括语言声学、生理声学和心理声学。听觉生理学虽然属生理学的分支学科,但听觉生理学的主要研究对象是听觉器官的结构与功能,对声音及言语的主观感知,识别与声音客观量之间的关系。因此,了解听觉声学中声音与听觉相关的一些物理特性是学习听力学的基础。

1.1.1 声音的本质含义

声音包括两种含义:第一种是指声波;第二种是指在生理学上,声波作用于听觉器官所引起的一种主观感觉。振动在介质中传播的过程叫做波。振动是物体的来回运动,比如一个秋千、一个钟摆、洗衣机下面的地板、音叉的叉臂、空气粒子。但只有当这种振动从一个空气粒子传到另一个空气粒子时,才被叫做声音。因此,可以说声音的本质就是由一定的能量作用于可振动的物体所产生的经某种介质进行传播的机械振动。

1.1.2 简谐振动

为了更好地理解声音的本质,我们需要对声音产生的最简单、最基本的形式——简谐振动进行分析。简谐振动(simple harmonic motion, SHM, 也称谐振动)的振动质点只在其平衡位置附近作往复运动,只含一种频率且振幅恒定不变。声波最简单的形式也是如此,即介质中每个质点都在自己平衡位置作往返的简谐运动。最典型的简谐振动是音叉的振动。要了解这种最简单的声波形式,需分解音叉的振动过程。因为音叉两个叉臂的振动是镜像关系,所以通常只需要观察其中一个叉臂。如图 1-1 所示,当用一个作用力敲击音叉后,叉臂即向内侧移动;然后又加速弹回来,在快速通过其原来静止时的位置后,叉臂继续向外侧摆动,但逐渐减速,直到最外侧;在最外侧,叉臂改变运动方向,向原静止时的中心位置加速移动,再一次通过原中点位置后继续向内侧移动,逐渐减速并且在最内侧时再一次改变方向,接着继续这样不断重复运动。一次完整的往返振动被称作一个循环(cycle)。在一秒钟时间内完成的循环次数,被称为频率(frequency)。

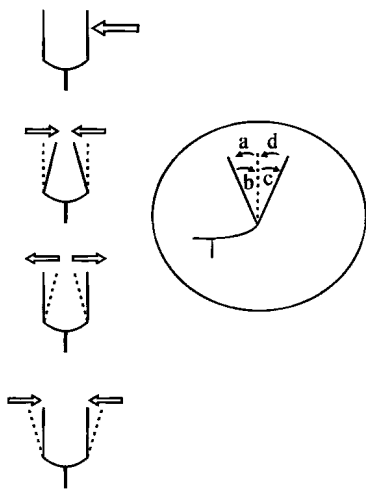


图 1-1 音叉振动示意图
(单个叉臂的摆动过程如图中 a、b、c、d 的顺序进行)



然而作用力只是敲击了叉臂一下,那么这样的运动过程是如何持续的呢?这主要取决于物体所具有的惯性和弹性。正是由于音叉的弹性,受外力作用发生变形的叉臂受到反向作用的回复力。因此,最初方向向内的作用力受到了方向向外的回复力。当叉臂被向内推动时,回复力逐渐增加,结果叉臂的运动逐渐慢下来并最终停止,在弹性回复力的作用下叉臂开始改变运动方向,向外侧运动。当回复力将叉臂拉回到中心的原位置时,需要开始考虑叉臂的质量。正因为叉臂的质量所产生的惯性作用使叉臂加速回到中心位置,当叉臂到达中心位置时达到最大速度,惯性使叉臂在中心位置没有停下来,结果弹性回复力再一次逐渐增加,超过作用方向相反的惯性力,叉臂在最外侧停止位移并改变运动方向,接着又开始重复这样一个过程。这样的一种振动,称为简谐振动。从生活中我们知道这样的振动是不会永远持续下去的,它必然会逐渐衰减并最终完全终止。由于阻力和摩擦力的作用,振动随时间逐渐减弱称为衰减(damping)。阻力的产生是因为叉臂周围与空气接触,振动的金属就会与周围的空气分子产生摩擦,这种摩擦使得一些原本维持叉臂运动的机械能被转化成了热能,因此振动逐渐衰减,振幅亦逐渐减小,最终完全停止。因此,这种振动也称阻尼振动。阻尼振动持续的时间与物体的阻尼大小有关。阻尼大则持续时间短,阻尼小则持续时间长。外来周期性策动力(振动能量)作用于机械反应系统所引起的持续性振动称受迫振动。如环境中的声波引起耳内鼓膜、听骨链以及基底膜的振动,音频电流输入耳机引起耳机膜的振动都属受迫振动。

1.1.3 声波的传播

音叉将振动传递给周围的空气微粒,由此产生了声音。音叉的振动转化成周围空气微粒的振动,也是一种简谐振动。这种与简谐振动相关的声音称为纯音。

叉臂向外侧振动时,将其外侧的空气微粒推向更外围,使得外围的空气微粒相互间更紧密,或者说使周边的大气压力增高,这种正向的空气压力称为压缩(compression)。这种压缩是随叉臂向外侧的移动逐渐增加的,并在叉臂振动到最外侧时达到最大。当叉臂向内侧移动时,被压缩的空气微粒也随之改变方向,因为空气是一种弹性介质,被压缩的空气也会产生弹性回复力。虽然空气微粒很小,但它们仍然具有质量,因此当空气微粒向内侧运动时,压缩减小,当通过中心位置时压缩变为零。当它们继续向内侧运动时,它们与原先外侧空气微粒的距离就加大了,此时,外侧的空气变稀薄了,因此叉臂外侧的空气压力低于大气压,这种低于周围大气压力的状态称为疏散(rarefaction)。当空气微粒到达最内侧时,叉臂外侧空气微粒间的疏散化达到最大,气压达到最大负值。此时,回复力又促使空气微粒向外侧运动,音叉也同时改变了方向从而推动向外侧的运动。如图 1-2 所示,当振动的音叉叉臂向外侧移位时,其外侧微粒被压缩成一个密部,此密部的空气微粒又随之推动相邻的空气微粒发生压缩,由此将密部逐渐向外传递。当音叉的叉臂开始向内侧移动时,外侧密部的空气微粒又回到其初始位置;叉臂继续向内侧移动,空气分子也跟着继续向内侧移动,从而在其初始位置形成一个疏部。此疏部的空气微粒同样也拉动相邻的空气微粒发生疏散,由此将疏部逐渐向外传递。在声源不断振动的作用下,空气分子的密部与疏部交替地向四周扩展的过程就是声波的传播。

注意:每个空气微粒在其平衡位置来回振动,导致相邻的空气微粒也随之来回振动,但它们都只在其平衡位置来回振动。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。声波的能量随扩展距离的增加而逐渐消耗,最后声音消失。

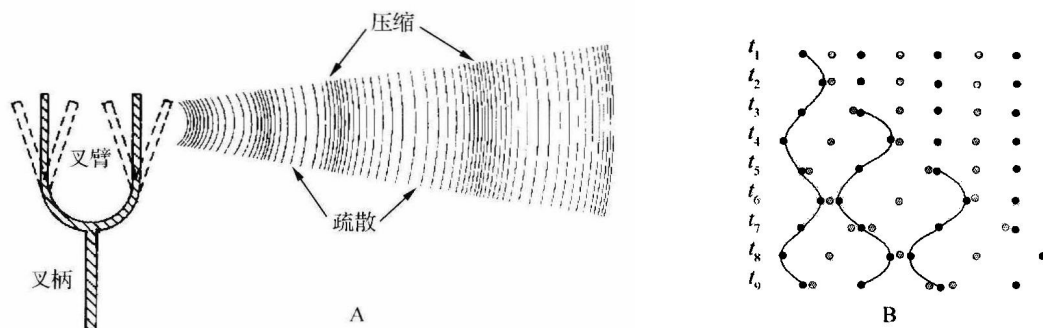


图 1-2 音叉振动传播示意图

(图 A 表示音叉叉臂振动, 带动其周围空气微粒发生振动, 从而形成疏密波向外传播; 图 B 说明从 t_1 到 t_9 几个不同时间点, 空气微粒间如何进行振动的传递, 而每个微粒只在其平衡位置作往返运动)

1.1.4 声波的表现形式

一粒石子丢进池塘时在水面上产生的波是横波, 因为微粒振动的方向与波传播的方向垂直。而声波是纵波, 因为每个空气微粒振动的方向与波传播的方向是一致的, 但将其用横波形式来表示更方便。如图 1-3 所示, 将声波的简谐运动用横波来表示时, 呈现为正弦曲线函数的形式, 因此简谐运动也称为正弦运动。

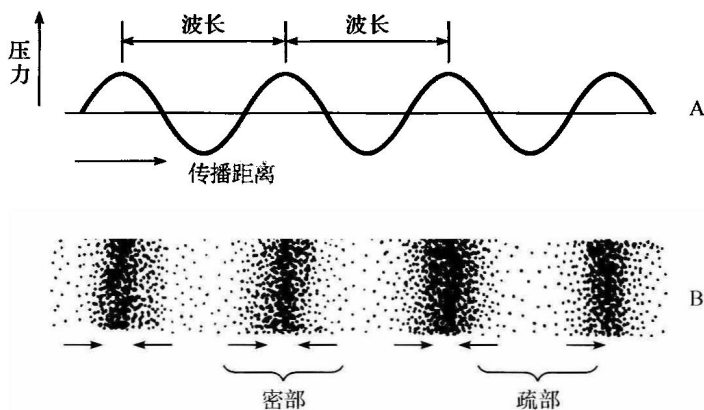


图 1-3 声波的两种表现形式

(图 A 以横波形式表示, 其纵坐标可代表压力变化或质点位移, 横坐标可代表声波的传播距离或时间; 图 B 以纵波的形式表示, 显示质点的位移、波的密部和疏部)

除上述两种表现形式外, 声波的简谐运动也可以用旋转矢量图来表示。如图 1-4 所示, 质点 (空气微粒) 在其平衡位置的往返运动过程可以用绕圆心 o 沿逆时针方向旋转的一点 P 来表示, 圆心 o 至 P 的距离以线段 r 表示, P 在振动周期内任何时刻的状态可通过旋转角度的大小来表示。 P 在零时 (一个振动周期开始时, 即图中 a 点) 的旋转夹角 θ 为零, 此时位移也为零; 当 P 的旋转角度为 45° 时 (即图中 b 点), 质点的位移为 P 点至水平轴的垂线高度 l ; 质点运动至最大正位移时, 夹角 θ 为 90° (即图中 c 点); 质点回到零点开始负移时, 夹角 $\theta = 180^\circ$; 质点达到最大负移时, 夹角 $\theta = 270^\circ$; 周期完成时, 夹角 $\theta = 360^\circ$ 。质点在周期性运动中某一瞬间所处的状态或所在



的位置称相位, 夹角 θ 称相位角。相位通常用来描述不同时间点, 变化的波之间的关系。如某点两个振幅和频率相同但初相不同的简谐振动, 当 $t=0$ 时, 它们的相位差 $=180^\circ$, 称为相位相反或简称“反相”; 当相位差为 0° 或 $360^\circ(2\pi)$ 时, 称为相位相同或简称“同相”。从图 1-4 中可以看出, 质点的位移即垂线 l 的长度, 而 l 的变化与 θ 的变化有关, 由于 r 值不变, 为方便起见可以定义 $r=1$ 。因 $\sin\theta = l/r$, 故位移(或振幅)值可从相位角的正弦值得到。例如当 $\theta = 45^\circ$ 时, $\sin\theta = 0.707$, 即此时位移值为最大位移时的 0.707。

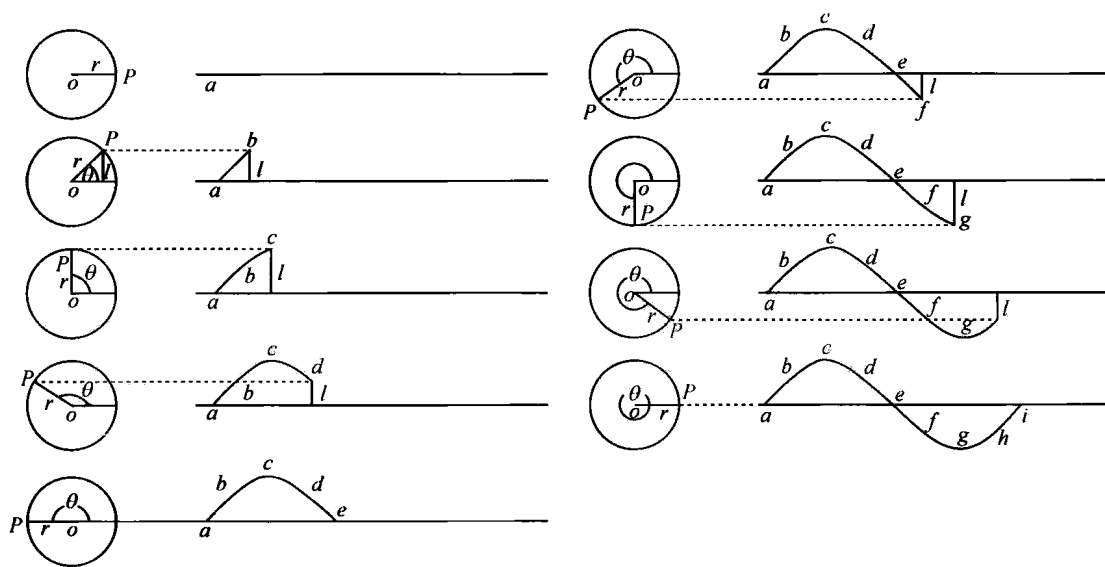


图 1-4 以圆形旋转矢量图的形式表示一个声波的简谐运动, 并将其与正弦波的表现形式进行对照 [图中 P 点代表声波某质点, a 至 i 各点表示 P 从初始位置(a)运动到最大正向位移处(c), 返回经过初始位置(e), 再到达最大负向位移处(g), 最终回到初始位置(i)。其旋转角度(相位角)从 0° 到 360°]

1.1.5 声音的参量

1. 声音的周期、频率、振幅

声音的周期是质点完成一次振动循环(cycle)所经历的时间, 以 t 表示。质点在单位时间内(秒)所作的振动循环的次数叫做振动的频率或每秒周数, 以 f 表示。频率的单位是赫兹(赫, Hz)。如某周期波每秒重复 100 次, 周期就是 $1/100\text{s}$, $t=0.01\text{s}(10\text{ms})$ 。周期与频率的关系: $f=1/t$, $t=1/f$ 。人耳听觉的感受范围是 $20\sim 20000\text{Hz}$, 这一频带称为声频, 高于此范围者为超声, 低于此范围者为次声。人的听觉频率范围有个体差异, 个别受试者的低频下限可达 $10\sim 16\text{Hz}$, 然而一般情况下, 对于小于 50Hz 的声音, 往往由振动感觉代替了低频听觉; 有的人高频听觉上限可达 24000Hz , 某些儿童甚至能听到高达 30000Hz 的声音。与人类信息交往关系最密切的是言语频率范围, 即 $500\sim 3000\text{Hz}$ 的声音频率。

振幅是指质点离开平衡位置的位移, 其通常反映振动质点的位移、能量和压力。任何瞬间质点离开平衡位置的距离称振动的瞬时值。瞬时值可以是正值也可以是负值。最大的瞬时值又称峰值。如图 1-5 所示, 一个波的峰-峰振幅是这个波的正向波峰与负向波谷之间的距离。但这既不能反映波的整体, 也不能反映波的变化。由于振幅不断改变, 因此测量瞬间的某个振幅不如测量“总体平均振幅”。但总体平均振幅不是简单地将所有瞬时振幅值平均, 因为正值和负值会相



互抵消,所以用“均方根”的平均方法更有效,即将所有正值和负值先平方,再平均,再开方。对于正弦波,均方根值通常是峰值的 70.7%(0.707)或峰-峰值的 0.354。

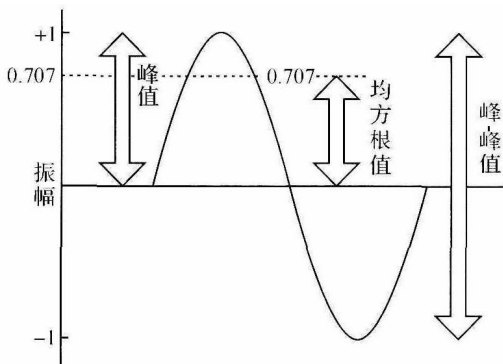


图 1-5 分别用峰值、均方根值、峰-峰值三种方式来表示一个正弦波的振幅

2. 声音的波长、声速

波长是一个波在一个振动循环内传播的距离。在物理学上,波长通常用希腊字母 λ (lambda) 来表示。我们熟悉的水波,其波长就是相邻两个波浪尖或两个波谷之间的距离。但声波则表现为一个压缩峰与下一个压缩峰之间的距离,或者一个疏谷点与下一个疏谷点之间的距离。由此也可以说,在某一固定的频率中,沿着波的传播方向,在波形中离平衡位置的位移与时间皆相同的任意两个质点之间的最短距离都是一个波长。

声速指单位时间内声波在介质中传播的距离。不同介质的声波传播速度有差别,介质密度高者声速快;介质密度低者声速慢;没有介质存在时(如在真空中),声音不能传播。例如在密度较高的象牙中,声速约为 3013m/s,颅骨与骨性耳蜗的声速与此值近似;在密度较低的水中,声速为 1437m/s,内耳淋巴液的声速大约接近此值;空气中的声速约为 334m/s,外耳道气柱的声速大致等于此值。空气中的声速受温度影响但不受大气压的影响,如 0℃ 时的声速是 331.4m/s,22℃ 时则为 334.8m/s,即声速随温度升高而加快。此外,气体传导声音的速度还受介质相对分子质量的影响,介质为氢、氦等相对分子质量较低的气体时声速较快,介质为氧、氮等相对分子质量较高的气体时则声速较慢。

声速与波长间的关系式为 $\lambda = c/f$,如 100Hz 纯音在空气中的波长为 334.8cm。

3. 相位

相位(phase)是声波的一个属性,指在周期性运动中,质点在某一瞬间所处的状态或所在的位置。如前所述,纯音为正弦波形,每一周期的相位角是 360°。当用耳机作声源时,设耳机膜振动面在静止位置时为 0°,则向外运动达最大点时为 90°,恢复原位时为 180°,向内运动达最大点时为 270°,再恢复原位时为 360°,完成一个振动周期。前 180° 组成了声波的密相(condensation),空气分子在振动、碰撞过程中被挤在一起,致密度增高。在密相的顶端,即相位 90° 处,相当于声波的波峰。后 180° 组成了声波的疏相(rarefaction),此时振动着的空气分子发生扩散,分子间的距离加大,密度变小,成疏相。疏相的最低端,即相位 270° 处,相当于正弦波的波谷。

1.1.6 复合音

声音一般可分为纯音和复合音两大类。纯音是波形呈正弦曲线的振动,是单一频率的振动波。但在自然界和日常生活中很少遇到纯音,绝大部分是复合音。



1. 同一正弦波的叠加

复合音是由各种频率、振幅和相位的正弦波叠加形成的。当介质中有两组振动同时作用到某一质点时,该质点不可能按照原来的波形同时传播两组波的振动,而是按照两组波合成或叠加后的振动波形而振动。

当频率相同的两组波在介质中传播时,如在空间某点的相位角相同,其波峰和波谷可以彼此相加,振幅等于各波振幅的总和,称完全加强(reinforcement);如它们的相位相反,一个波的波峰与另一个波的波谷彼此抵消,从而使声波消除,称完全抵消(cancellation);如果相位既不相同,也不相反,则两组振动波的作用结果将是它们之间的代数和。总之,两个相位不同的波叠加后,每个瞬间质点的位置(或相位)是同一瞬间的两个波的质点振幅的代数和(如图 1-6 所示)。

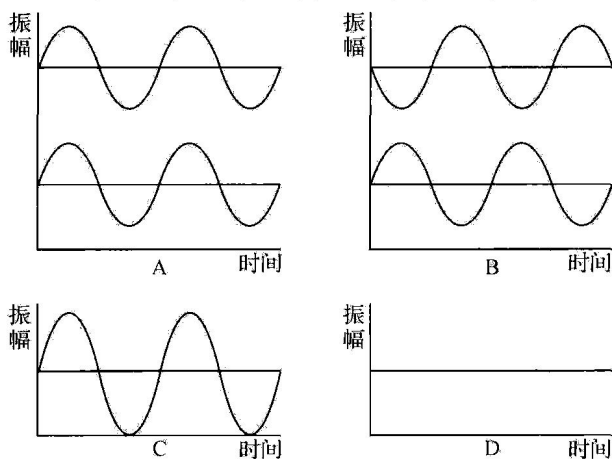


图 1-6 两个相同正弦波的叠加

(图 A 为单独两个正弦波,它们的频率、振幅、相位完全相同;图 C 为这两个正弦波叠加后的波形;图 B 为图 A 中的两个正弦波相位相反时的情形;图 D 为这两个相位反正弦波叠加后的情形)

2. 不同正弦波的叠加

不同频率、振幅、相位的正弦波叠加的原则如前所述,即质点在每个瞬间的位置(或相位)是同一瞬间的几个波的质点振幅的代数和。如图 1-7 所示,不同频率的正弦波叠加后就不再是正弦波了,但它也是一种周期性的振动波,即它的波形会随时间出现周期性重复。在复合音波中频率最低的成分(分音)称基音。频率与基音成整数倍的分音称谐音(谐波);2 倍或 3 倍基音的分音分别称二次或三次谐音。如图 1-7B 所示的三个复合波,即 $f_1 + f_2$ 、 $f_1 + f_2 + f_3$ 、 $f_1 + f_2 + f_3 + f_4$ 的周期与 f_1 一致。 f_1 就是该复合周期波的基频(一次谐波), f_2 称二次谐波, f_3 称三次谐波。任何复杂的周期性振动都可以分解为许多谐波,这称为傅立叶定律。把复杂的振动分解成各种频率成分的过程称傅立叶分析,也称频谱分析。

3. 频谱

如图 1-7A 和 B 所示的波形图显示了振幅随时间而发生的变化,然而一个纯音的频率并不能从波形图上直观地看出,一个复合音包含的频率更无法从波形图上测得。同一个频率的正弦波在复合波上的相位不同,就会出现完全不同的波形图。因此,要了解一个声波的频率情况,需要使用频谱图。频谱(frequency spectrum)既可以表示声音的频率和强度的二维关系,也可以表示声音的频率、强度与时间的三维关系。如图 1-7C 所示,二维频谱图一般以频率刻度(线性等比例



刻度或对数刻度)为横坐标,以声压级刻度为纵坐标。在复合音中,所包含的单个或多个纯音的频谱呈纵线状,称为线状频谱(linear spectrum)。有一种频谱图用纵坐标表示频率,横坐标表示时间,明暗度表示声音的强度(如图 1-8 所示),可以同时观察声音的频率、时间、强度三个参量,称三维频谱,即动态频谱。如图 1-9 所示,如果将上述三个参量分别用 X、Y、Z 轴来表示就形成了立体的三维频谱分析图。

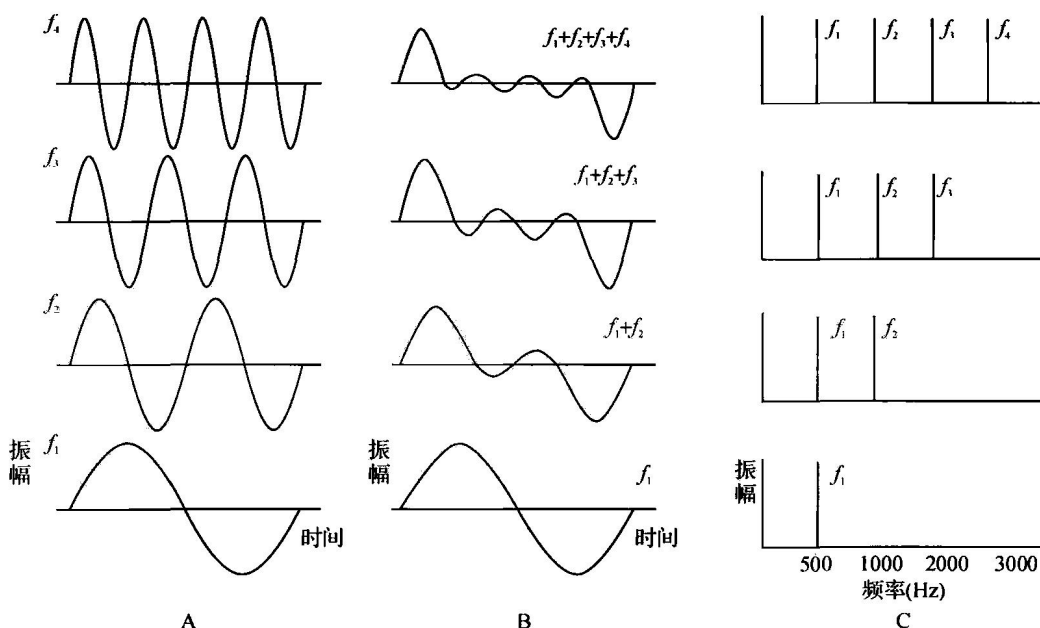


图 1-7 两种形式的二维频谱分别显示不同频率波的组合

(图 A 以正弦波形式表示四种频率的声波;图 B 为四种频率声波组合成的不同形式的复合波;图 C 以线性频谱图表示图 B 中的声波组合)

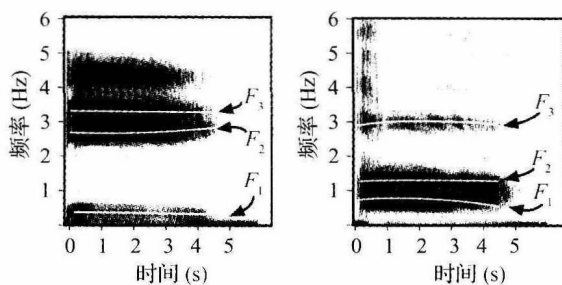


图 1-8 左图为发/a:/音的三维频谱图,右图为发/i:/音的三维频谱图

(图中横坐标为时间,纵坐标为频率,图像色彩深浅表示强度, F_1 、 F_2 、 F_3 分别为第一、第二、第三共振峰)

频谱根据需要通常可分成若干个频带。所谓频带,即两个特定的频率界限之间的部分,所包含的频率范围大小称带宽(band)。带宽的宽窄可人为设定。最常用的带宽有:一个倍频程,二分之一倍频程和三分之一倍频程。所谓一个倍频程是指组成该频带的上下频率界限 f_1 、 f_2 之间存在 $f_2 = 2^1 f_1$ 的关系;而二分之一倍频程指组成该频带的上下频率界限 f_1 、 f_2 之间存在 $f_2 = 2^{1/2} f_1$ 的关

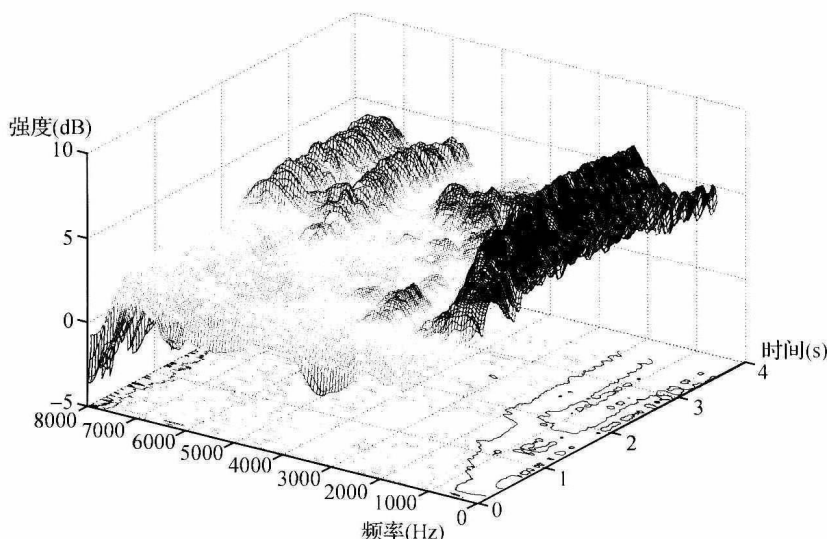


图 1-9 立体三维频谱图
(图中三个坐标分别表示频率、强度、时间)

系;同理,三分之一倍频程指组成该频带的上下频率界限 f_1 、 f_2 之间存在 $f_2 = 2^{1/3} f_1$ 的关系。在声音计量和频谱表示时,往往将频带的中心频率作为该频带的代表。如表 1-1 所示,一个倍频程将人耳可听到的声音频率范围 20~20kHz 分为 10 个倍频带,其中心频率按 2 倍增长,共 11 个,中心频率分别为:16Hz,31.5Hz,63Hz,125Hz,250Hz,500Hz,1kHz,2kHz,4kHz,8kHz,16kHz。1/3 倍频程则将倍频程再分成三个更窄的频带,使频率划分更加细化,其中心频率按倍频的 1/3 增长。

表 1-1 倍频程和 1/3 倍频程的划分

1 倍频程		1/3 倍频程		1 倍频程		1/3 倍频程	
中心频率	截止频率	中心频率	截止频率	中心频率	截止频率	中心频率	截止频率
16	11.2~22.4	12.5	11.2~14.1	1000	710~1400	800	710~900
		16	14.1~17.8			1000	900~1120
		20	17.8~22.4			1250	1120~1400
31.5	22.4~45.0	25	22.4~28	2000	1400~2800	1600	1400~1800
		31.5	28.0~35.5			2000	1800~2240
		40	35.5~45.0			2500	2240~2800
63	45~90	50	45~56	4000	2800~5600	3150	2800~3550
		63	56~71			4000	3550~4500
		80	71~90			5000	4500~5600
125	90~180	100	90~112	8000	5600~11200	6300	5600~7100
		125	112~140			8000	7100~9000
		160	140~180			10000	9000~11200
250	180~355	200	180~224	16000	11200~	12500	11200~14100
		250	224~280			16000	14100~17800
		315	280~355			20000	17800~22400
500	355~710	400	355~450				
		500	450~560				
		630	560~710				

4. 非周期波

非周期波的各组成成分间不存在谐波关系,也不随时间发生波形重复。典型的非周期波如瞬时音和随机噪声。瞬时音是一个突然出现的、持续时间极短的声音,因此不会出现波形的重复。随机噪声的波形也是完全随机的,包含所有可能的频率,因此随机噪声又称白噪声(如图1-10所示),如同白光含有各种颜色成分一样。白噪声在任意一段时间内的平均振幅也是相同的,所以在白噪声的频谱上看不到单个的垂线,只能用连接振幅顶端的一水平连续线来表示。由于这样的频谱包含了连续的各种频率成分,因此又称为连续频谱。随机噪声具有平坦的连续频谱,典型的瞬时音的连续频谱也是平坦的。但大多数非周期波的连续频谱并不是平坦的,它们的振幅总是偏向某一个频率,比如敲击不同乐器会听到不同的声音,因为它们的能量偏向不同的频率范围。又比如一种声学上常用的噪声——粉红噪声,如图1-11所示,该噪声中低频的能量分布较多,类似光谱中的粉红色光,故称为粉红噪声。

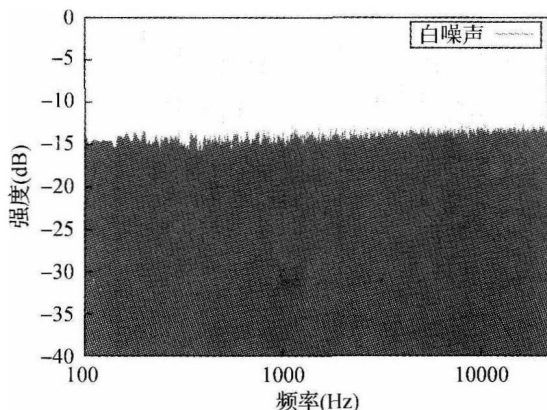


图 1-10 白噪声频谱图

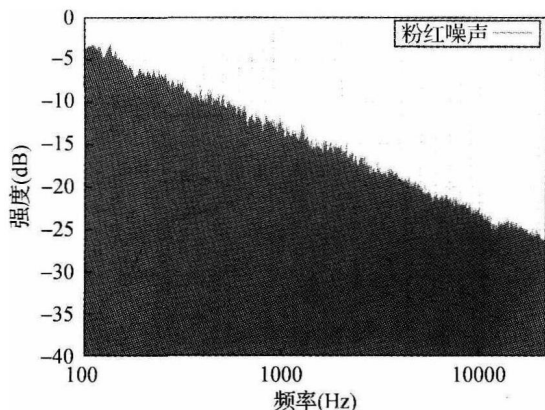


图 1-11 粉红噪声频谱图

1.1.7 共振和驻波

如前所述,一个振动物体不受任何阻尼的影响,在其回复力作用下形成一种固定频率的简谐振动,这种振动是由振动系统内部的弹性和质量决定的,即取决于系统本身的性质,所以这一振动频率叫做系统的固有频率。物体受外来周期性策动力(振动能量)作用而产生的振动称受迫振动,当这种周期性策动力恰好等于振动物体的固有频率时,振动处于最容易的状态,振幅达到最大值,即产生共振,而该频率(范围)则称为它的共振频率(resonant frequency)。不同物体的共振频率范围不同,因此这些物体就像滤波器,对某些频率的能量更容易传递。

不同的发声体通过不同的方式产生共振。

1. 弦乐器

拨动一根琴弦,波动从拨动处产生,向两端移动,然后反射回来向反方向传播,结果出现了两组波的相向移动。在介质中传播时波形不断向前推进的波称行波;而上述两组波,由于频率、振幅、传播速度均相同,而传播方向相反,叠加后形成的波并不向前推进,而是像一个静止的波,故称为驻波。驻波最大的位移点(复合波的波峰)和无位移点(复合波基线位)在几个固定的点上。其中位移为零的点称为波节或节点(node),位移最大处称为波腹或反节点(antinode)。如图