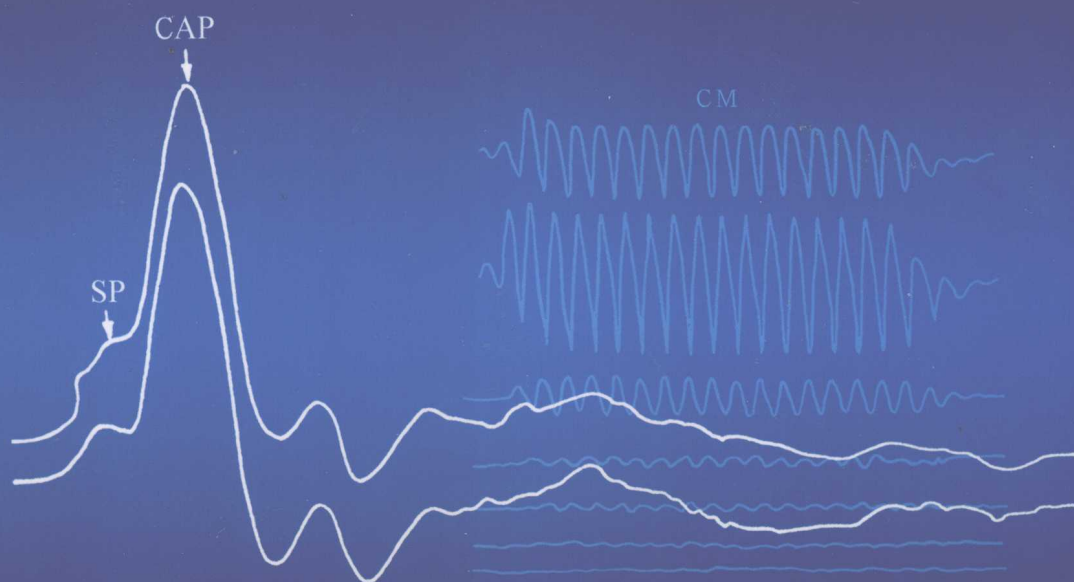


听觉诱发 反应及应用

Fundamental and Application of
Auditory Evoked Response

◎主 编 李兴启



 人民军医出版社
PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS

听觉诱发反应及应用

Fundamental and Application of Auditory Evoked Response

主 编 李兴启

副主编 郑杰夫 郝 昕

编 者 (以姓氏笔画为序)

于 红 吉林大学第一医院耳鼻咽喉一头颈外科

卢云云 北京市朝阳区医院(西院)耳鼻咽喉科

李兴启 解放军总医院耳鼻咽喉科研究所

成晋川 解放军总医院第二附属医院耳鼻咽喉科

郑杰夫 美国俄勒冈医科大学听觉研究中心

周 娜 解放军总医院耳鼻咽喉科研究所

郭明丽 河北省人民医院耳鼻咽喉科

闻雨婷 吉林大学第一医院耳鼻咽喉一头颈外科

郝 昕 中国人民解放军总医院耳鼻咽喉科研究所

黄丽辉 北京市耳鼻咽喉科研究所



人民军医出版社

People's Military Medical Press

北 京

图书在版编目(CIP)数据

听觉诱发反应及应用/李兴启主编. —北京:人民军医出版社,2007.1
ISBN 978-7-5091-0654-9

I. 听… II. 李… III. 听觉-诱发反应 IV. R339.16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 138681 号

策划编辑:杨磊石 文字编辑:黄栩兵 责任审读:李 晨

出 版 人:齐学进

出版发行:人民军医出版社 经销:新华书店

通信地址:北京市 100036 信箱 188 分箱 邮编:100036

电话:(010)66882586(发行部)、51927290(总编室)

传真:(010)68222916(发行部)、66882583(办公室)

网址:www.pmmp.com.cn

印刷:三河市春园印刷有限公司 装订:春园装订厂

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:15.75 彩页 1 面 字数:360 千字

版、印次:2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

印数:0001~3000

定价:55.00 元

版权所有 侵权必究

购买本社图书,凡有缺、倒、脱页者,本社负责调换

电话:(010)66882585、51927252

主 编 简 介



李兴启 解放军总医院耳鼻咽喉科研究所研究员，四川省合江县人，1966年毕业于北京大学生物系。同年参军入伍，从事军事噪声安全标准的制定工作，并师从我国著名听觉生理学家梁之安教授。1978年作为我国著名耳鼻喉科专家姜泗长院士的助手调入解放军总医院耳鼻咽喉科研究所工作，一直从事听力学及听觉生理学研究。此期间作为访问学者曾在法国波尔多第二大学国家医科院听力学研究中心进修学习，在解放军总医院先后建立3个实验室，在姜泗长院士的领导下具体主持，并完成全军“八五”、“九五”指令性课题，撰写了“十五”指令性课题标书。连续获得国家自然科学基金资助项目3个和总装备部计量科学基金资助项目2个。曾获全军科技进步一等奖1项，二等奖5项，三等奖3项；在国内外期刊发表论文150余篇，参与编写《临床听力学》和《新生儿及婴幼儿听力筛查》有关章节，《临床诱发电位学》为副主编。1992年被评为国家有突出贡献的中青年专家，并享受政府特殊津贴。现任北京市0~6岁儿童听力诊断中心专家组组长，全国残疾人第二次抽样调查专家委员会听力残疾专业组专家，现代电生理学杂志编委，中国听力语言康复科学杂志专家委员会委员，中华耳科学杂志顾问，听力学及言语疾病杂志副主编，兼任武汉大学、四川大学、福建医科大学客座教授和泸州医学院名誉教授。

内 容 提 要

本书作者参考国内外最新文献,结合自己长期从事听力学与听觉生理学的研究成果,系统阐述了听觉诱发反应的基本理论、测定技术及其在耳科临床和相关研究中的具体应用。全书共 12 章,包括听觉声学基础、听觉生理学基础、听觉诱发电位基础知识,耳蜗电图、听性脑干反应、耳声发射、40Hz 听觉事件相关电位、中潜伏期反应、听觉稳态反应、失匹配负波、皮质电反应与伴随负变异,以及听力障碍的筛查、诊断、评估、干预、治疗和康复措施等。内容新颖,资料翔实,实用性、指导性强,可供耳科、儿科医师和研究人员、助听器验配人员及听力学研究人员阅读参考。

前言

自 20 世纪 70 年代末以来,以听觉诱发电位为基础的电反应测听(electrical response audiometer, ERA)引进我国,至今已近 30 年。开始只有几个大城市的少数几家大医院拥有,目前,在全国各大医院几乎已经普及,可以说得到了广泛的应用,积累了丰富的经验,并为临床鉴别诊断提供了重要的依据。随着新生儿听力筛查工作逐渐推广和普及,以及听力学的发展,在听性脑干反应(ABR)和耳蜗电图(ECochG)逐渐应用的基础上,耳声发射(OAE),40Hz 相关电位(40Hz AERP)也相继在临床推广。近年来,随着计算机技术的进步,以客观反应和客观判断为特点的多频稳态反应(ASSR)的问世,大大促进了电反应测听技术的发展。随着这些技术应用的深入,许多临床听力学的表现需要人们给予恰当的解释和综合评估,加之听力学是一门边缘学科,涉及其他学科的知识较多,给正确判断检测结果增加了难度。因此,阐明各种听觉诱发反应,包括听觉诱发电位和耳声发射的发生原理,以及相关因素的影响,检测技术原理及操作规范,就显得格外重要。为此目的,我们总结近 30 年来自己在动物实验和临床应用中的一些经验,并参考国内外相关文献,编写了这本《听觉诱发反应及应用》,以期为从事听力学的工作者、医师及研究生提供参考。

本书在编写过程中,得到院、所领导的关怀支持和孙建和、杨贵舫、兰兰、冀飞、陈艾婷、王玲燕等同志的具体帮助,谨此表示感谢!

书中如有错漏不足之处,欢迎同行专家和广大读者批评指正。

李兴启

2006 年 8 月

目 录

第 1 章 听觉声学基础	(1)
第一节 振动、波与声音的关系	(1)
一、振动	(1)
二、波	(3)
三、声音	(6)
第二节 声学基本知识	(6)
一、声波的基本特性	(6)
二、声能的衰减	(7)
三、声波现象	(7)
四、声场	(8)
第三节 声测量	(12)
一、幅度取值	(12)
二、声的计量方法	(13)
三、频谱分析	(16)
四、心理声学	(22)
五、听觉研究常用声信号	(23)
六、听力设备校准	(26)
第 2 章 听觉生理学基础	(34)
第一节 概述	(34)
一、研究简史	(34)
二、听觉研究成就	(34)
第二节 外耳和中耳的结构与功能	(36)
一、外耳	(36)
二、中耳	(38)
第三节 耳蜗的结构与功能	(39)
一、大体结构	(39)
二、耳蜗螺旋器	(40)
三、耳蜗的神经联系	(42)
四、耳蜗的听觉生理	(43)
第四节 听觉神经系统的解剖和生理	(51)
一、听觉传入神经	(52)
二、听觉中枢的上行通路及核团	(52)
三、听觉中枢的下行通路	(54)
第五节 听觉中枢生理	(55)

一、听觉的感受、辨别与识别	(55)
二、鸡尾酒会现象与听觉下行通路	(58)
三、听觉中枢的可塑性	(59)
第3章 听觉诱发电位基础	(66)
第一节 发展概况及分类	(66)
一、发展概况	(66)
二、分类	(67)
第二节 神经生物学基础	(67)
一、神经细胞的结构及外环境	(67)
二、神经细胞的功能	(71)
三、耳蜗毛细胞及其传入、传出通路	(77)
四、正常听力的听觉系统与神经细胞的发育	(82)
第三节 AEP 检测原理及技术	(84)
一、场电位、容积导体与等电位线	(84)
二、数字平均器及叠加原理	(85)
三、电反应测听实际应用及要求	(88)
第四节 声刺激和非声条件对听觉诱发电位的影响	(90)
一、刺激声种类及选择	(90)
二、刺激声参数对 AEP 的影响	(93)
三、非声条件对 AEP 的影响	(97)
第4章 耳蜗电图	(103)
第一节 微音电位	(103)
一、微音电位的来源	(103)
二、微音电位的特点	(103)
第二节 总和电位	(105)
一、总和电位的来源	(105)
二、总和电位的特点	(108)
第三节 复合动作电位	(109)
一、复合动作电位的来源	(109)
二、复合动作电位的特点	(111)
第四节 耳蜗电图的应用	(112)
一、记录技术	(112)
二、梅尼埃病的诊断	(115)
三、感音神经性聋	(117)
四、突发性聋	(118)
五、中枢性聋	(118)
六、CM 的应用	(118)
第5章 听性脑干反应	(122)
第一节 听性脑干反应的起源和特点	(122)

一、起源	(122)
二、特点	(122)
第二节 临床及动物实验应用	(124)
一、记录技术	(124)
二、正常值	(127)
三、新生儿及婴幼儿听力筛查	(129)
四、器质性聋和功能性聋的鉴别	(130)
五、耳神经学诊断	(130)
六、动物实验	(143)
第6章 耳声发射	(146)
第一节 概述	(146)
一、发展概况	(146)
二、基本概念	(147)
三、分类及名词术语	(147)
四、基本特性	(148)
五、产生机制	(148)
第二节 测试原理	(151)
一、测试中需注意的共同问题	(151)
二、瞬态声诱发耳声发射的记录	(151)
三、畸变产物耳声发射的记录	(153)
四、自发性耳声发射的记录	(155)
五、刺激频率耳声发射和电诱发耳声发射	(155)
第三节 临床应用	(156)
一、新生儿听力筛查	(156)
二、听力损失的鉴别诊断	(157)
三、梅尼埃病的鉴别诊断	(158)
四、听力损失的动态监测	(160)
五、耳蜗传出神经系统功能的监测	(160)
六、提示咽鼓管功能	(160)
第7章 40Hz 听觉事件相关电位	(163)
第一节 概述	(163)
一、定义及特征	(163)
二、相关电位的起源及其机制的研究	(163)
第二节 临床应用	(167)
一、测试方法	(167)
二、应用范围	(167)
第8章 中潜伏期反应	(177)
一、中期肌源性(声动)反应	(177)
二、中期神经源性反应	(180)

三、原发皮质反应	(181)
第 9 章 听觉稳态反应	(183)
第一节 概述	(183)
一、基本概念	(183)
二、可诱发 ASSR 的声音类型	(183)
三、ASSR 的颅内起源及其产生原理	(185)
四、检测基本原理	(187)
五、参数设置	(188)
六、结果表示方法	(188)
七、影响 ASSR 的因素	(188)
第二节 临床应用	(190)
一、听力评估	(190)
二、助听器验配及助听效果评估	(191)
三、ASSR 估计纯音听阈的优势	(191)
四、存在的问题	(192)
五、应用前景	(194)
第 10 章 失匹配负波	(198)
第一节 概述	(198)
一、产生机制	(198)
二、测量指标	(198)
三、影响因素	(198)
第二节 测试与记录方法	(200)
一、测试方法	(200)
二、记录方法	(200)
第三节 临床应用	(201)
一、评价听觉中枢听觉辨别功能和发育情况	(201)
二、评估言语识别能力	(201)
三、指示神经可塑性变化	(202)
四、存在的问题	(202)
第 11 章 皮质电反应、 P_{300} 及伴随负变异	(206)
第一节 皮质电反应	(206)
一、基本概念	(206)
二、测试步骤	(207)
三、临床应用	(207)
四、动物实验	(208)
五、SCR 的优点	(208)
第二节 P_{300}	(208)
一、记录原理	(208)
二、来源	(209)

三、诱发条件	(209)
四、正常人基本波形	(209)
五、临床应用	(210)
第三节 偶发负变异	(211)
一、测试方法	(211)
二、临床应用	(212)
第 12 章 听力障碍的综合评估	(214)
第一节 听力学测试技术比较	(214)
一、生理学测听技术	(214)
二、主观测听技术	(217)
三、言语识别的测试	(218)
第二节 新生儿及婴幼儿听力筛查及诊断	(219)
一、新生儿及婴幼儿听力筛查	(219)
二、婴幼儿听力诊断	(222)
三、听力障碍的干预与康复	(223)
四、听力障碍婴幼儿的听觉言语发育	(223)
第三节 感音神经性听力障碍的鉴别诊断	(224)
一、蜗性聋	(224)
二、蜗后性聋	(228)
第四节 听神经病的综合诊断	(229)
一、发病年龄及病因病理学特点	(229)
二、发病部位	(231)
三、临床听力学特点、诊断及鉴别诊断	(234)
四、影响听力学表现的生理基础	(236)
五、综合诊断、干预和治疗	(237)

第1章 听觉声学基础

听力学作为一门新兴学科,致力于研究、诊断、干预和预防听力障碍。由于听觉与声学的密切关系,临床听力学工作者需要对声音的物理特性及声学测量的相关内容有所了解。

声学的英文 acoustics 一词缘于希腊文,本意就有声学的和听觉的两重意义。人们在提到“声音”的概念时,往往指某种物体振动产生了在空气中传播的声波;而提到“听”时,也往往指空气中的声音被人耳所接收。想像一下:一个全聋患者无听力,怎么会感到有声呢?反之,在真空中,振动无法传播,听力再好,您又会听到什么声呢?

实际上,声学研究的内容绝不仅仅局限

于在空气中传播的、能为人耳所接收到的声波。声学是研究声波的发生、传播、接收和效应的科学。根据研究的对象、方法及频率范围的不同,可划分成许多专门的学科,如几何声学、物理声学、超声学、水声学、建筑声学、电声学等。由于声音与听觉、语言之间的密切联系,语言声学、生理声学和心理声学也成为声学的重要组成部分,主要研究对象为语言的发生与识别、听觉器官的结构与功能,以及声学中主客观量之间的关系。

在临床听力学范畴内,除非特别说明,声音往往狭义地指在空气中传播的、能为人耳所接收到的声波。

第一节 振动、波与声音的关系

声音是一种机械波,而机械波是机械振动在弹性媒质中的传播过程。为了叙述方便,首先简要介绍一下物理学中振动及波的基本知识。

一、振 动

一个物理量(如交流电压、钟摆的位移等)在所观察时间内不停地经过最大值和最小值而变化总称为振荡。振动往往特指一个机械系统中某物理量的振荡(振荡是一般术语,振动只用于机械系统,包括声学系统)。振动的表现形式为系统中的物体沿直线或曲线经过其平衡位置附近来回重复地运动,称为机械振动。

力作用于物体,可产生直线加速运动,也可能产生机械振动。究竟产生哪种运动形

式,取决于物体的惯性、弹性和摩擦力。机械振动是由物体受力产生形变后因弹性而产生的回复力以及由物体的质量所决定的惯性共同作用的结果。摩擦力则对抗物体的运动,决定了物体是否能产生运动及运动是否能保持。

最简单的振动形式是简谐振动。简谐振动的一个经典例子就是弹簧振子的振动。如图 1-1 所示,球在位置 O 时,弹簧为初始长度,作用于球上的弹力为零,这个位置是物体的平衡位置。如果把球拉到位置 A 后再放开,它就要在平衡位置 O 的左右(A←O→B)振动。

(一)简谐振动

小球为什么会振动呢?我们把它分为四个阶段来讨论。

第1阶段是从A到O。把球拉到A时,弹簧因拉长而产生了弹力(回复力),但这时弹力与手拉球的力量抵消,所以球不动。手一松开,弹力立即起作用,此时弹性势能最大,但速度尚为零,所以动能等于零。弹力使球向左方运动。此阶段弹力方向和运动方向都向左,球作加速运动(动能增加);弹力逐渐减小(势能减小)。当回到O点时,速度最大(动能最大),弹力为零(势能等于零)。

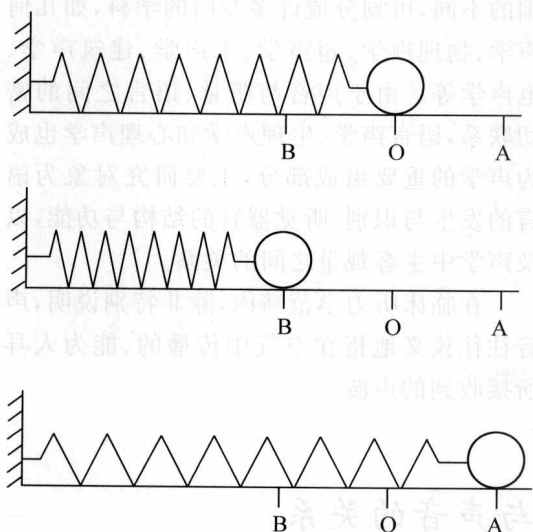


图 1-1 弹簧振子的振动

第2阶段是从O到B。球到O点时虽然弹力为零,但它具有最大的速度,当然不会停驻在这个位置,而要继续向左运动。向左运动必然使弹簧受压,产生弹力,阻止小球向左继续运动。在这个阶段中小球做减速运动,弹力逐渐增大(势能逐渐增加),速度逐渐减小(动能逐渐减小)。达到B点时速度降为零,不能再向左运动。此时弹性势能最大,而动能降为零。

第3阶段是从B到O。这阶段与第1阶段相似,这个机械系统中的能量又从势能转化成动能。弹性势能由最大变为零,动能由零变为最大。

第4阶段是从O到A。与第2阶段相似,弹性势能由最大变为零,动能由零变为最大。系统中的能量又再次从动能转化成势能。

这样小球就完成了一次振动,只要条件不变,球就会一直这样振动下去。

简谐振动可由做匀速圆周运动的质点在其直径上的投影运动来等效(图 1-2)。其中A为振幅,是振动物体离开平衡位置的最大位移。物体完成一个全振动(交替变化1次)所需的时间称为振动周期,用T表示。因为

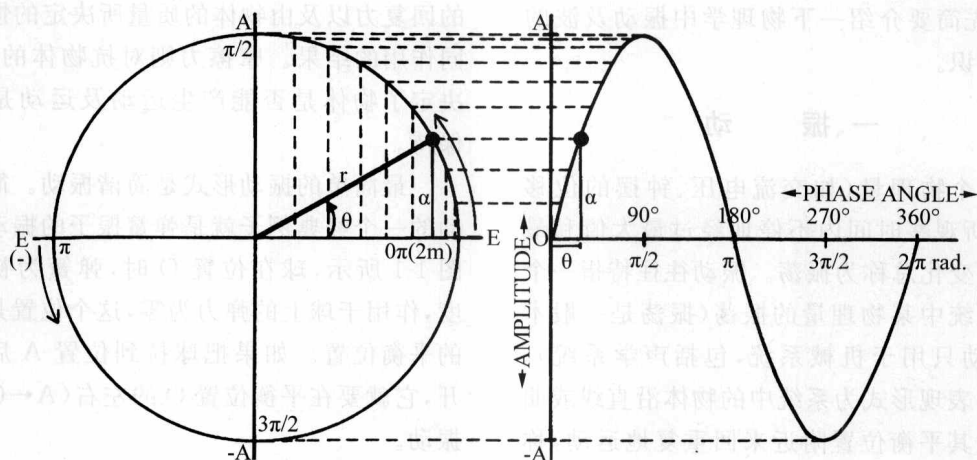


图 1-2 简谐振动可由做匀速圆周运动的质点在其直径上的投影运动

质点沿圆周运动1周(2π)所需的时间是 T ,所以圆周运动的角速度 $\omega = 2\pi/T$ 。物体在单位时间(1s)内完成全振动的次数称为振动的频率,一般用 f 表示,单位以德国物理学家Hertz(赫兹)命名,简写为Hz。频率为周期的倒数, $f = 1/T = \omega/2\pi$;则 $\omega = 2\pi f$ 。由于 ω 是 f 的 2π 倍,因此,又称为简谐振动的圆频率。

由图1-2可知,振子在任意时刻 t 的运

动状态,可用量 $\omega t + \varphi$ 完全确定。 $\omega t + \varphi$ 是确定做简谐振动的物体的运动状态的物理量,称为相位或位相。由于相位用角度表示,故也称为相角。 φ 称为初相角。

简谐振动的位移、速度、加速度与时间的关系都符合正弦函数(它可由公式推导),只不过相位上存在差异。加速度超前速度 90° ,位移落后速度 90° ,加速度与位移反相(图1-3)。

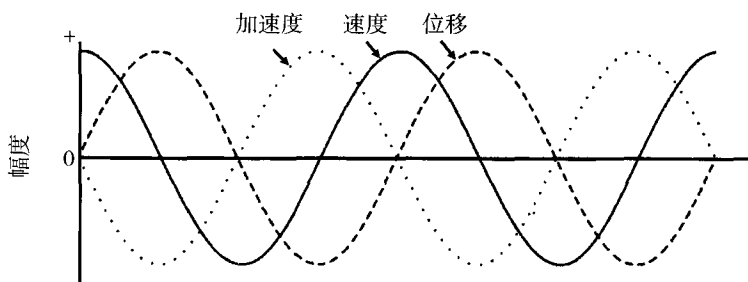


图1-3 位移、速度、加速度的相位关系

实线:速度;密虚线:超前位移 90° ;疏虚线:滞后加速度 90°

(二)自由振动与阻尼振动

弹簧振子只要不受摩擦和其他任何阻力,小球就将保持一定的振幅永远振动下去。理想状态下,一个振动物体不受任何阻力的影响,在其回复力作用下所做的振动称为无阻尼自由振动。我们还发现,上例中的小球不论离开平衡位置多远,只要仍在弹簧的弹性限度之内,那么弹簧振子完成一次振动所花费的时间就是恒定的;单位时间内完成振动的次数(频率)也是恒定的。这是因为,物体做无阻尼自由振动时的频率是由振动系统内部的弹性和质量决定的,它们都是由系统本身的性质所决定的量,因而被称为固有频率。

实际上,由于摩擦和其他阻力无法避免,振动物体因克服摩擦和其他阻力做功,能量和振幅会逐渐减小,这种振动称为阻尼振动。能量减小主要有两种方式:一是由于摩擦阻力的存在,使振动能量逐渐转变为热能,称为

摩擦阻尼;另一种是由于物体的振动引起邻近媒质质点的振动,使振动的能量逐渐向四周传播出去,转变为波动的能量,称为辐射阻尼。音叉的振动就是辐射阻尼的一个很好的例子。

当振动系统的阻尼较低时,振荡幅度缓慢下降;而当振动系统中的阻尼较高时,振荡形式很快终止。当阻尼高到连一次完整的振荡形式都无法完成时,该阻尼称为临界阻尼。

二、波

下面我们要讨论振动体对周围弹性媒质的影响。以音叉振动产生的声波为例:音叉振动,使其周围的一部分空气媒质离开平衡位置,由于媒质具有的弹性,必然会在其附近产生使它回到平衡位置的弹性力,因而这部分媒质将在其平衡位置附近振动起来。与此同时,这部分媒质又将对它所在部位周围的媒质产生力的作用,振动就会传到它的周围

各部。周围各部分的振动又使较远的各部分跟着振动,这样就会越传越远,传播到物体的全部。由此,可以给出波的定义:机械振动在弹性媒质中的传播过程所形成的机械波,下文简称为波。

具 (一)波的定义要点

(1)媒质质点只在平衡位置附近振动,传播的是凸起、凹下或密集、稀疏的状态,质点本身并不随波动而迁移。例如,往平静的水池中投一石子,以石子落下去的地方为中心,会出现凸、凹两种圆环交替传播到整个水池。如果在水面上漂有树叶,它并不随着波的传播而漂向远处,只是在原位置上下振动(严格讲,水波的这种性质与空气的振动是近似的)。铃铛振动时,击动附近的空气,使空气一会儿密集、一会儿稀疏,铃铛附近空气的密集和稀疏又产生弹性力,引起附近部分空气的振动。如此,在空气中密集状态和稀疏状态相间出现,并向远处传播,即形成声波。

(2)机械波不能脱离弹性媒质而独立存在。若把钟放在一个大玻璃罩中,我们仍可以清晰地听到钟的滴答响声。然而当我们通

过罩子上的抽气孔往外抽气时,滴答声逐渐变弱;当罩内的空气被抽得十分稀薄时,钟声就几乎听不见了。

(3)波的传播伴随有能量的传递。一处质点振动引起周围质点振动,振动质点具有能量。因此,波的传播是伴随有能量的传递,即波是能量传递的一种形式。要想维持振动的传播,必须有提供能量的来源——波源。例如,一根绳子一端固定,另一端用手上下抖动一次,一个凸起和凹下的状态就通过绳子传到固定端。要使绳子持续出现凸起和凹下的状态,手就必须始终抖动。

(二)波的传播形式

1. 横波 把1根橡皮绳的一端固定,手持另一端上下振荡1次,这样就在橡皮绳上先形成一个凸起的形态,然后又形成一个凹下去的状态。凸起的和凹下去的状态会通过整个橡皮绳传到另一端。这个过程中,绳子的每一段都在上下振动,而波沿水平方向传播。这种弹性媒质分子振动方向与波传播方向相垂直的波,称为横波(图1-4)。上述水面波类似于横波。

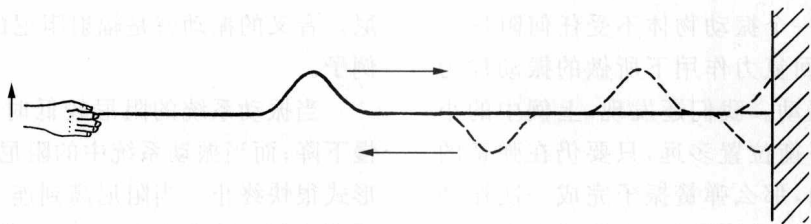


图 1-4 横波波源

2. 纵波 把1根较长弹簧的一端固定,另一端用手轻轻一推,就形成了一个弹簧圈较密的密部。由于弹簧各处弹力的作用,密部沿着弹簧一直向前传播;如用手轻轻一拉,就形成了一个弹簧圈较疏的疏部,由于弹簧各处弹力的作用,疏部也沿着弹簧一直向另一端传播。如果不断地推拉弹簧,就可以看到一系列的密部和疏部依次向前传播。这种

媒质分子振动方向和波传播方向平行的波,称为纵波,好似疏、密相间的“麦浪”,也称为疏密波(图1-5)。

(三)波长、频率与波速

波的传播方向称为波线。同一波线上相邻的两个同相位的质点之间的距离,即一个完整波的长度,称为波长,用 λ 表示。波传过一个波长的时间,称为波的周期 T 。波速 c

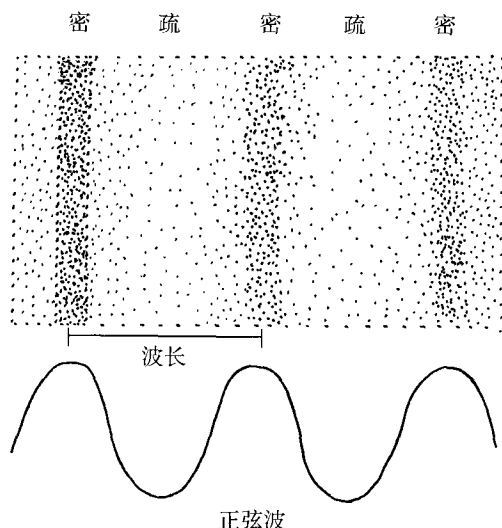


图 1-5 声波的产生与传播

是指一定的振动相位在空间的传播速度,即振动的任一相位在 1s 内前进的路程。由此可知,波速和波长及周期之间的关系是:

$$c = \lambda / T$$

周期的倒数 $f = 1/T$, 称为频率。波的频率是在单位时间内波动推进的距离中所包含的波长的数目。波速和波长及频率的关系是:

$$c = f\lambda$$

波速仅由弹性媒质的性质决定,不受波长、频率和振幅的影响。波的传播速度决定于媒质的密度和弹性模量。理论上可以证明,波速是由媒质的密度 ρ 和弹性模量 k 决定的。

(四)波的基本特征

1. 反射、折射与散射 当声波自一种媒质入射到另一种媒质时,若它们的特性阻抗不同,就产生反射和折射(图 1-6)。

(1)反射:波阵面由两种媒质之间的表面返回的过程,向表面的入射角等于反射角。反射定律:入射角等于反射角,即 $\theta_i = \theta_r$ 。

(2)折射:因媒质中声速的空间变化而引起的声传播方向改变的过程。折射定律:入

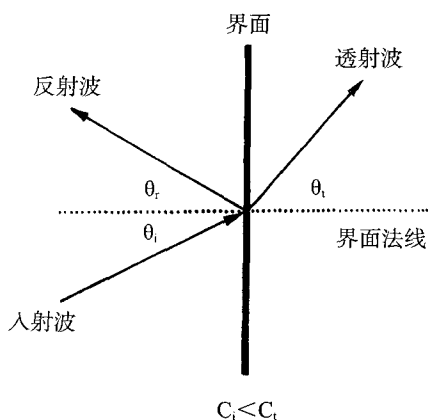


图 1-6 波的反射与折射

射角的正弦和折射角的正弦的比值等于两媒质中声速的比值(C_1 和 C_2 分别为在两种媒质中的声速):

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{C_1}{C_2} = \eta$$

(3)全反射:指声波完全不传到第 2 媒质,而由分界处全部反射的现象(当入射角 $>$ 临界角 θ_k 时,即发生全反射)。如果分开两种媒质的边界具有无限平面的形状,这种边界的反射称为镜反射,如同光的反射。一个人站在桥上,水中出现的桥和人影,即为光的全反射;这应区别于光的直射现象,如一个人或电线杆在太阳底下出现的人影,即为光的直射现象。

(4)散射:密度与弹性不同的障碍物所产生散射,即声波经许多方向不规则反射、折射或衍射的总称。

2. 干涉与衍射

(1)干涉:即几个振动的叠加将产生干涉。由于干涉现象,声场中可产生驻波或定波(频率相同或相近的声波相加时所得的现象)。

(2)衍射:即声波绕过障碍物使传播方向改变的现象。波长对障碍物大小的比值越大,衍射也越大,如果障碍物的尺寸远 $>$ 波长,虽然还有衍射,但在障碍物背后的边缘附

近将形成一个没有声波的区域,叫声影区。

三、声 音

所谓声音,实际上有双重含义,物理学和心理学有不同的阐述。

从物理上讲,声是指在任何弹性媒质中传播的扰动,是一种机械波。扰动是指气体、固体或液体中的某一物理量(如密度、或者是压力、或者是速度……)的一个小的变化。扰动源的扰动使周围的弹性媒质质点产生振动,使振动能量向四周传播出去,而媒质质点本身并不传播。这个能量传播的过程就是声。声学研究的范畴相当宽,往往把气体、液体和固体中传播的弹性振动以及在这些弹性媒质的有限区域内形成驻波的弹性振动,统称为声振动,都作为声学研究的对象。

经常和声相连的一个字叫音,什么是音呢?从心理学角度看,声波通过听觉所产生的印象就是音。音的定义是能够引起感觉的一种声,讲通俗一点,就是有意义的声。讲话时口腔发出的声,耳朵听到以后,能够体会到有某一种含义在里面,或者是感觉到了某种意思,这个就是音。我国古代对声和音的关系已经有很好的认识和定义,老子的“大音希声,大象无形,大器晚成”这几个排比句,蕴含了相近的哲理。所谓“大音希声”,讲的通俗一点就是说,有理不在言高,只要你道理能够说清,并不在于你的声波能量大小,这里的声就是物理的声了,而音就是说话里面的含义。

听力学中所涉及的声音概念,往往是指在空气中传播的弹性振动,而且听力学比较多地应用了心理声学的研究成果。

第二节 声学基本知识

一、声波的基本特性

(一)频率

声波的频率范围很宽,人耳听觉所能感受的频率范围是 $20 \sim 20\,000$ Hz。人耳最敏感的频率范围是 $1\,000 \sim 4\,000$ Hz,可感受到的最小声压为 $20\mu\text{Pa}$ 。低于 20Hz 的声波为次声,高于 $20\,000$ Hz 的声波为超声。一些动物可听到超声和次声。强度很大时,超声和次声可通过非听觉的途径作用于躯体。

(二)声速

声波在一定媒质中的传播速度称为声速。声速与媒质的弹性和密度有关。声波在空气、水和钢铁中的速度比值约为 $1:4:12$ 。声速还与媒质分子运动的活跃程度(温度)有关。大气中声速的公式可近似为

$$c = 331 + 0.6t$$

其中 t 是摄氏温度。大气温度每增减 10°C ,声速相应增减 6m 。 0°C 时大气中的声速为 331m/s , 20°C 时大气中的声速为 343

m/s ,通常将常温下的声速认定为 340m/s 。在水、海水(相当于淋巴液)、象牙(相当于乳突)中的声速分别为 $1\,450$ 、 $1\,531$ 和 $3\,013\text{m/s}$ 。

静态大气压并不影响声速,无论是在高山还是海平面,只要气体成分及温度不变,高空中大气没有稀薄到气体分子的间距与波长相当的水平,则声速必定是一样的。

(三)声压、声强与声阻抗率

为了描述声波在媒质中各点的强弱,常用声压和声强两个物理量。

当我们考察空气媒质的质量和弹性时,空气分子可视为是由一个小弹簧串接在一起的小球。振动使空气分子也表现出弹簧振子样的运动,局部媒质时而压紧,压强暂时 $>$ 静态大气压;时而疏松,压强暂时 $<$ 静态大气压。由于声波的传播,在原有静态大气压的基础上表现出的大气压强的动态变化,称为声压。由于媒质中各点声振动的周期性变化,声压也在作周期性变化。声压的单位为