

卫生部规划教材

全国医学专科学校教材

供临床医学专业用

医用物理学

第三版

明纪堂 主编



人民卫生出版社

全国医学专科学校教材

供临床医学专业用

医 用 物 理 学

第 三 版

明 纪 堂 主 编

黄慰怀 (桂林医学院)

高同信 (菏泽医学专科学校)

金 畴 (杭州医学专科学校)

明纪堂 (长治医学院)

编写

(京)新登字081号

图书在版编目(CIP)数据

医用物理学/明纪堂主编.-北京:人民卫生出版社

1995

ISBN 7-117-00084-8

I. 医… II. 明… III. 医用物理学-医学专科学校-教材
IV. R312

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第11102号

医用物理学

第三版

明纪堂 主编

人民卫生出版社出版

北京市崇文区东大街10号

北京市卫顺印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开 10.5印张 237千字

1981年7月第1版 1995年4月第3版第16次印刷

印数: 229 191—246 290

ISBN 7-117-00084-8/R·85 定价: 6.90元

著作权所有, 请勿擅自用本书制作各类出版物, 违者必究。

临床医学专科第三轮教材说明

医学专科第一轮、第二轮全国统编教材在发展我国医学专科教育方面发挥了重要作用。随着医学科学的迅速发展,医学模式的转变和我国基层卫生工作改革的不断深化,第二轮教材已不能完全适应形势发展的要求。根据国家教委的有关指示和规定,1990年卫生部着手组织临床医学专科第三轮教材的修订、编写工作,成立了临床医学专科教材评审委员会,确定修订、编写的指导思想、原则、计划及质量控制措施。

本轮教材服从于“2000年人人享有卫生保健”的卫生工作战略目标,贯彻预防为主,突出实践,面向基层,医疗、预防、保健相结合的方针,力求编出临床医学专科教材的特色。

全套教材计有:

- | | | | |
|--------------------|--------|----------------|-------------|
| 1. 《医用物理学》第三版 | 明纪堂 主编 | 13. 《诊断学》第三版 | 贾民谊 主编 |
| 2. 《医用化学》第三版 | 杜广才 主编 | | 刘文钦 副主编 |
| 3. 《人体解剖学》第三版 | 刘方 主编 | 14. 《内科学》第三版 | 祝惠民 主编 |
| 4. 《组织学和胚胎学》第三版 | | | 黄泳齐 副主编 |
| | 刘贤钊 主编 | 15. 《外科学》第三版 | 叶舜宾 主编 |
| 5. 《生理学》第三版 | 钟国隆 主编 | | 魏育贤、王竞武 副主编 |
| 6. 《生物化学》第三版 | 黄治森 主编 | 16. 《妇产科学》第三版 | 赵克忠 主编 |
| 7. 《医学免疫学和微生物学》第三版 | | 17. 《儿科学》第三版 | 刘玉生 主编 |
| | 童竞亚 主编 | 18. 《传染病学》 | 刘应麟 主编 |
| 8. 《人体寄生虫学》第三版 | | 19. 《五官科学》第三版 | 吴博亚 主编 |
| | 胡昌仁 主编 | | 苏启明、周亮 副主编 |
| 9. 《病理学》第三版 | 洪美玲 主编 | 20. 《皮肤性病学》第三版 | 蔡中民 主编 |
| 10. 《药理学》第三版 | 吴景时 主编 | 21. 《中医学》 | 程化奇 主编 |
| 11. 《医学遗传学基础》 | 郭亦寿 主编 | | 李重恩 副主编 |
| 12. 《预防医学》 | 黄云从 主编 | | |

我们希望这套教材的出版能为我国医学专科教育的进一步发展发挥较大作用,并热诚欢迎广大师生提出宝贵意见。

临床医学专科教材评审委员会

主任委员: 于 频

副主任委员: 钟国隆 叶舜宾

委员: (按姓氏笔画为序)

丁全福 王竞武 王祖武 王海江 阴兆峰
宋培博 苏启明 张万超 林印钢 祝惠民
姜常胜 南 潮 胡昌仁 徐 军 黄云从
程小兰

评审委员会办公室主任: 黄道初

前 言

教材建设是教育过程中一项重要的基本建设,要提高教学质量必须有一本好的教材。医学高等专科学校教育是我国高等医学教育一个独立的层次,它是为县和县级以上医药卫生机构输送普及型高级医药专门人才的。其学习年限较短,要学习的内容又较多,这样在获取知识和培养能力方面,对教材的依靠就更大。因此,医学专科教材的编写要围绕教育的性质、任务和培养目标,精选内容,突出学生能力的培养,使学生负担适当。

临床医学专科教材《医用物理学》第三版的编写是在卫生部统一部署、临床医学专科教材评审委员会的直接领导下进行的。与第二版教材相比,有较大的变动。①本教材起点为高中物理学,删去了振动和波,电和磁部分等与高中相比,增加知识不多的内容。②在认真分析医学专科教材《医用物理学》第二版的基础上,根据医学高等专科学校培养目标,遵照全国医专教材评审委员会全套教材要构成一个适合医学专科教育完整体系的精神,结合医学院校实际,突出医学特色,精选了与医学有密切联系的物理学内容,以保证学生能掌握物理学的基础理论、基本知识和基本技能。突出医学特色是指在内容的选择上,不是讲医学物理,更不是讲医学。《医用物理学》是一年级基础课,学生没有医学基础。对于跨学科的内容,在《医用物理学》的讲授中讲不清也没有必要讲。如眼的结构、分辨本领及视力表,心电向量等,根据全套教材分工,这些内容分别划为眼科学及诊断学编写,避免了不应有的重复。③本教材适当介绍了物理知识在医学上的应用,同时还介绍了一些新发展起来联系医学的应用技术,如激光的基础知识、CT技术等,形成了有别于其它物理学的知识体系。

本教材在编写过程中,我们征求了全国三十多所兄弟院校的意见,得到了中国生物医学工程学会医学物理分会和许多同志们的关心与帮助,特别是全国医专教材评审委员副主任委员钟国隆教授,中国生物医学工程学会医学物理分会常务理事、北京医科大学王鸿儒教授,新乡医学院朱平福副教授,解放军北京医学高等专科学校徐仁惠副教授等对全书进行了评阅,提出了大量宝贵意见和建议,对提高该书质量起了重要作用,在此表示感谢!

由于我们水平有限,教材中缺点、错误在所难免,诚恳希望使用本书的广大师生批评指正。

长治医学院 明纪堂

内 容 简 介

临床医学专科教材《医用物理学》第三版，以高中物理学为起点，精选了与医学有密切联系的物理学内容：声波及超声波，流变学基础知识，电偶极子电场，电桥电路和RC电路，生物信号检测，偏振光，医用光学仪器，X射线，原子核的放射性等。在保证学生获得必要的物理学基础理论、基本知识、基本技能基础上，在介绍物理知识医学应用的同时，也介绍了一些新发展起来联系医学的应用技术，如激光技术、CT技术等。全书共分为10章，各章有联系又相对独立，适合学校学生系统学习，也便于有志者自学。

目 录

绪论	1
一、物理学研究的对象和方法	1
二、物理学与医学的关系	1
第一章 声波	3
第一节 声波的性质	3
一、声速	3
二、声压与声阻	3
三、声强	4
四、反射与折射	5
五、声波的衰减	6
六、乐音的特性	7
第二节 听觉区域和声强级	8
一、听阈 痛阈 听觉区域	8
二、声强级	9
三、响度级	10
第三节 多普勒效应	11
第四节 超声波	15
一、超声波的特性和作用	15
二、超声波的产生和探测	16
三、超声波在医学中的应用	17
第二章 液体的流动	22
第一节 理想液体的流动	22
一、理想液体 稳定流动	22
二、连续性方程	23
三、伯努利方程及其应用	24
第二节 实际液体的流动	29
一、牛顿粘滞定律粘度	29
二、泊肃叶公式	32
三、雷诺数	34
四、血液的流动	35
第三节 血液的流变性	37
一、非牛顿液体与表观粘度	37
二、卡森方程	40
三、影响血液粘度的因素	40
四、血液流变学的应用和进展	43
第三章 液体的表面现象	45
第一节 表面张力和表面能	45

第二节 弯曲液面内外的压强差	47
第三节 毛细现象	49
一、液体与固体接触处的表面现象	49
二、毛细现象	50
三、气体栓塞	52
第四章 电场与电路	54
第一节 电偶极子电场	54
一、电偶极子电势	54
二、电偶极层电势	56
第二节 能斯脱电势	57
一、能斯脱方程	57
二、能斯脱方程的应用	58
第三节 基尔霍夫定律	59
一、基尔霍夫第一定律	59
二、基尔霍夫第二定律	60
第四节 RC电路的充放电过程	61
第五章 生物信号检测	65
第一节 生物信号与检测系统	65
第二节 信号的拾取	67
一、生物检测电极	67
二、医用传感器	68
第三节 信号处理	72
一、晶体管放大器	73
二、放大器的幅频特性	76
三、集成运算放大器	77
四、干扰与噪声	77
第四节 信号显示	79
一、机械描记装置	79
二、电子显示装置	80
第六章 光的波粒二象性	85
第一节 光的干涉和衍射	85
一、惠更斯原理	85
二、光的干涉	86
三、光的衍射	88
四、光栅衍射	90
第二节 光的偏振与旋光	91
一、自然光和偏振光	91
二、起偏和检偏	92
三、双折射现象	93
四、旋光性	95
第三节 光的粒子性	96

一、光电效应·····	96
二、康普顿效应·····	97
第四节 光的吸收·····	98
一、朗伯-比耳定律·····	99
二、光电比色计原理·····	100
三、分光光度计原理·····	101
四、光的生物效应·····	102
第七章 医用光学仪器 ·····	104
第一节 球面折射·····	104
一、单球面折射·····	104
二、共轴球面系统·····	106
第二节 透镜·····	107
一、薄透镜·····	107
二、薄透镜组·····	110
三、厚透镜·····	112
四、圆柱透镜·····	113
第三节 放大镜与显微镜·····	114
一、放大镜·····	114
二、显微镜·····	115
三、光学仪器的分辨本领·····	116
第四节 电子显微镜·····	118
一、德布罗意波·····	118
二、电子显微镜·····	118
第五节 玻璃纤维内窥镜·····	119
第八章 激光的产生与生物效应 ·····	122
第一节 激光的产生·····	122
一、原子的能级与发光·····	122
二、激光的产生原理·····	123
三、激光器·····	127
第二节 激光的特性·····	127
第三节 激光的生物效应·····	128
一、激光的生物效应·····	128
二、激光生物效应的医学应用·····	129
第九章 X射线 ·····	130
第一节 X射线的特性·····	130
第二节 X射线的产生·····	130
一、X射线的产生装置及工作原理·····	130
二、X射线的强度和硬度·····	131
三、X射线的产生机制·····	132
第三节 X射线的吸收·····	135
一、X射线的吸收·····	135

二、吸收X射线的量度·····	136
第四节 X射线的医学应用·····	138
一、放射治疗·····	138
二、透视和照相·····	138
三、电子计算机断层技术·····	139
第十章 原子核的放射性 ·····	142
第一节 原子核的结构·····	142
第二节 核衰变类型及衰变规律·····	143
一、核衰变的类型·····	143
二、放射性核的衰变规律·····	146
第三节 放射性核素在医学上的应用·····	149
一、放射性核素诊断·····	149
二、放射性核素治疗·····	150
三、放射线的防护·····	150
附录 ·····	152
一、物理量的单位·····	152
二、常见物理常量·····	154
各章部分复习题答案 ·····	155

绪 论

医用物理学是一门医学生必修的基础课，它是一门具有医学特色的物理学。要学好这门课，每个医学生必须首先了解物理学研究什么，它与医学有什么关系。

一、物理学研究的对象和方法

自然界是由各种各样的物质组成的。所谓物质是作用于我们感觉器官而引起感觉，不依赖于主观意识而客观存在的东西。物质可划分成两种基本形态、实物和场。实物是各种物质的组成者，如山川河流、日月星辰、分子、原子、电子等；场是实物之间相互作用的传递者，如引力场、电场、磁场等。实物和场都是客观存在运动着的物质，它们不可分割地联系在一起。物质处在永恒不停地运动中，没有不运动的物质，也没有非物质的运动。不过这里所指的运动是广义的，它包括各种机械运动、化学变化，也包括动植物的生长等，运动是物质存在的形式，是物质的固有属性。

随着科学的发展，分工越来越细，许多新的学科应运而生，各门学科都以一定的物质运动形态作为自己的研究对象，它们的任务都是揭示自然界物质运动和变化的客观规律，从而提高人们认识世界和改造世界的能力。物理学当然也不例外，只不过物理学研究的对象与其它学科不同，物理学是研究物质运动中，最普遍、最基本物质运动形态的科学，是探索物质运动规律、物质结构及其相互作用的科学。在自然界，人类活动中最常见的机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核的运动等都属于物理学研究的范畴。物理学所研究的物理现象、获得的物理定律等存在于一切自然现象和规律之中，与一切自然现象都有着不可分割的内在联系，一切自然现象，无论是生命的，还是无生命的，都遵从物质运动中最基本的能量守恒定律、万有引力定律等。因此，物理学的理论和定律带有极大的普遍性，是其它自然科学和一切应用技术的基础。

物理学的研究方法是发现许多客观规律的钥匙，它引导人类不断地去揭示自然界的奥秘，使人类对自然界的认识日益深刻，日趋完善。因此，学习物理学还要掌握物理学的研究方法。

物理学的研究方法首先是观察，观察就是在自然条件下观察所要研究的对象，对于那些一时还不能控制的自然过程，这是主要的资料来源。再就是实验，实验就是在人为的条件下，使现象反复重演从而研究现象中各种因素间的关系。在观察和实验所得的大量资料基础上，经过分析、概括、判断和推理，把事物的本质和内在联系抽象到更一般的形式，于是产生了假说。由假说再经过反复验证，被证明能正确地反映客观规律时，则上升为定律和理论。

物理学这种由观察、实验、假说最后导致定律和理论的研究方法，不仅适用于物理学研究，同样可以指导我们去研究医学。

二、物理学与医学的关系

生命过程不可避免地要涉及到物理的过程，因而在学习医学时，物理学的基本知识

是不可少的。随着人类对生命现象认识的深入，生物学已经达到分子水平，医学科学愈来愈多地把它们的理论建立在精确的物理学理论基础之上。如果说，过去基础医学和临床医学的研究主要处在整体、器官、细胞水平的一般阶段，那么现在基础医学和临床医学已由细胞水平进展到亚细胞水平、分子水平。物理学知识已成为探讨有机体内物理运动状态、性质和过程方面必要的基础。例如，要了解血液循环，就必须知道流体动力学的基本规律；要懂得听诊、叩诊的道理，了解声波的感觉过程和超声波的医学应用，就必须熟悉声波的物理性质和传播规律；要了解人体内各种各样的生物电现象，并进行生物电信号的检测，就必须掌握一定的电学和电子学知识；要了解眼的结构和功能，不仅必须了解几何光学，还必须了解物理光学知识；要了解热辐射、光辐射、X射线、 γ 射线等对人体的诊断原理和治疗作用，就必须了解它们的基本性质。因此，学好物理学是学好医学的基础。

医学的发展历来与物理学的发展有着密切的关系。物理学上每一重大发现和发明，都对医学产生着极为深刻的影响。

三百多年前，光学显微镜的问世，为医学科学的发展提供了有力工具，使医学科学工作者可以观察到人体肉眼看不到的细胞，为发现致病因子控制危害人类健康的传染病和流行病创造了条件。X射线的发现，很快用于临床诊疗。1896年发现了放射性同位素后，由于放射性同位素与它的同位素相比，仅仅不同的是具有放射性，可作为示踪原子。在基础医学研究和临床诊断方面，用示踪原子方法可显示该元素在机体内的活动踪迹，用同位素扫描和 γ 照相机可以获得放射性物质在体内某部位分布的图样，可借助它诊断器官病变；用放射性同位素放出的射线照射肿瘤细胞，是治疗恶性肿瘤的重要手段。电子显微镜的发明成为当代生物学、医学、高分子化学、微电子学等科技领域的有力工具，对医学则使其步入了分子水平，达到了揭示生命活动的微观本质和疾病的微观机制阶段。

电子技术的发展，激光的诞生，特别是电子计算机的迅速发展，使信息处理技术已渗透到医学各个领域，从基础医学到临床医学，从教学、诊断治疗到科研，从医学情报检索、病历病案管理到行政业务等，计算机都能发挥重大作用。

由上可见，不仅物理学理论是学习医学的必要知识基础；而且物理学方法，物理学技术上的每次重大突破，都对医学产生巨大的推动作用。学习用物理学方法、物理学技术去解决医学问题，加快医学向定量化科学发展，是研究医学的重要途径，是提高临床诊断治疗水平的重要手段。为此，要求每个医学生要重视物理学学习，为学好医学打下必要的基础。

明纪堂

第一章 声 波

声波是一种机械波，通常在弹性媒质中以纵波的形式传播，作用于人的听觉器官引起声音的感觉。它的频率范围大约是 $20 \sim 20000\text{Hz}$ 。声波由声源的振动产生，这个频率范围的机械振动也称为声振动。频率高于 20000Hz 的机械波称为**超声波**；频率低于 20Hz 的机械波称为**次声波**。超声波与次声波虽然人听不到，但是与声波的本质是一样的，有相同的基本性质。

第一节 声波的性质

一、声 速

传播声波的媒质通常是空气，也可以是其他气体、液体或固体。声波传播的速度简称**声速**，与媒质的性质（弹性与惯性）有关，并受温度的影响。固体中声速大，液体中声速次之，气体中声速小。通常温度升高时，声速增大，温度对气体中声速的影响尤为明显。

研究得知，气体中的声速与绝对温度的平方根成正比。在空气中，声速 c 与摄氏温度 t 的关系，有如下经验公式

$$c = 331 + 0.6t \quad (1-1)$$

0°C 时，空气中声速为 331m/s ，每升温 1°C ，声速增大 0.6m/s ，表 1-1 给出 20°C 时几种媒质中的声速。

表 1-1 声速和声阻 (20°C)

物质	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$c(\text{m/s})$	$Z(\text{kg/s}\cdot\text{m}^2)$
空气	1.21	343	415
(0°C 时)	1.29	331	427
水	988.2	1484	1.48×10^6
钢	7800	5050	39.39×10^6
脂肪	970	1400	1.36×10^6
脑	1020	1530	1.56×10^6
肌肉	1040	1568	1.63×10^6
密质骨	1700	3400	6.12×10^6

二、声压与声阻

声波作为纵波在媒质中传播时，媒质各部分时而密集时而稀疏，交替出现密部与疏部，媒质各部分的压强相应变化。若没有声波传播时，媒质某处的静压强为 p_0 ，该处形成密部的瞬间，压强高于 p_0 ；该处形成疏部的瞬间，压强低于 p_0 。我们把声波在媒质中

传播产生的压强瞬时值 p 与静压强 p_0 的差称为**声压**，单位是 Pa (帕)。显然声压是变化的，若声源作周期性振动，声压也随着周期性变化。由于声压是变化的，它的大小通常用幅值 p_m 表示。声压幅值 p_m 与声速 c 、媒质密度 ρ 有关；也与声波的振幅 A 和角频率 ω 有关。理论导出

$$p_m = A\omega\rho c \quad (1-2)$$

波传播过程，媒质质点发生振动，其振动速度的幅值 $v_m = \omega A$ ，代入(1-2)式得

$$p_m = \rho c v_m \quad (1-3)$$

对于给定的媒质，在一定温度下， ρ 与 c 为常量，二者的积改用一个常量 Z 替代，(1-3)式改写为

$$p_m = Z v_m \quad (1-4)$$

其中

$$Z = \rho c = \frac{p_m}{v_m} \quad (1-5)$$

Z 称为**声阻抗**，简称**声阻**，单位是 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 或 $\text{N} \cdot \text{s/m}^3$ 。将(1-4)式类比电学中的欧姆定律公式，声阻可比拟为电阻 R 。在声压幅值 p_m 一定的条件下，媒质质点振动速度的幅值 v_m 与声阻 Z 成反比。声阻表示媒质的声学特性，是声学中重要的物理量。它的大小取决于媒质密度与声速，而声速在一定温度下仅与媒质性质有关，可见，声阻是由媒质决定的。几种物质的声阻数值见表1-1。

声波在媒质中传播，媒质质点的振幅、速度幅值、加速度幅值都难以直接测定。而声压容易检测，根据声压与声阻可以计算媒质质点振动的上述物理量。

三、声 强

声波是机械波，在波动过程中随振动状态的传播，同时进行能量传递。弹性媒质的质点是相互关联相互作用的，因此振动质点不但具有动能，还具有弹性势能。振动过程中，质点的位移与速度周期性变化，它的动能与势能也随着周期性变化。一块媒质由许多质点组成，其机械能同样作周期性变化，并沿着波前进的方向传递能量。单位体积媒质的机械能在一个周期内的平均值，称为波的平均能量密度 $\bar{\epsilon}$ ，它决定于媒质密度 ρ 和波的角频率 ω 及振幅 A ，理论分析得出。

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \quad (1-6)$$

一列平面波在均匀媒质中传播，不考虑能量损失，各处的能量密度 $\bar{\epsilon}$ 是相同的。波的能量以波速 c 沿波动方向传播。在图1-1中，垂直波传播方向上取面积 S ，单位时间内，通过 S 面的平均能量，应是以 S 面为底，以波速值 c 为高的柱体所含有的机械能

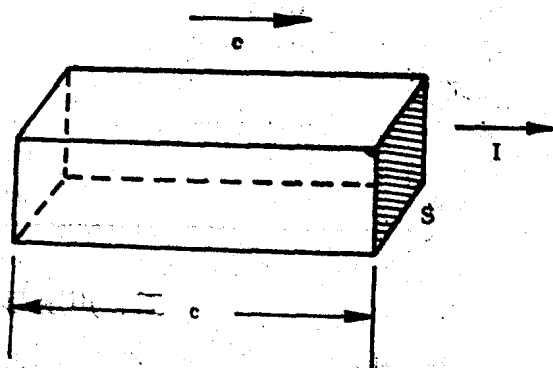


图 1-1 波的强度

$\bar{\epsilon}Sc$ ，称为平均能流。通过单位面积的平均能流则称为能流密度，即**波的强度**，用 I 表示

$$I = \bar{\epsilon} c = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 A^2 \quad (1-7)$$

上式是各种机械波共同的强度公式，声波的强度简称**声强**，式中波速 c 即为声速。声强在数值上等于声波单位时间内、垂直通过单位面积的平均能量数。它的大小表示声波的强弱，单位是 W/m^2 。(1-7) 式表明声强与振幅的平方成正比，声波传播过程中发生能量的耗散，就表现为振幅的衰减。

将 (1-2) 式代入 (1-7) 式可得

$$I = \frac{1}{2} \cdot \frac{p_m^2}{\rho c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{p_m^2}{Z} \quad (1-8)$$

该式表明，声强与声压幅值的平方成正比，与声阻成反比。声强的测定比较困难，也可用容易测量的声压表示声音的强弱。

【例1-1】 测得某音响设备发出最强声波的声压幅值为 8.3Pa ，在 20°C 时该声波的强度多大？透过面积 2m^2 的窗口的声功率是多少？若声波频率 1000Hz ，其振幅与质点振动速度幅值各多大？

解 查表1-1得到 20°C 时空气的声阻 $Z = 415\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$ ，据 (1-8) 式计算声强

$$I = \frac{1}{2} \cdot \frac{p_m^2}{Z} = \frac{(8.3)^2}{415} = 8.3 \times 10^{-2} (\text{W/m}^2)$$

透过窗口的声功率即单位时间内通过窗口的声波能量

$$N = IS = 8.3 \times 10^{-2} \times 2 = 0.166 (\text{W})$$

声波的角频率 ω 与频率 ν 的关系是 $\omega = 2\pi\nu$ ，据 (1-2) 式计算声波的振幅

$$A = \frac{p_m}{\omega \rho c} = \frac{p_m}{2\pi\nu} = \frac{8.3}{2 \times 3.14 \times 1000 \times 415}$$

$$= 3.18 \times 10^{-6} (\text{m}) = 3.18 (\mu\text{m})$$

据 (1-4) 式计算空气质点振动速度幅值

$$v_m = \frac{p_m}{Z} = \frac{8.3}{415} = 0.02 (\text{m/s})$$

计算结果说明，通常声波的功率是很小的，振幅也很小，数量级是 μm 。

四、反射与折射

声波像光波一样，行进到两种媒质的分界面上，会发生反射与折射现象。部分声波返回原媒质传播，称为声波的反射，反射波也称回声。另一部分声波，进入第二种媒质改变行进方向继续传播，称为折射，折射波也称透射波。声波的反射与折射遵守光的反射与折射定律。

声波发生反射与折射，不仅有传播方向的改变，同时反射波与透射波的强度较入射波强度减弱。反射波强度 I_1 与入射波强度 I_0 的比称为声波的反射系数 β_1 (声强反射系数)。透射波强度 I_2 与入射波强度 I_0 的比称为透射系数 β_2 (声强透射系数)。上述两个系数与界

面两侧媒质的声阻 Z_1 、 Z_2 有关，也与入射角有关。当声波垂直入射时，理论证明

$$\text{反射系数} \quad \beta_1 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (1-9)$$

$$\text{透射系数} \quad \beta_2 = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (1-10)$$

不难看出 $\beta_1 + \beta_2 = 1$ 。垂直入射时，在不考虑界面上声波能量损失的条件下，反射波与透射波强度之和等于入射波的强度。从上二式还可以看出，界面两侧媒质确定，则 Z_1 、 Z_2 一定，不论从哪种媒质垂直入射，反射系数与入射系数不变。

当界面两侧媒质的声阻接近时， $Z_1 \approx Z_2$ ，则 $\beta_1 \approx 0$ 而 $\beta_2 = 1$ ，即反射波极弱，声波几乎全部透射。当界面两侧声阻数值悬殊时， $Z_1 \gg Z_2$ 或 $Z_2 \gg Z_1$ ，则 $\beta_1 \approx 1$ 而 $\beta_2 \approx 0$ ，这时声波几乎全部反射。例如，声波由空气垂直入射人体，空气声阻 $415 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$ ，而肌肉的声阻 $1.63 \times 10^6 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$ ，两个数值相差几千倍，代入(1-8)和(1-9)式，可计算得到 $\beta_1 \approx 99.9\%$ ， $\beta_2 \approx 0.1\%$ ，计算结果表明，声波很难从空气进入人体。同样，声波也很难从人体透出进入空气。因此，利用超声波探查人体时，发射超声波的探头与人体表面之间，要涂皂液或液体石蜡等导声耦合剂。涂抹液体用来消除探头与人体之间的空气夹层，避免超声波在空气与人体的界面上进入与透出时，发生强烈的反射。便于超声波进入人体和体内反射的超声波透入人体。

五、声波的衰减

声波在媒质中传播的过程，它的强度在传播方向上逐渐减弱，这种现象称为**声波的衰减**。声强的减弱主要是由于声波能量不断耗散，被媒质吸收，转化为内能。媒质吸收声波能量有两方面的原因：一方面是媒质的内摩擦和热传导；另一方面是声波的散射。散射与媒质中所含微粒大小有关，微粒线度与声波波长的数量级越接近，散射越显著。例如，空气中的尘粒，对波长较长的声波散射作用不强；对波长很短的超声波散射作用则很显著。在非均匀媒质中散射尤为明显，成为声波衰减的主要原因。声波衰减的快慢，即媒质吸收能量的多少，与媒质的性质及声波传播距离有关。若声波原来的强度为 I_0 ，传播距离 X ，强度减为 I ，由理论及实验可以证明

$$I = I_0 e^{-\mu X} \quad (1-11)$$

式中 μ 为媒质的吸收系数，表示媒质吸收声波能量的能力大小，它与声波的速度、频率等因素有关。吸收系数与声速的三次方成反比，与频率的平方成正比。气体中声速小，而超声波的频率高，因此，超声波在气体中衰减很快。(1-11)式表明，媒质吸收声波能量造成声强按负指数规律衰减（式中自然数 $e \approx 2.7182$ ）。 $I \sim X$ 关系曲线如图1-2所示，图中 $X_{\frac{1}{2}}$ 为声波强度衰减 $\frac{1}{2}$ 传播的距离。

通常声波以球面波的形式在媒质中传播，除了媒质的吸收造成声波减弱之外，由于球面随声波的传播不断扩展，波的能量逐渐分散，也造成声波的减弱。图1-3表示球面声波自0点发出，取2个球面，其半径分别为 x_1 、 x_2 ，面积分别为 S_1 、 S_2 ，两球面上的声强分别为 I_1 、 I_2 。在不考虑媒质吸收能量的条件下，单位时间内两球面上声波能量应相等，即

$$I_1 S_1 = I_2 S_2$$

则

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{x_2^2}{x_1^2} \quad (1-12)$$

此式表明，球面声波的强度与离开波源的距离的平方成反比，称为球面波的反平方定律。

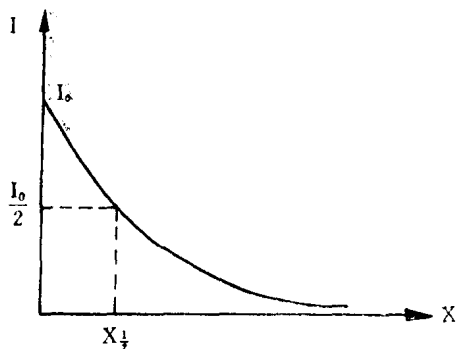


图 1-2 声波的衰减

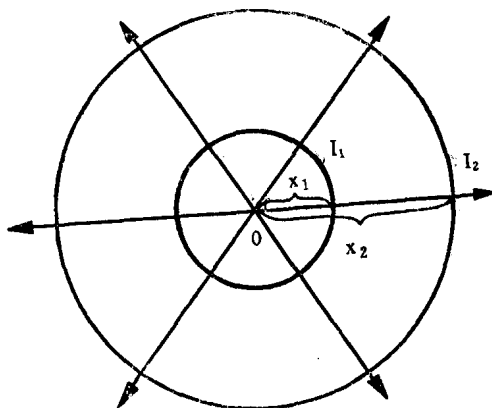


图 1-3 球面波的衰减

六、乐音的特性

一般声源由两部分组成：一是振动体，二是共鸣器。例如，人发声的振动体是声带，口腔与鼻腔起共鸣作用。通常声源的振动不是谐振动，而是复杂的振动。如果这个复杂振动是周期性的规律振动，产生的声音称为乐音，否则称为噪音。图 1-4 画出钢琴与黑管的振动曲线，可以看出两振动曲线虽然复杂，但是有规律的周期性变化，两乐器发出的都是乐音。



图 1-4 钢琴与黑管的振动曲线

一个周期振动的方程应是时间 t 的周期函数，可写做 $F(\omega t)$ ，其中 ω 是振动的角频率。数学分析证明，任意周期性函数都可以表示为若干正弦函数与余弦函数之和，称为傅立叶级数。

$$\begin{aligned} F(\omega t) = & A_0 + A_1 \cos \omega t + A_2 \cos 2\omega t + A_3 \cos 3\omega t \\ & + \dots + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + B_3 \sin 3\omega t \\ & + \dots \end{aligned}$$

式中常数项 A_0 为 $F(\omega t)$ 在一个周期内的平均值，即周期性振动的平均振幅。其余各项均为谐振动方程的形式，分别对应频率成倍数增加的谐振动。其中频率 ω 称为基频，其他