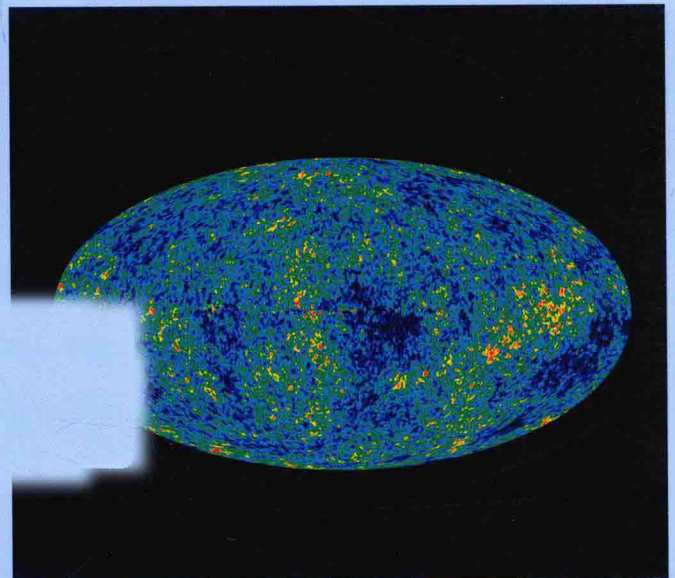
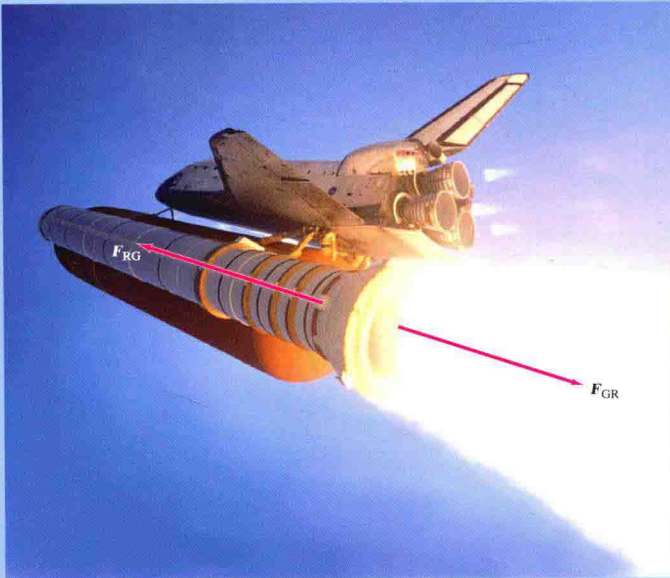


PHYSICS FOR SCIENTISTS & ENGINEERS WITH MODERN PHYSICS, 4E

# 大学物理 (修订版) (下)

[美] 詹科利 (Giancoli, D.C.) 著  
东华大学物理教研室 译



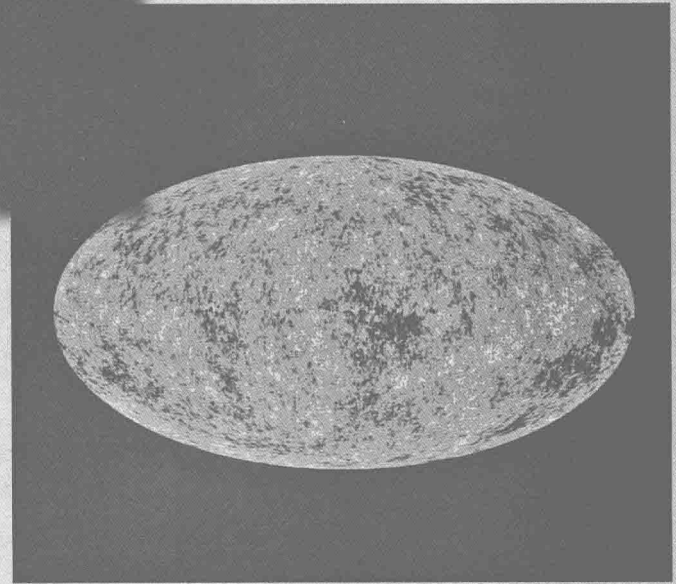
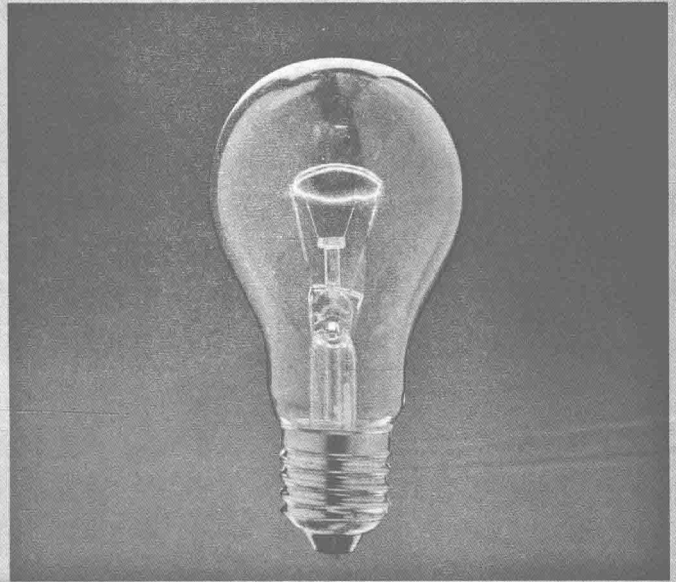
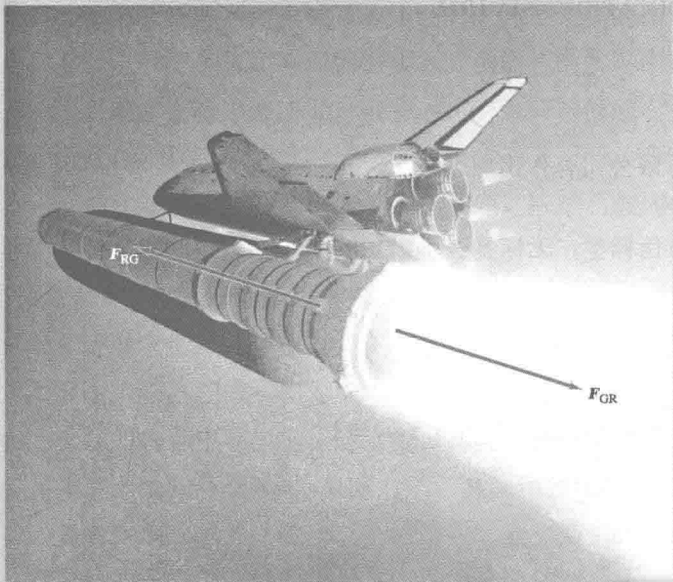
PHYSICS FOR SCIENTISTS & ENGINEERS WITH MOD

# 大学物理 (修订版) (下)

[美] 詹科利 (Giancoli, D.C.) 著

东华大学物理教研室

译



## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 下/[美]詹科利(Giancoli, D. C.)著; 东华大学物理教研室译. —修订版.  
—上海: 东华大学出版社, 2017. 5  
ISBN 978-7-5669-1209-1

I. ①大… II. ①詹…②东… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 075225 号

Authorized translation from the English language edition, entitled PHYSICS FOR SCIENTISTS & ENGINEERS WITH MODERN PHYSICS, 4E, 9780131495081 by GIANCOLI, DOUGLAS C., published by Pearson Education, Inc, Copyright © 2008.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and DONGHUA UNIVERSITY PRESS Copyright ©.

合同登记号: 中图字 09-2015-053

本书中文简体字版由培生教育出版公司授权东华大学出版社有限公司合作出版, 未经出版者书面许可, 不得以任何形式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

责任编辑: 竺海娟

封面设计: 小智慧

## 大学物理(修订版)(下)

著者: [美]詹科利(Giancoli, D. C.)

译者: 东华大学物理教研室

出版: 东华大学出版社(上海市延安西路 1882 号, 200051)

本社网址: <http://www.dhupress.net>

天猫旗舰店: <http://dhdx.tmall.com>

营销中心: 021-62193056 62373056 62379558

印刷: 常熟大宏印刷有限公司

开本: 889 mm×1194 mm 1/16

印张: 24

字数: 845 千字

版次: 2017 年 5 月第 1 版

印次: 2017 年 5 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978-7-5669-1209-1

定价: 58.00 元

# 前 言

《Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics》是一套风格独特的美国大学物理课程教材。全书内容深浅适当,注重物理理论与现实生活的结合以及物理在工程技术中的应用,注重启发学生思考,激发学生自主学习的热情。国外很多名校都将此书用作物理教材。作者 Douglas C. Giancoli 是美国加州大学伯克利分校的教授,他撰写了很多与大学物理学相关的书籍,对物理学有很宽泛的认识,其编著的书籍受到了读者的一致好评。

在体系结构上,全书设计合理,对概念和原理的阐述科学、准确,能使学生更好地把握物理学的体系,形成科学、准确的物理概念和良好的知识链。在行文上,全书语言通俗简明、生动有趣,适合学生阅读、理解和掌握。在选材上,全书精选了大量极具趣味性的照片和精美的图片,图文并茂,令人耳目一新,能使学生在赏心悦目中愉快地学习。全书把丰富的物理知识融入鲜活的生活实际中,举例生动,能充分满足学生的求知欲和好奇心,激发学生的学习兴趣。在讲述方法上,全书通过引入开篇问题、设立概念例题、指出解题思路、给出复习和小结的方式,不仅让学生在生动有趣的学习环境中知道学习了什么,而且还教会学生怎样学习,使他们掌握科学的学习方法。此外,全书在习题的编排上也做了细化处理,按难易程度将习题分为 I、II、III 类,按内容分为思考题、习题和综合性习题,对不同层次的学生都有指导意义。

《大学物理》是原版书(第四版)的译本,在保持原著的风格和体系的基础上,参照教育部非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会 2010 年制订的《大学物理课程教学基本要求》,结合国内大学物理教学的内容,对原著的部分章节和习题做了合理的取舍。全书分上、下两册,此为下册。

全书的内容主要包括:运动学(测量、物体的运动),动力学(牛顿定律、万有引力定律、动能定理、能量守恒定律、动量和角动量),流体力学,波动和振动,声学,热力学(热力学定律),气体动理论,电磁学(电荷和电场、高斯定理、电势、磁场、电磁感应、麦克斯韦方程组),波动光学(干涉、衍射和偏振),狭义相对论,早期量子理论和原子模型、量子力学等。本书全面地概括了物理学的各分支,可作为高等学校理工科类各专业学生的大学物理教材,也可供相关技术人员参考,或作为高等职业技术学校学生的教材。

本书由东华大学理学院物理系大学物理教研室翻译,参加翻译的老师有张菁(第 1 章)、郭颖(第 2 章)、王春瑞(第 3 章)、姜萌(第 4 章)、邢怀中(第 5 章)、陆爱江(第 6 章)、黄晓江(第 7 章)、钟方川(第 8 章)、石建军(第 9 章)、施芸城(第 10 章)、杨馥(第 11 章)、薛绍林(第 12 章)、郭英(第 13 章)、何国兴(第 14 章)、卢洪伟(第 15 章)、浦天舒(第 16 章)、徐晓峰(第 17 章)、蔡旭初(第 18 章)、伍滨和(第 19 章)、李博(第 20 章)、张晓东(第 21 章)、唐晓亮(第 22 章)、徐金洲(第 23 章)、何波(第 24 章)、梁源(第 25 章)、詹亚歌(第 26 章);赵莉娟(第 27 章)、鲍云(第 28 章)、丁可(第 29 章)、钟平(第 30 章)、吴华(第 31 章)、杨沁玉(第 32 章)、查学军(第 33 章)。统稿老师为陆爱江(第 1~6 章)、丁可(第 7~12 章)、李博(第 13~18、29~30 章)、伍滨和(第 19~25 章)、吴华(第 26~28、31~33 章)。

下册修订版由以下老师修改完成:杨沁玉(第 16、31~33 章)、李博(第 17、18、20 章)、蔡旭初(第 21~23 章)、丁可(第 24~28 章)、陆爱江(第 19、29~30 章)。

由于译者中英文水平的局限,本书可能存在不少缺点甚至错误,竭诚欢迎广大读者批评和指正。

# 目 录

## 第 16 章 声音 / 1

- 16-1 声波的特性 / 1
- 16-2 声波(纵波)的数学表示 / 3
- 16-3 声音的强度:分贝 / 4
- 16-4 声源:振动的弦和空气柱 / 8
- \* 16-5 音质和噪声 叠加 / 13
- 16-6 声波的干涉 拍 / 13
- 16-7 多普勒效应 / 16
- \* 16-8 激波和声震 / 19
- \* 16-9 应用:声纳、超声波和医学成像 / 21

## 第 17 章 温度、热膨胀和理想气体定律 / 27

- 17-1 物质的原子理论 / 28
- 17-2 温度和温度计 / 29
- 17-3 热平衡和热力学第零定律 / 31
- 17-4 热膨胀 / 31
- \* 17-5 热应力 / 35
- 17-6 气体定律和绝对温度 / 36
- 17-7 理想气体定律 / 37
- 17-8 利用理想气体定律解决问题 / 38
- 17-9 用分子数表示的理想气体定律 阿伏伽德罗常数 / 40

## 第 18 章 气体动理论 / 45

- 18-1 理想气体定律和温度的微观解释 / 45
- 18-2 分子速率分布 / 50

## 第 19 章 热量与热力学第一定律 / 54

- 19-1 热量是传递的能量 / 55
- 19-2 内能 / 56
- 19-3 比热容 / 57
- 19-4 量热学——解题方法 / 58
- 19-5 潜热 / 60
- 19-6 热力学第一定律 / 63
- 19-7 热力学第一定律的应用:功的计算 / 65
- 19-8 气体摩尔热容 能量均分定理 / 69
- 19-9 气体的绝热膨胀 / 72
- 19-10 热传递:传导 对流 辐射 / 74

## 第 20 章 热力学第二定律 / 89

- 20-1 热力学第二定律——引言 / 89
- 20-2 热机 / 90
- 20-3 可逆过程与不可逆过程 卡诺热机 / 93
- 20-4 冰箱、空调和热泵 / 97
- 20-5 熵 / 99

20-6 熵和热力学第二定律 / 100

20-7 从有序到无序 / 104

20-8 能量退化 热寂说 / 105

\* 20-9 熵和热力学第二定律的统计解释 / 105

\* 20-10 热力学温度 热力学第三定律 / 108

\* 20-11 热污染、全球变暖和能源 / 108

## 第 21 章 电荷和电场 / 115

21-1 静电、电荷及其守恒 / 116

21-2 原子中的电荷 / 117

21-3 绝缘体和导体 / 117

21-4 感应电荷 验电器 / 118

21-5 库仑定律 / 119

21-6 电场(电场强度) / 123

21-7 连续分布电荷的电场强度计算 / 127

21-8 电场线(电力线) / 131

21-9 电场及导体 / 132

21-10 带电粒子在电场中的运动 / 133

21-11 电偶极子 / 134

\* 21-12 分子生物学中的电性力 DNA / 136

## 第 22 章 高斯定理 / 142

22-1 电场强度通量 / 143

22-2 高斯定理 / 144

22-3 高斯定理的应用 / 146

\* 22-4 高斯定理和库仑定律的实验基础 / 151

## 第 23 章 电势 / 155

23-1 电势能与电势差 / 155

23-2 电势与电场强度的关系 / 158

23-3 点电荷的电势 / 160

23-4 电荷连续分布带电体的电势 / 161

23-5 等势面 / 162

23-6 电偶极子的电势 / 163

23-7 由电势(分布)确定电场强度 / 164

23-8 静电势能 电子伏特 / 165

\* 23-9 阴极射线管:电视机、计算机显示屏与示波器 / 166

## 第 24 章 磁场 / 172

24-1 磁铁和磁场 / 172

24-2 电流产生磁场 / 174

24-3 载流导线在磁场中所受的力 磁感应强度  $B$  的定义 / 175

24-4 运动电荷在磁场中所受的力 / 177

- 24-5 磁场作用在载流线圈上的力矩 磁矩 / 181
- 24-6 霍尔效应 / 183
- 第 25 章 磁场的来源 / 189**
- 25-1 载流直导线产生的磁场 / 189
- 25-2 两根平行载流导线间的相互作用力 / 191
- 25-3 安培和库仑的定义 / 192
- 25-4 安培环路定理 / 193
- 25-5 螺线管和螺绕环的磁场 / 196
- 25-6 毕奥-萨伐尔定律 / 198
- 25-7 磁性材料——铁磁性 / 200
- \* 25-8 电磁铁和螺线管——应用 / 201
- \* 25-9 磁性材料中的磁场 磁滞 / 202
- \* 25-10 顺磁性和抗磁性 / 203
- 第 26 章 电磁感应和法拉第电磁感应定律 / 209**
- 26-1 感应电动势 / 210
- 26-2 法拉第电磁感应定律 楞次定律 / 211
- 26-3 动生电动势 / 215
- 26-4 发电机 / 217
- \* 26-5 反电动势和反力矩 涡电流 / 219
- 26-6 变压器和电力传输 / 221
- 26-7 感生电动势 / 223
- \* 26-8 电磁感应的应用：音响系统、计算机存储器、地震仪、接地故障断路器 / 225
- 第 27 章 互感、自感和磁场的能量 / 231**
- 27-1 互感 / 232
- 27-2 自感 / 234
- 27-3 磁场的能量 / 236
- 第 28 章 麦克斯韦方程组和电磁波 / 240**
- 28-1 变化的电场产生磁场 安培环路定理和位移电流 / 241
- 28-2 磁场的高斯定理 / 243
- 28-3 麦克斯韦方程组 / 244
- 28-4 电磁波的产生 / 244
- 28-5 由麦克斯韦方程组导出电磁波及其速度 / 246
- 28-6 光是一种电磁波 电磁波谱 / 250
- 28-7 测量光速 / 252
- 28-8 电磁波的能量 坡印廷矢量 / 253
- 28-9 辐射压强 / 255
- 28-10 广播和电视 无线电通信 / 256
- 第 29 章 光的波动特性 干涉 / 262**
- 29-1 波动说和微粒说 惠更斯原理和衍射 / 263
- 29-2 惠更斯原理和折射定律 / 264
- 29-3 干涉——杨氏双缝实验 / 265
- \* 29-4 双缝干涉图样中的光强分布 / 269
- 29-5 薄膜干涉 / 271
- \* 29-6 迈克尔逊干涉仪 / 276
- \* 29-7 发光强度 / 277
- 第 30 章 衍射和偏振 / 284**
- 30-1 单缝或圆盘衍射 / 285
- \* 30-2 单缝衍射图中的光强分布 / 287
- \* 30-3 双缝衍射实验 / 290
- 30-4 圆孔孔径大小对分辨率的影响 / 292
- 30-5 波长  $\lambda$  对望远镜和显微镜分辨率的影响 / 294
- \* 30-6 人眼分辨率和有效放大倍率 / 295
- 30-7 衍射光栅 / 296
- 30-8 分光仪和光谱学 / 298
- \* 30-9 衍射光栅的主极大宽度和分辨率 / 300
- 30-10 X 射线和 X 射线衍射 / 302
- 30-11 偏振 / 303
- \* 30-12 液晶显示器 (LCD) / 307
- \* 30-13 大气中的光散射 / 308
- 第 31 章 狭义相对论 / 312**
- 31-1 伽利略-牛顿相对性原理 / 313
- 31-2 狭义相对论的两条基本原理 / 315
- 31-3 同时的相对性 / 316
- 31-4 时间延缓和双生子佯谬 / 317
- 31-5 长度收缩 / 323
- 31-6 四维时空 / 325
- 31-7 伽利略变换和洛伦兹变换 / 326
- 31-8 相对论动量 / 329
- 31-9 极限速度 / 330
- 31-10 质能关系 / 331
- 31-11 狭义相对论的重大影响 / 334
- 第 32 章 早期量子理论和原子模型 / 338**
- 32-1 普朗克量子假说：黑体辐射 / 338
- 32-2 光子理论和光电效应 / 340
- 32-3 光子的能量、质量和动量 / 344
- 32-4 康普顿效应 / 345
- 32-5 光子相互作用 电子偶的产生 / 346
- 32-6 波粒二象性 互补性原理 / 347
- 32-7 物质的波动性 / 348
- \* 32-8 电子显微镜 / 350
- 32-9 早期原子模型 / 351
- 32-10 原子光谱：了解原子结构的重要途径 / 352
- 32-11 玻尔模型 / 354
- 32-12 德布罗意假说在原子中的应用 / 360
- 第 33 章 量子力学 / 365**
- 33-1 量子力学——一个新理论 / 366
- 33-2 波函数及其诠释 双缝实验 / 366
- 33-3 海森堡不确定性原理 / 368
- 33-4 哲学意义 可能性与确定性 / 371
- 33-5 一维定态薛定谔方程——不含时形式 / 372

“假如音乐是物理学家的食粮，那么请继续演奏吧。” [见莎士比亚《第十二夜》第一行]

弦乐器依靠弦上的横向驻波产生谐音，管乐器的声音源自空气柱的纵向驻波，打击乐器产生更复杂的驻波。

本章除了研究声源，我们也研究用分贝标度的声强级、声波的干涉和拍、多普勒效应、激波和声震以及超声成像。



## 第 16 章 声音

### 开篇问题——请猜一猜！

钢琴演奏者弹奏“中央C”键时，声音由钢琴弦的振动产生并通过空气的振动向外传播（这样琴声就能传到你的耳朵）。比较弦的振动和空气的振动，以下哪个表述是正确的？

- (a) 弦的振动和空气的振动有相同的波长；
- (b) 这两种振动有相同的频率；
- (c) 这两种振动有相同的速率；
- (d) 空气振动的波长、频率、速率都与弦的振动不同。

**声**音与我们的听觉有关，它与人耳的生理及人脑的心理特点也有关联。听觉体现声音传到入耳的感受，术语“声音”也指刺激人耳的物理感觉，声波是纵波。

我们可以从三个方面来研究声音：第一，声音必有一个声源，与任何机械波一样，声波的波源是一个振动物体；第二，能量以纵向声波的形式从声源向外传播；第三，声音由人耳或麦克风检测。我们通过声波本身的某些特性开始这一章的学习。

### 16-1 声波的特性

由第 15 章中的图 15-5 我们看到振动的鼓面是如何在空气中产生声波的。

#### 目录

- 16-1 声波的特性
- 16-2 声波（纵波）的数学表示
- 16-3 声音的强度：分贝
- 16-4 声源：振动的弦和空气柱
- \* 16-5 音质和噪声 叠加
- 16-6 声波的干涉 拍
- 16-7 多普勒效应
- \* 16-8 激波和声震
- \* 16-9 应用：声纳、超声波和医学成像

实际上, 由于在通常情况下是空气的振动迫使我们的耳膜振动, 因此我们往往考虑在空气中传播的声波。然而, 声波实际上也能够其他材料中传播。

水下两块石头相撞的声音能被水面下的游泳者听见, 这是因为水把振动传到了人耳。当你把耳朵紧贴地面时, 你能听到驶近的列车声或卡车声。这种情况下, 地面并不直接接触你的耳膜, 但是通过地面传递的纵波(也叫声波)的振动引起耳外和耳内空气振动。声音不能在没有介质的地方传播, 例如, 真空瓶子里的振铃声是听不见的, 声音也不能通过真空传播到外层空间。

不同材料中的声速 (speed of sound) 是不同的, 在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $1\text{ atm}$  的空气中, 声波以  $331\text{ m/s}$  的速率传播。在式 (15-4) ( $v = \sqrt{B/\rho}$ ) 中, 我们看到这一速率依赖于材料的体积模量  $B$  和密度  $\rho$ 。氦气因其体积模量与空气差别不大而密度远小于空气, 所以氦气中的声速大约是空气中的 3 倍。在液体和固体中, 由于它们的可压缩性很小, 因此体积模量大得多, 声速也更大。表 16-1 列出了一些材料中的声速, 这些数值或多或少与温度有关, 对于气体较明显。例如, 在通常(环境)温度的空气中, 温度每提高  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  声速近似增加  $0.60\text{ m/s}$ :

$$v \approx (331 + 0.60T)\text{ m/s} \quad [\text{空气中的声速}]$$

式中,  $T$  为以  $^{\circ}\text{C}$  为单位的温度。除非另外说明, 在本章中我们都假定  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 所以  $v = [331 + (0.60)(20)]\text{ m/s} = 343\text{ m/s}$ 。

**概念理解** 例 16-1 闪电的距离。判断何处有闪电的雷声经验是“一英里外发生的闪电要隔 5 s 后方能听见雷声”。解释为什么是这个结果。注意光速是如此之高 ( $3 \times 10^8\text{ m/s}$ , 几乎比声速快一百万倍), 以至于光传播至我们的时间与声音传播的时间相比可以忽略。

答: 空气中的声速大约是  $340\text{ m/s}$ , 所以传播  $1\text{ km} = 1\text{ 000 m}$  大约要花 3 s, 一英里约  $1.6\text{ km}$ , 所以雷声传播一英里的时间约为  $(1.6)(3) \approx 5\text{ s}$ 。

**练习 A** 在例 16-1 中, 如果是千米之外的闪电, 相应的雷声经验是什么?

对于听者来说, 声音的两个特性是非常重要的, 这就是“响度”和“音高”。它们都与听者的心理感受有关, 但是这些主观感受也对应物理上的“可测量”量。响度 (loudness) 与声波的强度(单位时间通过单位面积的能量)相关, 我们将在第 16-3 节讨论。

声音的音高 (pitch) 是指它是如短笛或小提琴那样的高音呢, 还是如大鼓或低音提琴那样的低音。决定音高的物理量是频率, 这由伽利略首先指出。频率越低, 音高越低; 频率越高, 音高越高<sup>②</sup>。最灵敏的人耳能对  $20 \sim 20\text{ 000 Hz}$  的频率作出反应, 此频率范围叫作可听范围 (audible range)。这两个极限因人而异而稍有差异, 一般是人的年纪越大越听不见高频声, 所以老年人的高频极限可能是  $10\text{ 000 Hz}$ , 甚至更低。

频率在可听范围之外的声波也会传至人耳, 但是我们一般感觉不到。高于  $20\text{ 000 Hz}$  频率的声波叫超声波 (ultrasonic) (不要与超音速混淆, 超音速是指物体运动的速率超过声速)。许多动物能听到超声波, 例如, 狗能听到高达  $50\text{ 000 Hz}$  的声音, 蝙蝠能探测到的频率高达  $100\text{ 000 Hz}$ 。超声波在医学和其他

表 16-1 各种材料中的声速  
( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $1\text{ atm}$ )

材料	声速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
空气	343
空气 ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	331
氦气	1 005
氢气	1 300
水	1 440
海水	1 560
铁和钢	$\approx 5\text{ 000}$
玻璃	$\approx 4\text{ 500}$
铝	$\approx 5\text{ 100}$
硬木	$\approx 4\text{ 000}$
混凝土	$\approx 3\text{ 000}$

## 物理应用

### 闪电的距离

## 注意

不要混淆超声(高频)与超音(高速)

<sup>①</sup>我们处理  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (“室温”) 时, 将数据精确到 2 位有效数字。

<sup>②</sup>虽然音高主要由频率决定, 但它也略依赖于响度。例如, 很响的声音似乎比相同频率的轻的声音的音高稍低。

领域有许多应用，我们将在本章稍后讨论。

**例 16-2 利用超声波自动对焦。** 老式的自动对焦相机通过发射一个很高频率（超声）的脉冲信号测定其到照相物体的距离，它包括一个检测反射声波的传感器，如图 16-1 所示。为了了解检测器的时间灵敏度，计算物体位于 (a) 1.0 m 外，(b) 20 m 外时脉冲信号的传播时间。

**解题思路：**如果我们假定温度大约为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，那么声速为  $343\text{ m/s}$ 。利用声速  $v$  和两种情况下的信号来回总距离  $d$ ，可以得出时间 ( $v=d/t$ )。

**解：**(a) 脉冲信号传播 1.0 m 到达物体，再经 1.0 m 返回，传播距离共 2.0 m，我们用  $v=d/t$  解得  $t$ ：

$$t = \frac{d}{v} = \frac{2.0\text{ m}}{343\text{ m/s}} = 0.0058\text{ s} = 5.8\text{ ms}$$

(b) 现在总距离是  $2 \times 20\text{ m} = 40\text{ m}$ ，所以

$$t = \frac{40\text{ m}}{343\text{ m/s}} = 0.12\text{ s} = 120\text{ ms}$$

**注：**新式的自动对焦相机用红外线 ( $v=3 \times 10^8\text{ m/s}$ ) 而不是超声波测距，当镜头自动前后移动时，数字传感器阵列检测相邻接收器接收到的光强差，通过选取镜头位置使之具有最大光强差（最大反差对焦）。

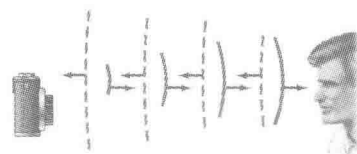


图 16-1 例 16-2，自动对焦相机发射一超声波脉冲。实线表示向右传播的脉冲波前，虚线表示从人脸反射回到相机的脉冲波前。脉冲来回传播的时间信息可使相机的机械装置调节镜头，并聚焦在适当的距离上

频率低于可听范围（即小于  $20\text{ Hz}$ ）的声波叫次声波（**infrasonic**）。次声源包括地震、雷声、火山以及振动的重型机械。重型机械产生的次声波特别令工人烦恼，因为次声波即便听不见也会对人体造成损伤。这些低频波以共振方式起作用，会引起身体器官的移位和不适。

## 16-2 声波（纵波）的数学表示

在第 15-4 节我们看到，沿  $x$  轴传播的正弦波可用下式（式 15-10c）表示

$$D = A \sin(kx - \omega t) \quad (16-1)$$

式中， $D$  为  $t$  时刻波在  $x$  位置的位移， $A$  为它的振幅（位移的最大值），波数  $k$  与波长  $\lambda$  的关系为  $k = 2\pi/\lambda$ ， $\omega = 2\pi f$ ，这里  $f$  为频率。对于横波，如弦上的波，位移  $D$  垂直于沿  $x$  轴的波的传播方向；但是对于纵波，位移  $D$  则是沿波的传播方向，也就是  $D$  平行于  $x$  轴，它表示媒质的一个小体积元离开其平衡位置的位移。

声波（纵波）也可以不从位移的角度而从压强变化的角度考虑。实际上，声波也常被称为**压强波（pressure wave）**，通常压强的变化比位移更容易测量（见例 16-7）。由图 16-2 可见，波的“压缩”部分（此处分子聚集最紧密）的压强要比正常值高，而“膨胀”（或稀薄）部分的压强小于正常值。图 16-3 为分别用 (a) 位移和 (b) 压强表示的空气中的声波。注意位移波和压强波有四分之一波长或  $90^\circ$  ( $\pi/2$  弧度) 的相位差：压强最大或最小处的位移（相对于平衡位置）为零；而在压强变化为零处，位移最大或者最小。

### 压强波的推导

现在让我们来推导行进声波中压强变化的数学表达式。由体积模量  $B$  的定

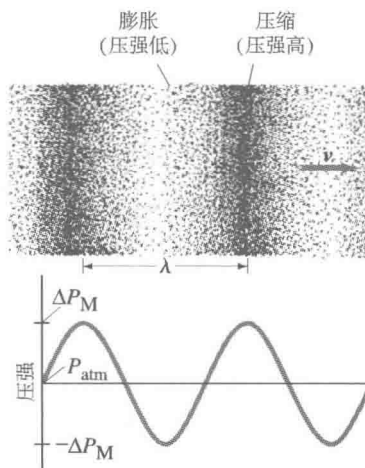


图 16-2 以压强表示的向右传播的声波

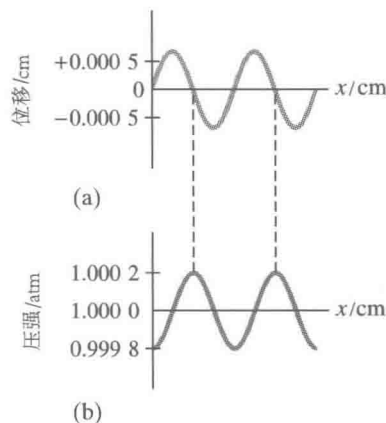


图 16-3 用 (a) 位移、(b) 压强表示的给定时刻空气中的声波

义(式12-7)得,

$$\Delta P = -B(\Delta V/V)$$

式中,  $\Delta P$  表示与正常压强  $P_0$  (波不存在时) 的压强差(声压),  $\Delta V/V$  为由于压强改变  $\Delta P$  而引起的介质体积的微小相对变化量, 负号表示压强增加时体积减小 ( $\Delta V < 0$ )。现在考虑声波通过流体的一个薄层的情况(图16-4), 假设这一薄层的厚度为  $\Delta x$ 、面积为  $S$ , 那么, 它的体积  $V = S\Delta x$ 。由于波通过时的压强变化导致流体体积的改变量是  $\Delta V = S\Delta D$ , 此处  $\Delta D$  是薄层压缩或膨胀时厚度的改变量,  $D$  表示介质的位移。因此, 我们得到

$$\Delta P = -B \frac{S\Delta D}{S\Delta x}$$

为了精确起见, 我们取  $\Delta x \rightarrow 0$  的极限, 所以得到

$$\Delta P = -B \frac{\partial D}{\partial x} \quad (16-2)$$

式中, 用偏导数标记是因为  $D$  既是  $x$  的函数也是  $t$  的函数。假如位移  $D$  如式(16-1)那样以正弦函数的规律变化, 那么由式(16-2)得到

$$\Delta P = -(BAk)\cos(kx - \omega t) \quad (16-3)$$

(式中的  $A$  为位移振幅, 并不是面积, 面积为  $S$ 。)因此压强也以正弦函数的规律变化, 但是在相位上与位移差  $90^\circ$  或四分之一波长, 如图16-3所示。  $BAk$  称为声压振幅 (pressure amplitude), 记为  $\Delta P_M$ , 它表示压强相对于周围正常压强变化的最大和最小值。因此, 可将上式写为

$$\Delta P = -\Delta P_M \cos(kx - \omega t) \quad (16-4)$$

利用  $v = \sqrt{B/\rho}$  (式15-4) 和  $k = \omega/v = 2\pi f/v$  (式15-12), 则

$$\Delta P_M = B A k = \rho v^2 A k = 2\pi \rho v A f \quad (16-5)$$

## 16-3 声音的强度: 分贝

响度 (loudness) 是人们在心理上的感受, 它与物理上的可测量, 即波的强度 (intensity) 相对应。波的强度定义为单位时间内通过垂直于能流的单位面积上的波所传递的能量。正如我们在第15章中所看到的, 强度正比于波振幅的平方。强度的单位为瓦/米<sup>2</sup> ( $\text{W}/\text{m}^2$ )。

人耳能够听到的声音强度从  $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$  到  $1 \text{ W}/\text{m}^2$  (甚至更高, 尽管那已在痛觉阈之上), 这是一个难以置信的强度范围, 从最低值至最高值有  $10^{12}$  的跨度。尽管我们可以听到的声音强度范围如此之大, 可是我们能感觉到的响度并不正比于强度。为了产生一个约2倍响度的声音, 需要约10倍强度的声波, 这一结论对接近可听范围中间频率的任何声音来说都是大致成立的。例如, 对一个普通人来说, 强度为  $10^{-2} \text{ W}/\text{m}^2$  的声波听起来是强度为  $10^{-3} \text{ W}/\text{m}^2$  的声波响度的2倍, 是强度为  $10^{-4} \text{ W}/\text{m}^2$  的声波响度的4倍。

### 声强级

由于强度的主观感受与物理上的可测量“强度”存在这一关系, 声强级通常以对数标度来确定, 这一标度的单位是贝尔 (bel), 以发明家亚历山大·格拉汉姆·贝尔 (Alexander Graham Bell) 的名字命名。然而更通用的声强级单位是分贝 (decibel, dB), 1分贝等于1/10贝尔 ( $10 \text{ dB} = 1 \text{ bel}$ )。任何声音的声

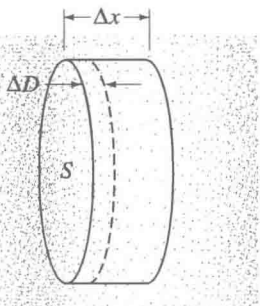


图16-4 一流体中的声波向右传播。当波通过流体的一个面积为  $S$ 、厚度为  $\Delta x$  的薄层时, 由于压强变化引起其体积变化。在图示时刻, 若波向右传播使压强增加, 则薄层的厚度将减小一个量  $\Delta D$

### 物理应用

人的听力范围

强级 (sound level)  $\beta$  用强度  $I$  定义为

$$\beta = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad [\text{单位 dB}] \quad (16-6)$$

式中,  $I_0$  为选定的参考强度, 对数取以 10 为底。  $I_0$  通常取正常人耳能听到的最小强度——“听觉阈”,  $I_0 = 1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 。因此, 强度  $I = 1.0 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$  声音的声强级是

$$\beta = 10 \lg \left( \frac{1.0 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2}{1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = 10 \lg 100 = 20 \text{ dB}$$

这是因为  $\lg 100 = 2.0$ 。请注意: 听觉阈的声强级为 0 dB, 由于  $\lg 1 = 0$ ,  $\beta = 10 \lg 10^{-12}/10^{-12} = 10 \lg 1 = 0$ 。还要注意, 强度增加 10 倍对应于声强级增加 10 dB, 强度增加 100 倍对应于声强级增加 20 dB。因此, 50 dB 声音的强度是 30 dB 声音的 100 倍。以此类推。

几种常见声音的强度和声强级列于表 16-2。

**注意**

0 dB 并不意味着声强为零

表 16-2 各种声音的强度

声源	声强级/ dB	声强/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )
30 m 外的喷气式飞机	140	100
痛觉阈	120	1
喧闹的摇滚音乐会	120	1
30 m 外的汽笛	100	$1 \times 10^{-2}$
重型卡车	90	$1 \times 10^{-3}$
交通繁忙的街道	80	$1 \times 10^{-4}$
嘈杂的饭馆	70	$1 \times 10^{-5}$
相距 50 cm 的谈话	65	$3 \times 10^{-6}$
小音量无线电广播	40	$1 \times 10^{-8}$
耳语	30	$1 \times 10^{-9}$
树叶沙沙声	10	$1 \times 10^{-11}$
听觉阈	0	$1 \times 10^{-12}$

**例 16-3** 街道上的声强。在嘈杂的街角, 声强级为 75 dB, 那里的声强为多少?

**解题思路:** 我们必须由式 (16-6) 求得强度  $I$ , 记住  $I_0 = 1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 。

**解:** 由式 (16-6) 得

$$\lg \frac{I}{I_0} = \frac{\beta}{10}$$

所以

$$\frac{I}{I_0} = 10^{\beta/10}$$

因为  $\beta = 75$ , 故

$$I = I_0 10^{\beta/10} = (1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2) (10^{7.5}) = 3.2 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$$

**注:**  $x = \lg y$  等同于  $y = 10^x$ 。

**例 16-4** 扬声器的响应。广告声称一只高质量扬声器在播放 30 Hz 至 18 000 Hz 频率的声音时, 在全音量范围内的声强级均匀度为  $\pm 3 \text{ dB}$ , 即在这一频率范围内, 对给定的输入声强级, 输出的声强级变化不会超过 3 dB。对于最大变化为 3 dB 的输出声强级, 声强变化的倍数为多少?

**解题思路:** 设平均声强为  $I_1$ , 平均声强级为  $\beta_1$ , 最大声强  $I_2$  对应声强级  $\beta_2 = \beta_1 + 3 \text{ dB}$ , 然后运用声强和声强级之间的关系式 (16-6)。

**解:** 由式 (16-6) 得到

$$\beta_2 - \beta_1 = 10 \lg \frac{I_2}{I_0} - 10 \lg \frac{I_1}{I_0}$$

$$3 \text{ dB} = 10 \left( \lg \frac{I_2}{I_0} - \lg \frac{I_1}{I_0} \right) = 10 \lg \frac{I_2}{I_1}$$

因  $(\lg a - \lg b) = \lg (a/b)$ , 由最后一个方程得到

$$\lg \frac{I_2}{I_1} = 0.30$$

或

$$\frac{I_2}{I_1} = 10^{0.30} = 2.0$$

所以声强级变化  $\pm 3 \text{ dB}$  对应于声强加倍或减半。

**物理应用**

扬声器的响应 ( $\pm 3 \text{ dB}$ )

值得注意的是, 3 dB 的声强级差 (它对应于声强加倍, 正如刚才所看到的

那样)所对应的仅仅是响度在主观感受上很小的变化,实际上,普通人能区分的声强级差大约为1或2 dB。

**练习B** 声强级增加3 dB意味着“强度加倍”,声强级增加6 dB意味着强度如何?

**概念理解 例 16-5 小号演奏者。** 一位小号演奏者以75 dB的声强级演奏,另三位小号演奏者以同样的响度加入演奏,新的声强级是多少?

答:4只小号的声强是1只小号(= $I_1$ )的4倍,即 $4I_1$ ,因此4只小号的声强级是

$$\begin{aligned}\beta &= 10 \lg \frac{4I_1}{I_0} = 10 \lg 4 + 10 \lg \frac{I_1}{I_0} \\ &= 6.0 \text{ dB} + 75 \text{ dB} = 81 \text{ dB}\end{aligned}$$

**练习C** 由表16-2可以看到,普通对话的声强级约为65 dB。若两个人同时说话,声强级为(a) 65 dB; (b) 68 dB; (c) 75 dB; (d) 130 dB; (e) 62 dB。

正常情况下,声音的响度或强度随着声源远离而降低。但在室内,由于存在墙壁的反射,效果却不是这样。只有当声源处在能向四周自由辐射的开放环境中,其强度才与距离的平方成反比,

$$I \propto \frac{1}{r^2}$$

如我们在第15-3节看到的,当声源相距很远时,强度减小比 $1/r^2$ 更快。这是因为部分能量转换成了空气分子的无规则运动,频率越高产生的损耗越多,所以任何混合着各种频率的声音在远处听起来都将失去“嘹亮性”。

**物理应用**

喷气式飞机的噪声



图 16-5 戴着降低声强耳罩的机场工作人员

**例 16-6 飞机的轰鸣。** 距一架喷气式飞机30 m处测得的声强级为140 dB,在距飞机300 m处测得的声强级为多少?(忽略地面的反射。)

**解题思路:** 如果给定声强级,我们可以用式(16-6)求得30 m处的声强,由于声强随距离平方减小,若忽略反射,我们可以得到300 m处的 $I$ 并再次运用式(16-6)得到声强级。

解:30 m处的声强 $I$ 为

$$140 \text{ dB} = 10 \lg \left( \frac{I}{10^{-12} \text{ W/m}^2} \right)$$

或

$$14 \text{ dB} = \lg \left( \frac{I}{10^{-12} \text{ W/m}^2} \right)$$

以方程两边作为10的幂次(提示 $10^{\lg x} = x$ ),则有

$$10^{14} = \frac{I}{10^{-12} \text{ W/m}^2}$$

所以 $I = (10^{14})(10^{-12} \text{ W/m}^2) = 10^2 \text{ W/m}^2$ 。在300 m处,距离是原来的10倍,声强将是原值的 $\left(\frac{1}{10}\right)^2 = 1/100$ ,即 $1 \text{ W/m}^2$ 。因此,声强级为

$$\beta = 10 \lg \left( \frac{1 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = 120 \text{ dB}$$

即使在300 m处,声音的声强级也在痛觉阈以上,所以机场工作人员要佩戴耳罩以免听力受损(图16-5)。

注：以下是一个计算声强级的更简单方法，不必使用式 (16-6)。因为强度随距离平方减小，在 10 倍远的距离处强度减小到原值的  $(\frac{1}{10})^2 = \frac{1}{100}$ ，我们可以用 10 dB 对应于 10 倍强度变化这一结论（见例 16-3 前的文字），那么强度变化 100 倍对应于声强级变化为  $(2)(10 \text{ dB}) = 20 \text{ dB}$ 。这也证实了我们上面的结果： $140 \text{ dB} - 20 \text{ dB} = 120 \text{ dB}$ 。

### 强度与振幅

波的强度  $I$  正比于波振幅的平方，就如我们在第 15 章看到的那样。因此，我们可以将振幅与强度  $I$  或声强级  $\beta$  定量地联系起来，如下例所示。

**例 16-7 微小的位移。** (a) 计算声强级处于听觉阈、频率为 1 000 Hz 的声波传播中空气分子的最大位移；(b) 求出同一声波中的最大压强变化。

**解题思路：**在第 15-3 节中，我们得到了波的强度  $I$  和位移振幅  $A$  之间的关系式 (15-7)，如果给定强度，要求解空气分子振荡的振幅，由式 (16-5) 可计算压强。

**解：**(a) 听觉阈的  $I = 1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$  (表 16-2)，用式 (15-7) 求解振幅  $A$ ：

$$A = \frac{1}{\pi f \sqrt{2\rho v}} \sqrt{\frac{I}{2\rho v}} = \frac{1}{(3.14)(1.0 \times 10^3 \text{ s}^{-1}) \sqrt{(2)(1.29 \text{ kg/m}^3)(343 \text{ m/s})}} \sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2}{2(1.29 \text{ kg/m}^3)(343 \text{ m/s})}}$$

$$= 1.1 \times 10^{-11} \text{ m}$$

式中，空气密度取  $1.29 \text{ kg/m}^3$ ，空气中的声速（假定  $20^\circ\text{C}$ ）为  $343 \text{ m/s}$ 。

注：我们看到人耳具有不可思议的灵敏度，它能探测空气分子的位移，而这个位移实际上小于原子的直径（约  $10^{-10} \text{ m}$ ）。

(b) 现在把声波作为压强波处理（第 16-2 节），由式 (16-5)

$$\Delta P_M = 2\pi\rho v A f = 2\pi(1.29 \text{ kg/m}^3)(343 \text{ m/s})(1.1 \times 10^{-11} \text{ m})(1.0 \times 10^3 \text{ s}^{-1})$$

$$= 3.1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

或  $3.1 \times 10^{-10} \text{ atm}$ 。我们再次看到人耳的灵敏度是多么不可思议。

### 物理应用

人耳不可思议的灵敏度

结合式 (15-7) 和式 (16-5)，我们可以用声压振幅  $\Delta P_M$  表示强度：

$$I = 2\pi^2 \rho v f^2 A^2 = 2\pi^2 \rho v f^2 \left( \frac{\Delta P_M}{2\pi\rho v f} \right)^2$$

$$I = \frac{(\Delta P_M)^2}{2\rho v} \quad (16-7)$$

当强度以声压振幅表示时，它与频率无关。

### 人耳的响应

人耳对各种频率声波的灵敏度是不同的，要使不同频率的声音听起来响度相同，就必须有不同的强度。通过对人群的研究得到的曲线如图 16-6 所示，图中每一条曲线表示一个响度级 (loudness level) (单位为方)，它在数值上等于 1 000 Hz 的声波以 dB 为单位的声强级。例如，标记为 40 方的曲线表示一个普通人听到的与 1 000 Hz 的 40 dB 的声强级有同样响度的声音。从 40 方的曲线上我们看到，100 Hz 的乐音必须以约 62 dB 的声强级播放才会与 1 000 Hz 的 40 dB 的乐音达到同样的响度。

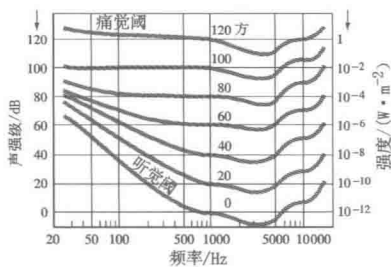


图 16-6 人耳的灵敏度是频率的函数（见正文）。注意频率以“对数”标度以便覆盖更广泛的频率范围

图 16-6 最底部的曲线（标记为 0）表示听觉阈的响度级，为频率的函数，对应一个听力很好的人耳刚好能听到的最柔和的声音。值得注意的是，人耳对频率为 2 000~4 000 Hz 的声音最敏感，人们说话和欣赏的音乐通常处于这个频率范围。还要注意，尽管一个 1 000 Hz 的刚能听得见的声音在 0 dB 声级，但 100 Hz 的声音必须接近 40 dB 才能被听到。图 16-6 顶部，标记为 120 方的曲线表示痛觉阈，超过这一级的声音会使人耳疼痛。

图 16-6 表明在较低的声强级，相对于中频声来说，人耳对高频和低频声不那么敏感。在某些立体声系统中，“响度”控制采用的方法是设法补偿低音量时的不灵敏度。当音量调低时，响度控制促使高频和低频音与中频音接近，这样就在频率间达到一种平衡，使声音听上去更加正常。然而，许多听众发现没有响度控制的声音更令人愉快、更加自然。

## 16-4 声源：振动的弦和空气柱

任何声源都是一个振动的物体，几乎任何物体都能产生振动，因此都可以作为声源。我们现在讨论某些简单的声源，比如乐器。乐器通过打击、弹拨、用弓拉或吹奏引起振动，并由此产生驻波。振源以其固有谐振频率振动，振源与空气（或其他介质）接触并通过空气振动将声波向外传播。声波的频率与振源的频率相同，但是速度和波长可以不同。鼓是靠一块绷紧的鼓面产生振动，木琴和马林巴琴是靠金属或木制的音条产生振动，铃、钹和锣也是用振动的金属发声。还有许多乐器用振动的弦发音，如小提琴、吉他和钢琴，或者用振动的空气柱发音，例如长笛、小号和管风琴。我们已经看到纯音的音高由频率确定，对于由中央 C 调开始的“等半音阶”音符一个八度的典型频率见表 16-3。注意一个八度对应于频率加倍，例如，中央 C 调的频率为 262 Hz，而 C' 调（中央 C 调之上的高音 C 调）的频率是其 2 倍，为 524 Hz。[中央 C 即 C 调或钢琴键中间的“哆”调。]

表 16-3 等半音阶\*

音调	频率/Hz
C	262
C <sup>#</sup> 或 D <sup>b</sup>	277
D	294
D <sup>#</sup> 或 E <sup>b</sup>	311
E	330
F	349
F <sup>#</sup> 或 G <sup>b</sup>	370
G	392
G <sup>#</sup> 或 A <sup>b</sup>	415
A	440
A <sup>#</sup> 或 B <sup>b</sup>	466
B	494
C'	524

\* 仅包含一个八度。

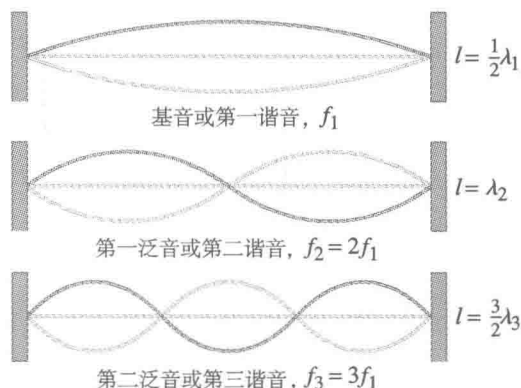


图 16-7 弦上的驻波（仅画出三个最低频率）

### 弦乐器

在第 15 章的图 15-26b 中，我们看到弦上的驻波是如何建立的，我们在图 16-7 中再次画出，这样的驻波是所有弦乐器的基础。音高在正常情况下由最低谐振频率即基频（fundamental）确定，对应的波节仅出现在弦的两端，整根上下振动的弦的长度对应半个波长，如图 16-7 上部图形所示，所以弦上基频波的

波长等于弦长的 2 倍。因此，基频  $f_1 = v/\lambda = v/(2l)$ ，式中  $v$  为弦上（不是空气中）的波速。在一根拉紧的弦上可能存在的驻波频率是基频的整数倍：

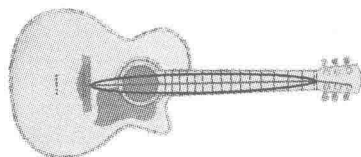
$$f_n = nf_1 = n \frac{v}{2l}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

式中， $n=1$  指基音（基频）， $n=2, 3, \dots$  为泛音（谐频）。所有的驻波， $n=1, 2, 3, \dots$ ，称为谐波<sup>①</sup>，如我们在第 15-9 节所看到的那样。

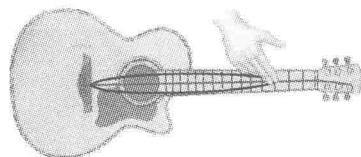
当我们把手指按在吉他或小提琴的琴弦上时，弦的有效长度变短，于是它的基音以及音高由于基频波的波长变短（图 16-8）而升高。吉他或者小提琴上的各根弦长度都相同，它们之所以发出不同音高的声音是因为这些弦具有不同的单位长度质量  $\mu$ ，从而影响了弦上的波速，波速  $v$  由式 (15-2) 决定

$$v = \sqrt{F_T/\mu} \quad \text{[拉紧的弦]}$$

因此较重弦上的波速较低，同一波长下的频率将变低。张力  $F_T$  也有可能不同。改变张力是调节每根弦音高的方法，钢琴和竖琴的弦有不同的长度，为调出较低的音调，不仅弦要更长，而且还要更重，理由将在下例中说明。



(a)



(b)

图 16-8 (a) 手指未按在弦上时的波长比 (b) 手指按在弦上时长。因此，手指按在弦上时频率升高。图上只画了一根弦和最简单的驻波（基频波）

**例 16-8 钢琴的弦。** 钢琴的最高音所对应的频率大约是最低音的 150 倍，若最高音的弦长为 5.0 cm，那么，在相同的张力下，与高音弦具有相同单位长度质量的最低音的弦长必须是多少？

**解题思路：**由于  $v = \sqrt{F_T/\mu}$ ，两根弦上的波速相同，所以频率反比于弦的长度  $l$  [ $f = v/\lambda = v/(2l)$ ]。

**解：**对每根弦的基频，我们可以得到比例关系

$$\frac{l_L}{l_H} = \frac{f_H}{f_L}$$

式中，下标 L 和 H 分别是指最低和最高音调，于是  $l_L = l_H(f_H/f_L) = (5.0 \text{ cm})(150) = 750 \text{ cm}$ ，或 7.5 m。对钢琴来说，这是个荒谬的长度 ( $\approx 25 \text{ ft}$ )。

**注：**因为最大的钢琴琴弦长度也不超过 3 m，所以对较低频的琴弦必须具有更重的质量。

**练习 D** 两根弦的长度和张力相同，但一根比另一根重，哪一根弦奏出的音调高？

**例 16-9 小提琴的频率和波长。** 用一根 0.32 m 长的小提琴弦演奏中央 C 之上的 A 调，对应频率 440 Hz。(a) 弦振动的基频波波长为多少？(b) 产生的声波的频率和波长是多少？(c) 它们为何不同？

**解题思路：**弦振动的基频波波长等于弦长的 2 倍（图 16-7），当弦振动时，它推动空气，迫使其以与弦振动相同的频率振动。

**解：**(a) 由图 16-7 可知，基频波波长为

$$\lambda = 2l = 2(0.32 \text{ m}) = 0.64 \text{ m} = 64 \text{ cm}$$

这是弦上驻波的波长。

(b) 在空气中向外传播的声波有相同的频率 440 Hz，其波长为

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343 \text{ m/s}}{440 \text{ Hz}} = 0.78 \text{ m} = 78 \text{ cm}$$

<sup>①</sup>当高于基频（基音）的谐振频率（即泛音）是基频的整数倍时（如在此处），则称它们为谐音。但是如果泛音不是基频的整数倍（如振动鼓面的频率），它们就不是谐音。

**注意**

弦上驻波的速度 ≠ 空气中声波的速度

式中  $v$  为空气 (假设 为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 中的声速, 见第 16-1 节。

(c) 声波波长不同于弦上驻波波长是因为空气中的声速 ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时为  $343\text{ m/s}$ ) 不同于弦上的波速 ( $=f\lambda=440\text{ Hz}\times 0.64\text{ m}=280\text{ m/s}$ ), 后者依赖于弦的张力和单位长度弦的质量。

**注:** 弦和空气的振动频率是相同的: 弦与空气接触, 弦“迫使”空气以同样的频率振动。由于弦上的波速与空气中的波速不同, 故弦上的驻波波长与声波波长不同。



(a)



(b)

图 16-9 (a) 钢琴上连接琴弦的共鸣板; (b) 吉他的共鸣箱

假如弦乐器仅靠它们的弦的振动产生声波, 由于弦太细, 并不能压缩和扩散太多的空气, 故弦乐器发出的声音不会太响, 因此弦乐器都必须借助一种叫作共鸣板 (钢琴) 或共鸣箱 (吉他、小提琴) 的机械放大装置, 通过增大与空气的接触面积将声音放大 (图 16-9)。当弦振动时, 共鸣板或共鸣箱也随之振动, 由于它们与空气的接触面积更大, 能产生更强的声波。对于电吉他, 因为弦的振动是靠电来放大的, 共鸣箱就不再重要。

**管乐器**

木管乐器、铜管乐器和管风琴这些乐器是由管中的空气柱形成的驻波振动发出声音的 (图 16-10)。驻波可以出现在任意腔体内的空气中, 即便是对于形状简单的, 如长笛、竖琴管那样的均匀细管, 频率也非常复杂。在某些管乐器中, 靠振动簧片或演奏者的嘴唇产生空气柱的振动, 而在另一些管乐器中, 由一股气流流向一个开口或吹嘴的边缘引起的扰动产生振动, 无论扰动是怎么产生的, 都能使管中的空气以各种频率振动, 但是仅有形成驻波的频率才能持续。

我们在图 16-7 中看到, 对于两端固定的弦, 弦的两端是驻波波节 (固定不动), 其间有一个或多个波腹 (振动的最大振幅), 相邻波腹之间有一个波节。最低频率的驻波只有单个波腹, 较高频率的驻波称为泛音 (overtone) 或谐音 (harmonic)。就如我们在第 15-9 节中看到的那样, 第一谐音称为基音 (基频), 第二谐音 (第一泛音) 的频率为基音频率的 2 倍, 以此类推。



图 16-10 管乐器: 长笛 (左) 和单簧管

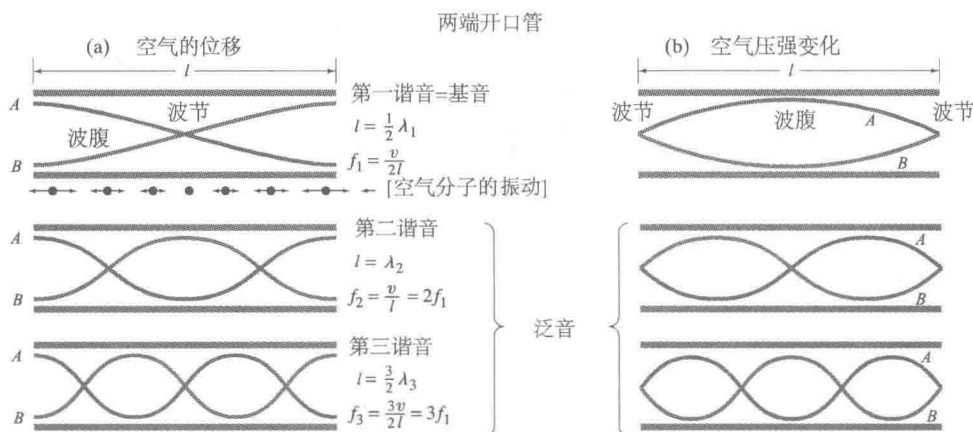


图 16-11 两端开口的均匀管 (“开口管”) 的三个最简单的振动模式 (驻波) 图: (a) 根据空气的移动 (位移) 画出, (b) 根据空气压强画出。每个图均画出了相隔半个周期的两个时刻 A 和 B 时的波形, 基频波情况下分子的实际振动画在 (a) 中基音图的正下方

对于直径均匀的管中空气柱的情形是类似的, 但是我们必须知道现在是空气本身在振动, 我们对波的描述既可以用气流, 即空气的位移, 也可以用空气的压强 (见图 16-2 和图 16-3)。如用位移表示, 因为在管内的闭合端空气不能

自由流动，此处是空气位移节点（波节），由于空气在管子的开口端可以自由进出，故在靠近管子开口端处是一个波腹点。管中的空气以驻波（纵波）的形式振动。两端开口的管子〔叫开口管（open tube）〕可能的振动模式如图 16-11 所示，一端开口、另一端封闭的管子〔叫封闭管（closed tube）〕的振动模式如图 16-12 所示。〔两端都封闭的管子，因内部空气不与外部相连，所以不能用作乐器。〕两幅图的（a）部分（图的左边）表示管中空气振动的位移振幅，注意这只是图示，空气分子本身的振动沿水平方向且平行于管长，如图 16-11a（左边）上部图中的小箭头所示。波腹靠近管的开口端，其确切位置与管子的直径有关，但是对于通常情况下直径与管长相比很小时，波腹出现在如图所示的紧邻端口处。以下我们都假定是这种情况。（波腹的位置可能也略微与波长及其他因素有关。）

让我们详细研究图 16-11 中的开口管，它可能是一根竖琴管或长笛，由于开口端空气是自由流动的，故开口管的两端均是位移波腹。在一根开口管中如果要形成驻波，必须至少有一个波节，单波节对应于管子的基频。由于两个相邻波节或相邻波腹间的距离为  $\frac{1}{2}\lambda$ ，所以最简单的基频情况是管长为波长的  $1/2$

（图 16-11a 顶部的图）： $l = \frac{1}{2}\lambda$ ，或  $\lambda = 2l$ 。基频为  $f_1 = v/\lambda = v/(2l)$ ，这里  $v$  为空气（管中空气）中的声速。有两个波节的驻波为第一泛音或第二谐音，波长为基音波长的一半（ $l = \lambda$ ），或频率为基音频率的 2 倍。实际上，在两端开口的均匀管中，每一泛音的频率都是基频（基音）的整数倍，如图 16-11a 所示，这与弦振动的结果一致。

对于封闭管，如图 16-12 所示，它可能是一根竖琴管。在封闭端总是位移波节（因空气不能自由流动），而在开口端（此处空气可以自由流动）总是波腹。由于波节到最近一个波腹的距离为  $\frac{1}{4}\lambda$ ，我们看到在封闭管中基频波的管长对应于波长的  $1/4$ ： $l = \lambda/4$ ，或  $\lambda = 4l$ 。因此基频为  $f_1 = v/(4l)$ ，即同样长度开口管基频的一半。我们能从图 16-12a 中看到的另一个与开口管的不同之处在于封闭管中仅存在奇数谐波：泛音的频率等于基频的 3, 5, 7, … 倍，频率为基频的 2, 4, 6, … 倍的波不可能使管的一端为波节而另一端为波腹，因此它们不可能以驻波的形式存在于封闭管中。

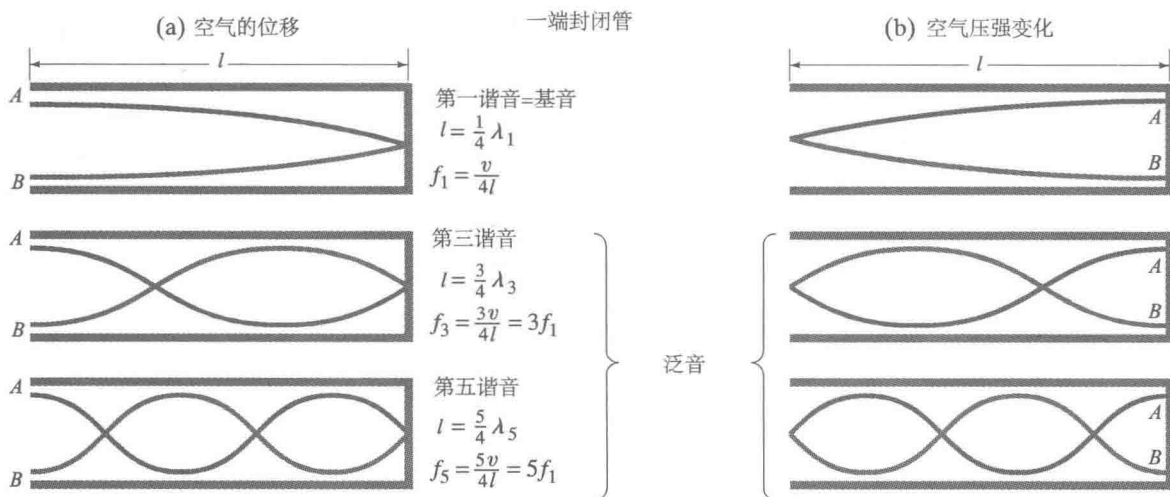


图 16-12 一端封闭管（“封闭管”）的振动模式（驻波），见图 16-11 的图解