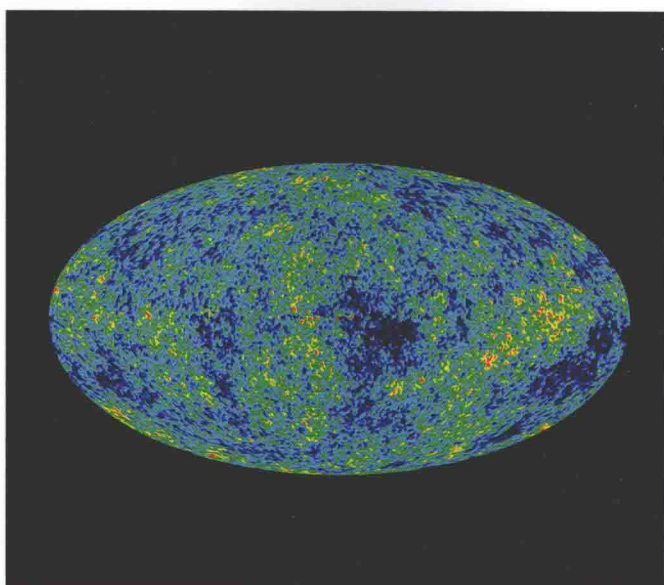
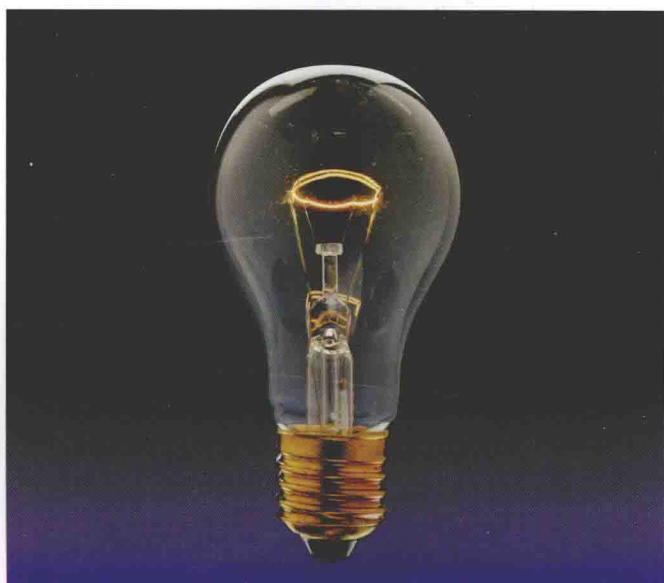
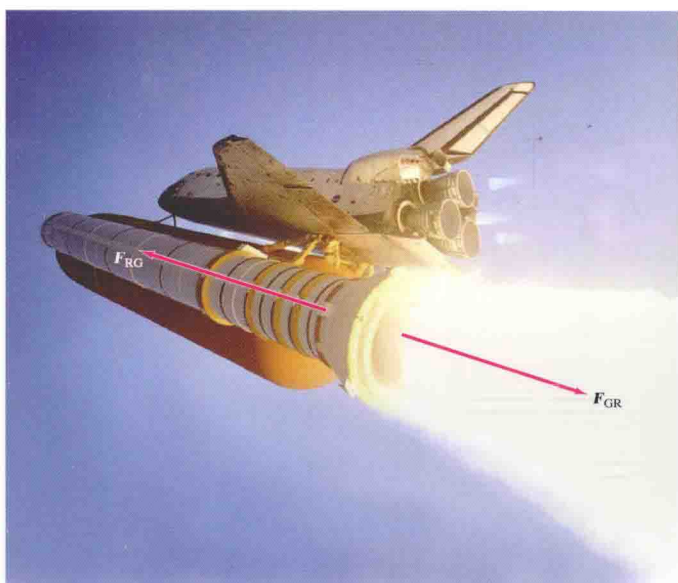


PEARSON

# 大学物理 (下)

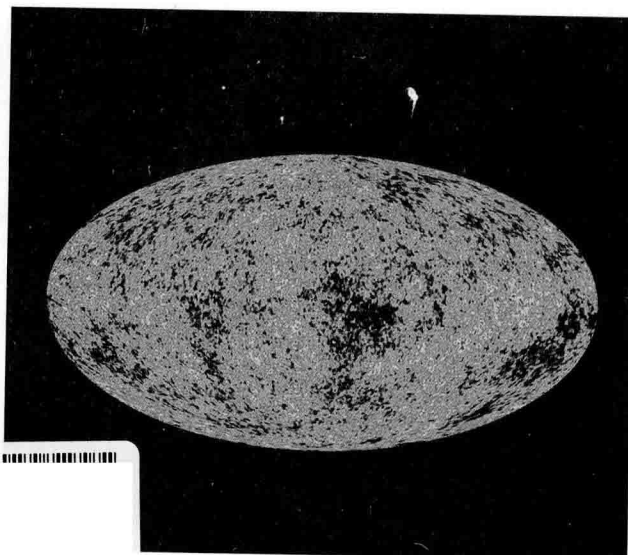
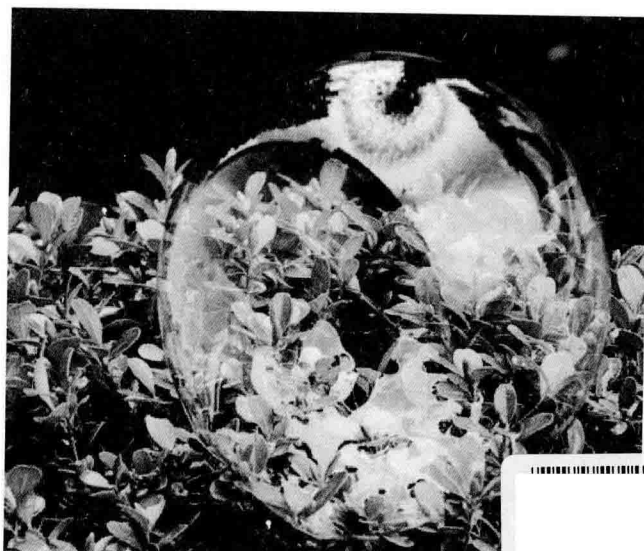
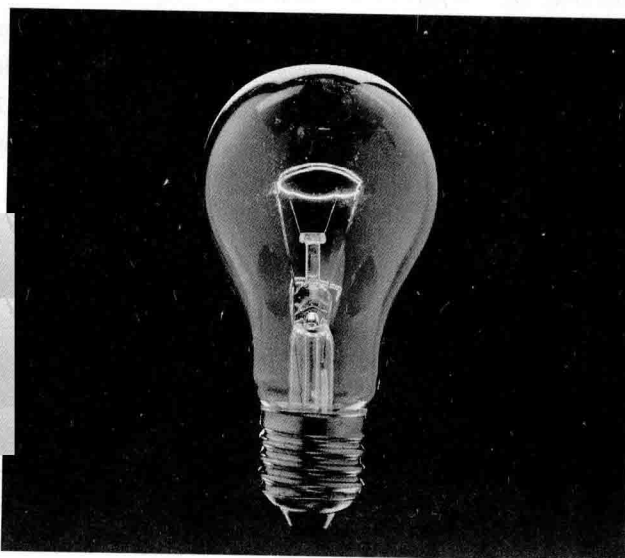
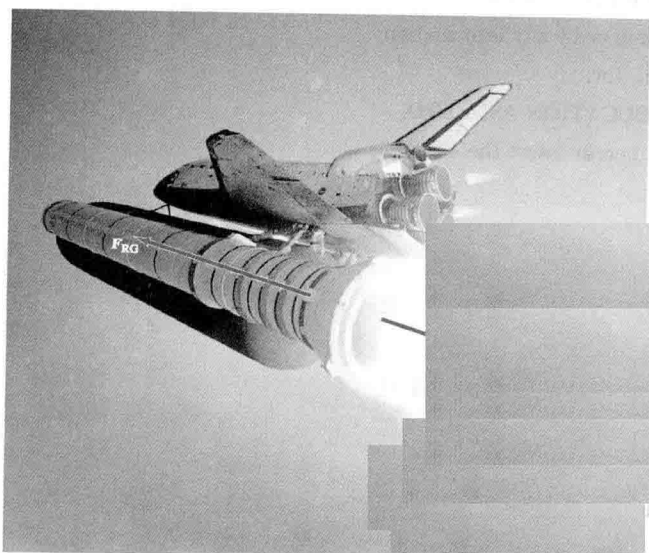
[美] 詹科利 (Giancoli, D.C.) 著  
东华大学物理教研室 译



东华大学出版社

# 大学物理 (下)

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



东华大学出版社

## 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. —上海: 东华大学出版社, 2015. 5  
ISBN 978-7-5669-0778-3

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(2015)第 084895 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 [Publisher shall herein insert the name of the copyright holder of the English version of the Work; Publisher shall refer to the copyright notice page of the English version of the Work to determine such name].

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 © [Publisher shall herein insert the Year of Publication].

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: 程智慧

## 大学物理(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 邮政编码: 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: 2015 年 5 月第 1 版

印 次: 2015 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5669-0778-3/O·021

定 价: 58.00 元

# 前 言

《Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics》是一套特色和风格原汁原味的美国大学物理课程的教材。全书内容深浅适当，注重物理理论与现实生活的结合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，撰写了很多和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、平易、生动，适合于学生阅读、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作图，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、建立概念例题、指导解题思路、给出复习和小结的方式，不仅在生动有趣的学习环境中让学生知道学习了什么，而且还通过这种方式教会学生怎样学习，使其掌握科学的学习方法。此外，全书在习题的编排上做了更细节化的处理，将习题按难易分为 I、II、III 类；按内容分为思考题、习题和综合性习题，对不同层次的同学都有指导的意义。

《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。共分上、下两册，本书为上册部分。

本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），以及气体的运动理论，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负责翻译，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）。1~6 章由陆爱江统稿；7~12 章由丁可统稿；13~18，29~30 章由李博统稿；19~25 章由伍滨和统稿；26~33 章由吴华统稿。

由于中英文水平的局限，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:声纳和超声波医学成像 / 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 含分子数的理想气体定律 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 热与热力学第一定律 / 54**
- 19-1 热量是能量的传递 / 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:计算做功的大小 / 65
  - 19-8 气体摩尔比热 能量均分定理 / 69
  - 19-9 气体的绝热膨胀 / 72
  - 19-10 热量传递: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、电荷及电荷守恒 / 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 / 123
  - 21-7 连续电荷分布的电场强度计算 / 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 连续带电体的电势 / 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、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 磁场中载流线圈的力矩 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 辐射压力 / 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 圆形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 衍射光栅的峰值宽度和分辨本领 / 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 / 313**
- 31-1 伽利略-牛顿相对性原理 / 314
- 31-2 狭义相对论的两条基本原理 / 316
- 31-3 同时的相对性 / 317
- 31-4 时间延缓和双生子佯谬 / 318
- 31-5 长度收缩 / 324
- 31-6 四维时空 / 326
- 31-7 伽利略变换和洛伦兹变换 / 327
- 31-8 相对论动量 / 330
- 31-9 极限速度 / 331
- 31-10 质能关系 / 332
- 31-11 狭义相对论的重大影响 / 335
- 第 32 章 早期量子理论和原子模型 / 340**
- 32-1 普朗克的量子假说: 黑体辐射 / 340
- 32-2 光子理论和光电效应 / 342
- 32-3 光子的能量、质量和动量 / 346
- 32-4 康普顿效应 / 347
- 32-5 光子相互作用 电子偶的产生 / 348
- 32-6 波粒二象性 互补性原理 / 349
- 32-7 物质的波动性 / 350
- \* 32-8 电子显微镜 / 352
- 32-9 早期原子模型 / 353
- 32-10 原子光谱: 了解原子结构的重要途径 / 354
- 32-11 玻尔模型 / 356
- 32-12 德布罗意假说在原子上的应用 / 362
- 第 33 章 量子力学 / 367**
- 33-1 量子力学——新理论 / 368
- 33-2 波函数及其诠释 双缝实验 / 368
- 33-3 海森堡不确定性原理 / 370
- 33-4 哲学意义 可能性与确定性 / 373
- 33-5 一维定态薛定谔方程——不含时形式 / 374

“假如音乐是物理学家的食粮，那么奏下去吧。” [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。

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！

钢琴手弹奏“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（能传到你的耳朵）。比较弦上的振动和空气中的振动，以下哪一条正确？

- (a) 弦上的振动和空气中的振动有相同的波长；
- (b) 它们有相同的频率；
- (c) 它们有相同的速度；
- (d) 空气中的波长、频率、速度都与弦上的不同。

**声**音与我们的听觉有关，因此与人耳的生理及人脑的心理特点有关。听觉说明声音传到人耳的感受，术语“声音”也指刺激人耳的物理感觉，即纵波。

我们可以把任何声音分成三个方面研究：第一，声音必有一个声源，如同任何机械波，声波的波源是一振动物体；第二，能量从声源以纵向声波的形式向外传播；第三，声音由人耳或麦克风来检测。我们通过声波本身的某些特性来开始这一章的学习。

### 16-1 声波的特性

在第 15 章中的图 15-5 我们看到，振动的鼓面如何在空气中产生声波。实

#### 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：声纳和超声波医学成像

表 16-1 各种材料中的声速  
(20 °C 和 1 atm)

材料	速度/ (m · s <sup>-1</sup> )
空气	343
空气 (0 °C)	331
氦气	1 005
氢气	1 300
水	1 440
海水	1 560
铁和钢	≈5 000
玻璃	≈4 500
铝	≈5 100
硬木	≈4 000
混凝土	≈3 000

### 物理应用

闪电距离多远

实际上，我们通常考虑在空气中传播的声波，因为在通常情况下是空气的振动迫使我们的耳膜振动。但是声波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，因为水把振动传到了人耳。当你把耳朵贴着地面，你能听到驶近的列车或卡车声，这种情况下地面其实并不接触你的耳膜，但是通过地面传递的纵波也同样叫作声波，因为它的振动引起耳外和耳内空气振动。声音不能在没有物质的地方传播，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 °C 和 1 atm 的空气中，声波以 331 m/s 的速度传播，在式 (15-4) ( $v = \sqrt{B/\rho}$ ) 中，我们看到这一速度依赖于材料的弹性模量  $B$  和密度  $\rho$ 。因此在氦气中，因其密度远小于空气而弹性模量差别不大，所以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，因此弹性模量大得多，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，但这主要对于气体较显著。例如，在通常 (环境) 温度的空气中，温度每增加一摄氏度声速近似地增加 0.60 m/s:

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

式中  $T$  为以 °C 为单位的温度，除非另外说明，在本章中我们将假定  $T = 20 \text{ °C}$ ，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。判断多远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)，以至于光传至我们的时间与声音传播的时间相比可以忽略。

**解：**空气中的声速大约是 340 m/s，所以传播 1 km = 1 000 m 要花大约 3 s，一英里约 1.6 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，声音的两个方面是马上可以明了的：“响度”和“音高”，它们都与听者的心理感受有关。但是对于这些主观感受，也对应存在物理上的“可测量”，响度 (loudness) 是与声波的强度 (单位时间通过单位面积的能量) 相关的，我们将在第 16-3 节讨论它。

声音的音高 (pitch) 是指它是如短笛或小提琴那样的高音，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，这是由伽利略首先指出的。频率越低，音高越低；频率越高，音高越高<sup>②</sup>，最好的人耳能对 20 ~ 20 000 Hz 的频率作出反应，此频率范围叫作可听范围 (audible range)。这两个极限稍微因人而异，一般趋向是人的年纪越大，越不能听见高频声，所以高频极限可能是 10 000 Hz 或者更低。

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 20 000 Hz 频率的声波叫超声波 (ultrasonic) (不要与超音速混淆，它用于以快于声速的速度运动的物体)。许多动物能听到超声频率，例如，狗能听到高达 50 000 Hz 的声音，蝙蝠能探测到的频率高达 100 000 Hz，超声波在医学和其他

<sup>①</sup>我们处理 20 °C (“室温”) 数据精度至 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的（超声）脉冲测定其到照相物体的距离，它包含一个检测返回的反射声波的传感器，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 外时脉冲的传播时间。

**解题思路：**如果我们假定温度大约为 20 °C，那么声速为 343 m/s。利用速度  $v$  和两种情况下的来回总距离  $d$ ，可以得出时间 ( $v=d/t$ )。

**解：**(a) 脉冲传播 1.0 m 到达物体再经 1.0 m 返回，总共 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) 总距离现在是  $2 \times 20 \text{ m} = 40 \text{ m}$ ，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光 ( $v=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) 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）。

频率低于可听范围（即低于 20 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，这些低频波以谐振方式起作用，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  $D$  为波在位置  $x$  及时刻  $t$  的位移， $A$  为它的振幅（最大值），波数  $k$  与波长  $\lambda$  由  $k = 2\pi/\lambda$  相联系， $\omega = 2\pi f$ ，这里  $f$  为频率。对于横波，如弦上的波，位移  $D$  垂直于沿着  $x$  轴的波的传播方向。但是对于纵波，位移  $D$  则是沿着波的传播方向，亦即， $D$  平行于  $x$  轴，它描述媒质的一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 waves**），压强的变化通常比位移更容易测量（见例题 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，而在“膨胀”（或稀薄）部分，压强小于正常值。图 16-3 为空气中声波的图解，(a) 依据位移表示，(b) 依据压强表示。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的声波中压强变化的数学表示，由体积模量  $B$  的定

### 注意

不要混淆超声（高频）与超音（高速）

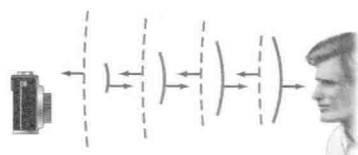


图 16-1 例 16-2 自动对焦相机发射一超声波脉冲。实线表示往右的向外传播的脉冲波前；虚线表示从人脸反射的脉冲波前，返回到相机。由脉冲来回的时间信息可使相机的机械装置调节镜头，聚焦在适当的距离上。

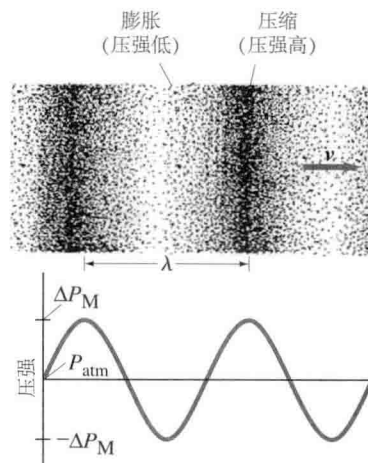


图 16-2 向右传播的声波，用压强表示。

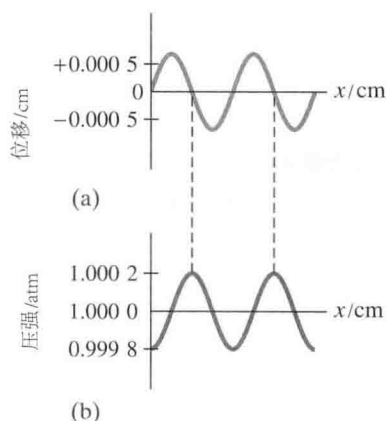


图 16-3 给定时刻空间中声波的表示，依据 (a) 位移，(b) 压强。

义(式 12-7) 有,

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

式中  $\Delta P$  表示与正常压强  $P_0$  (波不存在时) 的压强差 (声压),  $\Delta V/V$  为由于压强改变了  $\Delta P$  媒质体积的微小的相对变化量, 负号反映了压强增加体积减小 ( $\Delta V < 0$ ) 这一事实。现在考虑声波通过流体的一个薄层的情况 (图 16-4), 假如这一薄层具有厚度  $\Delta x$  以及面积  $S$ , 那么它的体积便是  $V = S\Delta x$ 。由于波通过时的压强变化导致体积的改变量是  $\Delta V = S\Delta D$ , 此处  $\Delta D$  是薄层压缩或膨胀时厚度的改变量,  $D$  表示媒质的位移。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) 那样以正弦函数变化, 那么由式 (16-2) 得到

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

(式中  $A$  为位移振幅, 不是面积, 面积为  $S$ 。) 因此压强也以正弦函数变化, 但是与位移在相位上差  $90^\circ$  或四分之一波长, 如图 16-3 所示。量  $BAk$  称为**声压振幅 (pressure amplitude)**  $\Delta P_M$ , 它表示相对于周围正常压强变化的最大和最小值, 因此我们可将上式写为

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

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

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

## 16-3 声音的强度: 分贝

**响度 (loudness)** 是人们在心理上的感受, 它与物理上可测的量, 即波的**强度 (intensity)** 相关。强度定义为单位时间通过垂直于能流的单位面积的波所传递的能量。如我们在第 15 章中所看到的, 强度正比于波振幅的平方。强度的单位是每单位面积的功率, 即瓦/米<sup>2</sup> ( $\text{W}/\text{m}^2$ )。

人耳能够探听到强度低至  $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$  和高达  $1 \text{ W}/\text{m}^2$  (甚至更高, 尽管那是在痛觉阈之上) 的声音, 这是一个难以置信的强度范围, 从最低至最高有  $10^{12}$  因子的跨度。大概因为有这么大的范围, 我们感觉到的响度并不直接正比于强度, 为产生一个发出约两倍响度的声音, 需约 10 倍强度的声波, 这一结论对靠近可听范围中间频率的任何声级来说是大致成立的。例如, 对一个普通人来说强度为  $10^{-2} \text{ W}/\text{m}^2$  的声波听起来约是强度为  $10^{-3} \text{ W}/\text{m}^2$  的声波响度的 2 倍,  $10^{-4} \text{ W}/\text{m}^2$  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”的这一关系, 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。更通用的是**分贝 (decibel, dB)**, 为  $\frac{1}{10}$  贝尔 ( $10 \text{ dB} = 1 \text{ bel}$ )。任何声音的**声强级 (sound level)**  $\beta$  用强度  $I$

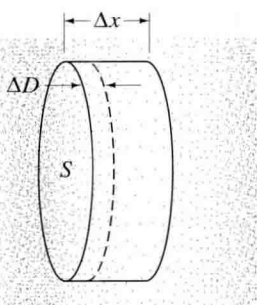


图 16-4 一流体中的声波向右传播。当波通过流体的一个面积为  $S$ 、厚度为  $\Delta x$  的薄层时, 由于压强变化其体积发生变化。在图示瞬间, 若波向右传播使压强增加, 则薄层的厚度将减小一个量  $\Delta D$ 。

### 物理应用

人的听力范围

定义为

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

式中  $I_0$  为选定的参考强度，对数取 10 为底。 $I_0$  通常取为对正常人耳可听到的最小强度——“听觉阈”，为  $I_0 = 1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 。因而，例如强度为  $I = 1.0 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$  的声音的声强级将是

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

这是因为  $\lg 100 = 2.0$ 。注意听觉阈的声强级为 0 dB，即  $\beta = 10 \lg 10^{-12}/10^{-12} = 10 \lg 1 = 0$ 。由于  $\lg 1 = 0$ ，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 的声音是 30 dB 声音的 100 倍，等等。

几种普通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

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

**解题思路：**为计算强度  $I$  我们必须解方程 (16-6)，记住  $I_0 = 1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 。

**解：**由式 (16-6)

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

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  $y = 10^x$ 。

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 外的喷气机	140	100
听觉阈	120	1
喧闹的摇滚音乐会	120	1
30 m 外的汽笛	100	$\times 10^{-2}$
重型卡车通行	90	$\times 10^{-3}$
交通繁忙的街道	80	$\times 10^{-4}$
嘈杂的饭馆	70	$\times 10^{-5}$
相距 50 cm 谈话	65	$\times 10^{-6}$
小声无线电广播	40	$\times 10^{-8}$
耳语	30	$\times 10^{-9}$
树叶沙沙声	10	$\times 10^{-11}$
听觉阈	0	$\times 10^{-12}$

**例 16-4** 扬声器的响应。一高质量扬声器声称播放的 30 Hz 至 18 000 Hz 频率在全音量范围其声强级均匀度为  $\pm 3 \text{ dB}$ ，即在这一频率范围，对一给定的输入声强级，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  $\beta_1$ ，以最大声强  $I_2$  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  $\pm 3 \text{ dB}$  对应于 2 倍强度或强度减半。

**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, 如刚才所看到的) 所对应的仅仅是表观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** 增加 3 dB 意味着“强度的 2 倍”, 增加 6 dB 意味着强度的几倍?

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

**解:** 4 只小号的声强是 1 只小号 ( $=I_1$ ) 的 4 倍, 即  $4I_1$ , 4 只小号的声强级便是

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

**练习 C** 由表 16-2, 我们看到寻常对话的声强级约为 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你远离声源而降低。但在室内, 效果却不是这样, 因为有来自墙壁的反射。然而, 若声源处在能向四周自由辐射的开放环境中, 则强度按距离平方的倒数减小,

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

如我们在第 15-3 节看到的, 距声源很远时, 强度减小比  $1/r^2$  更快。因为一些能量转化成了空气分子的无规则运动, 频率越高发生的损耗越多, 所以任何混合着各种频率的声音在远处听起来将失去“嘹亮性”。

**物理应用**  
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。** 距一喷气式飞机 30 m 处测得的声强级为 140 dB, 在距 300 m 处测得的声强级为多少? (忽略地面的反射。)

**解题思路:** 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, 距离远了 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, 声音也处在痛觉阈, 所以机场工作人员要佩戴耳罩以免其耳朵受损 (图 16-5)。

注：以下是一个更简单的方法，不必用到式 (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  $\left(\frac{1}{10}\right)^2 = \frac{1}{100}$ ，我们可以用 10 dB 对应于 10 倍强度变化这一结果（见例题 16-3 前的文字），那么强度变化 100 倍对应于声强级变化为  $(2)(10 \text{ dB}) = 20 \text{ dB}$ 。这便证实了我们上面的结果：140 dB - 20 dB = 120 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 位移有多小。** (a) 计算在听觉阈的 1 000 Hz 声波中空气分子的位移；(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，我们得到波的强度  $I$  和位移振幅  $A$  之间的关系式 (15-7)，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) 在听觉阈， $I = 1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$  (表 16-2)，用式 (15-7) 求解振幅  $A$ ：

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

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

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

注：我们看到人耳何等不可思议地灵敏，它能探测实际上小于原子直径（约  $10^{-10} \text{ m}$ ）的空气分子的位移。

(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的不可思议。

### 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

人耳对各种频率的灵敏度是不同的，要使不同频率的声音听起来响度相同须有不同的强度。对大量普通人群的研究得到的曲线如图 16-6 所示，图中，每条曲线表示响度级 (loudness level) (单位称作方)，它在数值上等于 1 000 Hz 的以 dB 为单位的声强级。例如，标记为 40 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。从这 40 方的曲线上我们看到，100 Hz 的音调必须以约 62 dB 的声强级才与 1 000 Hz 的 40 dB 的音调感受到同样的响度。

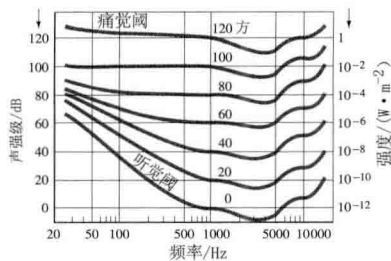


图 16-6 人耳的灵敏度是频率的函数（见正文）。注意频率以“对数”标度以便覆盖广泛的频率范围。

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，这是一个听力很好的人耳刚能听到的最柔和的声音。要注意的是，人耳对频率在 2 000~4 000 Hz 之间的声音最敏感，因为它是普通说话时的声音和音乐的声音。还要注意，尽管一个 1 000 Hz 的刚能听到的声音在 0 dB 声级，但 100 Hz 的声音必须接近 40 dB 才能被听到。图 16-6 顶部的曲线，标记为 120 方，表示痛觉阈，感受超过这一级的声音时会引起痛觉。

图 16-6 表明在较低的声强级，人耳对高频和低频声相对于中频声来说是欠灵敏的，在某些立体声系统中“响度”控制采用的方法是设法补偿音量低时的不灵敏度。当音量调低，响度控制相对于中频放大高低频的音量，使声音具有频率上平衡的较“正常的发声”。然而，许多听众发现没有响度控制的声音更令人满意和自然。

## 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，任何物体几乎都能振动，因此都是声源。我们现在讨论某些简单的声源，特别是乐器，乐器的声源是打击、弹拨、用弓拉或吹奏引起的振动，由此产生驻波。而振源以其固有谐振频率振动，振源与空气（或其他媒质）接触并使空气振动产生声波向外传播。声波的频率与振源的频率相同，但是速度和波长可以不同。鼓是靠一块绷紧的膜产生振动，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，许多乐器用振动的弦，如小提琴、吉他和钢琴，或者用振动的空气柱，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“等半音阶”的音符由中央 C 调开始的一个八度的典型频率见表 16-3。注意一个八度对应于双倍的频率，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# 或 D <sup>b</sup>	277
D	294
D# 或 E <sup>b</sup>	311
E	330
F	349
F# 或 G <sup>b</sup>	370
G	392
G# 或 G <sup>b</sup>	415
A	440
A# 或 B <sup>b</sup>	466
B	494
C	524

\* 仅包含一个八度。

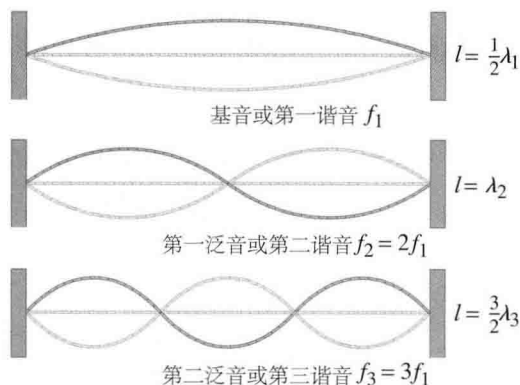


图 16-7 弦上的驻波（仅画出三个最低频率）。

### 物理应用

弦乐器

### 弦乐器

在第 15 章的图 15-26b 中，我们看到弦上的驻波是怎样建立的，我们在这里的图 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确定，即基波（fundamental），对应的波节点仅出现在弦的两端，整根上下振动着的弦的长度对应半个波长，如图 16-7 上部图形所示，所以弦上基波的波长等于弦长的 2 倍。因此，基波频率为  $f_1 = v/\lambda = v/2l$ ，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波波长变短（图 16-8）而变高。一把吉他或者小提琴上的各根弦长度都相同，它们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  $\mu$ ，影响了弦上的波速，因为由式（15-2）

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

因此较重的弦上的波速较低，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，钢琴和竖琴的弦都有不同的长度，为调出较低的音调，不仅弦要更长，还要更重，理由在下例中说明。

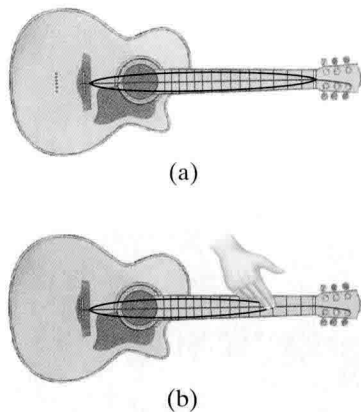


图 16-8 (a) 手指未按在弦上时的波长比 (b) 手指按在弦上时长。因此，手指按在弦上时频率高。图上只画了一根弦和最简单的驻波（基波）。

**例 16-8 钢琴的弦。** 钢琴的最高音键所对应的频率大约是最低音键的 150 倍，若最高音的弦长为 5.0 cm，那么与高音弦有同样的单位长度质量并且在相同的张力下，最低音的弦的长度必须是多少？

**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：**低频的弦较长，制作得较重，单位长度的质量较大，所以即使巨型钢琴的弦也不超过 3 m 长。

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

**注意**

弦上驻波的速度  $\neq$  空气中声波的速度

**例 16-9 小提琴的频率和波长。** 把一根 0.32 m 长的小提琴弦调至演奏中央 C 之上 440 Hz 的 A 调，(a) 弦振动的基波波长为多少？(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，如在此处，称它们为谐音。但是如果泛音不是基频的整数倍，如振动的鼓面，它们不是谐音。

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（ $=f\lambda=440\text{ Hz}\times 0.64\text{ m}=280\text{ m/s}$ ），它依赖于弦的张力和单位长度的质量。

**注：**弦上和空气中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。但是波长不同，因为弦上的波速与空气中的波速不同。



(a)



(b)

图 16-9 (a) 钢琴，系着弦的共鸣板；(b) 共鸣箱（吉他）。

假如弦乐器仅靠它们弦的振动产生声波，由于弦太细，不能压缩和扩散太多的空气，所以声音不会太响。因此弦乐器都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，它的作用是通过增大与空气接触的面积把声音放大（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，其共鸣箱不再如此重要。

### 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（图 16-10）。驻波可以出现在任意腔体内的空气中，但频率是复杂的，即便是对于形状简单的如长笛、竖琴管那样的均匀窄管。在某些这类乐器中，靠振动簧片或演奏者的嘴唇产生空气柱的振动，在另一些这类乐器中，一连串气流流向一开口或吹嘴的边缘，引起的扰动产生振动。由于扰动，无论它是如何产生的，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。

对于两端固定的弦，我们在图 16-7 中看到在弦的两端是驻波波节（不动），其间有一个或多个波腹（振动最大振幅），相邻波腹之间相隔一个波节。最低频率的驻波基音只有单个波腹，较高频率的驻波称为泛音（overtones）或谐音（harmonics），就如我们在第 15-9 节中看到的那样，专门称第一谐音为基音（基频），第二谐音（=第一泛音）的频率为基音频率的 2 倍，等等。



图 16-10 管乐器：长笛（左）和单簧管。

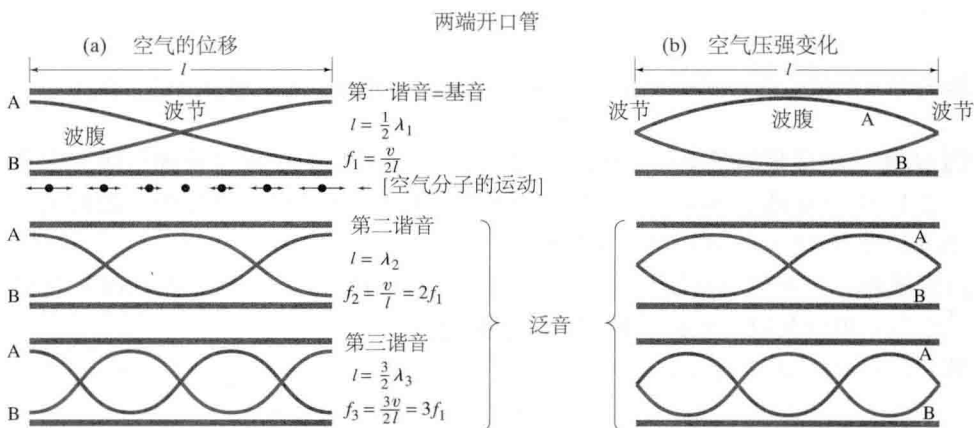


图 16-11 两端开口的均匀管（“开口管”）的三个最简单的振动模式（驻波）图。这些最简单振动模式，(a) 左边是根据空气的移动（位移）画出的，(b) 右边是根据空气压强画出的。每个图画出了相隔半个周期的两个时刻 A 和 B 时的波形，基波情况下分子的实际移动画在顶部左边图的正下方。

对于直径均匀的管中的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，在管子的闭合端的空气是位移节点（波节），因为在那里空气不能自由流动，而在靠近管子的开口端则是一个波



腹点，因为空气能够自由地进出。管中的空气以驻波（纵波）的形式振动，对于两端开口的管子〔叫开口管（open tube）〕可能的振动模式如图 16-11 所示，对于一端开口、另一端封闭的管子〔叫闭管（closed tube）〕振动模式示于图 16-12。〔两端都封闭的管子，因内部不与外部空气相连，不能用作乐器。〕两个图的（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是水平、平行于管长的，如图 16-11a（左边）顶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很靠近端口处。接下来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，它可以是一根竖琴管或长笛，开口管的两端是位移波腹，因为在开口端空气是自由流动的。在一根开口管中如果有驻波的话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点之间的距离为  $\frac{1}{2}\lambda$ ，所以最简单的基波情况是管长为波长的  $1/2$ （图 16-11a 顶部的图）： $l = \frac{1}{2}\lambda$ ，或  $\lambda = 2l$ 。所以基频为  $f_1 = v/\lambda = v/(2l)$ ，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，这正如同弦振动的结果。

对于封闭管，如图 16-12a 所示，它可以是一根竖琴管，在封闭端总是位移波节（因空气不能自由流动）而在开口端（那里空气可以自由流动）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波的管长范围仅对应于波长的  $1/4$ ： $l = \lambda/4$ ，或  $\lambda = 4l$ 。因此基频为  $f_1 = v/(4l)$ ，即同样长度开口管的一半。我们能从图 16-12a 中看到的另一个不同是在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 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在封闭管中存在。

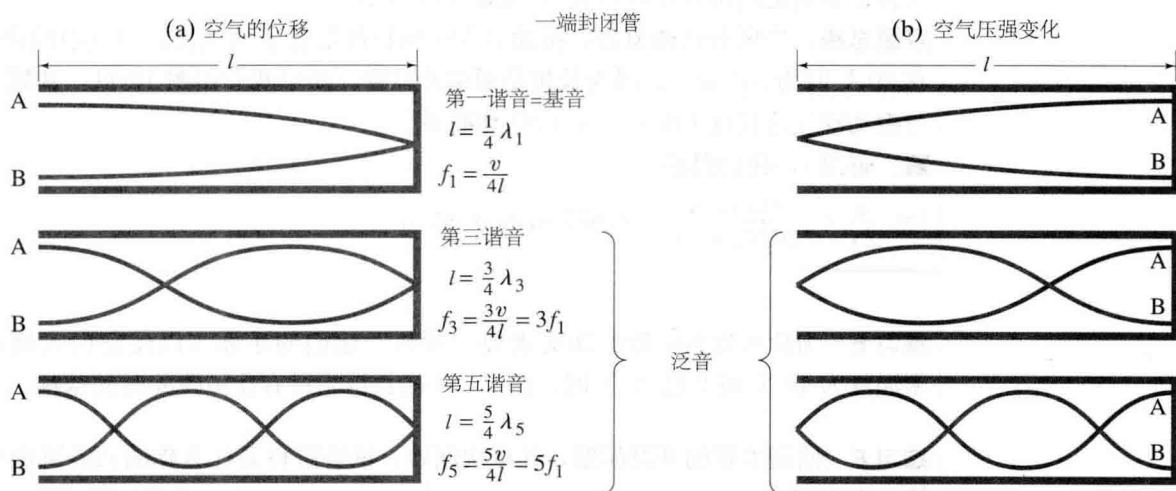


图 16-12 一端封闭管（“封闭管”）的振动模式（驻波）。见图 16-11 的图解。

分析均匀管中空气振动的另一个方法是考虑用空气压强来描述，如图 16-11