

# 波动学

《伯克利物理学教程》第三卷

上册

[美] F. S. 克劳福德 著

科学出版社

# 波 动 学

《伯克利物理学教程》第三卷  
(上册)

[美] F. S. 克劳福德 著

卢鹤绂 等 译

科 学 出 版 社

1 9 8 1

## 内 容 简 介

本书是《伯克利物理学教程》第三卷,专门讨论波动现象。全书强调不同波动现象之间的相似性和可类比性,着重阐述波动的基本概念以及这些概念之间的相互联系。书中还介绍了许多重要波动现象的实例,各章末附有大量习题和课外实验,有助于读者对有关概念深入理解。

本书可供大专院校理工科师生用作教学参考书,也可供有关科技人员参考。

本书由卢鹤绂主持翻译,参加翻译工作的有史福庭、汤家镛、朱梦熊、任炽刚、苏汝铿、吴治华、倪光炯、顾国庆、殷鹏程、钱毓敏、裘志洪等,卢鹤绂负责全书总校工作。

F. S. Crawford

WAVES

*Berkeley Physics Course Vol. 3*

McGraw-Hill, 1968

## 波 动 学

《伯克利物理学教程》第三卷

(上、下册)

[美] F. S. 克劳福德 著

卢鹤绂 等译

\*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝内大街137号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1981年4月第一版 开本:787×1092 1/32

1981年4月第一次印刷 印张:22 13/16

印数:0001—16,700 字数:563,000

统一书号:13031·1484

本社书号:2043·13—3

定 价: (上、下册) 2.85 元

# 波 动 学

《伯克利物理学教程》第三卷  
(下册)

[美] F. S. 克劳福德 著

卢鹤绂 等 译

科 学 出 版 社

1 9 8 1

## 中译本前言

自六十年代初期以来,美国一些重点大学,为了解决基础物理教材内容陈旧,与现代科学技术蓬勃发展的要求不相适应的矛盾,开始对大学基础物理课程试行改革.《伯克利物理学教程》就是这种尝试之一.它是美国近年来较为流行的供大学理工科学生头二年使用的基础物理学教程,一共包括五卷:1.力学;2.电磁学;3.波动学;4.量子物理学;5.统计物理学.原教程编写的意图,是尽可能地反映近百年来物理学的巨大进展,按照当前物理学工作者在各个前沿研究领域所使用的方式来介绍物理学.全教程引入狭义相对论、量子物理学和统计物理学的概念,从较新的统一观点来阐明物理学的基本原理,以适应现代科学技术发展对物理教学提出的要求.本书在编写过程中曾吸收了在各个前沿领域工作的许多物理学工作者的意见,经过较长时间的教学试验和多次修改,于1963年开始出版,迄今已重版多次,对美国大学物理教学有较大影响.原书比较偏重于理论方面,实验方面另编有《伯克利物理学实验》一书.鉴于这部教程在取材、编排和写法上有一些特点,对如何利用新的科学技术成就来改革和充实基础物理教学内容尚有可供借鉴之处,我们翻译出版中译本,以供我国高等院校师生和科技人员参考.由于各卷内容相对独立,我们将分别出版.

必须指出,这部教程完全是按照美国教学原则编写的,不一定适合我国的具体情况,希望读者阅读时注意.

在中译本中,我们对原书作了少量删节,删去的主要有和

原书内容关系不大的一些物理学家的照片和简单传记材料以及其他一些材料。原书各章附有一些参考读物，考虑到这些读物有的出版较早，国内难以找到，我们也已一律删去。读者可以根据需要与可能，参考有关的书籍。

译文错误或不当之处，请读者批评指正。

### 第三卷 序 言

这一卷专门研究波动学。这是一个广泛的课题。人人都知道许多涉及波动的自然现象，诸如水波、声波、光波、无线电波、地震波、德布罗意波以及其他各种波。而且仔细查阅一下任何物理学图书室的书架都会发现，对波动现象某一个方面的研究（譬如说水中的超声波）就可以占用整本的书或期刊，甚至可能吸引某个科学家的全部注意力。令人惊异的是，在这些狭窄研究领域之一工作的“专家”，通常能够相当容易地同其他一些被认为在与此无关的领域内工作的也被认为是狭窄的专家进行交流，为此他首先只须学会对方的行话，学会他们所使用的单位（譬如，秒差距是什么意思？）以及哪些物理量是重要的，等等。的确，一旦他发现自己的兴趣有了改变，他就可以迅速地改行而成为新领域里的“专家”。这种情况之所以可能，是由于有一个明显的事实，即许多完全不一样的和表面上互不相干的物理现象，都可以用一系列共同的概念来描述，因而科学家之间具有共同的语言。在这些共同使用的概念中，有许多就暗含在波动这个词内。

本书的主要目的是阐述波动学的一些基本概念以及这些概念之间的相互联系。为了达到这个目的，本书是按照这些概念，而不是按照诸如声、光等等可观察的自然现象来组织编写的。

另一个目的是要使读者熟悉许多重要而有趣的波动例子，从而具体地认识这些基本概念的普遍性及其广泛应用。所以，每当引进一个新概念后，就把它立即应用到许多不同的物

理体系上加以说明，例如弦线、玩具弹簧、传输线、硬纸板管、光束等等。与之相并列的另一种方法，是先用一个简单例子（例如拉紧的弦）引出这些有用的概念，然后再考虑其他有意义的物理体系。

通过选择彼此之间具有相似几何“外貌”的不同示例，我希望能鼓励学生去寻求不同的波动现象之间的相似性和类比性。我也希望能激励学生的勇气，当他们面对一些新现象时能够利用这些类比来“妄测”。类比法的利用常常会有众所周知的危险性，也可能隐藏着错误。但是，什么事情都会是这样。（把光猜测为可能“象是”类似果子冻的“以太”中的机械波，曾经是一种非常有效的类比。它曾经帮助麦克斯韦得出他的著名方程组，并导出了一些重要的预言。有一些实验——特别是迈克尔逊和莫雷实验证明这种机械模型不可能完全正确，爱因斯坦于是指出了如何放弃这个模型而仍然保留下麦克斯韦方程组。爱因斯坦宁愿直接去推测这些方程组，这可以称为“纯粹的”导出法。现在大多数物理学家虽然仍然在利用类比法和模型来帮助导出一些新的方程，但他们在发表结果时通常只给出方程，而不给出利用类比和模型导出这些方程的过程。）

课外实验是本卷的重要组成部分，它们能够给学生带来乐趣和培养他们的洞察力，而这是从普通课堂演示和实验室实验得不到的；尽管课堂演示和实验室实验也同等重要。这些课外实验全都是“家庭物理学”类型的实验，只需要很少的甚至不需要特殊的设备。（只需要有一个光学工具箱。尽管手头可能没有音叉、玩具弹簧和硬纸板管等，但它们十分便宜，并不“特殊”。）这些实验确实是让学生在家庭里做的，不是在实验室做的。其中的许多实验，叫做演示可能比叫做实验更确切些。



本书中讨论的每一个主要概念，都至少有一个课外实验加以演示。除了引用例子来说明概念外，课外实验还使学生有机会与一些物理现象直接“接触”。由于这些实验是在家里做的，这种接触是十分密切的，是从容不迫的。这一点很重要。在家里做实验没有伙伴帮忙，一切都必须自己动手；也没有指导教师向你解释演示的意义和结果，一切都要依靠自己。你可以按照自己的速度进行演示，想做多少次就可以做多少次。

课外实验有一个很宝贵的特点，那就是，如果你在晚上才想起你上星期做过的一个实验有不清楚的地方，那么十五分钟以后，你就能安排妥当重做一次实验。这一点很重要，因为在真正的实验工作中，从来没有一个人头一次就“把它搞对了”。事后的思考是成功的秘诀（还有一些别的因素）。对于学习来说，有害和有妨碍的事情，莫过于由于“实验设备已经拆掉了”或者由于“实验室已经关门”（或由于别的莫名其妙的理由）而不善于在实验以后继续进行思考。

最后，我还希望通过课外实验去培养学生具有我称之为“对现象的鉴赏力”。我希望学生用自己的双手去创造出一个场面，能使他的眼睛、耳朵和头脑既感到新鲜、惊奇，又感到十分愉快……

至此，  
在溪底颤动着的，  
是那鲜艳的石子……  
抑或  
还是那清澈的溪水。

# 教 学 说 明

## 课程组织

行波有很大的美学上的魅力,从它开始似乎是很自然的。然而,尽管波动在美学和数学上是很美的,但是它在物理上却是相当复杂的,因为它涉及到大量粒子之间的相互作用。既然我强调的是物理体系而不是数学,那么,我就先从最简单的物理体系开始,而不先讲最简单的波。

**第一章 简单体系的自由振动** 首先,我们回顾一下一维谐振子的自由振动。我们要强调的是惯性和恢复力的物理特点, $\omega^2$ 的物理意义,以及对于一个实际体系,要得到简谐运动,振动的振幅不能太大。其次,我们考虑两个耦合振子的自由振动,并引入简正模式的概念。我们强调简正模式就象一个“扩展”的谐振子,它的所有部分都以相同频率和相位振动,并强调对于一个给定的简正模式, $\omega^2$ 的物理意义与一维振子的相同。

**可省略的内容** 在全书中,有一些物理体系反复出现,教师不必全都讨论,学生也不必全学。本章例 2 和例 8 都是质量和弹簧的纵向振动,分别是一个自由度(例 2)和两个自由度(例 8)的情况。在以后各章里,我们把这种体系推广到许多自由度和连续体系中去(经受纵向振动的橡皮绳和玩具弹簧),并把这种体系当作一个模型,以帮助理解声波。如果教师想省略声音这一部分,那么也可以从一开始略去一切纵向振动部分。同样,例 4 和例 10 分别为一个自由度与两个自由

度的  $LC$  电路。在以后各章中，我们还要把这种电路推广到  $LC$  网络和连续传输线上去。因此，如果教师想省略传输线中电磁波的讨论，他可以从一开始就略去所有  $LC$  电路的例子。（他可以这样做而仍然能够透彻讨论电磁波，即从第七章起，用麦克斯韦方程讨论电磁波。）不要省略横向振动（例 3 和例 9）。

**课外实验** 我们极力推荐课外实验 1.24（盆水晃动模式）和有关的习题 1.25（湖面波动），其目的是要让学生开始“自己动手”。课外实验 1.8（两只拴在一起的肉汁罐头）可以用来做一次很好的课堂演示。当然，你们也许已经有条件可以做一个这类示范实验（耦合摆）。然而，甚至作为课堂示范，我仍然主张用玩具弹簧和肉汁罐头来作演示，虽然它们是粗糙的，但这样做可以鼓励学生自己动手。

**第二章 多自由度体系的自由振动** 我们把自由度数目从两个推广到很大数目，并求出在一根连续弦上的横向振动模式——驻波。我们定义  $k$ ，并引进色散关系的概念，给出  $\omega$  与  $k$  的函数关系。在节 2.3 中，我们利用弦的各种振动模式来导出周期函数的傅里叶分析。在节 2.4 中，我们给出了各种串有珠子的弹簧的严格色散关系。

**可省略的内容** 节 2.3 是可以不讲的，特别是，假如学生已经知道一些傅里叶分析。节 2.4 的例 5 是多个耦合摆的一个线性排列，即具有一个低频截止的最简单体系，以后将用它来帮助解释具有一个低频截止频率的其他体系的行为。如果教师不想在以后讨论在截止频率以下驱动体系（波导，电离层，光在玻璃内的全反射，德布罗意波的势垒贯穿，高通滤波器等等），就可以不考虑例 5。

**第三章 受迫振荡** 第一章和第二章从讨论谐振子的自由振动开始，而以讨论闭合体系的自由驻波结束。第三章和

第四章考虑受迫振荡。先讨论闭合体系(第三章),这里我们发现共振;然后讨论开放体系(第四章),这里我们发现行波。在节 3.2 中,我们论述受阻尼的受迫一维谐振子,讨论了它的瞬态行为和稳态行为。然后,再进而讨论两个或多个自由度的情况,发现相应于每个自由振动的模式都有共振。我们还考虑了在它们的最低模式频率之下(或最高模式频率之上)驱动的闭合体系,发现了指数波和“滤波”行为。

**可省略的内容** 节 3.2 中的瞬态现象可以省略。有些教师也可以省去在截止以外驱动的体系的各种情况。

**课外实验** 课外实验 3.8(两只拴在一起的肉汁罐头的受迫振动)和课外实验 3.16(力学带通滤波器)需要留声机转盘。特别对于在截止范围以外驱动的体系的指数波,这两个课堂演示实验的效果都非常好。

**第四章 行波** 这里我们介绍由开放体系的受迫振动所产生的行波(不同于第三章中曾讨论过的闭合体系的受迫振荡所产生的驻波)。第四章余下部分专门研究行波中的相速度(包括色散)和阻抗。我们把“行波的两个概念”相速度与阻抗同驻波的两个概念惯性和恢复力加以对照。也对比了驻波与行波相位关系的基本差别。

**课外实验** 我们推荐课外实验 4.12(水棱镜)。这是用光学工具箱做的第一个实验,它要用到紫色滤色片(能通过红光和蓝光,但滤去绿光)。我们特别推荐用你的脸面作为探测器进行课外实验 4.18(在地面上测定太阳常数)。

**第五章 反射** 至第四章末尾,我们已掌握了驻波和行波(一维的)。在本章中我们研究驻波和行波的一般叠加。在导出反射系数时,我们用十分“物理”的方式使用了叠加原理,而不是强调边界条件(在习题中强调了使用边界条件)。

**可省略的内容** 本章有很多例子涉及声、传输线和光,不

必都讲。第五章基本上是从第一到第四章所讲内容的应用，因此它的任何一部分，甚至于整个部分都可略去。

**课外实验** 每个人都应该做课外实验 5.3(玩具弹簧上短暂的驻波)。课外实验 5.17 与 5.18 是特别有趣的。

**第六章 调制、脉冲和波包** 第一到第五章，我们主要研究单个频率 $\omega$ 的情况(除节 2.3 傅里叶分析外)。在第六章里我们研究包含有不同频率叠加的脉冲和波包，并推广傅里叶分析的概念(已在第二章中对周期函数作了介绍)，以便包括非周期函数。

**可省略的内容** 大部分物理内容在前三节。如果教师已在节 2.3 略去了傅里叶分析，无疑地现在也要略去节 6.4 和节 6.5，这两节中引入了傅里叶积分及其应用。

**课外实验** 在没有看到水波的波包以前，不会有人相信存在群速度(见课外实验 6.11)。每一个人也应该做课外实验 6.12 和 6.13。

**习题** 频率调制和相位调制是在习题中讨论的，而不是在课文中讨论的。有一些很有意义的近代进展也在习题中讨论，例如激光器的锁模(习题 6.23)，多频(习题 6.32)，多道干涉仪傅里叶频谱学(习题 6.33)等。

**第七章 二维和三维波** 第一章至第六章讨论的全是一维波。在本章中我们讨论三维波。引进了波矢 $\mathbf{k}$ 。用麦克斯韦方程组作为研究电磁波的出发点(在前几章已有很多传输线上电磁波的例子，它们是以 LC 电路为例子讲的)。也研究了水波。

**可省略的内容** 节 7.3(水波)可以略去，但是不管是否学习节 7.3，我们推荐有关水波的那些课外实验。如果教师主要对光学感兴趣，他实际上可以从节 7.4(电磁波)开始讲起，继续讲第七、八、九章。

**第八章 偏振** 这一章专门研究电磁波偏振和在玩具弹簧上的波的偏振，重点在于部分偏振和相干性之间的物理关系。

**课外实验** 每个人至少应做课外实验 8.12, 8.14, 8.16 和 8.18 (课外实验 8.14 需要玩具弹簧, 其他要用光学工具箱)。

**第九章 干涉和衍射** 这里我们研究从波源到探测器经过不同路程的波动的叠加, 我们强调相干性的物理意义。把几何光学作为一种波现象来讨论。讨论一个受衍射限制的光束打在各种反射和折射表面上的行为。

**课外实验** 在有关干涉、衍射、相干性和几何光学的许多课外实验中, 每人应该至少各做一个。我们也特别推荐课外实验 9.50 (音叉的四极辐射)。

**习题** 有些论题是在习题中讲的, 如测星干涉仪, 包括近来发展起来的“长基线干涉量度学”(习题 9.57); 在习题 9.59 中讨论了相衬显微镜和无线电调幅波变成调频波的转换之间的类似性问题。

## 课外实验

**一般说明** 每星期至少要布置一个课外实验, 为了方便, 我们将所有包括水波、玩具弹簧上的波和声波的实验列表于下。以后我们还要描述光具箱。

**水波** 在第七章里讨论, 此外, 这个课题在下述一组容易的课外实验中还反复出现:

- 1.24 水盆中的晃动模式
- 1.25 湖面波动
- 2.31 锯齿浅水驻波
- 2.33 表面张力模式
- 3.33 锯齿浅水驻波

- 3.34 水上矩形二维表面驻波
- 3.35 水中驻波
- 6.11 水波包
- 6.12 浅水波包——潮浪
- 6.19 深水波的相速度和群速度
- 6.25 潮浪中的共振
- 7.11 水波的色散律
- 9.29 水波的衍射

**玩具弹簧** 每个学生都应该有一个玩具弹簧（任何玩具店都有出售）。下述实验中有四个需要一架唱机的转盘，因此，费用超过了“家庭物理”范围。然而，很多学生都有唱机。（涉及唱机的一些实验可以作为很好的课堂演示。）

- 1.8 耦合的肉汁罐头
- 2.1 玩具弹簧——长度对频率的影响
- 2.2 作为一个连续体系的玩具弹簧
- 2.4 玩具弹簧的“音品”
- 3.7 有阻尼的玩具弹簧中的共振(需要转盘)
- 3.8 两只耦合肉汁罐头的受迫振动(需要转盘)
- 3.16 机械带通滤波器(需要转盘)
- 3.23 波抗性区域的指数穿透(需要转盘)
- 4.4 玩具弹簧上波的相速度
- 5.3 玩具弹簧上短暂的驻波
- 8.14 玩具弹簧的偏振

**声音** 许多关于声学的课外实验，需要用到两个相同的音叉，最好用 C523.3 或 A440。最便宜的一种已经足够好了，可在音乐商店里买到。硬纸板管可在文具店或艺术供应商店购得。下述一些课外实验涉及到声学的内容：

- 1.4 测量振动频率
- 1.7 耦合的弓锯锯条
- 1.12 两个音叉构成的拍

- 1.13 你的耳朵的非线性——组合音调
- 1.18 吉他的不同弦线之间弱耦合所形成的拍
- 2.4 玩具弹簧的音品
- 2.5 作为傅里叶分析器的钢琴——耳朵对相位的不敏感性
- 2.6 钢琴谐音——等调律音阶
- 3.27 硬纸板管的共振频率宽度
- 4.6 用波包测定声速
- 4.15 威士忌酒瓶共振腔(赫姆霍兹共振腔)
- 4.16 空气、氦气和天然气中的声速
- 4.26 声阻抗
- 5.15 开端管对驻波的有效长度
- 5.16 硬纸板管的共振
- 5.17 你的声音探测系统(鼓膜、神经和脑)是相位灵敏的探测器吗?
- 5.18 测量开管两端的相对相位
- 5.19 音叉的泛音
- 5.31 玩具气球中的共振
- 6.13 音乐颤音和带宽
- 9.50 音叉的辐射花样——四极辐射

## 光学工具箱

**部件** 四个线偏振器,一个圆偏振器,一块  $1/4$  波片,一块半波片,一个衍射光栅和四个滤色片(红、绿、蓝、紫)。这些部件在课文里都有介绍(线偏振器在第 484 页;圆偏振器在第 510 页;  $1/4$  和半波片在第 512 页;衍射光栅在第 582 页)。正如第 258 页的课外实验 4.12 所述,有些实验还需要几块显微镜承物片,一个指示灯线光源或一个手电灯泡点光源。除了实验 4.12 以外,所有需要光学工具箱的实验都在第八、第九章里面,因为太多,这里就不一一列出了。

**课外实验** 涉及到全部光学工具的第一个实验应当是让



学生们认识所有这些部件。(各部件的一览表贴在包装容器盖的内侧。)为了将来使用方便,可在各部件上作出标记。例如,对于圆偏振器,可以用剪刀把四角稍许剪圆,然后在输入面靠近边缘处刻下“进入”字样,或在这个面上贴一小条胶带。对于  $1/4$  波长延迟器,可剪去一只角;对  $1/2$  波长延迟器,剪去两只角。在各种线偏振器上,可以沿着最易通过的轴刻一条线。(这个轴平行于偏振器的一条边。)

应该指出,“ $1/4$  波片”给出  $1400 \pm 200$  埃的空间延迟,近似地与波长无关(对可见光而言)。因此,它作为一个  $1/4$  波长的延迟器,所适用的波长为  $5600 \pm 800$  埃。 $\pm 200$  埃是制造厂的公差。一批给出  $1400$  埃空间延迟的波片产品,对绿光( $5600$  埃)来说是一种  $1/4$  波长的延迟器,但是它对较长波长的光(红光)则延迟得比  $1/4$  波长少一些,而对较短波长的光(蓝光),则延迟得比  $1/4$  波长多一些。另外一批产品如果给出的空间延迟为  $1400 + 200 = 1600$  埃,那么它只对一种红光( $6400$  埃)是  $1/4$  波长延迟器。而延迟为  $1400 - 200 = 1200$  埃的一批产品,只对一种蓝光( $4800$  埃)是  $1/4$  波长的延迟器。同样的论述也可应用到一个圆偏振器上去,因为一个圆偏振器是由多层的  $1/4$  波片和与其成  $45$  度角的线偏振器叠起来制成的,而该  $1/4$  波片是一种  $1400 \pm 200$  埃的延迟器。因此,当使用白光时,也许会有颜色稍为分散的效应。必须事先告诉学生,在任何实验中原来预料会得到“黑色”也即“消光”的地方,事实上他总会看到有某些“没有消光”的光,会有“错误”的颜色透漏出来。举例来说,我是按实际情况写课外实验 8.12 的。当你读到“你看到在绿色处的暗带吗?”这些句子的时候,或许会因为“在绿色处”几个字而吃惊,而那其实指的就是  $5600$  埃的那种颜色!