

·物理学教程·

黄圣华 傅鹤雁 主编

波动与光学

上册

牟绪程 编

清华大学出版社



科工委学院802 2 0027067 5

0091366

清华大学教材
物 理 学 教 程

主编 夏学江 史斌星

波 动 与 光 学

452.53 (上册)

牟绪程 编



清 华 大 学 出 版 社

内 容 简 介

本书是清华大学编的《物理学教程》之三,《波动与光学》分卷的上册,讲述振动和波(包括机械波和电磁波)。共有四章:振动,波的传播,电磁波,波的叠加。主干内容大体上相当于现在一般理工科大学物理课相应部分,但明显增加了论题,也提高了深度,以适应近年教学改革形势。本书对振动和波的基本概念及规律作了详细的讨论,并注意到便于自学。全书约有1/4的内容作为选读材料,可适应各种层次的要求。

本书可作为理工科各专业的大学物理教材,还可以作为科技人员、中学物理教师的参考书和青年读者自学用书。

波 动 与 光 学

(上册)

牟绪程 编

☆

清华大学出版社出版

(北京 清华园)

北京昌平区环球科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 13 字数: 360千字

1988年3月第1版 1988年3月第1次印刷

印数: 0001—5000

定价: 2.10元

ISBN 7-302-00144-8/O·36 (课)

物理学教程

序 言

本书是参照我国通用的高等学校理科类与工科类物理课教学大纲，作为一套普通物理教材而编写的，希望它可供理、工科各专业使用或参考。本书的大部分内容曾在清华大学物理课程中以讲义的形式试用；现在经过修改、重写后分为《力学与热学》、《电磁学》、《波动与光学》、《量子物理》及《量子与统计力学基础》等五个分卷陆续出版。

本书编者的共同愿望是这套书能帮助读者较好地掌握物理学的基本内容。我们力图把物理学的基本定律、概念、方法准确地叙述清楚；力求帮助读者分清主次，克服学习难点；对于容易产生误解的地方也力图给予必要的说明。有些问题在学生学习中虽然容易产生疑问，但因属于细节问题，常常没有包括在一般教材中。本书则对某些这样的问题也在小字段落、脚注、加•号章节或附录中给以一些说明，供读者有余力时参考。

物理学是研究自然界基本规律的一门科学，学习物理和世界观的建立有密切的联系。本书在内容的安排与阐述中力求贯彻辩证唯物主义思想，帮助读者获得对客观世界的正确认识。在人们对物理概念与规律的认识过程中，实验与理论的结合起着极重要的作用。本书在阐明原理概念时，特别是在说明近代物理概念的发展时，也希望将这一情况反映出来，对于若干重要的实验和它们与建立理论发展概念的关系给予了较详细的说明。

物理学日新月异的发展使它在现代科学技术领域中有着越来越广泛和重要的应用。在着重阐明基本原理的基础上，我们也尽可能地向读者介绍一些物理原理的应用和物理学新近发展的材料，使读者增加学习兴趣，开阔眼界和提高理解新技术及其应用的能力。

为了使本书有较大的适应性，我们把内容作了如下安排。凡是不带•号的各章节属于最基本的内容，可独立于带•号的章节学习。学时较少的各专业只需学习这些章节。理科专业或学时较多的工科专业则可用带•号章节、附录等作为补充内容。从全书看，五个分卷前三卷是基本教材，我们希望对于一般理科和工科各专业都能适用或可供参考；第四卷可作基本教材也可作选修课教材，视专业而定；最后一卷属于选修课教材。

在编写本书时，我们力图使它便于自学。我们的体会是，学生在学习中不仅应该获得知识与应用知识，还应该锻炼与提高学习的能力。因此在教学中必须注意培养与提高学生的学习能力，其中也包括培养与提高学生读书的能力。我们希望这套教材可供学生独立阅读，有助于培养学生的读书习惯与能力。另一方面，我们认为，如果教材便于自学，则明确了恰当的学习要求与份量后，就可以在课堂上详讲某些部分，略讲某些部分，再留一些部分给学生自学。这会有利于启发与指导学生，培养学生正确的学习习惯。此外，我们也希望这套书能供在职科技人员和自学的青年使用。

作习题是学习理论的重要环节。本书各分卷中都附有一定数量的复习思考题和习题。除基本的习题外，我们还选编了若干有一定难度的题以反映提高的要求（有的题是参考了国内外研究生入学试题选编的）。书末附有习题答案。

本书各分卷一律采用国际单位制。物理量的名称和符号也尽可能地符合国际标准化组织（ISO）提出的国际标准。

在本书的编写过程中得到了许多同志的热情帮助。刘绍唐教授审阅了全部内容，从编写的指导思想到具体内容都提出了宝贵

的意见；清华大学物理系的许多位年长同志如孟昭英、徐璋本、何成钧、徐亦庄、张礼等教授分别承担了本书某些分卷或某些部分的审阅工作；还有许多同志分别在各分卷中为编写习题、核对答案、制图、抄稿、出版等各方面作了大量的工作；在此对他们表示衷心的感谢。

在编写本书各分卷时，都参考了若干现有的教材，在许多地方得到启发与教益。这里难于一一指出，在此一并致谢。

由于编者能力有限，编写时间仓促，书中一定有不少缺点、错误，欢迎批评指正。

夏学江

史斌星

1982 年于清华大学

编 者 的 话

本书是清华大学编写的《物理学教程》中《波动与光学》分卷的上册，讲述振动和波的基本概念和规律，因此可称为“振动和波”。（下册集中讨论光的波动本性，可称为“波动光学”。）

大学普通物理课程传统地划分为力学、热学、声学、电磁学、光学和原子物理学等部分，每一部分都有一些作为其特点的基本规律。例如，力学研究机械运动，电磁学研究电磁场及其与实物的相互作用，机械运动和电磁场的运动在本质上是有所区别的。

我们也可以不按运动的本质，而按运动规律的形式，将某些重要的运动集中到一起来研究。摆锤的摆动、电路中的电磁振荡、分子原子内部的振动等是本质上不同的现象，但它们都遵从极为相似的规律。我们把这些运动都称为振动。当然，要说明机械振动的规律，应以力学定律为依据，要说明电磁振荡的原因则用电磁学的定律。

在固体、液体、气体等媒质中，一处发生机械振动，会由近及远地波及邻近部分而产生机械波。声波、水波、地震波等都是机械波。与此相似，变化电磁场在空间的传播过程叫做电磁波。无线电波、光波、X射线等都是电磁波。机械波和电磁波虽然本质上不同，但运动规律的形式非常相似。

基于上述情况，近年来不少物理教材中有这样的趋势：把波动列为物质（包括电磁场）运动的一种普遍形式，用统一的观点和方法来研究属于波动的各种现象，而不管它是力学的、声学的

的、电磁学的还是光学的。在同一论题中既讨论机械波，也讨论电磁波，甚至涉及“物质波”（即本教程《量子物理》卷中要讲的德布洛意波）。诚然，这种讲法也要指出声波和光波的区别，但强调的是它们的共通之处，是它们的类似性。这样做的好处不只便于集中讨论类似问题，更重要的是易于展示各种现象之间的联系，展示自然规律内在的和谐，使学生有触类旁通的体验，从而提高处理各种波动问题的能力。本书就是大致按这种想法编写的。

本书分为振动、波的传播、电磁波、波的叠加共四章。其中一些是选读内容（加*号表示）。这样做是考虑到后继课程的需要和学生将来在工作中的需要，同时也考虑到学生入学程度和学习能力在逐年提高，因而有可能在现有课时下学得更深一些。

除上述特点之外，本书特别注意阐明基本概念和基本规律。从振动和波的表达方式开始就加以详细说明，并及早引入复数表示法（虽然后面并不总是用它，但用其它表示法不甚方便时仍然多次使用复数表示）。对于振动能量问题、波的能量传输问题，都从不同侧面反复讨论。振动、波的叠加和分解，也在预定范围内（暂时没有引入复数形式的傅里叶变换）详细讨论，等等。本书主要是给修此课程的二年级学生阅读的。编者希望在重要问题上不要只留下定义或一两句简短的话，希望学生不要只学得一些结论，还要在头脑中形成鲜明的“物理图象”，学到一些思考问题的方法。这样做不免要适当扩大篇幅。权衡之下，编者宁愿让学生在念的过程中自己去把书“变薄”。

用本书作为教材时，教师宜根据学生实际情况而作出使用上的安排。书中打*号的小节作为选读材料，不打*号的作为基本内容。教材是发给学生们的阅读材料，不是讲稿，并不是说划为基本内容的部分都要讲。举例来说，书中三番五次从不同具体情况导出同一形式的波动方程，讲授时最好只讲一个，至多两个，其余的让学生自己看，甚至请学生从提出的问题自己导出波动方

程。全书共有61小节，其中打*号的为15小节（按小节数计算约占1/4）。略去这15小节选读材料，不影响原有的系统性。在剩下的46小节中，再略去一部分，仍然可以说是系统地介绍了振动和波的基本概念和规律。比如说以下所列的小节，可以考虑选一些或者全部略去：

1.6.4, 1.6.5, 1.6.6, 2.1.4, 2.2.4, 3.1.3,
3.2.2, 3.3, 3.4.1, 3.4.2, 3.5.1, 4.1.2,
4.1.3, 4.2.2, 4.3.2.

本书涉及具体的波动时，主要讲声和光。学习本书内容可以对声波、光波有初步了解，再加下册集中讲述光的波动性（光的量子性在《量子物理》中介绍），就有了进一步学习高等光学或声学课程的基础。振动和波的基础知识对于量子物理、电工技术和无线电技术方面的多种后继课程也是必要的准备。这部分内容在普通物理课中是相当重要的。

本书（指上册）初稿曾于1979年开始油印，刘绍唐同志仔细审阅了全部油印稿并提出了很多具体意见。1982年由董文达同志负责整理成铅印册，这中间邬淑婉等同志参加了核对习题等工作。1984年夏天开始进行修改。董文达、蒋大权、史斌星、黄天麟、高炳坤、邓新元、陈惟蓉、邬淑婉等同志都对修改方案提出过自己的意见。这次修订稿在总体安排上有些变动。每一小节都有改动。不少小节完全是重写或新加的。起稿过程中，夏学江同志逐字逐句反复审阅了全部稿件，并提了很多宝贵的修改意见和内容安排上的主意。最后由王建纬同志绘制大部分插图，姚有光同志编程序并用计算机绘制了约二十幅带曲线的插图。借此机会向历年来参加过此书逐渐成型工作的同志表示衷心的感谢。大家也没有忘记五年来使用过初稿的同学们对我们的支持和鼓励。没有学生的认可，教材将完全失去意义。

牟绪程

1985.9. 于清华园

目 录

第一章 振动	1
§1.1 谐振动的描述	1
1.1.1 谐振动的表达式	1
1.1.2 谐振动的矢量图示法和复数表示法	6
1.1.3 位相差	8
§1.2 无阻尼自由振动	14
1.2.1 弹簧振子的运动微分方程及其解	15
1.2.2 单摆的小幅度摆动	21
1.2.3 LC电路中的自由电磁振荡	25
§1.3 无阻尼自由振动的能量	28
1.3.1 势能和动能的转化	28
1.3.2 电场能和磁场能的转化	30
*1.3.3 从能量关系求振动规律	30
*1.3.4 稳定平衡位置附近的微小振动	35
§1.4 阻尼振动	40
1.4.1 阻尼振动的运动规律	41
*1.4.2 阻尼振动的能量损耗和系统的Q值	45
§1.5 受迫振动 共振	48
1.5.1 受迫振动的运动微分方程及其稳态解	49
1.5.2 共振	53
*1.5.3 速度共振, 吸收功率和共振锐度	55
§1.6 振动的合成与分解	62
1.6.1 同频率的两个标量谐振动的合成	62
1.6.2 不同频率的两个标量谐振动的合成 拍	65

1.6.3	互相垂直的两个矢量谐振动的合成·····	70
1.6.4	周期振动的傅氏分析 分立频谱·····	76
1.6.5	非周期性扰动的傅氏分析 连续频谱·····	84
1.6.6	振动的叠加原理和线性振动系统·····	94
习题一 ·····		100
第二章 波的传播 ·····		111
§2.1	简谐波的描述 ·····	111
2.1.1	波形的传播 频率、波长和波速的关系·····	111
2.1.2	位相的传播 一维简谐波的表达式·····	117
2.1.3	平面波和球面波·····	122
2.1.4	简谐波的复数表示法 复振幅·····	127
§2.2	波动方程和波速 ·····	132
2.2.1	弦上的横波·····	132
2.2.2	固体中的弹性波·····	135
2.2.3	流体中的声波·····	142
2.2.4	一维波动方程的通解·····	151
§2.3	波的能量传输 ·····	155
2.3.1	弹性波的能通量 波的强度·····	156
2.3.2	声强和声强级·····	160
*2.3.3	特性阻抗和能通量·····	165
§2.4	波的反射和折射 ·····	170
2.4.1	惠更斯原理和反射、折射定律·····	171
2.4.2	反射波、透射波的振幅和位相·····	177
§2.5	多普勒效应 ·····	184
习题二 ·····		193
第三章 电磁波 ·····		201
§3.1	波动方程和波速 ·····	201

3.1.1	真空中的平面电磁波·····	205
3.1.2	电磁波谱·····	213
3.1.3	电磁波在不导电媒质中的波速 色散现象··	216
*3.1.4	折射率怎样随频率而变·····	220
*3.1.5	传输线上的电磁波·····	226
§3.2	电磁波的能量和动量 ·····	233
3.2.1	电磁波的能量传输 坡印廷矢量·····	233
3.2.2	电磁波的动量 辐射压力·····	239
*3.2.3	传输线的特性阻抗和媒质的波阻抗·····	245
*3.2.4	媒质对波的吸收·····	250
§3.3	电磁辐射 ·····	256
§3.4	电磁波的反射和折射 ·····	270
3.4.1	反射波和折射波的振幅——菲涅耳公式····	271
3.4.2	反射波、折射波的位相、强度和能通量····	280
*3.4.3	反射、折射定律和菲涅耳公式的推导·····	288
*3.4.4	全反射和消逝波·····	293
§3.5	光学的多普勒效应 ·····	302
3.5.1	光学多普勒效应的特点及频移公式·····	302
*3.5.2	公式的推导·····	308
习题三	·····	311

第四章 波的叠加 ····· 318

§4.1	非简谐波的传播 ·····	318
4.1.1	波的叠加原理和线性媒质·····	319
4.1.2	波的叠加和分解·····	323
4.1.3	相速度和群速度·····	328
§4.2	驻波 ·····	339
4.2.1	从波的叠加看驻波的形成·····	340
4.2.2	有界弦的自由振动 简正模式·····	347

*4.2.3 有界弦自由振动的傅氏分解·····	354
*4.2.4 弦的受迫振动·····	359
§4.3 波的干涉 ·····	364
4.3.1 干涉现象和干涉条件·····	365
4.3.2 关于干涉条件的讨论·····	370
*4.3.3 两波干涉时的能量问题·····	374
习题四 ·····	381
习题答案 ·····	390

第一章 振 动

振动的基本规律很重要。一方面，它本身是工程技术中的重要问题，另一方面，它是讨论波的基础。本书安排这一章的侧重点在于后者。从本章开头的谐振动表示法直到末尾的频谱概念，几乎全都要在后面章节中用到。

本章讨论一个自由度的简单振动系统，强调的是建立准确的基本概念和熟练掌握重要关系式。学好本章的真正收益将体现在能够顺利学习以后各章。

为了利于自学，本章用了相当大的篇幅。但绝大部分内容不深，不难读懂。（略去带 * 号的部分，不影响本章作为预备知识的完整性。）

§1.1 谐振动的描述

在中学已讲过，物体沿一直线运动时，如果离开其平衡位置的位移按照余弦函数（或正弦函数）规律随时间而反复变化，这种振动就叫做简谐振动。它是最简单的振动，是进一步研究复杂振动的基础，我们简称之为**谐振动**。这一节从运动学的观点剖析谐振动的规律，介绍几种表示谐振动的办法，而暂不追究引起谐振动的动力学根源。

1.1.1 谐振动的表达式

我们来看一个简单振动系统的运动情况。图 1.1.1 右部画了一个螺旋弹簧，它上端固定，下端连一重物（例如砝码）。弹簧

和重物组成的这个振动系统称为**弹簧振子**。若把重物从它悬挂时的自然平衡位置向上托起一段距离，然后放手，不再碰它，它就很有节奏地上下振动。

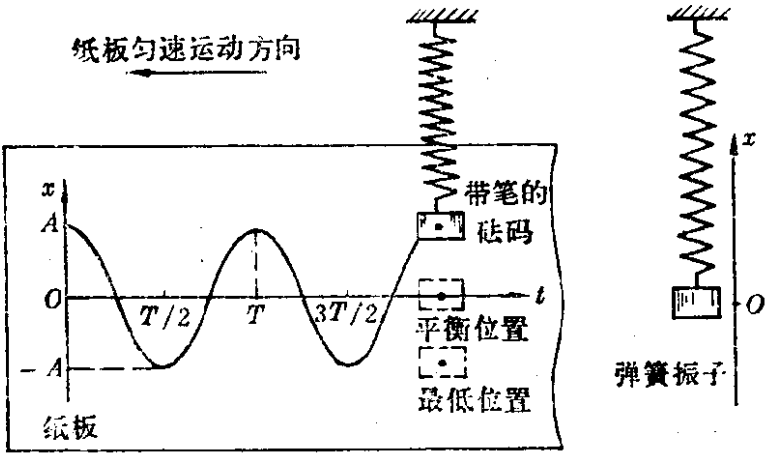


图 1.1.1 弹簧振子的振动曲线

为了确切描述弹簧振子的运动情况，可取坐标轴 x 竖直向上，并选原点 O 与重物（看作质点）的平衡位置重合，重物坐标 x 随时间 t 而变化的函数关系即是弹簧振子的运动规律。可在重物上装一支小笔，笔尖轻触立在后面的纸板。若重物被托起后由静止状态释放，同时向左匀速拉动纸板，可画出图1.1.1中的曲线。显然，图中横坐标以某种比例代表时间 t ，纵坐标是重物离开平衡位置的位移 x ，这曲线显示了 x 对 t 的函数关系。

上述曲线是一条余弦函数曲线，这表明重物是作谐振动。可以看到，每过一段确定的时间 T ，运动情况完全重演一次， T 是振动的**周期**。再者， x 总是在 A 和 $-A$ 所限定的范围内变化，离开中心的最大距离 A 就是**振幅**。考虑到余弦函数以其宗量变化 2π 为一周期，且余弦函数的数值总是被限定在 1 和 -1 之间，可知 $x-t$ 曲线对应的解析式应为 $x = A \cos(2\pi t/T)$ 。

既然周期 T 是作一次完整的振动所需的时间，那么 $1/T$ 就等于单位时间内的振动次数。把 $1/T$ 记为 ν ，叫做振动的**频率**，其单位应是秒的倒数，即 1/秒（意思是“周/秒”），这个单位的

专用名称叫赫兹，简称赫，符号是Hz。我们再把 $2\pi\nu$ 记为 ω ，叫做**谐振动的圆频率，或角频率**。 ω 的单位也是1/秒（意思是“弧度/秒”，rad/s），它不能称为赫兹。周期 T 、频率 ν 和圆频率 ω 之中的任何一个都可以用来表示一个谐振动的周期性，三者的关系如下：

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T. \quad (1.1.1)$$

这样一来，图1.1.1中的振动曲线有三种等效的解析式：

$$x = A \cos 2\pi(t/T),$$

$$x = A \cos 2\pi\nu t,$$

$$x = A \cos \omega t.$$

我们经常采用后两种形式。

$x = A \cos \omega t$ 这个式子规定了 $t=0$ 时 $x=A$ ，它只能表示 $t=0$ 时位移 x 恰好是正向最大值 A 的那些特殊的谐振动。换句话说，这种表达式限制我们必须把 $x=A$ 的那个时刻取作 $t=0$ 。但是，在描述一个谐振动时，没有理由说我们应该受此限制。我们可以在振动过程中任一时刻开始计时，并把那个时刻定为 $t=0$ ，如果那时 $x \neq A$ ，再用 $x = A \cos \omega t$ 表示这个谐振动就不行了，此式应修改。

当我们选定的计时器（其读数记为 t ）开始走动以后，设振动物体在某个时刻 t_1 达到正向最大位移 $x=A$ 。恰好在此时我们开动一个辅助计时器（其读数记为 t' ）。因为 $t'=0$ 时 $x=A$ ，所以运动规律可写成 $x = A \cos \omega t'$ 。辅助计时器比原来选定的计时器晚起动一段时间 t_1 ，二者读数的关系是 $t' = t - t_1$ 。于是我们可以写 $x = A \cos \omega(t - t_1) = A \cos(\omega t - \omega t_1)$ 。把常数 $-\omega t_1$ 简记为 φ ，就得到

$$x = A \cos(\omega t + \varphi). \quad (1.1.2)$$

这才是振幅为 A 、圆频率为 ω 的谐振动表达式的普遍形式。只要给予适当的 φ 值，它就可以表达 $t=0$ 时 $x=A$ 或 $x \neq A$ 的任何情形。

物体作谐振动时，它的运动状态作周期性变化。(1.1.2) 式中的 $(\omega t + \varphi)$ 的数值决定了 t 时刻物体运动状态正处于一周期中的什么“地位”。例如， $\omega t + \varphi = 0$ 表明物体在正向最远点，速度为零。当 $\omega t + \varphi$ 变为 $\pi/2$ 时， $x = 0$ ，物体正经过平衡位置（且向 $-x$ 方向运动）。 $\omega t + \varphi$ 变到 π 时， $x = -A$ ，物体在反向最远点，等等。月亮在绕地球运行的一个周期中表现出来的圆缺变化情况不是叫做“月相”吗？相，就是“面貌”、“形态”的意思。物理学中把 $(\omega t + \varphi)$ 叫做谐振动的**位相**，或**周相**，它是随时间而变的， t 时刻的位相 $(\omega t + \varphi)$ 反映了该时刻振动的“面貌”。在阴历的一个月里不会有两个日子看到同样的月亮。诚然，月初某一天和月末某一天可看到同样大小的弯月，但一个是上弦月，一个是下弦月，并不等同。与此类似，在谐振动的一个周期内，物体的一种运动状态（指位置和速度）只出现一次，虽然某一位置可经过两次，但两次的速度方向不同。总之，一个位相数值代表谐振动一周期中的一个确定的运动状态。位相这个概念在很多实际问题中的重要性盖源于此。

(1.1.2) 式中的 φ ，是 $t = 0$ 时的位相，叫做**初位相**。以后我们将多次看到位相和初位相的重要性。位相 $(\omega t + \varphi)$ 和初位相 φ 都是无量纲的纯数。它们在 (1.1.2) 式中作为余弦函数的宗量而出现，我们也就有时说它们的单位是弧度(rad)。

(1.1.2) 式所对应的曲线见图1.1.2，此图中横坐标是 ωt 而

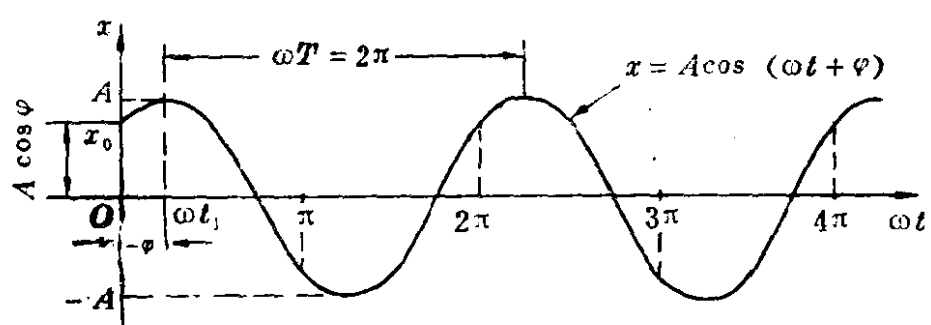


图 1.1.2 初位相 $\varphi < 0$ 的一条振动曲线

不是 t ， ωt 每变化 2π ，振动就经历一周期。当 $\omega t = \omega t_1 = -\varphi$ 时，