

清华大学教材

张三慧 主编

工科大学物理学

第四册

# 光学 近代物理

张三慧 史田兰 编

北京科学技术出版社

清华大学教材

张三慧 主编

工科大学物理学

第四册

光学近代物理

张三慧 史田兰 编

北京科学技术出版社

《工科大学物理学》  
第四册《光学 近代物理》

张三慧 主编

张三慧 史田兰 编

•

北京科学技术出版社出版

(北京西直门外南路19号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

固安县印刷厂印刷

•

850×1168毫米 32开本 11.625印张 296千字

1987年12月第一版 1989年7月第二次印刷

印数: 8601—14600册

ISBN7-5304-0024-X/Z·19 定价4.40元

## 内 容 简 介

本书是清华大学教材《工科大学物理学》第四册，讲述各类工科学生所需的物理学基础理论的 optics 和量子物理部分。书的前两章介绍振动与波的基本规律，接着简明而系统地讲述了光的干涉、衍射和偏振的规律。在量子物理部分着重阐述了波粒二象性这一核心概念，并在比基础上介绍了量子力学的基本方法和若干重要结论。除了基本内容外，还专题介绍了全息、多光子吸收、核磁共振、扫描隧穿显微镜、正电子湮没技术等今日物理趣闻与技术。也写了几位有关科学家的传略。这些可帮助学生扩大知识面。本书可作为各类工科大学及专科学校的物理学教科书，也可作为其他高校师生及中学物理教师教学或自学参考书。

## 数 值 表

真空中光速

$$c = 299792458 \pm 1.2 \text{ 米/秒}$$

普朗克常数

$$h = (6.626176 \pm 0.000036) \times 10^{-34} \text{ 焦耳} \cdot \text{秒}$$

玻耳兹曼常数

$$k = (1.380662 \pm 0.000044) \times 10^{-23} \text{ 焦耳/开}$$

斯忒藩——玻耳兹曼常数

$$\sigma = (5.67032 \pm 0.00071) \times 10^{-8} \text{ 瓦/米}^2 \cdot \text{开}^4$$

基本电荷

$$e = (1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19} \text{ 库}$$

原子质量单位

$$u = (1.6605655 \pm 0.0000086) \times 10^{-27} \text{ 千克}$$

电子静止质量

$$m_e = (9.109534 \pm 0.000047) \times 10^{-31} \text{ 千克}$$

质子静止质量

$$m_p = (1.6726485 \pm 0.0000086) \times 10^{-27} \text{ 千克}$$

中子静止质量

$$m_n = (1.6749543 \pm 0.0000086) \times 10^{-27} \text{ 千克}$$

质子质量与电子质量之比

$$m_p/m_e = 1836.15152 \pm 0.00070$$

电子荷质比

$$e/m_e = (1.7588047 \pm 0.0000049) \times 10^{11} \text{ 库/千克}$$

里德伯常数

$$R_{\infty} = (1.097373177 \pm 0.000000083) \times 10^7 / \text{米}$$

玻尔半径

$$a_0 = (5.2917706 \pm 0.00000044) \times 10^{-11} \text{ 米}$$

玻尔磁子

$$\mu_B = (9.274078 \pm 0.000036) \times 10^{-24} \text{ 焦/特}$$

核磁子

$$\mu_N = (5.050824 \pm 0.000020) \times 10^{-27} \text{ 焦/特}$$

电子磁矩

$$\mu_e = (9.284832 \pm 0.000036) \times 10^{-24} \text{ 焦/特}$$

质子磁矩

$$\mu_p = (1.4106171 \pm 0.0000055) \times 10^{-26} \text{ 焦/特}$$

电子的康普顿波长

$$\lambda_c = (2.4263089 \pm 0.0000049) \times 10^{-12} \text{ 米}$$

真空磁导率

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 12.5663706144 \times 10^{-7} \text{ 亨/米}$$

真空电容率

$$\varepsilon_0 = (8.854187818 \pm 0.000000071) \times 10^{-12} \text{ 法/米}$$

阿伏加德罗常数

$$N_0 = (6.022045 \pm 0.000031) \times 10^{23} / \text{摩}$$

摩尔气体常数

$$R = (8.31441 \pm 0.00026) \text{ 焦/摩} \cdot \text{开}$$

引力常数

$$G_0 = (6.6720 \pm 0.0041) \times 10^{-11} \text{ 米}^3 / \text{秒}^2 \cdot \text{千克}$$

## 前 言

摆在你面前的这部《工科大学物理学》是编者近十年来在清华大学讲授物理学所用的讲义的基础上编写的。

物理学是工科大学生必修的基础理论课。随着工业技术和物理科学本身的发展（这种发展在近几十年里更加快了步伐），物理学内容和讲授方法应该有相应的革新。但是，在我国，近几十年来的物理教学，特别是反映在物理教材上，并没有很好地适应这种时代的变化。这主要表现在：①内容基本未变，近代物理的基本概念与方法没有得到恰如其份的反映。②讲述方法基本未变，某些重要物理现象与规律相对孤立，没有反映出近代物理对自然规律的深刻的系统化的理解。③与目前我国中学物理教学衔接不好。不少内容是简单重复。这就破坏了学生学习物理学的兴趣，妨碍了他们学习积极性的发挥。

针对这些我们认为的缺点，在本书的编写上力求体现以下的特点。

首先是起点较高。凡是中学教学大纲已列内容，我们都认为学生已基本掌握。除为了本书的讲述系统所需要的以外，一般不再做简单的重复。

其次是着重加强了讲述的系统性。陈述物理学的内容可以按照两种系统进行。一种是遵循历史发展的顺序——历史逻辑，从早到晚依次讲述。一种是遵循物理学规律自身的相互联系所确定的顺序——结构逻辑或教学逻辑，从最基本的规律逐渐展开。虽然在不少地方这种系统是一致的，但二者确有明显的不同。为了使工科大学

生在较短的学时内对现代物理学的内容有一个尽可能整体的理解，我们在本书中采用了后一种讲述系统。

力学部分当然是以牛顿定律为基础展开的。书中着重阐明了守恒定律。作为牛顿力学的发展，最后讲了狭义相对论。

电磁学部分以库仑定律或高斯定律、电荷不变性以及狭义相对论为基础，讲述了静电场、运动电荷的电场以及磁场的规律。这样就更深刻地阐明了电场和磁场的相互联系。相对论不再只作为知识介绍，而是作为理解和阐述物理现象本质的基本规律了。

热学部分可以说是以统计概念和统计规律为基础加以讲述的。分子运动论当然是这样。对热力学第一定律也阐明了其微观意义。对热力学第二定律更是突出了它的统计意义。熵的概念是从统计的角度引入的。

振动与波部分是牛顿力学的延伸。物理光学实际上是作为波的基本规律在电磁波现象中的应用而讲述的。在量子物理部分我们也大胆地采用了演绎的讲述系统。这样可以使学生更深刻地掌握微观世界的基本特征——二象性和量子性。

第三是尽可能使内容现代化。书中着重介绍了近代物理的观点，例如守恒定律与对称性的关系，相对论的时空观，原子观点，统计的观点，微观粒子的二象性和量子性等。关于近代物理知识包括物理学前沿的介绍，除了散见于各章的实例、例题或习题外，本书特辟了两类特殊的章节：一是“今日物理趣闻”，一是“物理学与技术”。前者着重介绍当今物理学前沿的发展，例如粒子理论、广义相对论、超导、等离子体、大爆炸、耗散结构理论等。后者着重介绍物理学的近代应用，例如同步卫星的发射、等离子体发电、热泵、扫描隧穿显微镜等。根据工科教学计划限定的时间，这些内容是不可能作为教学要求进行课堂讲授的。但是，我们热切地希望所有的工科学生都能在课余阅读这些材料（为此，我们已在写法上尽可能地通俗化了，相信他们都是能看懂的）。这对于提高他们学



习物理的兴趣、扩大他们的视野以及在各自的专业范围内开拓自己的思路一定会有帮助的。

本书还辟有“科学家介绍”这一栏目。简要地介绍了重要的物理学家的生平与贡献。这样做，一方面是为了向学生提供必要的物理学史方面的知识，另一方面也希望学生能从这些科学家的开创精神、治学态度以及思想境界方面获得教益。

关于习题，我们并不赞同那种越多越好的观点，考虑到工科大学生的全面发展以及理解和掌握物理基本概念和规律的需要，本书中只编选了比在规定学时内能完成的稍多的思考题和习题。我们希望大学生在做题时不要贪多，而要求精。要真正把做过的每一道题从概念、原理上彻底弄清楚，并且用尽可能简洁明确的语言、公式、图象表述出来。

本书每章都列有“本章要求”和“本章提要”。我们希望通过这些来发挥学生学习的主动性和帮助他们进行自我检查。

本书在清华大学各系使用的过程中，是在规定的120小时（60分钟）内全部授完的（其中包括10—15小时的习题讨论课）。讲课有粗有细，有些属于要求的章节也未在课堂上讲而是留给学生自学。学生中的大多数都是怀着很大的兴趣阅读这部教材的，也都取得了较好的学习成绩。

本书也吸收了本校物理系其他物理教师的宝贵经验。在编写、试用过程中，邓新元、黄天麟等老师曾提出过许多宝贵的意见。刘凤英老师参加了本书的核算习题答案的工作。韩晓东同志提供了本书所需的全部照片。本校建筑系程远老师为本书绘制了全部科学家的肖像。郭奕玲老师提供了部分物理学史资料。对于以上这些热情的帮助，我们表示衷心的感谢。

在本书的编写（以及以往的教学）过程中，我们还借鉴了国外的许多教材，特别是帕塞尔的《电磁学》（E. M. Purcell: Electricity and Magnetism）和奥哈尼安的《物理学》（H. C. Ohanian,

Physics)。对这两本书的作者，我们也谨致以谢意。

我等有志于物理教学的改革久矣，然而鲜有成效。仅以此书献给广大的物理教师和工科大学生。我们热切地盼望着他们对本书的各方面的批评。

编者 1987 年 5 月

# 目 录

第一章 振动	1
§1.1 简谐振动的描述	2
§1.2 旋转矢量与振动的相	4
§1.3 简谐振动的动力学方程	9
§1.4 两个简谐振动实例	13
§1.5 简谐振动的能量	15
§1.6 阻尼振动	16
§1.7 受迫振动 共振	19
§1.8 在同一直线上的同频率的简谐振动的合成	21
§1.9 同一直线上的不同频率的简谐振动的合成	25
§1.10 谐振分析	27
§1.11 相互垂直的简谐振动的合成	30
思考题	36
习题	37
第二章 波动	42
§2.1 机械波的形成	43
§2.1附录 物体的弹性	46
§2.2 波的周期性和波速	50
§2.3 简谐波的波函数	53
§2.4 波所传播的能量	59
*§2.5 波动方程	65
§2.6 惠更斯原理	68
§2.7 波的干涉	72
§2.8 驻波	75
§2.9 多普勒效应	80

§2.10 声波	86
*§2.11 复波	90
思考题	96
习题	97
第三章 光的干涉	102
§3.1 为什么两个灯泡发的光不能产生干涉现象	102
§3.2 杨氏双缝干涉实验	105
§3.3 其他分波阵面的干涉实验	109
*§3.4 光源的大小对干涉条纹的影响	111
*§3.5 光的非单色性对干涉条纹的影响	115
§3.6 光程	118
§3.7 薄膜干涉(一)——等厚条纹	121
§3.8 薄膜干涉(二)——等倾条纹	127
§3.9 迈克耳逊干涉仪	133
科学家介绍 托马斯·杨和菲涅耳	139
思考题	143
习题	144
第四章 光的衍射	149
§4.1 光的衍射图样和惠更斯—菲涅耳原理	149
§4.2 单缝的夫琅和费衍射	151
§4.3 光栅衍射	158
§4.4 光栅光谱	163
§4.5 光学仪器的分辨率	172
§4.6 X射线的衍射	175
思考题	179
习题	180
今日物理趣闻 A. 全息照相	183
今日物理趣闻 B. 空间滤波与 $\theta$ 调制	190

第五章 光的偏振.....	195
§5.1 自然光和偏振光.....	195
§5.2 起偏和检偏.....	198
§5.3 反射和折射时光的偏振.....	201
§5.4 双折射现象.....	203
§5.5 椭圆偏振光和圆偏振光.....	210
§5.6 偏振光的干涉.....	215
§5.7 人工双折射.....	217
§5.8 旋光现象.....	219
思考题.....	221
习题.....	221
今日物理趣闻 C. 液晶.....	224
第六章 量子物理基础.....	229
§6.1 光电效应.....	230
§6.2 光子与光的二象性.....	232
§6.3 康普顿散射.....	237
§6.4 粒子的波动性.....	242
§6.5 几率波.....	245
§6.6 不确定性关系.....	248
§6.7 薛定谔方程.....	253
§6.8 势阱中的粒子.....	255
§6.9 谐振子.....	261
*§6.10 黑体辐射.....	263
§6.11 氢原子.....	267
§6.12 氢原子光谱.....	270
§6.13 电子的自旋 四个量子数.....	274
§6.14 原子的壳层结构.....	277
科学家介绍 德布罗意 玻尔 薛定谔.....	282

物理学与技术	I	核磁共振	292
物理学与技术	II	扫描隧穿显微镜	296
物理学与技术	III	正电子湮没技术	299
		思考题	302
		习题	302
今日物理趣闻	D.	多光子吸收	306
第七章		激光	310
	§7.1	粒子数按能级的统计分布 原子的激发	311
	§7.2	自发辐射 受激辐射和受激吸收	312
	§7.3	粒子数反转	314
	§7.4	增益系数	318
	§7.5	光学谐振腔	319
	§7.6	激光器的纵模和横模	321
	§7.7	激光的特性及其应用	325
	*§7.8	高斯光束通过薄透镜的变换	325
		习题	336
第八章		固体的能带结构	337
	§8.1	固体的能带	337
	§8.2	导体和绝缘体	340
	§8.3	半导体的导电机构	343
	§8.4	p-n 结	346
	§8.5	半导体的其它特性和应用	348
		习题	351
		习题答案	352

# 第一章 振 动

## 本章要求

1. 理解简谐振动的概念及其三个特征量的意义和决定因素，掌握用旋转矢量表示简谐振动的的方法。
2. 理解相及相差的意义。
3. 理解简谐振动的动力学特征和弹性力或准弹性力的意义。能根据条件列出运动微分方程从而判定简谐振动并求出其周期。
4. 掌握利用初始条件写出振动表达式的方法。
5. 理解简谐振动的能量特征。
6. 了解阻尼振动和受迫振动的基本特征。
7. 掌握在同一直线上两个同频率简谐振动的合成规律，了解拍与拍频。
8. 理解两个相互垂直，同频率简谐振动合成的规律，了解李萨如图的形成。

振动是物体的一种运动形式。从日常生活到生产技术以及自然界中到处都存在着振动。一切发声体都在振动，机器的运转总伴随着振动。海浪的起伏以及地震也都是振动，就是晶体中的原子也都在不停地振动着。物体或质点在一定位置附近所作的来回往复的运动叫机械振动。

广义地说，任何一个物理量随时间的周期性变化都可以叫做振动。例如 电路中的电流、电压；电磁场中的电场强度和磁场强度也都可能随时间作周期性变化。这种变化也可以称为振动—电磁振动或电磁振荡。这种振动虽然和机械振动有本质的不同 但它们随时间变化的情况以及许多其它性质在形式上都遵从相同的规律。因

此研究一种振动的规律有助于了解其他种振动的规律。本章着重研究机械振动的规律。

振动有简单和复杂之别。最简单的是简谐振动。它也是最基本的振动，因为一切复杂的振动都可以认为是由许多简谐振动合成的。下面就开始研究简谐振动。

## § 1.1 简谐振动的描述

物体运动时，如果离开平衡位置的位移（或角位移）按余弦函数（或正弦函数）的规律随时间变化，这种运动就叫简谐振动。

简谐振动可以用一个弹簧振子来演示。一个轻质弹簧的一端固定，另一端固结一个可以自由运动的物体，就构成一个弹簧振子。

图 1.1 就画了一个在水平光滑面上安置的一个弹簧振子。在弹簧处于自然长度时，物体的位置叫平衡位置，以  $O$  表示，并取

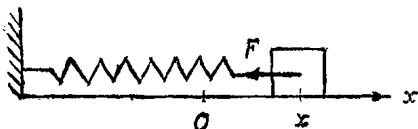


图 1.1 弹簧振子的简谐振动

作坐标原点。如果拉动物体然后释放，则物体将在  $O$  点两侧作往复运动。在这种运动中，物体对于平衡位置的位移（以下简称位移） $x$  将按余弦的规律随时间  $t$  变化，因此，物体的这种运动就是简谐振动。它的数学表达式是

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.1)$$

将物体视为质点，(1.1) 式中的  $A$  表示质点可能离开原点的最大距离。它给出了质点运动的范围。这个量叫做振动的振幅。

(1.1) 式表示质点的位置变化具有时间上的周期性。以  $T$  表示周期，即振动往复一次所经历的时间，则应有

$$\begin{aligned} x &= A \cos(\omega t + \varphi) = A \cos[\omega(t + T) + \varphi] \\ &= A \cos[\omega t + \varphi + \omega T] \end{aligned}$$

由于余弦函数的周期是  $2\pi$ ，所以有

$$\omega T = 2\pi$$



因此 
$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1.2)$$

以  $\nu$  表示振动的频率，即单位时间内振动往复的次数，则它显然和周期  $T$  有倒数的关系，

即 
$$\nu = \frac{1}{T} \quad (1.3)$$

将(1.2)式的  $T$  值代入，则有

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1.4)$$

由于  $\omega$  和  $\nu$  成正比，所以它叫做振动的角频率。 $\omega$ 、 $T$  或  $\nu$  都表示简谐振动的周期性。

在 SI 中， $T$  的单位是 s (秒)， $\nu$  的单位是 Hz (赫兹)， $\omega$  的单位就用  $s^{-1}$  (1/秒)。

在  $A$  和  $\omega$  已知的条件下，(1.1) 式中的  $\varphi$  (是一个角度) 就给出，或者说，决定于质点在时刻  $t=0$  (时间原点) 时的位置。一个简谐振动的物理特征在于其振幅和周期。对于一个振幅和周期已定的简谐振动，用数学公式表示时，由于选作原点的时刻不同， $\varphi$  值就不同。例如，选物体到达正向极大位移的时刻为时间原点，则 (1.1) 式中的  $\varphi=0$ ；如果选物体到达负向极大位移的时刻为时间原点，则 (1.1) 式中的  $\varphi=\pi$ 。这个由时间原点的选择所决定的量  $\varphi$  叫做振动的初相。

对于一个简谐振动，如果  $A$ 、 $\omega$  和  $\varphi$  都知道了，就可以写出它的完整的表达式了，也就是全部掌握了该简谐振动的特征了。因此，这三个量叫做描述简谐振动的三个特征量。

由位置函数 (1.1) 式，可求得任意时刻质点的速度和加速度的表示式分别如下：

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) = \omega A \cos(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) \quad (1.5)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) = \omega^2 A \cos(\omega t + \varphi + \pi) \quad (1.6)$$