

Physics

大学物理教程 (第二版)

——波与粒子

刘银春
曾曦萍 编
陈美香



SEU 2619469



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

2619469

04
162/-2

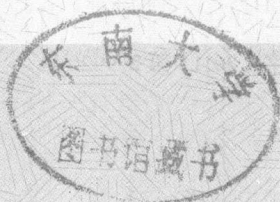
Physics

大学物理教程 (第二版)

——波与粒子

DAXUE WULI JIAOCHENG (DI-ER BAN) ——BO YU LIZI

刘银春
曾曦萍 编
陈美香



质检



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

《大学物理教程(第二版)》由实物与场、波与粒子两部分组成,各部分单独成册。本书以波与粒子为主线分两篇展开,第三篇是波,内容有振动、波动、光的波动性、光的波粒二象性、辐射度学和光度学基础和量子力学基础;第四篇是粒子,内容有统计物理学基础和热力学基础。每章之后有本章提要 and 习题。习题分A、B、C、D四部分,A、B两部分属难度不同的两部分,书后附有参考答案,C部分为多项选择题,D部分为英文题。

本书可作为高等学校理工科各专业“大学物理”课程教材,也可作为其他专业相关课程师生的教学或自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程:第2版.波与粒子/刘银春,曾曦
萍,陈美香编.——北京:高等教育出版社,2011.12
ISBN 978-7-04-034517-9

I. ①大… II. ①刘…②曾…③陈… 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(2011)第279920号

策划编辑 郭亚嫒	责任编辑 郭亚嫒	封面设计 赵阳	版式设计 余杨
插图绘制 尹莉	责任校对 胡美萍	责任印制 尤静	

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京铭成印刷有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 23.25
字 数 420千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2011年12月第1版
印 次 2011年12月第1次印刷
定 价 31.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 34517-00

目 录

第三篇 波

第 9 章 振动	1
9.1 简谐振动 相位	1
9.1.1 简谐振动	1
9.1.2 几种典型的简谐振动	2
9.1.3 旋转矢量表示法 相位	5
9.1.4 简谐振动的能量	7
9.2 简谐振动的合成	13
9.2.1 同方向简谐振动的合成	13
9.2.2 相互垂直的简谐振动的合成	17
9.3 阻尼振动 受迫振动 共振	21
9.3.1 阻尼振动	21
9.3.2 受迫振动与共振	24
9.3.3 受驱振荡电磁共振	26
本章要点	29
习题	31
第 10 章 波动	38
10.1 简谐波	38
10.1.1 波的基本概念	38
10.1.2 波函数	40
10.1.3 波动方程	42
10.2 机械波	45
10.2.1 机械波产生的条件及传播机制	45
10.2.2 物体的弹性形变	45
10.2.3 机械波在弹性介质中的波速	48
10.3 机械波的能量和强度	51

10.3.1	波的能量	51
10.3.2	能量密度	52
10.3.3	波的强度	53
10.3.4	波的吸收	54
10.3.5	声波	56
10.4	电磁波	59
10.4.1	电磁波的波动方程	59
10.4.2	电磁波的性质	61
10.4.3	电磁波的能量	62
10.4.4	电磁波的动量	64
10.4.5	电磁波的辐射与接收	65
10.4.6	电磁波谱	68
10.5	惠更斯原理及其应用	70
10.5.1	惠更斯原理	70
10.5.2	波的反射定律和折射定律	71
10.5.3	波的衍射	73
10.6	波的干涉 驻波	73
10.6.1	波的叠加原理	73
10.6.2	波的干涉	74
10.6.3	驻波	76
10.6.4	半波损失	79
10.7	多普勒效应	80
10.7.1	机械波的多普勒效应	81
10.7.2	光的多普勒效应	83
10.7.3	光的多普勒效应与“宇宙大爆炸”形成说	85
*10.8	非线性波 孤子	86
10.8.1	非线性波	86
10.8.2	孤波	86
	本章要点	88
	习题	90
第11章	光的波动性	97
11.1	光的相干性	97
11.1.1	光的相干条件	97
11.1.2	获得相干光的方法	98

11.1.3	光程 光程差 半波损失	99
11.1.4	两列相干光叠加后的光强分布	101
11.2	光的分波面干涉	102
11.2.1	杨氏双缝干涉	102
11.2.2	菲涅耳双镜实验	105
11.2.3	劳埃德镜实验	105
11.3	光的分振幅干涉	107
11.3.1	薄膜干涉	107
11.3.2	等厚干涉	108
11.3.3	等倾干涉	112
11.4	光的夫琅禾费衍射	118
11.4.1	惠更斯-菲涅耳原理	118
11.4.2	光的衍射现象及其分类	119
11.4.3	单缝夫琅禾费衍射	120
11.4.4	圆孔衍射	123
11.4.5	光学仪器的分辨率	124
11.5	光栅衍射	126
11.5.1	光栅结构	126
11.5.2	双缝衍射	126
11.5.3	光栅公式	127
11.5.4	光栅光谱	130
11.6	X射线的衍射	133
11.7	光的偏振	135
11.7.1	自然光和偏振光	136
11.7.2	马吕斯定律	139
11.7.3	布儒斯特定律	140
11.7.4	光的双折射	142
11.7.5	偏振光的干涉	145
11.8	偏振光的应用	146
11.8.1	光弹性效应	146
11.8.2	克尔效应	147
11.8.3	旋光现象	148
11.8.4	液晶和液晶显示器的物理原理	149
11.9	几何光学基础	151

11.9.1	几何光学的基本定律	151
11.9.2	费马原理	153
11.9.3	光在平面上的反射和折射成像	154
11.9.4	光在球面上的反射和折射	156
11.9.5	薄透镜	158
11.9.6	显微镜、望远镜和照相机	161
本章要点		163
习题		166
第 12 章 光的波粒二象性		175
12.1	黑体辐射定律与普朗克量子假设	175
12.1.1	热辐射的几个基本概念	175
12.1.2	基尔霍夫定律	176
12.1.3	黑体辐射的实验定律	178
12.1.4	普朗克的量子假设	180
12.2	光子理论与光的波粒二象性	184
12.2.1	光电效应的实验规律	184
12.2.2	光的波动说遇到的困难	186
12.2.3	爱因斯坦的光子理论	186
12.2.4	多光子光电效应和光电导效应	188
12.2.5	光的波粒二象性	189
12.3	康普顿效应	191
12.3.1	康普顿效应	191
12.3.2	康普顿效应的理论解释	193
本章要点		195
习题		196
第 13 章 辐射度学和光度学基础		199
13.1	辐射度学的基本物理量	199
13.1.1	辐射能	199
13.1.2	辐射通量	199
13.1.3	辐射出射度	200
13.1.4	辐射强度	200
13.1.5	辐射亮度	200
13.1.6	辐射照度	201
13.1.7	光谱辐射度量	202

13.2 光度学的基本物理量	202
13.2.1 光谱光视效能和光谱光视效率	202
13.2.2 光度学的基本物理量	204
13.3 照度定律	209
13.3.1 余弦定律	209
13.3.2 平方反比定律	209
本章要点	211
习题	212
第14章 量子力学基础	214
14.1 物质波	215
14.1.1 德布罗意的物质波假设	215
14.1.2 德布罗意波的实验证实	216
14.1.3 德布罗意的驻波思想	219
14.1.4 微观粒子波动性的统计解释	219
14.2 薛定谔方程	220
14.2.1 物质波的波函数	220
14.2.2 力学量的算符表示	222
14.2.3 薛定谔方程	224
14.3 定态薛定谔方程和驻波思想的应用	226
14.3.1 一维无限深势阱	227
14.3.2 一维势垒 隧道效应	231
14.3.3 一维线性谐振子	234
14.3.4 氢原子	237
14.3.5 电子的自旋	238
14.4 海森伯不确定关系	239
14.4.1 坐标和动量的不确定关系	240
14.4.2 能量和时间的不确定关系	241
14.4.3 其他形式的不确定关系	242
14.4.4 不确定关系与时空对称性	242
14.4.5 牛顿力学的适用度	242
14.5 原子和原子核结构	244
14.5.1 原子的壳层结构	244
14.5.2 原子核的基本性质和结构	246
14.6 核磁共振及其应用	252

14.6.1 核磁共振	252
14.6.2 核磁共振的应用	253
本章要点	255
习题	256

第四篇 粒 子

第 15 章 统计物理学基础	261
15.1 理想气体压强和温度的统计意义	262
15.1.1 系统的状态及其描述	262
15.1.2 理想气体分子模型和统计假设	263
15.1.3 理想气体压强的统计解释	264
15.1.4 温度的统计意义	266
15.2 能量均分定理 理想气体的内能	268
15.2.1 自由度	268
15.2.2 能量均分定理	268
15.2.3 理想气体的内能	270
15.3 粒子的经典统计分布	270
15.3.1 测定气体分子速率分布的实验	270
15.3.2 速率分布函数	271
15.3.3 麦克斯韦速率分布定律	272
15.3.4 三种特征速率	273
15.3.5 玻耳兹曼分布定律	275
15.3.6 大气密度和压强随高度变化的规律	277
15.4 气体分子的碰撞及其迁移现象	278
15.4.1 气体分子的碰撞	278
15.4.2 气体内的迁移现象	282
15.5 粒子的统计分布	285
15.5.1 经典粒子与量子粒子	285
15.5.2 费米 - 狄拉克统计	285
15.5.3 玻色 - 爱因斯坦统计	286
15.5.4 经典统计与量子统计的关系	286
15.6 激光	286
15.6.1 激光产生的基本原理	287
15.6.2 激光的特性	291

15.6.3 激光器	292
15.7 玻色-爱因斯坦凝聚和原子激射器	292
15.7.1 玻色-爱因斯坦凝聚	292
15.7.2 原子激射器	295
本章要点	297
习题	298
第 16 章 热力学基础	303
16.1 热力学第零定律 温度和温标	303
16.1.1 热力学第零定律	303
16.1.2 温标	304
16.2 热力学第一定律	305
16.2.1 准静态过程	305
16.2.2 功 内能 热量	306
16.2.3 热力学第一定律	309
16.3 热力学第一定律在理想气体准静态过程中的应用	311
16.3.1 气体的摩尔热容	311
16.3.2 等体过程	311
16.3.3 等压过程	312
16.3.4 等温过程	314
16.3.5 绝热过程	316
16.3.6 多方过程	318
16.4 循环过程 卡诺循环	319
16.4.1 循环过程	319
16.4.2 卡诺循环	323
16.5 热力学第二定律	327
16.5.1 热力学第二定律的表述	327
16.5.2 能量的退化与能源	329
16.5.3 热力学过程的不可逆性	329
16.5.4 卡诺定理	330
16.6 熵 热力学第三定律	332
16.6.1 熵的概念	332
16.6.2 熵增加原理	334
16.6.3 熵的统计解释	335
16.6.4 热力学第三定律	338

本章要点	340
习题	342
习题参考答案	348
附录 常用物理量数值表	356
参考文献	357

第三篇 波

第9章 振 动

振动与波动是自然界中的普遍现象,也是物质运动的基本形式。

一个物理量在某一数值附近做周期性的变化称为振动(vibration)。振动有机械振动、分子振动、电磁振动和原子振动等,它是一种普遍的运动形式,几乎遍及整个自然界。

振动状态在介质中的传播过程叫做波动,简称波(wave)。振动状态的传播伴随着能量的传播,波动也是能量的传播过程。波动是一种普遍而重要的运动形式。

尽管机械波、电磁波、物质波等波动的本质不同,但都有着共同的一般规律。因此,本篇在讨论振动与波动的一般规律的基础上,进而讨论机械波、电磁波(含光波)和物质波的有关内容。

振动和波动的特征要用相位来描述。杨振宁指出:“相位是物理学中最重要的概念之一。”无论是波的干涉还是衍射,其结果都决定于相位。因此,读者在学习振动与波动的过程中,要始终抓住相位这个关键。

9.1 简谐振动 相位

9.1.1 简谐振动

物理变量凡是按运动方程

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (9-1)$$

所做的运动,称为简谐运动(simple harmonic motion)或简谐振动。式(9-1)为二阶常微分方程,其解为

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (9-2)$$

由此可见,简谐振动是按正弦或余弦规律变化的一种运动,换言之,物理量凡是按正弦或余弦规律的变化,都称为简谐振动。式中 A 和 φ 均为常量。由式(9-2)可知,当 $\cos(\omega t + \varphi) = 1$ 时, $x = A$, 可见, A 表示物理变量 x 的最大值,我们称之为振幅(amplitude)。

9.1.2 几种典型的简谐振动

9.1.2.1 弹簧振子的振动

由一个劲度系数为 k 的弹簧和一个质量为 m 的物体所组成的系统称为弹簧振子。该系统放置于光滑水平桌面上,弹簧的一端固定于桌上某处,另一端系着质量为 m 的物体,选择弹簧的自然长度处为坐标原点,如图 9-1 所示,物体在此位置时,所受的合外力为零,故称此位置为平衡位置。当物体离开平衡位置而到达 x 处时,在水平方向上所受的弹性力为 $F = -kx$,根据牛顿第二定律有

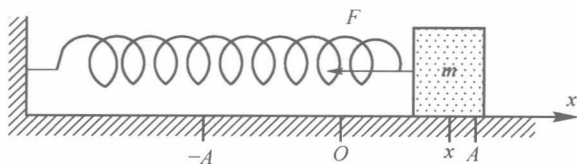


图 9-1 弹簧振子的运动

$$-kx = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad \text{或} \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0 \quad (9-3)$$

$$\text{令} \quad \omega^2 = \frac{k}{m} \quad \text{或} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9-4)$$

式(9-3)与式(9-1)完全一样了。故弹簧振子的运动为简谐振动, ω 是由系统本身决定的频率,称为固有频率。

9.1.2.2 复摆和单摆的振动

复摆是指刚体在重力矩作用下的摆动,如图 9-2 所示;而单摆则是由长为 l 的不可伸长的轻绳和小球 m 组成的系统,如图 9-3 所示。现以复摆为例研究它们的角量的运动规律。

如图 9-2 所示,设复摆可绕通过 O 点且垂直于纸面的转轴转动,其摩擦力和空气阻力均可忽略不计。 C 为复摆的质心位置, l 为质心 C 到转轴 O 的距离, 竖直虚线 OO' 为复摆的平衡位置。通常规定逆时针偏离平衡位置的角为正。

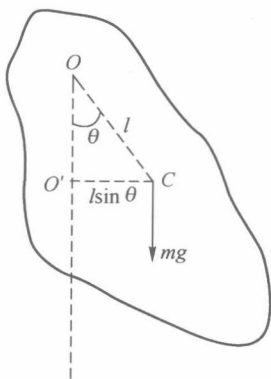


图 9-2 复摆

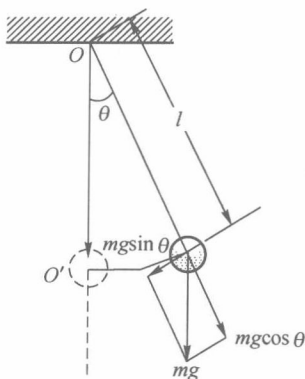


图 9-3 单摆

设复摆的质量为 m , 则它所受的重力矩为 $M = -mgl \sin \theta$, 由式 (2-58) $M = J\beta$ 得

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -mgl \sin \theta \quad \text{或} \quad \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{mgl}{J} \sin \theta = 0 \quad (9-5)$$

由 $\sin \theta = \theta - \frac{1}{3!}\theta^3 + \frac{1}{5!}\theta^5 - \dots$, 当 θ 很小 ($< 5^\circ$ 时), $\sin \theta \approx \theta$, 则有

$$M = -mgl\theta$$

角位移 θ 与力矩 M 呈线性关系, 式 (9-5) 则为

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{mgl}{J} \theta = 0 \quad (9-6)$$

上式就是复摆运动的微分方程, 若令

$$\omega^2 = \frac{mgl}{J} \quad (9-7)$$

代入式 (9-6), 有

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \omega^2 \theta = 0 \quad (9-8)$$

若把变量 θ 改为 x , 式 (9-8) 与式 (9-1) 完全相同, 说明复摆的角位移运动为简谐振动。式 (9-8) 的解为

$$\theta = \theta_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (9-9)$$

式中 θ_0 和 φ 为常量。

对单摆而言, 其转动惯量 $J = ml^2$, 代入式 (9-7) 得

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (9-10)$$

就是说,将式(9-10)代入式(9-8),则式(9-8)就可用于描述单摆的运动,可见单摆和复摆是遵守共同的规律的,即它们在重力作用下的小角度($<5^\circ$)摆动是简谐振动。

9.1.2.3 电磁振荡

电磁振荡电路是由电源、电感和电容组成的电路,如图9-4所示。先将开关拨到1,电源对电容充电,当电路充电到一定程度后,将开关S由1拨向2,接通LC电路,通过电流计G,可以看到回路中有大小和方向都交替变化的电流产生,即电路产生电磁振荡。设在任意时刻电容两端的电压为 $U_c = \frac{q}{C}$, 电路中的电流 $i = \frac{dq}{dt}$, 电感 L 中的感生电动势

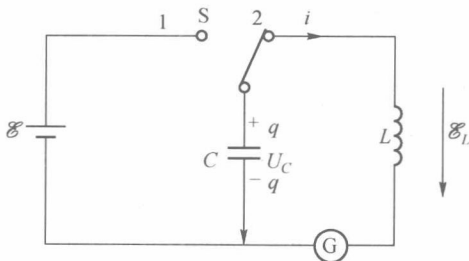


图9-4 电磁振荡

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d^2q}{dt^2},$$

忽略电流计和导线的电阻,则回路的方程为

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_L - U_c &= -L \frac{di}{dt} - \frac{q}{C} \\ &= -L \frac{d^2q}{dt^2} - \frac{q}{C} = 0 \end{aligned}$$

即

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{C} = 0 \quad \text{或} \quad \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0 \quad (9-11)$$

令

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \quad \text{或} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (9-12)$$

则式(9-11)可写成

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega^2 q = 0 \quad (9-13)$$

上式与式(9-1)具有完全相同的形式,可见在电磁振荡中,电荷的运动是简谐振动。式(9-13)的解为

$$q = q_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (9-14)$$

(9-2)、(9-9)和(9-14)三式所表示的物理量都按同一规律变化,这些物理量的变化都是简谐振动。

9.1.3 旋转矢量表示法 相位

9.1.3.1 简谐振动的旋转矢量表示法

由于简谐振动与匀速圆周运动存在一个很简单的对应关系,因此,可以借助旋转矢量来描述简谐振动。如图9-5所示,在 x 轴上任取一点 O 作为平衡位置,由 O 点做一长度等于简谐振动振幅的矢量 A ,该矢量 A 的起点固定于 O 点,并以角速度 ω 沿逆时针方向匀速转动。在 $t_0 = 0$ 时刻,矢量 A 与 x 轴的夹角为 φ ,其端点位于 M_0 处,在时刻 t ,矢量 A 的端点位于 M 处,在 $\Delta t = t$ 的这段时间里,矢量转过的角度为 ωt ,此刻它与 x 轴的夹角为 $\omega t + \varphi$ 。由矢量

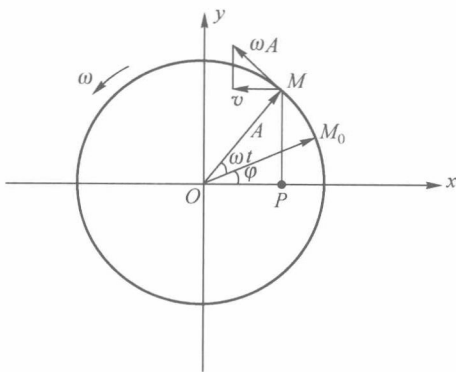


图9-5 旋转矢量表示

$$A(t) = x\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y = A\cos(\omega t + \varphi)\mathbf{e}_x + A\sin(\omega t + \varphi)\mathbf{e}_y$$

得

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

$$y = A\sin(\omega t + \varphi)$$

即矢量的端点 M 在 x 、 y 轴上的投影都做简谐振动。

在式(9-2)中,我们用余弦函数来描述简谐振动,即我们可以用旋转矢量 A

的端点 M 在 x 轴上的投影点 P 的运动来表示简谐振动,即

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

对上式求时间 t 的一阶导数,可得到 P 点的运动速度,即

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) \quad (9-15)$$

将式(9-15)对时间 t 求一阶导数,可得到 P 点运动的加速度,即

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) \quad (9-16)$$

上式还可以写成

$$a = -\omega^2 x \quad (9-17)$$

这一关系说明,简谐振动的加速度和位移成正比且反向。

由式(9-2)可知, A 、 ω 、 φ 一旦确定,对于一个简谐振动来说,就可以写出它的完整表达式,因而也就掌握了该简谐振动的特征了。故把这三个量叫做描述简谐振动的三个特征量。

9.1.3.2 相位

从简谐振动的定义式(9-2)可知,对一个确定的简谐振动来说,任意时刻的状态,完全由 $(\omega t + \varphi)$ 决定。我们把 $(\omega t + \varphi)$ 叫做 t 时刻振动的相位(或相, phase),把 $t=0$ 时刻的相位 φ ,称为初相。在相量图中,相位有一个直观的几何意义,即 t 时刻振幅矢量 A 与 x 轴的夹角,如图 9-6 所示。

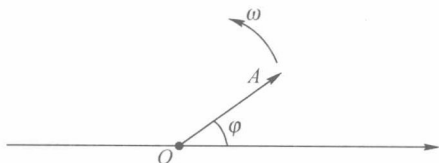


图 9-6 相量图

ω 是旋转矢量的角速度,在振动中称为角频率(angular frequency)或圆频率(circular frequency),它与频率(frequency) ν 和周期(period) T 的关系为

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \quad (9-18)$$

相位的概念在比较两个同频率的简谐振动的步调时特别有用。设有两个相同频率的简谐振动,它们的方程为

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

它们的相位差为