



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理学

(第二版) 下册

University
Physics



张铁强 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理学

(第二版) 下册

Daxue Wulixue

张铁强 主编



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

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。此次修订总结了第一版编写的经验,吸收了使用过本教材的师生们的意见和建议,适度扩展了近代物理的内容,将现代科学与高新技术的物理基础内容引入到教材中;同时,通过设置科技博览、前沿进展等栏目,在经典物理内容中插入物理前沿知识和现代科学技术的例子。

本书仍然按照知识模块化的方式进行编辑,不同学科专业的物理课程在保证教学基本要求中 A 类基本知识点的前提下,选择适当的 B 类知识点和现代科学与高新技术的物理基础专题(用“*”标记),纳入教学内容体系。本书上册包括力学、流体力学、热学、电磁学,下册包括振动和波动、光学、相对论、量子物理、现代科学与高新技术的物理基础专题。本书可供高等学校理工科非物理类专业的大学物理课程,以及电视大学和成人教育相关课程使用,也可以作为其他读者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.下册/张铁强主编.—2版.—北京:
高等教育出版社,2012.8
ISBN 978-7-04-035716-5

I. ①大… II. ①张… III. ①物理学-高等学校-
教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 158389 号

策划编辑 郭亚嫒	责任编辑 郭亚嫒	封面设计 于涛	版式设计 余杨
插图绘制 尹莉	责任校对 刁丽丽	责任印制 赵义民	

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 北京鑫海金澳胶印有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 25.25
字 数 460 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.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
版 次 2007 年 11 月第 1 版
2012 年 8 月第 2 版
印 次 2012 年 8 月第 1 次印刷
定 价 39.20 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 35716-00

目 录

第 10 章 振动	1
10.1 简谐运动	1
10.1.1 简谐运动方程	1
10.1.2 简谐运动的特征量	3
10.1.3 简谐运动的能量	5
10.1.4 简谐运动的旋转矢量表示法	7
10.2 几种简谐运动系统	9
10.2.1 单摆与复摆	9
【经典回顾】	10
10.2.2 LC 振荡电路	11
【前沿进展】	12
10.3 简谐运动的合成	13
10.3.1 同方向、同频率简谐运动的合成	13
10.3.2 同方向、频率相近的简谐运动的合成 拍	14
* 10.3.3 振动方向垂直、同频率简谐运动的合成	15
* 10.3.4 振动方向垂直、不同频率简谐运动的合成	17
* 10.4 振动的分解与频谱分析	18
* 10.5 阻尼振动 受迫振动 共振	20
10.5.1 阻尼振动	20
10.5.2 受迫振动	21
10.5.3 共振	22
【科技博览】	23
【网络资源】	24
小结	25
思考题	26
习题	27
第 11 章 机械波	29
11.1 波动的基本概念	29

11.1.1 机械波的产生和传播	29
11.1.2 波的几何描述	30
11.1.3 描述波的物理量	31
11.2 平面简谐波 波动方程	33
11.2.1 平面简谐波的波函数	33
11.2.2 波动方程	35
11.3 波的能量 能流密度	37
11.3.1 波的能量	37
11.3.2 波的能流 能流密度	38
* 11.3.3 声强 声强级	40
【科技博览】	41
11.4 惠更斯原理	42
11.4.1 惠更斯原理	42
11.4.2 波的衍射	43
11.4.3 波的反射与折射	44
11.5 波的叠加原理 波的干涉	45
11.5.1 波的叠加原理	45
11.5.2 波的干涉	46
11.6 驻波	48
11.6.1 驻波的形成	48
11.6.2 驻波的方程	49
11.6.3 半波损失	50
11.6.4 弦线上的驻波	52
【前沿进展】	52
11.7 多普勒效应	53
【科技博览】	56
【网络资源】	57
小结	57
思考题	58
习题	59
第12章 电磁波	62
12.1 电磁波	62
12.1.1 电磁波的预言	62

【经典回顾】	63
12.1.2 平面电磁波的波动方程	64
12.1.3 平面电磁波的性质	66
12.1.4 电磁波的能量传播	67
12.2 电偶极子辐射电磁波	68
12.2.1 电磁波的产生与传播	68
12.2.2 电偶极子辐射电磁波	69
12.3 电磁波谱	71
【网络资源】	73
小结	73
思考题	74
习题	75
第 13 章 几何光学成像原理	76
13.1 光线及其传播的基本定律	76
13.1.1 光程与光线	76
13.1.2 几何光学基本定律	80
【科技博览】	82
13.2 成像基本概念与光路计算	83
13.2.1 物像的基本概念	83
13.2.2 实际光路计算	85
13.3 高斯光学	88
13.3.1 折射球面近轴成像光路	88
13.3.2 球面反射镜近轴成像光路	91
13.3.3 薄透镜近轴成像光路	92
* 13.4 典型光学仪器	95
13.4.1 眼睛与视觉放大率	95
13.4.2 显微镜	97
13.4.3 望远镜	99
【前沿进展】	100
【网络资源】	100
小结	101
思考题	102
习题	103

第 14 章 光的干涉	105
14.1 光的相干性	105
14.1.1 光的干涉 相干条件	105
14.1.2 光程差	107
14.1.3 获得相干光的方法	109
14.2 分波阵面干涉	111
14.2.1 杨氏双缝干涉	111
【经典回顾】	112
14.2.2 劳埃德镜实验	114
* 14.2.3 空间相干性和时间相干性	116
14.3 分振幅干涉	119
14.3.1 薄膜干涉	119
14.3.2 劈尖干涉	122
14.3.3 牛顿环	124
【科技博览】	126
* 14.4 迈克耳孙干涉仪	128
【前沿进展】	129
【网络资源】	129
小结	130
思考题	131
习题	132
第 15 章 光的衍射	134
15.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	134
15.1.1 光的衍射现象	134
15.1.2 惠更斯-菲涅耳原理	135
【经典回顾】	136
15.2 夫琅禾费单缝衍射	137
15.2.1 夫琅禾费单缝衍射的实验装置	137
15.2.2 单缝衍射强度	138
15.2.3 单缝衍射条纹特点	141
15.3 夫琅禾费圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	144
15.3.1 夫琅禾费圆孔衍射	144

15.3.2 光学仪器的分辨本领	145
15.4 光栅衍射	147
15.4.1 衍射光栅	147
15.4.2 光栅衍射条纹的形成	148
15.4.3 光栅光谱	152
【科技博览】	157
* 15.5 伦琴射线的衍射 布拉格公式	158
15.5.1 伦琴射线	158
15.5.2 劳厄实验	159
15.5.3 布拉格公式	159
* 15.6 全息照相	160
15.6.1 全息照相	160
15.6.2 全息照相原理	161
15.6.3 全息照相的应用	163
【网络资源】	164
小结	165
思考题	166
习题	167
第 16 章 光的偏振	169
16.1 自然光和偏振光	169
16.1.1 自然光	170
16.1.2 部分偏振光	170
16.1.3 偏振光	171
16.2 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	172
16.2.1 偏振片	172
16.2.2 起偏和检偏 马吕斯定律	173
16.3 反射光和折射光的偏振 布儒斯特定律	176
16.3.1 反射起偏 布儒斯特定律	176
16.3.2 折射起偏 玻璃片堆	177
* 16.4 光的双折射 尼科耳棱镜	178
16.4.1 光的双折射现象	178
16.4.2 尼科耳棱镜	182
16.4.3 波片	183

* 16.5 偏振光的干涉	184
16.5.1 偏振光的干涉	184
16.5.2 人为双折射现象	186
【前沿进展】	189
* 16.6 旋光现象	190
【网络资源】	191
小结	192
思考题	193
习题	193
第 17 章 相对论基础	195
17.1 迈克耳孙-莫雷实验与狭义相对论的基本假设	195
* 17.1.1 迈克耳孙-莫雷实验	195
17.1.2 狭义相对论的基本假设	198
【前沿进展】	199
17.2 洛伦兹变换	199
17.2.1 洛伦兹坐标变换	199
17.2.2 洛伦兹速度变换	203
【经典回顾】	203
17.3 狭义相对论的时空观	205
17.3.1 同时的相对性	205
17.3.2 运动的时钟变慢	206
17.3.3 运动的杆缩短	208
17.4 相对论质点动力学方程	211
17.4.1 质量和速度的关系	211
【科技博览】	212
17.4.2 相对论动力学基本方程	213
17.5 相对论能量	214
17.5.1 相对论能量	214
* 17.5.2 能量和动量关系	215
* 17.6 广义相对论基础	218
17.6.1 广义相对论的基本原理	218
17.6.2 相对论中的引力理论	220
17.6.3 广义相对论的时空性质	223

【网络资源】	227
小结	227
思考题	228
习题	229
第 18 章 波粒二象性	232
18.1 热辐射 普朗克能量子假说	232
18.1.1 热辐射	232
18.1.2 黑体辐射的实验规律	233
18.1.3 普朗克能量子假说	236
【科技博览】	239
18.2 光电效应 爱因斯坦光子假说	240
18.2.1 光电效应	240
18.2.2 爱因斯坦光子假说	241
【科技博览】	244
18.2.3 康普顿效应	245
18.3 原子光谱 玻尔原子理论	248
18.3.1 原子模型	248
【前沿进展】	250
18.3.2 原子光谱	251
* 18.3.3 玻尔的原子理论	252
18.4 实物粒子的波动性	257
18.4.1 德布罗意关系	257
18.4.2 电子衍射实验	258
18.4.3 不确定关系	260
【网络资源】	264
小结	264
思考题	266
习题	266
第 19 章 量子力学基础	268
19.1 波函数及其统计解释	268
19.1.1 波函数	268
19.1.2 波函数的统计解释	269

19.1.3 归一化与标准化条件	271
19.2 薛定谔方程	273
19.2.1 薛定谔方程的建立	274
19.2.2 本征值与本征值方程	275
19.2.3 定态薛定谔方程	278
19.3 一维无限深势阱	279
19.4 势垒 隧道效应	283
【科技博览】	286
* 19.5 线性谐振子	287
19.6 氢原子	288
19.6.1 氢原子中电子的薛定谔方程	288
19.6.2 氢原子中电子的状态描述	290
19.7 电子的自旋	293
19.7.1 施特恩-格拉赫实验	293
19.7.2 电子的自旋	294
【前沿进展】	295
19.8 原子的电子壳层结构	296
19.8.1 泡利不相容原理	296
19.8.2 原子核外的电子排布	298
* 19.9 分子与分子光谱	302
19.9.1 氢分子 H_2	302
19.9.2 分子光谱	303
【网络资源】	306
小结	307
思考题	309
习题	309
* 第20章 激光的物理基础	311
20.1 自发辐射与受激辐射	311
20.1.1 自发辐射	312
20.1.2 受激辐射与受激吸收	313
20.1.3 三种作用过程的相互关系	315
20.2 激光形成的原理	316
20.2.1 粒子数反转原理	317

20.2.2 激光工作物质	318
20.2.3 光学谐振腔	320
【前沿进展】	321
20.3 激光的模式和高斯光束	324
20.3.1 激光的模式	324
20.3.2 激光束的传播	327
20.4 典型激光器	329
【前沿进展】	331
20.5 激光的特点与应用	332
20.5.1 激光的特点	332
20.5.2 激光应用	334
【网络资源】	336
小结	336
习题与思考题	338
* 第 21 章 固体物理基础	339
21.1 固体的能带结构	339
21.1.1 晶体的微观结构	339
21.1.2 晶体的结合	341
【前沿进展】	342
21.1.3 固体的能带结构	342
【前沿进展】	346
21.2 固体中的载流子及其统计分布	346
21.2.1 固体中的载流子	346
21.2.2 载流子的统计分布	350
21.3 半导体物理基础	353
21.3.1 半导体的电导和霍尔效应	353
21.3.2 pn 结	355
21.3.3 半导体的光吸收与光辐射	356
【科技博览】	358
21.4 超导电性	358
21.4.1 超导基本现象	358
21.4.2 超导的微观理论	361
【前沿进展】	363

21.5 纳米材料简介	364
21.5.1 纳米材料的特性	364
21.5.2 纳米技术的应用	365
【网络资源】	367
小结	367
习题与思考题	368
习题答案	370
索引	376
参考文献	391

第 10 章 振 动

振动(vibration)是自然界中常见的现象,如钟摆的摆动、琴弦的颤动、心脏的跳动……乃至晶体中原子在格点附近的热运动等,均属于振动.我们把物体在其稳定的平衡位置附近所做的往复运动,称为机械振动(mechanical vibration).但振动并不仅限于此,在物理学的其他领域也存在着与机械振动相类似的振动现象.如交流电中电流和电压的往复变化,电磁波中电场和磁场的往复变化等.因此广义上讲,任何一个物理量,在某一定值附近作往复变化,都可以称之为振动.虽然它们与机械振动有本质差别,但理论和实验表明,一切振动现象都具有共同点,都遵循相同的数学规律.

振动有简单和复杂之分.最简单、最基本的振动是简谐运动.一切复杂的振动都可看成是诸多简谐运动的合成.所以本章我们主要以简谐运动为例,研究振动现象的一般规律.

通过本章的学习,理解简谐运动及其旋转矢量表示法;掌握简谐运动的规律;理解同方向同频率简谐运动的合成;了解阻尼振动、受迫振动及共振等现象.

10.1 简 谐 运 动

10.1.1 简谐运动方程

简谐运动(simple harmonic motion)可以用一弹簧振子来演示.一个轻质弹簧一端固定,另一端固结一个物体(视为质点),就构成一个弹簧振子(spring oscillator).如图 10.1 是一个安放在光滑水平面上的弹簧振子.当弹簧处于自然状态时,物体所在位置为平衡位置,以 O 点表示,且取作坐标原点.如果拉动物体,然后释放,物体将在弹性回复力的作用下,依靠其惯性在 O 点作往复运动,即简谐运动.

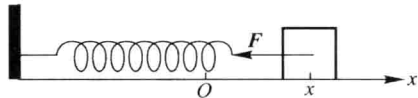


图 10.1 弹簧振子

设在任意时刻 t , 物体的位移为 x , 由胡克定律(Hooke's law)可知,它所受的弹性力的大小 F 为

$$F = -kx \quad (10.1)$$

式中, k 为轻质弹簧的劲度系数, 负号表示弹性力的方向与位移方向相反. 若物体的质量为 m , 根据牛顿第二定律, 物体的运动方程可表示为

$$F = ma = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (10.2)$$

将式(10.1)代入式(10.2)中, 得

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \quad (10.3)$$

将上式改写成

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x = -\omega^2 x \quad (10.4)$$

式中

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (10.5)$$

ω 是由系统自身性质所决定的常量. 式(10.4)反映了简谐运动物体加速度的基本特征: 加速度的大小与位移大小成正比, 加速度方向与位移方向相反.

利用式(10.4)可进一步将振动的概念扩展, 任何物理量 y 若满足方程式

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega^2 y$$

且 ω 是由系统自身性质所决定的常量, 则该物理量在做简谐运动. 该式称为简谐运动的微分方程.

式(10.4)的解为

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (10.6)$$

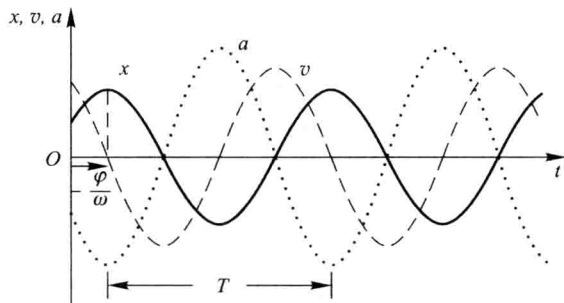
式中, A 和 φ 都是积分常数, 其物理意义将在以后讨论. 式(10.6)反映了简谐运动物体的运动特征: 振动物体的位移随时间按余弦(或正弦)规律变化. 反之, 具有这种运动特征的运动即为简谐运动. 故式(10.6)为简谐运动的运动学方程.

由简谐运动的运动学方程, 可求得任意时刻质点的振动速度和加速度分别为

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \varphi) = A\omega \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (10.7)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) = \omega^2 A \cos(\omega t + \varphi + \pi) \quad (10.8)$$

式(10.6)、式(10.7)和式(10.8)的函数关系可用图 10.2 所示的曲线表示, 其中表示 $x-t$ 关系的曲线叫做振动曲线(curve of oscillation).

图 10.2 简谐运动的 x, v, a 随时间变化的关系曲线

10.1.2 简谐运动的特征量

由简谐运动方程 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ 可知, 决定简谐运动物体运动特征的物理量是其中的 A, ω 和 φ , 它们是描述简谐运动的特征量.

一、振幅

式(10.6)中, A 表示振动物体离开平衡位置的最大距离, 称为振幅 (amplitude). 它恒为正. 在国际单位制中, 振幅的单位为米 (m).

二、周期和频率

正弦、余弦函数均为周期性函数, 因此简谐运动也是周期性的, 即每隔一定时间 T , 运动就重复一次, 这个固定的时间间隔 T 就是周期 (period). 于是有

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

因余弦函数的周期是 2π , 所以有

$$\omega T = 2\pi$$

即

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (10.9)$$

物体在 1 s 内完成全振动的次数, 称为振动频率 (frequency), 用 ν 表示. 显然

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (10.10)$$

m, k 都是谐振子系统的固有性质, 所以 T 和 ν 均由系统自身性质决定, 故又分别叫做固有周期 (natural period) 和固有频率 (natural frequency). 在国际单位制中, 周期的单位为秒 (s), 频率的单位为赫兹 (Hz).

由式(10.10)可知

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}$$

或

$$\omega = 2\pi\nu \quad (10.11)$$

这说明 ω 等于 2π s 内物体振动的次数,称为角频率 (angular frequency) 或圆频率 (circular frequency). 国际单位制中,角频率的单位为弧度每秒 ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$).

三、相位与初相位

振动方程中的 $(\omega t + \varphi)$ 称为简谐运动的相位 (phase), 有时也简称为相. 相位的单位为弧度 (rad). 在振幅一定, 角频率已知的情况下, 相位决定任意时刻振动系统的运动状态 (位置和速度). 例如, 当用余弦函数表示简谐运动时, $\omega t + \varphi = 0$, 即相位为零的状态, 表示质点在正的最大位移处而速度为零; $\omega t + \varphi = \pi/2$, 即相位为 $\pi/2$ 的状态, 表示质点正越过原点并以最大的速率向 x 轴负向运动; $\omega t + \varphi = 3\pi/2$ 的状态, 表示质点也正越过原点并以最大的速率向 x 轴正向运动.

$t=0$ 时刻的相位 φ 称为初相位 (initial phase), 简称初相. 在振幅一定、角频率已知的情况下, 它决定于振动系统的初始运动状态. 反之, 振动系统的初始运动状态亦决定系统的振幅和初相位.

设 $t=0$ 时刻, 物体的位移和速度是 x_0 、 v_0 . 利用式 (10.6)、式 (10.7) 得出

$$\begin{cases} x_0 = A \cos \varphi \\ v_0 = -A\omega \sin \varphi \end{cases} \quad (10.12)$$

从中解出振幅和初始相位分别为

$$\begin{cases} A = \sqrt{x_0^2 + v_0^2 / \omega^2} \\ \varphi = \arctan \frac{-v_0}{x_0 \omega} \end{cases} \quad (10.13)$$

例 10.1 一物体沿 x 轴做简谐运动, 其振动规律为 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$, 设 $\omega = 10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 且当 $t=0$ 时, 物体的位移为 $x_0 = 1 \text{ m}$, 速度为 $v_0 = -10\sqrt{3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 求该物体的振幅和初相位.

解 由式 (10.13), 将 $\omega = 10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $x_0 = 1 \text{ m}$, $v_0 = -10\sqrt{3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 代入, 可得

$$A = 2 \text{ m}$$

$$\tan \varphi = \sqrt{3}$$

即

$$\varphi = \frac{\pi}{3} \quad \text{或} \quad \varphi = \frac{4}{3}\pi$$

但因