

University Physics

大学物理教程

主编 龚勇清 易江林 陈学岗



国防工业出版社

National Defense Industry Press

大学物理教程

主 编 龚勇清 易江林 陈学岗
副主编 万 雄 赵希圣 乐淑萍

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是以物理学为基础,根据高等院校工科类专业大学物理的理论和知识要求,在总结编者长期从事物理教学经验的基础上编写的。全书共 12 章,主要包括力学与狭义相对论基础、电磁学部分、振动和波动、分子运动论和热力学、波和粒子以及激光的基本原理。每章后附有习题供读者系统训练,书后附有参考答案。

本书可作为工科类专业的大学物理公共课程的教材,也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程/龚勇清,易江林,陈学岗主编. —北京:国防工业出版社,2011.2

ISBN 978-7-118-07312-6

I. ①大... II. ①龚... ②易... 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 022307 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 19 字数 336 千字

2011 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 31.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

物理学是研究物质的基本结构和基本运动规律的科学。物理学的基本概念和基本规律具有极大的普遍性,它为很多自然科学、工程技术提供了理论基础和实验技术。物理学是自然科学中最具有活力的带头学科,是自然科学和工程技术的基础,也是高新技术发展的源泉和先导。物理学的思想和方法,对自然科学的研究和工程技术的发展具有指导作用。

《大学物理》是工科学生必修的公共基础理论课,是对学生进行科学素质教育和知识创新教育的重要基础课。学习《大学物理》有利于促进大学生学习系统的发展,有利于提高大学生的科学素质(包括工程技术素质),有利于激发大学生创造力。学习《大学物理》,一方面为大学生构建必备的科学知识基础,为其专业教育提供坚实的理论基础;另一方面为“终身学习”建立扎实的理论根基。

本教材的教学参考学时数为 80 学时~112 学时,在书的编排上做了适当的优化与调整。全书共分 12 章,第 1 章至第 4 章主要介绍质点运动学和牛顿定律、狭义相对论基础、动量守恒和能量守恒定律、刚体力学基础。第 5 章至第 7 章是电磁学部分,包括静电场和电介质、稳恒磁场和磁介质、电磁感应和变化的电磁场。第 8 章、第 9 章为机械振动和机械波、波动光学。第 10 章为气体分子运动论和热力学基础。第 11 章为波和粒子。第 12 章为激光的基本原理。

本教材的第 2、3、5、8、9 章和第 12 章由龚勇清编写,第 1、4 章以及习题部分由易江林编写,第 6、7 章由陈学岗编写,第 10 章和第 11 章分别由赵希圣、乐淑萍编写,万雄、熊文林、程小金、朱泉水、黄彦、徐冉冉和颜丽华在本书编写过程中做了大量工作,在此表示感谢。由于作者水平有限,加之本书编写仓促,难免存在不妥之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

2011 年 1 月

目 录

第 1 章 质点运动学与牛顿定律	1
1.1 位置矢量和质点的运动学方程	1
1.1.1 参照系	1
1.1.2 质点模型	2
1.1.3 位矢和位移	2
1.2 速度和加速度	4
1.2.1 速度	4
1.2.2 加速度	6
1.3 圆周运动	8
1.3.1 法向加速度与切向加速度	8
1.3.2 圆周运动的角量描述	9
1.4 牛顿运动定律	11
1.4.1 牛顿第一定律(惯性定律)	11
1.4.2 牛顿第二定律(加速度定律)	11
1.4.3 牛顿第三定律(作用与反作用定律)	12
1.5 牛顿定律的应用	12
1.5.1 应用牛顿定律解题步骤	12
1.5.2 牛顿运动定律的应用	13
1.5.3 动力学两类问题	14
1.5.4 300 年来一桶水	15
1.6 相对运动	15
1.7 碰撞问题	16
习题	17
第 2 章 狭义相对论基础	19
2.1 伽利略相对性原理和伽利略坐标变换式	19
2.1.1 力学相对性原理	19
2.1.2 伽利略坐标变换式	19

2.2 狭义相对论基本原理和洛伦兹坐标变换式	20
2.2.1 狭义相对论基本原理	20
2.2.2 洛伦兹坐标变换式	22
2.3 狭义相对论的时空观	24
2.3.1 同时性问题	24
2.3.2 长度缩短	24
2.3.3 时间延长	26
2.4 狭义相对论动力学基础	28
2.4.1 相对论力学的基本方程	28
2.4.2 质量和能量的关系	30
习题	32
第3章 动量守恒和能量守恒定律	35
3.1 动量、冲量和动量定理	35
3.1.1 动量	35
3.1.2 动量原理	36
3.2 动量守恒定律	37
3.2.1 动量守恒定律的表述	37
3.2.2 质点系动量守恒的条件	38
3.2.3 火箭飞行原理	39
3.3 变力的功和保守力的功	40
3.3.1 功的定义	40
3.3.2 功率	42
3.3.3 保守力的功	42
3.4 动能定理	44
3.4.1 质点的动能定理	44
3.4.2 质点系的动能定理	45
3.5 机械能	46
3.5.1 机械能与保守力场	46
3.5.2 势能	47
3.6 质点系的功能原理和机械能守恒定律	48
3.6.1 质点系的功能原理	48
3.6.2 机械能守恒定律	49
习题	51

第 4 章 刚体力学基础	53
4.1 刚体的基本运动	53
4.1.1 刚体	53
4.1.2 刚体定轴转动的角速度	53
4.2 角动量和角动量守恒定律	55
4.2.1 质点的角动量	55
4.2.2 质点角动量定理	56
4.2.3 质点角动量守恒定律	56
4.2.4 质点系的角动量	57
4.3 刚体定轴转动的动能定理	58
4.3.1 力矩的功	58
4.3.2 刚体转动动能	59
4.3.3 转动惯量及其计算	59
4.4 刚体定轴转动定律和角动量定理	62
习题	64
第 5 章 静电场和电介质	67
5.1 库仑定律	67
5.1.1 电荷守恒定律	67
5.1.2 库仑定律的表达	68
5.1.3 静电场力的叠加原理	69
5.2 电场强度	69
5.2.1 场强的定义及点电荷场强	69
5.2.2 场强的叠加原理	70
5.2.3 电偶极子	74
5.3 静电场的高斯定理	75
5.3.1 电场线	75
5.3.2 电通量	76
5.3.3 高斯定理	77
5.3.4 高斯定理的应用	79
5.4 静电场的环路定理和电势	81
5.4.1 静电场力的功	81
5.4.2 静电场的环路定理	82
5.4.3 电势能	82
5.4.4 电势	83

5.4.5	电势差	83
5.4.6	等势面	86
5.5	静电场中的导体	87
5.5.1	导体的静电平衡条件	87
5.5.2	电容器的电容	89
5.6	静电场中的电介质	91
5.6.1	有电介质时的高斯定理	91
5.6.2	带电电容器的能量	92
5.6.3	静电场能量	93
	习题	94
第 6 章	稳恒磁场和磁介质	98
6.1	电流	98
6.1.1	电流强度	98
6.1.2	欧姆定律及其微分式	99
6.2	磁场和磁感应强度	100
6.2.1	磁场	100
6.2.2	磁感应强度	102
6.3	毕奥—萨伐尔定律及其应用	103
6.3.1	毕奥—萨伐尔定律	103
6.3.2	磁感应强度的叠加原理	104
6.4	磁场的高斯定理和安培环路定理	106
6.4.1	磁场的高斯定理	107
6.4.2	安培环路定理及其应用	108
6.4.3	安培环路定理应用举例	110
6.5	磁场对电流的作用	113
6.5.1	磁场对运动电荷的作用	113
6.5.2	磁场对载流导线的作用	114
6.6	磁介质及其磁化	116
6.6.1	磁介质	116
6.6.2	磁介质中的磁场	116
	习题	117
第 7 章	电磁感应和变化的电磁场	121
7.1	电源和电动势	121
7.2	电磁感应的基本规律	122

7.2.1 法拉第电磁感应定律	122
7.2.2 涡流的概念及趋肤效应	125
7.3 动生电动势	126
7.4 感生电动势	127
7.5 自感、互感和磁场的能量	130
7.6 麦克斯韦电磁场理论简介	132
习题	134
第8章 机械振动和机械波	137
8.1 简谐振动	137
8.1.1 简谐振动概念	137
8.1.2 简谐振动的基本规律	137
8.1.3 相位差	139
8.2 简谐振动的矢量图示法	140
8.2.1 旋转矢量法	140
8.2.2 简谐振动的实例	142
8.3 谐振子振动的能量	143
8.4 谐振动的合成	144
8.4.1 两个同方向、同频率的简谐振动的合成	144
8.4.2 两个同方向、不同频率的谐振动的合成	146
8.4.3 相互垂直的简谐振动的合成	146
8.5 机械波的产生和传播	148
8.5.1 机械波的产生条件和传播特征	149
8.5.2 机械波传播的特征物理量	150
8.6 简谐波的波动方程	151
8.6.1 平面简谐波的波动方程	152
8.6.2 波动方程的微分形式	154
8.7 波的能量和能流密度	155
8.7.1 波的能量	155
8.7.2 能量密度和能流密度	157
8.7.3 波的吸收	158
8.8 惠更斯原理和波的叠加	158
8.9 驻波和半波损失	161
习题	165

第9章 波动光学	168
9.1 电磁波的波动方程	168
9.1.1 电磁波的特性	168
9.1.2 电磁波的能量和动量	169
9.1.3 电磁波谱	171
9.2 光源和光波的叠加	171
9.2.1 普通光源的发光特点	171
9.2.2 光的相干条件	172
9.3 相干光的获得	174
9.3.1 杨氏双缝实验	175
9.3.2 干涉条纹的明暗条件	175
9.3.3 菲涅耳双镜实验	177
9.4 薄膜干涉	180
9.4.1 光程	180
9.4.2 等倾干涉	182
9.4.3 等厚干涉	184
9.4.4 增透膜和增反膜	188
9.5 迈克尔逊干涉仪	188
9.6 光的衍射	190
9.6.1 惠更斯—菲涅耳原理	190
9.6.2 单缝衍射	191
9.6.3 光学仪器的分辨本领	194
9.7 光栅衍射	196
9.8 光的偏振	198
9.8.1 自然光和偏振光	198
9.8.2 起偏和检偏	199
9.8.3 反射和折射时的偏振	201
9.8.4 双折射、椭圆偏振光和圆偏振光	203
习题	203
第10章 气体分子运动论和热力学基础	207
10.1 理想气体的状态方程	207
10.2 理想气体的压强公式和温度公式	209
10.2.1 理想气体压强公式	209
10.2.2 温度公式	211

10.3	能量均分原理和理想气体的内能	211
10.3.1	能量按自由度均分原理	211
10.3.2	理想气体的内能	213
10.4	麦克斯韦速率分布	214
10.4.1	统计规律	214
10.4.2	麦克斯韦速率分布定律	215
10.4.3	三种特征速率	217
10.4.4	玻耳兹曼分布律	219
10.5	分子的平均碰撞次数及自由程	220
10.6	热力学第一定律	221
10.6.1	热力学第一定律的表述	221
10.6.2	气体系统做功公式	222
10.7	热力学第一定律应用于理想气体的等值过程	224
10.7.1	等容过程	224
10.7.2	等压过程	225
10.7.3	等温过程	227
10.7.4	绝热过程	227
10.7.5	多方过程	229
10.8	卡诺循环	230
10.8.1	循环过程	230
10.8.2	卡诺循环	231
10.9	热力学第二定律和卡诺定理	234
10.9.1	热力学第二定律	234
10.9.2	卡诺定理和热力学第二定律的统计意义	235
	习题	236
第 11 章	波和粒子	240
11.1	热辐射和普朗克量子假说	240
11.1.1	黑体辐射	240
11.1.2	普朗克量子假说	242
11.2	爱因斯坦光子理论	243
11.2.1	光电效应	243
11.2.2	爱因斯坦方程	245
11.2.3	康普顿效应	245
11.3	德布罗意波、实物粒子波粒二象性	246

11.4	玻尔氢原子理论.....	248
11.5	海森伯测不准关系.....	250
11.6	量子力学的基本概念和薛定谔方程.....	251
	习题.....	254
第 12 章	激光的基本原理	256
12.1	激光器的设想和实现.....	256
12.2	激光的基本概念和特性.....	258
12.3	激光振荡的基本原理和基本条件.....	264
12.4	光在介质中的放大.....	269
12.5	光学谐振腔.....	272
12.6	典型激光器件.....	276
12.6.1	气体激光器	276
12.6.2	固体激光器	282
12.6.3	半导体激光器	284
12.6.4	其他激光器	285
	习题.....	286
	习题答案	287
	参考文献	291

第 1 章 质点运动学与牛顿定律

质点力学主要包括运动学、动力学和静力学,即

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t)$$

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$$

$$\sum \boldsymbol{F} = 0$$

分析力学问题,一般从运动学开始,在这方面已有很多讨论。例如,静力学,主要研究物体受力平衡问题。本章主要解决的问题:第一,如何描述物体运动的状态,即建立物体的运动方程;第二,运用牛顿定律研究物体的状态变化。

1.1 位置矢量和质点的运动学方程

1.1.1 参照系

运动是物质存在的形式,是物质的固有属性,这便是运动的绝对性。然而,要描述物体的运动状态一定要选定一个参照系。如图 1-1 所示,卫星绕地球运动,以地心为参照系,卫星作圆周运动;如图 1-2 所示,若以太阳为参照系,同样是卫星绕地球运动,其轨迹却是螺旋线,实际为卫星绕地球旋转和地球绕太阳公转的运动叠加。

所以,这就是运动描述的相对性。为了明确描述一个物体的运动,从而确定



图 1-1 卫星绕地球运动

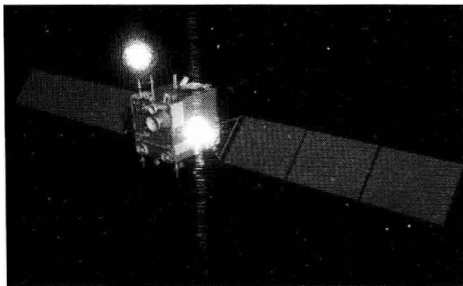


图 1-2 “嫦娥”一号卫星图

物体运动的状态,需要在参照系中选定一个坐标系。最常用的坐标系即三维直角坐标系 (x, y, z) 。

1.1.2 质点模型

1. 质点

质点是力学中最简单、最常用的物理模型。

当某一物体的形状和尺寸大小可以忽略(就所研究的问题,大小和形状几乎不起作用),可认为质量集中到一个点上(质心)时,该物体可视作质点。地球虽大,在研究其绕太阳公转时,即可视作质点;电子虽小,但在研究电子自旋时,却不能视作质点。即使同一物体在某个力学问题中可视作质点,而在另一个力学问题中却不一定视作质点。

2. 质点系

如果所研究的物体不能当作质点处理,则可以将它分割成许多小质元,先分析单个质元的情况,再进一步讨论质元的组合问题。数学中常用积分的方法。

在第4章中讨论的刚体,就是一个质点系问题,只不过将它视作一个不发生形变的物体(刚体模型)。

1.1.3 位矢和位移

1. 位矢

位矢是用以确定质点所在位置矢量的简称,即任一时刻质点所在空间的位置。如图1-3所示,在直角坐标系中的点 $P(x, y, z)$:

空间(三维坐标) $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$

平面(二维坐标) $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$

直线(一维坐标) $\mathbf{r} = x\mathbf{i}$

2. 运动学方程

质点的运动学方程,即讨论位矢与时间的关系。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-1)$$

写成分量形式:

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \quad (1-2)$$

表示质点的空间运动可以视作质点在 x 、 y 和 z 轴上同时参与的三个直线运动。

3. 位移

1) 直线运动中的位移

图1-4为质点在曲线运动中的位移。某质点从点 P_1 (t 时刻)沿任一曲线

运动到点 $P_2(t+\Delta t)$ 时刻), 用 $\Delta \mathbf{r}$ 表示该质点位置矢量的移动。 $\Delta \mathbf{r}$ 即称作质点在这段时间内的位移。 P_1P_2 即为初位置指向末位置的有向线段。

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A \quad (1-3)$$

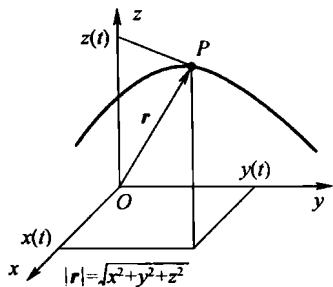


图 1-3 直角坐标系中的位矢

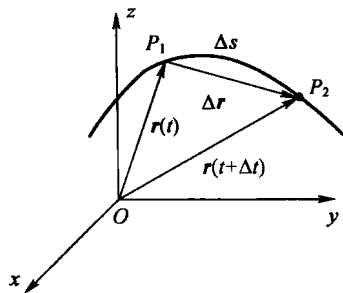


图 1-4 直角坐标系中的位移和路程

在直角坐标系中, 有

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r} &= \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} + \Delta z \mathbf{k} \\ &= (x_2 - x_1) \mathbf{i} + (y_2 - y_1) \mathbf{j} + (z_2 - z_1) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (1-4)$$

2) 讨论

位移的两个含义: 一个是指质点位置的变更(即距离); 另一个是强调质点位置变更的方向(位移矢量性)。它表示一段时间后, 终点与初始点间的距离以及终点在始点的什么方向。

这样, 质点运动变更后的位置, 只与质点运动的始末位置有关, 而与运动的轨迹无关。

4. 路程

路程是指质点从点 P_1 到点 P_2 沿曲线运动轨迹所经历的实际路程的长度, 用 Δs 表示, 它是一标量。

1) 无穷小位移

利用数学的概念“无穷小”, 可抽象得到无穷小位移的概念。“位移”与“路程”之间的关系:

- (1) 位移 $\Delta \mathbf{r}$, 是矢量, 有大小和方向;
- (2) 路程 Δs , 是标量, 有大小、无方向, 且总为正值。

如图 1-5 所示, 总位移等于各段位移的矢量和, 即

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta \mathbf{r}_1 + \Delta \mathbf{r}_2 + \Delta \mathbf{r}_3 \quad (1-5)$$

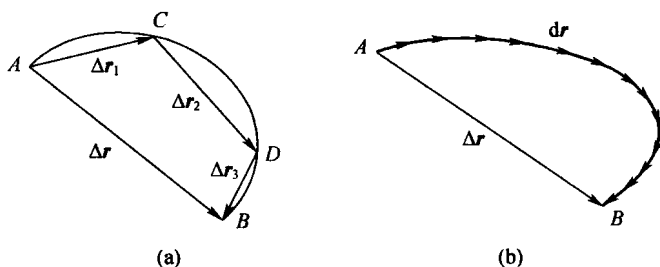


图 1-5 位移

(a) 各段位移的矢量和; (b) 无穷小位移。

若把这段时间细分为无穷个很短的时间间隔 dt , 就得到在 dt 时间内的无穷小位移 $d\mathbf{r}$, $d\mathbf{r}$ 的大小等于 $|d\mathbf{r}|$ 。

2) 讨论

一般情况下, $|\Delta\mathbf{r}| \neq \Delta s$, 但在 dt 时间内 ($\Delta t \rightarrow 0$ 时), 有 $|d\mathbf{r}| = ds$ 。 $d\mathbf{r}$ 的方向是沿质点运动轨道的切线, 指向质点向前的方向。理解无穷小位移的含义, 就能够很好地理解后面要介绍的速度和速率。

1.2 速度和加速度

速度和加速度是描述质点运动的重要物理量。

1.2.1 速度

1. 平均速度

如图 1-4 所示, 将作曲线运动质点的位移 $\Delta\mathbf{r}$ 与其相应的时间 Δt 的比值称为 Δt 时间内质点的平均速度, 即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta\mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-6)$$

上式实际描述的是单位时间位移的变化率。那么, 显然有平均速率

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-7)$$

可见, 平均速度是矢量, 其方向与位移 $\Delta\mathbf{r}$ 的方向相同。平均速率是标量, 其大小为相应的 Δt 内质点所运动的路程。

平均速度与平均速率均与 Δt 有关, 即时间段取值不同, 平均速度或平均速率的值也不尽相同。因此, 这种对质点运动的描述不够精确。

2. 瞬时速度

要得到对质点运动更精确的描述, Δt 的取值越小越好, 从数学的角度取

$\Delta t \rightarrow 0$, 即以平均速度的极限来表述, 则应用数学中导数的概念:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt}$$

$\Delta t \rightarrow 0$ 时, $t + \Delta t \rightarrow t$, 所以质点在 t 时刻的瞬时速度简称为速度。

$$v = \frac{dr}{dt} \quad (1-8)$$

表明质点在 t 时刻附近无限短时间内位移对时间的瞬时比值。显然, 瞬时速率 (简称速率) 可表示为

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (1-9)$$

3. 讨论

速度是描述运动质点在某一瞬时位置矢量变化的物理量, v 的方向与无穷小位移 dr 方向相同。而速率是描述运动质点在某一瞬时运动快慢的物理量, 即速度的大小。因为 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 有 $|dr| = ds$, 则

$$\left| \frac{dr}{dt} \right| = \frac{ds}{dt} \quad (1-10)$$

即速度的大小 $|v| = v$ 。

结论: 瞬时速度的大小在任一时刻都与瞬时速率相等, 但速度的方向是沿运动轨道切线指向质点前进的方向。

4. 直角坐标系中速度的表示

由运动学方程, 以二维平面运动为例:

$$\begin{aligned} r(t) &= x(t)i + y(t)j \\ v &= \frac{dx}{dt}i + \frac{dy}{dt}j = v_x i + v_y j \\ v_x &= \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt} \end{aligned} \quad (1-11)$$

式(1-11)可推广到三维坐标系。

所以, 在直角坐标系中速度的大小 (即速率) 表示为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (1-12)$$

方向用 v 与 x 轴正向夹角 α 表示, 则

$$\tan \alpha = \frac{v_y}{v_x} \quad (1-13)$$

速度积分形式有