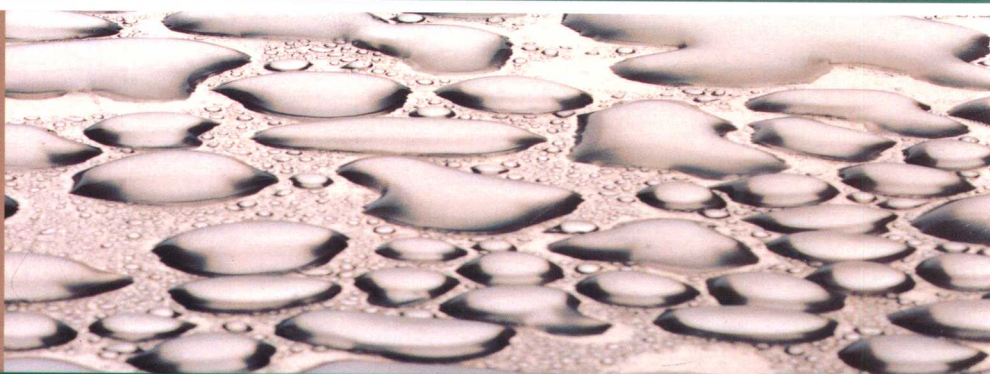


高等学校教材

大学物理学

上册

University
Physics



赵丽萍 李红艳 主 编
蔡传锦 谭金凤 副主编

 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

04
20143
1

P1

阅 览

高等学校教材

大学物理学

上册

Daxue Wulixue

赵丽萍 李红艳 主 编
蔡传锦 谭金凤 副主编



内容简介

本书是依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)编写的。书中涵盖了基本要求中的核心内容,并精选了一定数量的拓展内容。书中对经典物理内容进行了精简和深化,对近代物理内容进行了精选和简化,适当介绍了现代科学技术的发展与应用。在写作风格和插图设计等方面,注意突出物理思想和物理图像,使教材内容通俗易懂。全书分上、下两册。上册内容为力学、相对论基础、电磁学。下册内容为热学、振动与波动、光学、量子物理基础、原子核物理与粒子物理简介和新技术物理基础简介。与本教材配套有《大学物理学习指导书》,此书对学生学习、巩固本教材的学习效果大有裨益。

本书可作为普通高等学校非物理类理科、工科等专业的大学物理课程教材或参考书,亦可供其他专业学生和社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上册/赵丽萍,李红艳主编.—北京:高等教育出版社,2013.1

ISBN 978-7-04-036539-9

I. ①大… II. ①赵… ②李… 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 303574 号

策划编辑 郭亚嫒

责任编辑 王 硕

封面设计 于 涛

版式设计 王艳红

插图绘制 尹 莉

责任校对 刘娟娟

责任印制 朱学忠

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 涿州市京南印刷厂

开 本 787mm × 960mm 1/16

印 张 19.75

字 数 360 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 2013 年 1 月第 1 版

印 次 2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价 31.00 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 36539-00

前 言

本书是依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版),在总结编者多年教材改革实践的基础上,借鉴国内外优秀教材改革成果,博采众长,由长期从事大学物理教学工作的一线教师,结合多年的教学经验和教学研究成果编写而成的。书中涵盖了基本要求中的核心内容,并精选了一定数量的拓展内容,适当介绍了现代科学技术的发展与应用。

书中对经典物理内容进行了精简和深化,删除了与中学物理重叠的部分内容,使学生一接触大学物理便有新鲜感,并注意经典物理在内容上的互渗、方法上的互通、功能上的互补、结果上的互利。书中对近代物理内容进行了精选和简化,并在近代物理学内容的叙述上力求做到通俗易懂,重点突出近代物理思想和物理图像,了解量子力学处理问题的一般方法,尽量减少复杂的数学运算。在现代科学技术的发展与应用中,简单介绍了激光、半导体、超导电性和纳米材料及其应用。另外,根据教育部最新制定的教学基本要求,书中增加了流体力学、几何光学、广义相对论、核物理和粒子物理等内容供学习参考。

本书在编写过程中,编者始终站在学生的角度,充分考虑学生学习物理知识的认知规律,采用朴实流畅、通俗易懂的语言阐述物理现象、物理规律,构建了合理的知识框架,引领读者由浅入深系统地学习大学物理的基本内容和科学方法。在插图设计方面,注意图文并茂,并结合内容在各章开头插入一些相关图片,给读者产生一种新鲜感。本书的例题和习题都是经过精心挑选的,既注意避免应用到较繁、较深的数学理论,又能较好地配理解书中的核心内容。

书中带“*”号的内容,教师可自行取舍,不影响教材的整体性。书中小字部分是相关章节的延伸内容,不作要求。

为了便于教师和学生使用这部教材,本书配备的教学与学习资料有:

1. 提供配套精美电子课件,该课件设计合理,符合认知规律和教学规律,整个课件内容风格统一,文字、图片、动画、视频使用设计恰当,画面整洁、

色彩协调,美观新颖,视觉效果好。课件内容覆盖了本书的主要知识点。

2. 出版与主教材配套的《大学物理学习指导书》。该书总结了主教材中每一章的知识要点,指导学生掌握各章的重点、难点,给出了书中思考题和习题的分析与解答,以方便读者自学和参考。

参加本书编写工作的有:蔡传锦(第1—3章)、赵丽萍(第4—6章)、谭金凤(第7、8章)、张剑(第9、10章)、李红艳(第11—13章)、张宝金(几何光学)、刘桂媛(第14、16章)、庞岩涛(纳米材料)、王婕(第15章)。书后各章的习题答案由王婕、张宝金提供。全书由赵丽萍、李红艳负责统稿和定稿。

由于编者水平有限,书中仍会有疏漏和不妥之处,恳请广大教师和读者不吝批评指正,使我们的教材在使用中不断完善。

编 者

2012年8月于山东建筑大学

目 录

第 1 章 质点运动学	1
1.1 质点运动的描述	1
1.1.1 质点 参考系	1
1.1.2 位置矢量 运动方程	2
1.1.3 速度	4
1.1.4 加速度	5
1.2 曲线运动的描述	8
1.2.1 自然坐标系中的速度与加速度	8
1.2.2 圆周运动及其角量描述	10
1.3 相对运动	13
思考题	15
习题	17
第 2 章 质点动力学	20
2.1 牛顿定律及其应用	20
2.1.1 牛顿定律	20
2.1.2 牛顿定律的应用	22
2.1.3 非惯性系 惯性力	25
2.2 动量定理 动量守恒定律	27
2.2.1 动量 动量定理	27
2.2.2 动量守恒定律	32
2.2.3 火箭飞行原理	34
2.2.4 质心 质心运动定理	36
2.3 机械能 机械能守恒定律	39
2.3.1 功和功率	39
2.3.2 动能 动能定理	41
2.3.3 势能	44

2.3.4 功能原理 机械能守恒定律	47
2.4 碰撞	48
2.5 质点的角动量定理和角动量守恒定律	51
2.5.1 质点的角动量	51
2.5.2 角动量定理	52
2.5.3 角动量守恒定律	54
*2.6 对称性与守恒定律	56
2.6.1 对称性和对称操作	56
2.6.2 守恒定律与对称性	58
思考题	60
习题	62
第3章 刚体和流体的运动	66
3.1 刚体及其运动规律	66
3.1.1 刚体的平动和转动	67
3.1.2 定轴转动刚体的运动学描述	67
3.2 转动定律	69
3.2.1 力矩	69
3.2.2 转动定律	71
3.2.3 转动惯量 平行轴定理	72
3.3 刚体定轴转动的角动量和角动量守恒定律	76
3.3.1 刚体定轴转动的角动量	76
3.3.2 刚体定轴转动的角动量定理和角动量守恒定律	77
3.4 刚体绕定轴转动的动能定理	80
3.4.1 力矩的功	80
3.4.2 刚体绕定轴转动动能和动能定理	81
*3.5 进动	84
*3.6 流体的运动	87
3.6.1 理想流体的连续性方程	87
3.6.2 理想流体定常流动的伯努利方程	89
思考题	93
习题	94
第4章 相对论基础	100
4.1 伽利略变换 经典力学的相对性原理	101
4.1.1 经典力学的绝对时空观	101
4.1.2 伽利略变换 经典力学的相对性原理	101

4.2 狭义相对论基本原理 洛伦兹变换	103
4.2.1 迈克耳孙 - 莫雷实验	103
4.2.2 狭义相对论基本原理	104
4.2.3 洛伦兹变换	104
4.2.4 相对论速度变换	107
4.3 狭义相对论的时空观	109
4.3.1 同时的相对性	109
4.3.2 时间的延缓	110
4.3.3 长度的收缩	112
4.4 狭义相对论动力学	113
4.4.1 相对论质量和动量	113
4.4.2 相对论动力学的基本方程	115
4.4.3 相对论能量	116
4.4.4 相对论动量和能量的关系	118
4.5 广义相对论简介	119
4.5.1 等效原理 广义相对性原理	120
4.5.2 广义相对论的时空特性	121
4.5.3 广义相对论的实验验证	123
思考题	126
习题	127
第5章 真空中的静电场	130
5.1 电荷 库仑定律	131
5.1.1 电荷	131
5.1.2 库仑定律	132
5.2 电场 电场强度	134
5.2.1 电场	134
5.2.2 电场强度	135
5.2.3 电场强度的计算	136
5.3 真空中静电场的高斯定理	142
5.3.1 电场强度通量	142
5.3.2 高斯定理	145
5.3.3 高斯定理的应用	147
5.4 静电场的环路定理 电势	153
5.4.1 静电场力的功 静电场的环路定理	153
5.4.2 电势能	155

IV 目录

5.4.3 电势 电势差	155
5.4.4 电势的计算	156
5.4.5 等势面	161
5.5 电场强度与电势的关系	162
思考题	165
习题	167
第6章 静电场中的导体和电介质	171
6.1 静电场中的导体	172
6.1.1 导体的静电平衡条件	172
6.1.2 静电平衡时导体上的电荷分布	173
6.2 静电场中的电介质	180
6.2.1 电介质的极化	180
6.2.2 电极化强度	182
6.3 有电介质时的高斯定理	184
6.3.1 电位移 有电介质时的高斯定理	184
*6.3.2 静电场的边界条件	187
6.4 电容 电容器	189
6.4.1 孤立导体的电容	189
6.4.2 电容器	190
6.4.3 电容器的串联和并联	193
6.5 静电场的能量	195
6.5.1 电容器的能量	196
6.5.2 静电场的能量	196
思考题	198
习题	200
第7章 恒定磁场	204
7.1 恒定电流 电动势	204
7.1.1 电流 电流密度	204
*7.1.2 电流连续性方程和恒定电流条件	206
7.1.3 电源 电动势	207
7.2 磁场 磁感应强度	208
7.2.1 基本磁现象	208
7.2.2 磁场 磁感应强度	209
7.3 毕奥-萨伐尔定律	211
7.3.1 毕奥-萨伐尔定律	211

7.3.2 毕奥 - 萨伐尔定律的应用	212
7.3.3 运动电荷的磁场	216
7.4 恒定磁场的高斯定理	217
7.4.1 磁通量	217
7.4.2 恒定磁场的高斯定理	218
7.5 安培环路定理	218
7.5.1 安培环路定理	218
7.5.2 安培环路定理的应用	221
7.6 带电粒子在电场和磁场中的运动	224
7.6.1 带电粒子在磁场中的运动	224
7.6.2 带电粒子在电磁场中运动的实例	227
7.7 磁场对载流导线的作用	229
7.7.1 载流导线在磁场中所受的磁力	229
7.7.2 载流线圈在磁场中所受的磁力矩	231
7.8 磁场中的磁介质	234
7.8.1 磁介质 磁介质的磁化	234
7.8.2 磁化强度与磁化电流	236
7.8.3 有磁介质时的安培环路定理	238
*7.8.4 恒定磁场的边界条件	241
*7.8.5 铁磁质	243
思考题	246
习题	247
第8章 电磁感应 电磁场	252
8.1 电磁感应定律	253
8.1.1 法拉第电磁感应定律	253
8.1.2 楞次定律	254
8.2 动生电动势和感生电动势	257
8.2.1 动生电动势	257
8.2.2 感生电动势 感生电场	259
*8.2.3 电子感应加速器	261
*8.2.4 涡电流	263
8.3 自感和互感	264
8.3.1 自感 自感电动势	264
8.3.2 互感 互感电动势	266
8.4 磁场的能量	269

8.5 位移电流 麦克斯韦方程组	271
8.5.1 位移电流 全电流安培环路定理	271
8.5.2 电磁场 麦克斯韦方程组的积分形式	274
思考题	275
习题	278
附录1 矢量	282
附录2 常用基本物理量	288
附录3 国际单位制	289
附录4 希腊字母	291
习题参考答案	292
参考文献	303

第1章

质点运动学

质点在运动过程中，其位置随时间而改变。

质点运动学

自然界万象纷呈，一切物质都在永不停息地运动着，在各种形态的物质运动中，最简单、最基本的运动是物体之间(或物体内各部分之间)的相对位置变化的运动，这种运动形式称为机械运动(mechanical motion)。研究物体机械运动及其规律的学科称为力学(mechanics)。力学可分为运动学和动力学两部分，其中描述物体的空间位置随时间而变化的规律叫做运动学。



本章将利用矢量和微积分知识重点研究质点运动的规律，其主要内容有：位置矢量、位移、速度和加速度、质点的运动方程、切向加速度、法向加速度、相对运动。

八大行星绕太阳运动构成一幅美丽的图案，行星的运动是一种机械运动

1.1 质点运动的描述

1.1.1 质点 参考系

1. 质点

实际物体都有一定的大小、形状、质量及复杂的内部结构，它们对物体运动的影响是很大的，但在有些问题中，物体的大小和形状所起的作用可以忽略不计，就可以把实际物体抽象为一个只具有质量而忽略大小和形状的理想物

体,称为质点(*particle*).显然,质点是一个理想模型,但把物体看做质点是有条件的、相对的,主要是看物体的大小和形状在特定的力学问题中是否可以忽略或不起作用.例如,研究地球绕太阳公转时,由于地球与太阳间的距离为地球平均半径的 10^4 倍,地球上各点相对于太阳的运动近似相同,因此可以用一个具有地球质量的点来代替整个地球.

在物理学的研究过程中,建立一些理想的模型可以凸显主要规律,也可使处理的问题得以简化.当我们所研究的物体不能视为质点时,质点力学仍不失其价值.此时,可把整个物体看成由许多质点所组成,从这些质点运动的分析入手,就有可能得到整个物体的运动规律.像质点系力学、刚体力学、弹性力学乃至流体力学,就是由质点力学发展起来的.

2. 参考系

自然界中的任何物体都处于永恒不息的运动之中,运动虽然具有绝对性,但对一个物体运动的描述却是相对的.因为一个物体的位置及位置的改变总是以其他物体为参考来确定的,这个参考物体叫做参考系(*reference system*).经验告诉我们,同一物体的同一运动,相对于不同的参考系来说,对运动的描述是不同的.例如,自由下落的雨滴,相对于地面这个参考系,是直线运动;而以行进的汽车为参考系,雨滴将作曲线运动,这就是运动描述的相对性.因此,凡是与机械运动相关的力学现象和规律,只有在指明参考系的情况下才有意义.

在运动学中,对参考系的选择原则上是任意的,这取决于问题的性质和研究的方便.例如,在讨论地面附近物体的运动时,通常选取地面或地面上静止的物体作为参考系,而在研究行星绕太阳的运动时则取太阳作为参考系.

参考系选定之后,为了把运动物体在每一时刻相对于此参考系的位置定量地表示出来,就要在此参考系上建立适当的坐标系(*coordinate system*),把坐标系的原点和坐标轴固定在参考系上,这样,就可以用相应的坐标对物体的运动过程作定量描述.常用的坐标系有直角坐标系、自然坐标系,另外还有极坐标系和球坐标系等.

1.1.2 位置矢量 运动方程

质点做机械运动时,为了定量地描述质点在每一时刻的空间位置、反映物体位置的变化及其规律,我们将引入描述物体运动的几个基本物理量.

1. 位置矢量

如图 1.1 所示的直角坐标中,描述运动质点在空间的瞬时位置用位置矢量(简称位矢)表示,位置矢量是从坐标原点指向质点所在位置的有向线段,用 $\boldsymbol{r}$ 表示.设质点 P 的空间坐标为 x 、 y 、 z ,以 $\boldsymbol{i}$ 、 $\boldsymbol{j}$ 、 $\boldsymbol{k}$ 分别表示沿 x 轴、 y 轴、 z

轴正方向的单位矢量, 则位置矢量 $\mathbf{r}$ 可写成

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \quad (1.1)$$

位置矢量的大小为

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

位置矢量的方向可由其方向余弦来表示, 即

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos \beta = \frac{y}{r}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{r}$$

式中 α 、 β 、 γ 分别是位矢 $\mathbf{r}$ 与 x 轴、 y 轴、 z 轴之间的夹角。

2. 运动方程

质点在运动过程中, 其位置随时间 t 而改变, 所以, 质点的位置矢量随时间的变化可由 $\mathbf{r}(t)$ 函数来描述, 即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1.2)$$

上式称作质点的运动方程 (equation of motion), 它给出了质点在任意时刻的空间位置。

运动方程也可以表示为坐标的分量形式, 即

$$\left. \begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \\ z &= z(t) \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

从式 (1.3) 中消去时间参数 t , 就可以得到运动质点的轨道方程, 或称为轨道方程。

3. 位移

运动质点在一段时间内位置的改变叫做它在这段时间内的位移 (displacement vector), 设质点沿图 1.2 所示的曲线运动, 在 t 时刻, 质点位于 A 点处, 位矢为 $\mathbf{r}_A$, 经过时间 Δt , 质点运动到 B 点处, 位矢为 $\mathbf{r}_B$. 在时间 Δt 内, 质点位置的变化可用从 A 点指向 B 点的有向线段 $\Delta \mathbf{r}$ 来表示, 根据矢量运算法则可得质点的位移为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A \quad (1.4)$$

在直角坐标系中, 位移 $\Delta \mathbf{r}$ 可表示为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r} &= (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j} + (z_B - z_A)\mathbf{k} \\ &= \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \end{aligned}$$

位移的大小为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (1.5)$$

位移的方向由起点 A 指向终点 B .

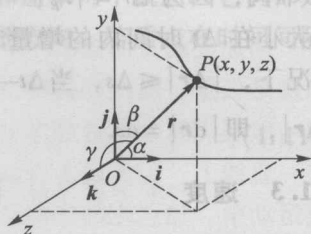


图 1.1 位置矢量

图 1.2 中质点实际运动轨迹的长度称作路程, 用 Δs 表示. 应当注意, 位移和路程是两个不同的概念. 位移是矢量, 它给出质点位置变化的大小和方向, 它的大小为 $|\Delta \mathbf{r}|$, 这一数值与 Δr 不同, 因为 $\Delta r = |\mathbf{r}_B| - |\mathbf{r}_A|$, 它是位置矢量的大小在 Δt 时间内的增量. 路程是标量, 一般情况下, $|\Delta \mathbf{r}| \leq \Delta s$, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 有 $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta \mathbf{r}|$, 即 $|\mathrm{d}\mathbf{r}| = \mathrm{d}s$.

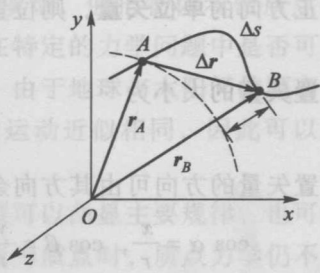


图 1.2 位移

1.1.3 速度

1. 平均速度

速度是描述质点空间位置变化快慢的物理量, 即反映了质点运动的快慢和方向. 若质点在时间 Δt 内, 发生的位移为 $\Delta \mathbf{r}$ 时, 我们把 $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 的比值称作质点在这段时间内的平均速度 (average velocity), 用 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示, 即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.6)$$

在直角坐标系中, 平均速度可以写成

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \mathbf{j} + \frac{\Delta z}{\Delta t} \mathbf{k} = \bar{v}_x \mathbf{i} + \bar{v}_y \mathbf{j} + \bar{v}_z \mathbf{k} \quad (1.7)$$

2. 瞬时速度

平均速度只能粗略地反映在 Δt 内质点位置变化的平均快慢. 为了获得质点每一瞬间的运动情况, 可把时间间隔 Δt 取得很小, 这样质点的平均速度就越接近 t 时刻它在 A 点的速度. 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 平均速度的极限值就是质点在 t 时刻的瞬时速度 (instantaneous velocity), 简称速度, 用 $\mathbf{v}$ 表示, 即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}t} \quad (1.8)$$

上式表明质点在 t 时刻的瞬时速度 $\mathbf{v}$ 等于其位置矢量 $\mathbf{r}(t)$ 对时间 t 的一阶导数, 质点的速度方向就是位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向. 由图 1.3 可知, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, B 点无限趋近于 A 点, 而 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向最后将与轨迹曲线在 A 点的切线一致. 这样, 质点在 t 时刻的速度方向就沿着该时刻质点所在处运动轨迹的切线并指向质点运动前进的一方.

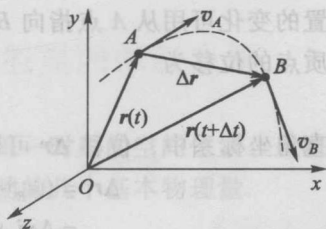


图 1.3 瞬时速度

速度的单位是米每秒, 用 m/s 表示.

将式 (1.1) 代入式 (1.8), 由于 $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 是常矢量, 所以有

$$\mathbf{v} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1.9)$$

速度的大小为

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.10)$$

另外, 在描述质点运动快慢时, 还常用到平均速率和速率两个概念. 它们都是标量, 只反映质点运动的快慢程度, 而不考虑运动的方向. 若质点在时间间隔 Δt 内, 通过的路程为 Δs , 则平均速率定义为

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1.11)$$

平均速率的极限值定义为质点在 t 时刻的速率 v , 即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1.12)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $ds = |d\mathbf{r}|$, 所以 $v = |\mathbf{v}|$, 即速率等于速度的大小.

1.1.4 加速度

1. 平均加速度

加速度是描述质点速度变化快慢的物理量. 如图 1.4 所示, 质点沿着曲线 AB 运动, 在 Δt 时间内其速度由 $\mathbf{v}_A$ 变为 $\mathbf{v}_B$, 速度的增量为 $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A$, 我们把 $\Delta \mathbf{v}$ 与 Δt 的比值称作质点在这段时间内的平均加速度 (average acceleration), 用 $\bar{\mathbf{a}}$ 表示, 即

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1.13)$$

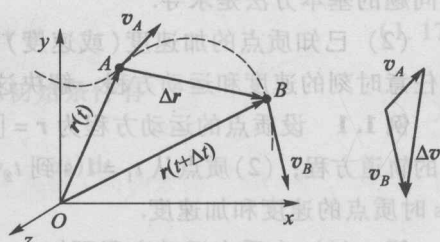


图 1.4 平均加速度 $\bar{\mathbf{a}}$ 的方向为 $\Delta \mathbf{v}$ 的方向

2. 瞬时加速度

平均加速度只能粗略地反映 Δt 时间内质点速度的变化情况. 为准确地描述质点在某一时刻 (或某一位置) 的速度变化率, 需引入瞬时加速度. 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 平均加速度的极限值就是质点在 t 时刻的瞬时加速度 (instantaneous acceleration), 简称加速度, 用 $\mathbf{a}$ 表示, 即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \quad (1.14)$$

上式表明加速度 $\mathbf{a}$ 等于速度 $\mathbf{v}$ 对时间 t 的一阶导数, 或等于位置矢量 $\mathbf{r}$ 对时间 t 的二阶导数. 加速度的单位是米每二次方秒, 用 m/s^2 表示.

在直角坐标系中, 加速度可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt}\mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt}\mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt}\mathbf{k} \\ &= a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k} \end{aligned} \quad (1.15)$$

加速度的大小为

$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1.16)$$

加速度的方向是 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 的极限方向. 应当注意, 由于加速度是矢量, 既反映速度方向的改变, 又反映速度大小的改变. 因而加速度方向一般与该时刻的速度方向不一致. 当质点作直线运动时, 加速度和速度虽同在一直线上, 但可以有同向(加速运动)和反向(减速运动)两种情况; 而在曲线运动中, 加速度的方向总是指向曲线的凹侧.

由式(1.2)、式(1.9)和式(1.15)可以看出, 质点的任意运动都可以分解为三个坐标轴方向上各自独立进行的直线运动的叠加.

质点运动学研究的问题一般可分为两类:

(1) 已知质点的运动方程, 求质点在任意时刻的速度和加速度. 解决这类问题的基本方法是求导.

(2) 已知质点的加速度(或速度)随时间的变化规律和初始条件, 求质点在任意时刻的速度和运动方程. 解决这类问题的基本方法是积分.

例 1.1 设质点的运动方程为 $\mathbf{r} = [2t^2\mathbf{i} + (3t+1)\mathbf{j}]$ (SI 单位), 求: (1) 质点的轨道方程; (2) 质点从 $t_1 = 1\text{ s}$ 到 $t_2 = 3\text{ s}$ 时间内的位移和平均速度; (3) $t_2 = 3\text{ s}$ 时质点的速度和加速度.

解 (1) 由质点运动方程可知

$$\begin{aligned} x &= 2t^2 \\ y &= (3t+1) \end{aligned}$$

消去时间参量 t , 可得质点运动的轨道方程为

$$y = \left(\frac{3}{2} \sqrt{2x} + 1 \right)$$

(2) 根据质点的运动方程, $t_1 = 1\text{ s}$ 和 $t_2 = 3\text{ s}$ 时质点的位矢分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= [2 \times 1^2\mathbf{i} + (3 \times 1 + 1)\mathbf{j}] \text{ m} = (2\mathbf{i} + 4\mathbf{j}) \text{ m} \\ \mathbf{r}_2 &= [2 \times 3^2\mathbf{i} + (3 \times 3 + 1)\mathbf{j}] \text{ m} = (18\mathbf{i} + 10\mathbf{j}) \text{ m} \end{aligned}$$

由式(1.4)可知位移为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = (16\mathbf{i} + 6\mathbf{j}) \text{ m} = 2(8\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) \text{ m}$$

由式(1.6)可知平均速度为

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{2(8\mathbf{i} + 3\mathbf{j})}{2} \text{ m/s} = (8\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) \text{ m/s}$$

(3) 将运动方程对时间 t 求一阶导数, 得到速度方程