



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

大学物理学

林铁生 高兴茹 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

大学物理学

DAXUE WULIXUE

林铁生 高兴茹 主编



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

内容提要

本书是全国教育科学“十一五”规划课题“我国高校应用型人才培养模式研究”物理类子课题“独立院校应用型本科物理课程教学内容、课程体系改革与教学资源建设的研究与实践”的研究成果。

本书充分考虑了物理课程在培养学生科学思维、创新精神和科学作风中的重要作用,注意了基本概念、基本理论和基本研究方法的传授,突出物理模型,努力做到主次分明、详略得当、清晰简明。本书特别注意教学上的可操作性,适当降低了习题的难度,为摆脱当前物理教学中只重视“解题”的倾向,增加了阅读题和讨论题,使习题多样化,用以培养学生运用物理知识解决实际问题的能力。

本书主要内容有:力学、热学、电磁学、振动与波动、波动光学和近代物理。本书可作为独立学院、应用型本科院校理工科类大学物理学教材,也可供其他高等学校的有关专业选用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学/林铁生,高兴茹主编. —北京:高等教育出版社,2011.8

ISBN 978-7-04-032706-9

I. ①大… II. ①林…②高… 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(2011)第141031号

策划编辑 高建 责任编辑 高建 封面设计 于文燕 版式设计 余杨
插图绘制 尹莉 责任校对 金辉 责任印制 韩刚

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社址	北京市西城区德外大街4号	网址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印刷	北京市朝阳展望印刷厂	网上订购	http://www.landaco.com
开本	787 mm × 960 mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印张	30.25	版次	2011年8月第1版
字数	570千字	印次	2011年8月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定价	40.70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 32706-00

前 言

本书是全国教育科学“十一五”规划课题“我国高校应用型人才培养模式研究”物理类子课题“独立院校应用型本科物理课程教学内容、课程体系改革与教学资源建设的研究与实践”的研究成果。参加本课题工作的有北京联合大学和北京交通大学滨海学院。编写本书的指导思想如下:

(1) 大学物理是高等学校工科各专业的一门重要基础课,它在培养学生科学思维、创新精神和科学作风方面有着其他课程不可替代的作用。在编写中我们注意了基本概念、基本理论和基本研究方法的传授,突出物理模型,注意物理与工程技术的联系,试图做到通过本课程的学习,能使学生在知识、能力和科学素质等方面得到较大的提高。

(2) 充分注意教学上的可操作性,努力做到主次分明、详略得当、清晰简明,使学生好阅读,教师好使用。

(3) 摆脱大学物理教学中,只重视计算题训练的倾向,适度降低了计算题的难度,努力使习题多样化,每一章都增加了讨论题和阅读题,培养学生运用物理知识解决实际问题的能力。

(4) 本教材编写时,注意了与高中物理新课改的教学内容的衔接,并在考虑当前大学物理教学现状的前提下,按照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委会制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2008版)来安排和选取教学内容。

本书适用于80~120学时独立学院大学物理课程的教学,可作为应用型本科院校的大学物理课教材。

本书由林铁生、高兴茹主编,林铁生除负责本书的策划、统稿和定稿外,还改写了部分章节,高兴茹除参加上述工作外,还编写了本书附录,并对各章习题进行统稿。参加本书编写的人员有(以姓氏笔画为序):

王雪梅编写第四章静电场;毋小云编写第五章恒定磁场和第六章电磁感应与电磁场;姜黎霞编写第一章质点运动学与牛顿运动定律、第二章运动定理与守恒定律、第三章刚体的运动、第七章气体动理论和第八章热力学基础;姚淑娜编写第九章振动、第十章波动和第十一章波动光学;高兴茹编写第十二章狭义相对论和第十三章量子物理。

由于本书的编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请专家、同行和读者批评指正。

目 录

第一篇 力 学

第一章 质点运动学与牛顿运动定律	3
§ 1.1 参考系 质点	3
§ 1.2 质点的位移 速度和加速度	4
§ 1.3 圆周运动	9
§ 1.4 相对运动	13
§ 1.5 牛顿运动定律	15
§ 1.6 牛顿运动定律的应用举例	20
计算题	24
讨论题	26
阅读题	26
第二章 运动定理与守恒定律	28
§ 2.1 功 功率	28
§ 2.2 保守力的功 势能	30
§ 2.3 动能定理 机械能守恒定律	35
§ 2.4 动量定理 动量守恒定律	41
§ 2.5 角动量定理 角动量守恒定律	48
§ 2.6 质心 质心运动定理	54
计算题	57
讨论题	58
阅读题	59
第三章 刚体的运动	60
§ 3.1 刚体的运动描述	60
§ 3.2 刚体对定轴的角动量定理	62
§ 3.3 刚体对定轴的角动量守恒定律	66
§ 3.4 转动定律	68
§ 3.5 刚体定轴转动的动能定理	71
计算题	74
讨论题	76
阅读题	77

第二篇 电 磁 学

第四章 静电场	83
§ 4.1 物质的电结构 库仑定律	83
§ 4.2 电场 电场强度	85
§ 4.3 静电场的高斯定理	91
§ 4.4 静电场的环路定理 电势	100
§ 4.5 电场强度与电势的关系	107
§ 4.6 静电场中的导体	109
§ 4.7 静电场中的电介质	116
§ 4.8 电容 电容器	120
§ 4.9 静电场的能量	123
计算题	125
讨论题	131
阅读题	131
第五章 恒定磁场	133
§ 5.1 恒定电流 电源 电动势	133
§ 5.2 磁场 磁感应强度	137
§ 5.3 毕奥 - 萨伐尔定律	140
§ 5.4 磁通量 磁场的高斯定理	145
§ 5.5 磁场的安培环路定理	148
§ 5.6 磁场对运动电荷的作用	154
§ 5.7 磁场对载流导线和载流线圈的作用	159
§ 5.8 磁介质中的磁场	165
计算题	173
讨论题	180
阅读题	181
第六章 电磁感应 电磁场	184
§ 6.1 法拉第电磁感应定律	184
§ 6.2 动生电动势和感生电动势	188
§ 6.3 自感和互感	195
§ 6.4 磁场的能量	199
§ 6.5 位移电流 全电流安培环路定理	201
§ 6.6 麦克斯韦方程组的积分形式	204

计算题	206
讨论题	210
阅读题	211

第三篇 热 学

第七章 气体动理论	215
§ 7.1 分子运动的基本概念	215
§ 7.2 气体的状态参量 平衡态 理想气体物态方程	217
§ 7.3 理想气体的压强公式与温度公式	219
§ 7.4 能量按自由度均分定理 理想气体的内能	223
§ 7.5 麦克斯韦速率分布律	227
§ 7.6 气体分子的平均碰撞频率和平均自由程	232
计算题	235
讨论题	236
阅读题	236
第八章 热力学基础	238
§ 8.1 准静态过程 功、热量及内能	238
§ 8.2 热力学第一定律	240
§ 8.3 热力学第一定律对理想气体等值过程的应用	241
§ 8.4 热力学第一定律对理想气体绝热过程的应用	246
§ 8.5 循环过程 卡诺循环	248
§ 8.6 热力学第二定律	254
§ 8.7 可逆过程和不可逆过程 卡诺定理	256
§ 8.8 热力学第二定律的统计意义	258
§ 8.9 熵 熵增加原理(玻耳兹曼关系)	260
计算题	263
讨论题	265
阅读题	265

第四篇 振动 波动 波动光学

第九章 振动	269
§ 9.1 简谐振动	269
§ 9.2 简谐振动的能量	275
§ 9.3 阻尼振动 受迫振动 共振	276

§ 9.4 简谐振动的合成	279
§ 9.5 振荡电路 电磁振荡	284
计算题	287
讨论题	289
阅读题	290
第十章 波动	292
§ 10.1 机械波的产生与传播	292
§ 10.2 平面简谐波的波函数	297
§ 10.3 波的能量 能流密度	301
§ 10.4 惠更斯原理 波的衍射	305
§ 10.5 波的叠加原理 波的干涉 驻波	307
§ 10.6 多普勒效应	313
§ 10.7 声波	316
§ 10.8 电磁波	318
计算题	325
讨论题	327
阅读题	328
第十一章 波动光学	330
§ 11.1 光的相干性	330
§ 11.2 由分波阵面法产生的光的干涉	331
§ 11.3 光程	335
§ 11.4 由分振幅法产生的光的干涉	337
§ 11.5 迈克耳孙干涉仪	343
§ 11.6 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理	344
§ 11.7 夫琅禾费单缝衍射	345
§ 11.8 光栅衍射	350
§ 11.9 光学仪器的分辨本领	355
§ 11.10 X射线的衍射	358
§ 11.11 光的偏振	360
计算题	366
讨论题	368
阅读题	369

第五篇 近代物理基础

第十二章 狭义相对论	375
-------------------------	------------

§ 12.1 伽利略变换 经典力学的时空观	375
§ 12.2 狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换	379
§ 12.3 狭义相对论的时空观	383
§ 12.4 狭义相对论的动力学基础	388
计算题	393
讨论题	394
阅读题	394
第十三章 量子物理	396
§ 13.1 黑体辐射 普朗克的能量子假说	396
§ 13.2 光电效应 爱因斯坦的光子假说	401
§ 13.3 康普顿效应 光的波粒二象性	406
§ 13.4 玻尔的氢原子理论	412
§ 13.5 实物粒子的波动性	417
§ 13.6 不确定关系	420
§ 13.7 波函数 薛定谔方程	423
§ 13.8 氢原子的量子理论	428
§ 13.9 电子的自旋	430
§ 13.10 多电子原子的壳层结构	432
§ 13.11 原子核	435
§ 13.12 激光	441
§ 13.13 半导体	445
计算题	448
讨论题	450
阅读题	450
计算题参考答案	452
附录一 国际单位制 (SI)	466
附录二 常用物理常量	467
附录三 矢量的运算	468
参考书目	472

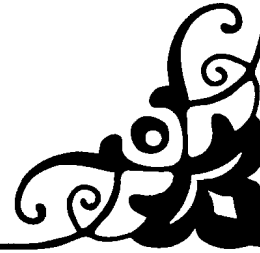



第一篇 力 学

自然界中的一切物质都处于永恒的运动之中,物质的运动形式多种多样,其中最简单最基本的运动是机械运动。机械运动是指一个物体的位置随时间的变化或物体各部分之间相对位置随时间的变动。力学是研究物体机械运动规律的一门学科。力学是物理学的重要组成部分,是物理学中最早形成的学科,也是至今仍充满活力的学科。经过300多年的发展,力学形成了严谨的理论体系和完备的研究方法。几乎在物质运动的所有形式中都包含机械运动,所以它的许多概念和原理具有广泛的适用性,从而使力学成为物理学和许多工程技术的理论基础。20世纪以来,量子力学、相对论的建立以及对混沌问题的研究,给经典力学带来了巨大的冲击,使人们对力学的认识发生了重大的改变。

通常把力学分为运动学、动力学和静力学。运动学研究的是如何描述物体的运动以及各运动学量之间的关系,它不涉及引起和改变运动的原因;动力学研究的是物体运动与物体间相互作用之间的内在联系;静力学研究的是物体在相互作用下的平衡问题。

本篇主要讨论质点运动学、质点动力学和刚体力学基础,着重阐明能量、动量、角动量等概念及相应的运动定理和守恒定律。



第一章 质点运动学与牛顿运动定律

运动学是从几何观点来研究和描述物体的机械运动,没有涉及运动状态发生变化的原因.而物体运动状态的变化,则是与作用在物体上的力有关的,这部分内容属于牛顿运动定律涉及的范围.本章首先介绍确定质点位置的方法及描述质点运动的重要物理量——位移、速度和加速度,进而讨论圆周运动和相对运动,最后阐述质点在力作用下遵从的基本规律——牛顿运动三定律.

§ 1.1 参考系 质点

一、参考系

自然界中的所有物体都在不停地运动着,绝对静止不动的物体是不存在的.物体的运动是绝对的,运动的描述是相对的.为了描述一个物体的运动,需要选取另一个物体或彼此不作相对运动的物体系作为参考,被选作参考的物体或物体系称为参考系.同一物体相对于不同的参考系,其运动的描述是不同的.例如在匀速行驶的火车中,静坐的乘客相对于车厢静止,而相对于路边某一固定物体,乘客和火车一起作匀速运动.这就是运动描述的相对性.因此,在描述某一物体的运动时,必须指明是相对哪个参考系而言的.

参考系通常要根据问题的性质和研究问题的方便来选取.例如研究物体在地面上的运动时,选取地面作为参考系较方便,而研究地球绕太阳的运动时,则选取太阳作为参考系较为方便.

为了定量地描述物体相对于参考系的位置及其变化,需要在参考系上建立一个固定的坐标系.最常用的是直角坐标系.此外,根据需要还可选用其他坐标系,例如极坐标系、球坐标系或柱面坐标系等.

二、质点

物质世界是错综复杂、丰富多彩的.在物理学中,为了突出研究对象的主要性质,经常建立一些理想模型来代替实际的物体,使问题简化.质点就是一种理想模型.质点是指忽略了物体的大小和形状且具有一定质量的几何点.

一个物体能否被看作质点,要根据问题的具体情况而定.一般来说,当

所研究的问题中不涉及物体的转动和形变时,物体的大小、形状和结构可以忽略,可视为一个质点.当研究一些比较复杂的物体(如弹性体、流体)运动时,虽然不能把整个物体看成质点,但可以将其看成由许多质点组成的质点系,这样,就可以在解决质点运动问题的基础上来研究这些复杂物体的运动.

§ 1.2 质点的位移 速度和加速度

一、位置矢量 位移

1. 位置矢量

描述一个质点的运动,首先要确定它的空间位置.质点的空间位置可以用许多方式来描述,其中一种方式是用矢量来描述.这个矢量是由某参考点引向质点所在位置的有向线段,常用符号 r 来表示,称为质点相对于该参考点的位置矢量,简称位矢.位置矢量的大小 r 表明质点到参考点的距离,其方向标志了质点的位置相对于参考点的方位.方位和距离都确定了,质点的位置也就确定了.

为了便于定量描述,通常选择固定在参考系的坐标原点作为位置矢量的参考点,如图 1.1 所示.某质点在 P 点的位置可以用坐标 x, y, z 表示,也可以用由坐标原点 O 引向 P 点的位置矢量 r 来表示.由图 1.1 可知, P 点的坐标 x, y, z 是位矢 r 在 x, y, z 坐标轴上的分量,位矢与坐标之间的关系为

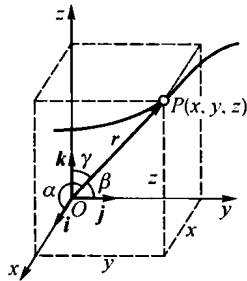


图 1.1 位置矢量

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

其中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为沿 x, y, z 轴正方向的单位矢量(即大小是一个单位的矢量).位矢 r 的大小为

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

位矢的方向可用 r 的方向余弦确定:

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

其中 α, β, γ 分别是 r 与 x, y, z 坐标轴之间的夹角.

在国际单位制(SI)中,位置矢量的单位是米,符号为 m.

当质点运动时,它的位置矢量将随时间而变化,其变化规律可以用位置矢量 r 对时间 t 的函数

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1.2)$$

来表示,此函数给出了任一时刻质点所在的位置,称为质点的运动方程.

在直角坐标系中,质点的运动方程可表示为

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

其分量形式为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases}$$

质点运动时所经过的路线称为质点的轨道,将上式中的参数 t 消去,即得质点的轨道方程:

$$f(x, y, z) = 0$$

例如:在直角坐标系中,质点 P 从原点 O 开始沿 x 轴作平抛运动,其运动方程为

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} = (v_0 t)\mathbf{i} + \left(-\frac{1}{2}gt^2\right)\mathbf{j}$$

其分量形式为

$$\begin{cases} x = v_0 t \\ y = -\frac{1}{2}gt^2 \end{cases}$$

从上式中消去 t ,即得质点的轨道方程:

$$y = -\frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v_0}\right)^2$$

这是一抛物线方程.

2. 位移

位移是描述质点位置变化的物理量.设某质点沿一曲线运动,如图 1.2 所示, t 时刻质点在 A 点,位矢为 $\mathbf{r}(t)$,经过 Δt 时间后,质点运动到 B 点,位矢为 $\mathbf{r}(t + \Delta t)$,在此过程中,质点的位置变化可由 A 点指向 B 点的矢量 \overrightarrow{AB} 表示,称为质点在 t 到 $t + \Delta t$ 时间间隔内的位移,由图 1.2 可得

$$\overrightarrow{AB} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t) = \Delta \mathbf{r} \quad (1.3)$$

式(1.3)表明,质点在某一时间内的位移等于同一时间内其位矢的增量.

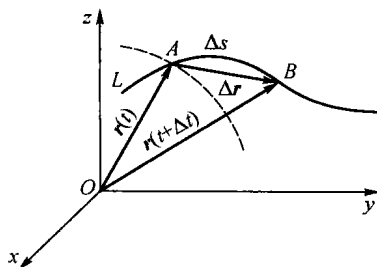


图 1.2 位移

由式(1.1),可将 A 、 B 两点的位置矢量分别写为

$$\mathbf{r}_A = x_A\mathbf{i} + y_A\mathbf{j} + z_A\mathbf{k}$$

$$\mathbf{r}_B = x_B \mathbf{i} + y_B \mathbf{j} + z_B \mathbf{k}$$

于是,有

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

应当注意,位移不同于路程.位移表示的是质点在一段时间内位置的变化,是矢量,但未描述质点沿着什么路径由起点运动到终点.路程 Δs 表示质点在一段时间内经过的运动轨道的长度,是标量.一般情况下,在某段有限的时间内,质点位移的大小与其路程不相等,只有当质点沿某一确定方向作直线运动时,位移的大小才与路程相等.另外,在 Δt 趋于零的极限情况下,两者的极限值相等,即 $ds = |d\mathbf{r}|$.

在国际单位制(SI)中,位移和路程的单位都是米,用符号 m 表示.

二、速度 加速度

1. 速度

速度是描述质点运动快慢和方向的物理量. 设质点在 Δt 时间内的位移为 $\Delta \mathbf{r}$, 则 $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 的比值称为质点在 Δt 内的平均速度, 即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$$

显然,平均速度是矢量,其方向为位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向.平均速度只反映了质点在 Δt 时间内位置矢量 \mathbf{r} 的平均变化率,是对运动状态的一种粗略描述,不能确切说明质点在每一时刻的运动状态.

为了精确地描述质点在某一时刻的运动状态,可以将 Δt 无限减小,使之趋近于零,这时质点的平均速度将趋近于一个确定的极限值,这个极限值称为质点在 t 时刻的瞬时速度,简称速度,用 \mathbf{v} 表示,则有

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1.4)$$

速度等于位置矢量对时间的一阶导数. 速度是矢量,其大小反映了 t 时刻质点运动的快慢,其方向就是 t 时刻质点运动的方向.

由式(1.4)可知,速度的方向就是 Δt 趋于零时,平均速度或位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向.如图 1.3 所示,当 Δt 趋于零时,点 B 趋近于点 A , $\Delta \mathbf{r}$ 则趋于与轨道相切,所以质点

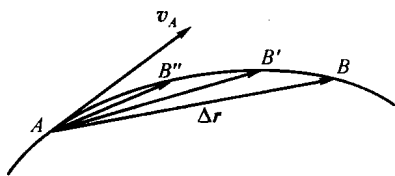


图 1.3 质点在轨道 A 点的速度方向

的速度方向是沿该轨道质点所在处的切线方向,并指向质点前进的一侧.

在直角坐标系中,速度可表示为

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = \frac{d}{dt}(x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}) = \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dz}{dt}\boldsymbol{k} = v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k} \quad (1.5)$$

式中 $v_x = \frac{dx}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt}$, $v_z = \frac{dz}{dt}$ 分别是 \boldsymbol{v} 沿三个坐标轴的分量,因此速度的大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.6)$$

速度的方向可以用方向余弦确定:

$$\cos \alpha = \frac{v_x}{v}, \quad \cos \beta = \frac{v_y}{v}, \quad \cos \gamma = \frac{v_z}{v}$$

在描述质点运动的快慢时,还常用到平均速率和速率这两个概念.若质点在 Δt 内通过的路程为 Δs ,则质点在 Δt 内的平均速率为

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

平均速率是一个标量.当 Δt 趋于零时,平均速率的极限值称为瞬时速率,简称速率,即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1.7)$$

由于 $|\Delta \boldsymbol{r}| \neq \Delta s$,因此平均速度的大小不等于平均速率.但是当 Δt 趋于零时, $ds = |d\boldsymbol{r}|$,则有 $\left| \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right| = \frac{ds}{dt}$,因此瞬时速度的大小等于瞬时速率,即 $v = |\boldsymbol{v}|$.

在国际单位制(SI)中,速度和速率的单位都是米每秒,符号为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. 加速度

加速度是描述质点运动速度的大小和方向随时间变化快慢的物理量.设质点沿曲线运动,在 Δt 时间内由 A 点运动到 B 点,速度由 \boldsymbol{v}_A 变为 \boldsymbol{v}_B ,在 Δt 时间内其速度增量为 $\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A$,如图 1.4 所示.

我们将 $\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$ 称为质点在 Δt 时间内的平均加速度,即 $\bar{\boldsymbol{a}} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$.

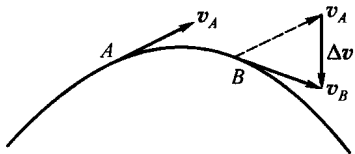


图 1.4 速度的变化量

平均加速度是矢量,其方向与速度增量方向相同,大小为 $|\bar{\boldsymbol{a}}| = \left| \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} \right|$.平均加速度是在 Δt 时间内速度的平均变化率,它不能给出每一时刻速度的变化情况,是对速度变化情况的一种粗略描述.为了精确描述质点在某一时刻运动速度的变化,可将 Δt 无限减小,当 Δt 趋于零时, $\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$ 将趋于一个确定的极限矢量,这个

矢量描述了速度的瞬时变化情况,称为**瞬时加速度**,简称**加速度**,即

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} \quad (1.8)$$

加速度是速度对时间的变化率,无论是速度的大小发生变化,还是速度的方向发生变化,都有加速度.由式(1.4)还可得

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2} \quad (1.9)$$

由此可见,加速度等于速度对时间的一阶导数或位矢对时间的二阶导数.加速度是矢量,它的方向与 Δt 趋于零时速度增量 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向相同.加速度的方向一般与同一时刻的速度方向不同.在直线运动中,加速度 \boldsymbol{a} 与速度 \boldsymbol{v} 同向(加速运动)或反向(减速运动).在曲线运动中,加速度 \boldsymbol{a} 的方向总是指向曲线凹的一侧.如图 1.5 所示,斜抛弹丸在空气中飞行时,各时刻的加速度 \boldsymbol{g} 的方向铅直向下.随着弹丸上升,速率减小, \boldsymbol{g} 与 \boldsymbol{v} 成钝角;随着弹丸下降,速率增大, \boldsymbol{g} 与 \boldsymbol{v} 成锐角,然而无论弹丸处于上升还是下降过程,其加速度 \boldsymbol{g} 的方向总是指向曲线的凹侧.

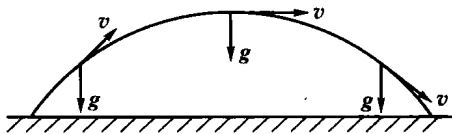


图 1.5 斜抛运动中弹丸加速度的方向

加速度的大小为 $|\boldsymbol{a}| = \left| \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} \right|$, 一般情况下, $|\boldsymbol{a}| \neq \frac{d|\boldsymbol{v}|}{dt}$.

在直角坐标系中,加速度可表示为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{a} &= \frac{dv_x}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dv_y}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dv_z}{dt}\boldsymbol{k} \\ &= \frac{d^2x}{dt^2}\boldsymbol{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\boldsymbol{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\boldsymbol{k} \\ &= a_x\boldsymbol{i} + a_y\boldsymbol{j} + a_z\boldsymbol{k} \end{aligned} \quad (1.10)$$

式中 $a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$, $a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}$, $a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2}$ 是 \boldsymbol{a} 沿三个坐标轴的分量,因此加速度的大小为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1.11)$$

加速度的方向可以用方向余弦确定:

$$\cos \alpha = \frac{a_x}{a}, \quad \cos \beta = \frac{a_y}{a}, \quad \cos \gamma = \frac{a_z}{a}$$

在国际单位制(SI)中,加速度的单位是米每二次方秒,符号为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

例 1.1 质点作平面曲线运动,其运动方程为: $\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j}$, 其中 $x = 2t$, $y = \frac{1}{2}t^2 - 2$, 式中各

量均采用 SI 单位.求:(1)质点在 $t = 2\text{ s}$ 到 $t = 4\text{ s}$ 这段时间内的位移和平均速度;(2)质点在