

University Physics  
大学物理学

上册

王磊 陈钢



高等教育出版社

# University Physics

# 大学物理学

上册

王 磊 陈 钢 聂 娅

高等教育出版社

## 内容提要

本书根据教育部最新编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2008年版)的精神,并结合四川大学多年来的教学实践编写而成。作者从新世纪工程技术人才培养的总体要求出发,以培养学生的能力和素质为目的,以物质的存在形式和基本性质为主线,以现代教育思想、教育方法为指导,来设计大学物理的内容和课程体系。在学习经典教材的基础上,对难度和深度作了一些调整,使全书的脉络更加清晰,深度、广度更加合适。本书科学严谨、语言简练、深入浅出,尽量应用简单的数学知识,并有较宽的适用面。

本书分为上、下两册。上册内容为力学和电磁学;下册内容为热学、光学、近代物理。本书可作为普通高等学校理工科类本科生大学物理课程的教材,也可供其他读者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上册/王磊,陈钢,聂娅. —北京:高等教育出版社,2009.12

ISBN 978-7-04-027941-2

I. 大… II. ①王…②陈…③聂… III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第181717号

策划编辑 陶 铮 责任编辑 张海雁 封面设计 于 涛 责任绘图 尹 莉  
版式设计 王 莹 责任校对 王 雨 责任印制 朱学忠

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	咨询电话	400-810-0598
邮政编码	100120	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京明月印务有限责任公司		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787×960 1/16	版 次	2009年12月第1版
印 张	21	印 次	2009年12月第1次印刷
字 数	390 000	定 价	22.80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 27941-00

# 前 言

近年来,大学基础物理教学在教育改革进程中,已经经历了多次课程设置和课时数的调整,理工科类大学物理要求和学时差异越来越大。这套教材是编者基于现阶段综合性大学对大学物理课程的具体要求,并结合多年分别在理工科类专业进行大学物理教学的经验,参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新制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2008年版)编写成的。

物理学是所有自然科学的理论基础,它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是大学低年级理工科类学生的一门非常重要的基础课程。为了实现在有限的教学时间内,培养学生的创新精神和解决问题的能力,对理工科类学生进行扎实有效的基础性训练,同时实现开拓创新的科学素质的培养目标,此套教材的编写力争做到既有基础性和拓展性,又具有使用上的灵活性和可选择性。

本书分为上、下两册,系统地介绍了大学物理学的基本概念、基本公式和基本理论,主要内容包含力学、热学、电磁学、波动光学和近代物理基础等内容。上册包含力学和电磁学,下册包含热学、光学和近代物理基础部分,全书共17章。本书除保持了物理学的逻辑特点和知识的完备性外,有以下几方面的特点:

(1) 力学部分根据研究对象的力学规律分类,整个内容归纳为两部分共四章:第一、第二章对单个质点运动的力学规律进行分析讨论,介绍了经典力学的基本定律和研究特点;第三章对质点系的运动规律进行了阐述,从质点系的质心入手,分析了质点系的动力学规律;第四章是将质点系的力学规律应用于特殊的质点系——刚体。

(2) 电磁学部分的内容历年来都是学生学习的难点。本书在保留传统的基本内容、基本章节顺序的基础上,对部分内容进行压缩和简化(如直流电路、导体、磁介质等章节均采取了比较简化的描述方式),例题、习题的难度适当降低。对于新的应用和发展,如霍尔效应、涡电流等,均有由浅入深、概念清晰的叙述,为进入有关领域的学科和技术研究提供必要的理论基础。

(3) 光学部分的讲解是在机械振动与机械波的规律基础上引出波动光学的基本规律。波动光学讲述传统光学的内容,包括光的干涉、衍射和偏振。光振动的相干叠加是光的干涉现象和光的衍射现象的本质。在进入波动光学时,首先引入光程与光程差的概念,然后再介绍典型的干涉现象。这一讲述顺序能够让

学生在掌握光程差与相位差的关系之后,更好地理解相干叠加的规律。在光的偏振一章中,强调电磁波横波特性,建立矢量光波的概念,并对光矢量的偏振特性进行了分析。

(4) 近代物理可分为三个部分:相对论、光的量子论和量子力学。叙述以理论概念为主,重大实验为辅,除个别章节外,只用到初等数学工具。本部分是以近代物理对客观世界认识的历史发展为讲解顺序,给出概念清楚、物理图像鲜明的规律。

(5) 本书的习题大部分偏重于基础知识,旨在帮助学生巩固课程内容,掌握主要知识点;少量习题和问题的讨论较为灵活,使学有余力的学生能够通过练习加深对知识的理解,得到进一步的提高。

本书可作为高等学校理工科类各专业本科生的大学物理教材,由王磊主持,四川大学物理学院基础物理教学中心编写,参编人员有王磊、陈钢、聂娅、伍登学、张软玉、冯灏、廖志君。

书中难免有错误和不妥之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2008年10月于四川大学

# 目 录

<b>第一章 质点的运动</b> .....	1
§ 1.1 质点运动的描述 .....	1
1.1.1 参考系 质点 .....	1
1.1.2 位置矢量 位移 .....	2
1.1.3 速度 速率 .....	3
1.1.4 加速度 .....	4
§ 1.2 质点运动的合成与分解 .....	6
1.2.1 直线运动 .....	6
1.2.2 抛体运动 .....	7
§ 1.3 给定轨道的平面曲线运动 .....	10
1.3.1 自然坐标 切向加速度和法向加速度 .....	10
1.3.2 圆周运动 .....	13
§ 1.4 相对运动 .....	15
习题 .....	18
讨论题 .....	20
<b>第二章 质点的运动定理</b> .....	21
§ 2.1 牛顿运动定律 .....	21
2.1.1 牛顿运动三定律 .....	21
2.1.2 几种常见的力和基本力 .....	23
2.1.3 牛顿运动定律的应用举例 .....	25
2.1.4 伽利略相对性原理 .....	30
2.1.5 非惯性系和惯性力 .....	31
§ 2.2 质点的动量定理 .....	38
2.2.1 力的时间积累效应——冲量 .....	38
2.2.2 质点的动量定理 .....	38
§ 2.3 质点的动能定理 .....	42
2.3.1 力的空间积累效应——功 .....	42
2.3.2 质点的动能定理 .....	43
§ 2.4 质点的角动量定理 .....	46
2.4.1 力矩与角动量 .....	46

2.4.2 角动量定理与角动量守恒 .....	48
* 2.4.3 开普勒三定律 .....	50
习题 .....	52
讨论题 .....	55
<b>第三章 质点系的运动定理</b> .....	<b>57</b>
§ 3.1 质心 质心运动定理 .....	57
3.1.1 质心 .....	57
3.1.2 质心运动定理 .....	60
§ 3.2 质点系的动量定理和动量守恒 .....	62
3.2.1 质点系的动量 .....	62
3.2.2 质点系的动量定理 动量守恒 .....	62
3.2.3 变质量问题举例 .....	65
§ 3.3 质点系的动能定理和机械能守恒 .....	67
3.3.1 质点系的动能 质点系的动能定理 .....	67
3.3.2 一对内力的功 .....	70
3.3.3 保守力的功 势能 .....	71
3.3.4 机械能守恒 .....	75
3.3.5 两体碰撞 .....	76
§ 3.4 质点系的角动量定理和角动量守恒 .....	79
3.4.1 质点系的角动量定理 .....	79
3.4.2 质点系的角动量守恒 .....	80
* § 3.5 有心力作用下的运动 .....	81
习题 .....	86
讨论题 .....	88
<b>第四章 刚体的转动</b> .....	<b>90</b>
§ 4.1 刚体的运动 .....	90
§ 4.2 刚体定轴转动的描述 .....	91
§ 4.3 刚体定轴转动的角动量 转动惯量 .....	93
4.3.1 刚体定轴转动的角动量 .....	93
4.3.2 转动惯量的计算 .....	93
§ 4.4 刚体定轴转动的转动定律 .....	99
§ 4.5 刚体定轴转动的角动量定理和角动量守恒 .....	101
§ 4.6 刚体定轴转动中的功能关系 .....	104
4.6.1 刚体定轴转动的动能 .....	104
4.6.2 力矩的功 .....	104

4.6.3 定轴转动的动能定理 .....	105
§ 4.7 刚体定轴转动的势能和机械能守恒 .....	106
* § 4.8 进动 .....	109
* § 4.9 刚体的平面平行运动 .....	111
习题 .....	113
讨论题 .....	117
<b>第五章 真空中的静电场</b> .....	<b>118</b>
§ 5.1 库仑定律 .....	118
5.1.1 电荷 .....	118
5.1.2 库仑定律 .....	119
§ 5.2 静电场 电场强度 .....	122
5.2.1 电场 电场强度 .....	122
5.2.2 电场强度的叠加原理 .....	122
5.2.3 电场强度的计算 .....	123
5.2.4 匀强电场对电偶极子的作用 .....	131
§ 5.3 高斯定理 .....	132
5.3.1 电场线 .....	132
5.3.2 电场强度通量 .....	132
5.3.3 电场的高斯定理 .....	135
5.3.4 高斯定理的应用 .....	138
§ 5.4 电势 .....	142
5.4.1 静电场力做功 静电场的环路定理 .....	142
5.4.2 电势差和电势 .....	143
5.4.3 电势的计算 .....	145
5.4.4 等势面 电势梯度 .....	149
习题 .....	153
讨论题 .....	158
<b>第六章 静电场中的导体和电介质</b> .....	<b>160</b>
§ 6.1 静电场中的导体 .....	160
6.1.1 导体的静电平衡 .....	160
6.1.2 静电平衡导体上的电荷分布 .....	161
6.1.3 封闭导体空腔内外的电场 静电屏蔽 .....	164
* 6.1.4 静电场边值问题的唯一性定理 .....	170
§ 6.2 电容和电容器 .....	173
6.2.1 孤立导体的电容 .....	173



6.2.2	电容器及其电容 .....	173
6.2.3	电容器的连接 .....	176
§ 6.3	静电场中的电介质 .....	177
6.3.1	电介质 电介质的极化 .....	177
6.3.2	极化强度与极化电荷 .....	179
6.3.3	电介质的极化规律 .....	180
6.3.4	有电介质存在时的高斯定理 .....	180
* § 6.4	静电场的边界条件 .....	184
§ 6.5	带电体系的静电能 .....	186
6.5.1	点电荷系的相互作用能 .....	186
6.5.2	电容器的电能 .....	187
6.5.3	电荷连续分布时的静电能 .....	188
6.5.4	静电场的能量 .....	189
	习题 .....	193
	讨论题 .....	197
<b>第七章</b>	<b>恒定电流与恒定磁场 .....</b>	<b>198</b>
§ 7.1	恒定电流 .....	198
7.1.1	电流 电流的连续性方程 .....	198
7.1.2	欧姆定律 焦耳定律 .....	200
7.1.3	电源电动势和全电路欧姆定律 .....	201
§ 7.2	磁场 磁感应强度 .....	207
7.2.1	磁现象与磁场 .....	207
7.2.2	磁感应强度 .....	207
§ 7.3	毕奥-萨伐尔定律 .....	209
7.3.1	毕奥-萨伐尔定律 .....	209
7.3.2	毕奥-萨伐尔定律的应用 .....	210
* 7.3.3	运动电荷产生的磁场 .....	213
§ 7.4	磁场的高斯定理和安培环路定理 .....	214
7.4.1	磁场的高斯定理 .....	214
7.4.2	磁场的安培环路定理 .....	216
7.4.3	安培环路定理的应用 .....	217
7.4.4	位移电流与全电流 .....	221
§ 7.5	安培力与洛伦兹力 .....	224
7.5.1	安培力 .....	224
7.5.2	带电粒子在磁场中的运动 .....	231

§ 7.6 磁介质 .....	237
7.6.1 磁介质的磁化 .....	237
7.6.2 磁介质中的高斯定理和安培环路定理 .....	242
7.6.3 铁磁质 .....	245
* 7.6.4 磁场的边界条件和磁屏蔽 .....	248
习题 .....	250
讨论题 .....	258
<b>第八章 电磁感应 电磁场基本规律 .....</b>	<b>259</b>
§ 8.1 法拉第电磁感应定律 .....	259
8.1.1 电磁感应现象 .....	259
8.1.2 楞次定律 .....	261
8.1.3 法拉第电磁感应定律 .....	263
§ 8.2 动生电动势 感生电动势 涡旋场 .....	266
8.2.1 动生电动势 .....	266
8.2.2 感生电动势 感应电场的性质 .....	271
8.2.3 电磁感应的应用举例 .....	274
§ 8.3 自感与互感 .....	278
8.3.1 自感现象与自感系数 .....	278
8.3.2 互感现象与互感系数 .....	280
§ 8.4 电感和电容的暂态过程 .....	282
8.4.1 $RL$ 电路中的暂态过程 .....	282
8.4.2 $RC$ 电路中的暂态过程 .....	283
§ 8.5 磁场的能量 .....	286
§ 8.6 麦克斯韦方程组 .....	288
习题 .....	290
讨论题 .....	295
<b>附录一 单位制与量纲 .....</b>	<b>296</b>
<b>附录二 矢量的基本运算 .....</b>	<b>298</b>
<b>习题答案 .....</b>	<b>304</b>
<b>中英文名词对照表 .....</b>	<b>313</b>

# 第一章 质点的运动

本章首先介绍了经典时空的概念和参考系;其后介绍了描述质点运动状态的基本量:位置矢量、速度矢量及加速度矢量,分别在直角坐标系和自然坐标系下给出了质点运动的描述;最后讨论了质点的运动学方程.

运动是物质世界基本的存在方式.机械运动是最基本、最直观的运动形式,机械运动是其他运动的基础.力学的任务就是描述和分析宏观物体的机械运动规律,说明定量描述物体运动的方法,研究物体发生各种运动的原因,给出物体运动的普遍物理规律.

机械运动是指宏观物体的空间位置随时间发生改变.任何物体的运动都是在时间、空间中进行的,空间反映了物质的广延性,它给出了物体的体积和位置及其变化的概念,时间反映了物理过程的顺序和持续性.在经典物理中,空间是均匀、各向同性的,时间是均匀、单向流逝的,空间和时间各自独立地变化.

## § 1.1 质点运动的描述

### 1.1.1 参考系 质点

自然界中的运动是绝对的,而对运动的描述是相对的.描述物体运动时选作标准的物体称为参考系.参考系的选择是任意的,选择不同的参考系,对研究对象运动的描述是不同的.在选定的参考系中,建立适当的时空坐标系,质点的运动便可以定量描述.本书主要涉及的坐标系为直角坐标系和自然坐标系.

任何物体都有一定的大小和形状,而且物体在运动时,内部各个点的位置变化也各不相同.在物理上为了便于对物体运动作定量的精确研究,往往把研究对象模型化.研究物体运动的一个理想化模型是质点.质点是指其大小和形状均可以忽略的有质量的点.在两种情形下,物体的运动可当成质点来处理:①当物体做非旋转的平动时,可以用一个点代表整个物体的运动情况;②当物体的几何尺寸与所关注的空间尺度相比很小时,可将整个物体看成一点来处理.一个物体可否抽象为一个质点,应当根据问题的实际情况而定.例如在研究星体在太空中相对于太阳的运动时,星体可视为质点;而讨论星体的自转和运动形态时,星体就不能视作质点,必须考虑物体的质量分布和方位了.

## 1.1.2 位置矢量 位移

### 一、位置矢量 质点的运动方程

为描述质点在  $t$  时刻的空间位置, 首先应在参考系中建立适当的坐标系. 在如图 1.1-1 的直角坐标系中, 从坐标系原点  $O$  到  $t$  时刻质点位置  $P$  引出的矢量  $\boldsymbol{r}$ , 称为  $P$  点的位置矢量, 简称位矢或径矢.

当质点运动时, 位矢  $\boldsymbol{r}$  是时间  $t$  的函数, 可表示为

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \quad (1.1-1)$$

上式称为质点的运动方程, 其直角坐标分量为

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \quad (1.1-2)$$

质点在空间所经历的路径称为轨道. 质点的运动轨道是直线时, 称为直线运动; 质点的运动轨道是曲线时, 称为曲线运动. (1.1-2) 式是轨道参数方程, 消去时间  $t$  后得到质点运动的轨道方程:

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

另一方面, 质点的运动可视为沿直角坐标轴的三个分运动的合成, 有

$$\boldsymbol{r}(t) = x(t)\boldsymbol{i} + y(t)\boldsymbol{j} + z(t)\boldsymbol{k} \quad (1.1-3)$$

位矢  $\boldsymbol{r}$  的大小为

$$r = |\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.1-4)$$

$\boldsymbol{r}$  与  $x, y, z$  三个坐标轴的夹角称为方位角, 如图 1.1-1 中的  $\alpha, \beta, \gamma$ , 故  $\boldsymbol{r}$  的方向可由方位角的余弦(方向余弦)来确定:

$$\cos \alpha = \frac{x}{|\boldsymbol{r}|}, \quad \cos \beta = \frac{y}{|\boldsymbol{r}|}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{|\boldsymbol{r}|} \quad (1.1-5)$$

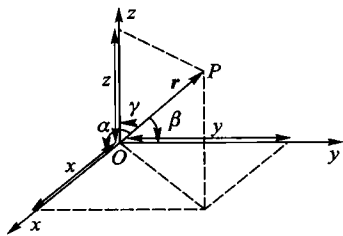


图 1.1-1 质点的位置矢量

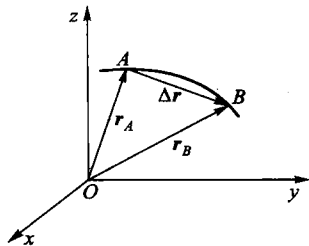


图 1.1-2 质点的位移

### 二、位移

设质点沿轨道  $AB$  做曲线运动, 如图 1.1-2 所示. 在时刻  $t_1$ , 质点在  $A$  处, 其位矢为  $\boldsymbol{r}_A$ ; 在时刻  $t_2$ , 质点运动到  $B$  处, 其位矢为  $\boldsymbol{r}_B$ . 于是, 质点在时间间隔  $\Delta t = t_2 - t_1$  内的位置变化, 可以用从  $A$  到  $B$  的矢量  $\Delta \boldsymbol{r}$  来表示, 即

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A \quad (1.1-6)$$

$\Delta \mathbf{r}$  称为位移,它是位矢  $\mathbf{r}$  的增量.  $\Delta \mathbf{r}$  与参考点  $O$  的选择无关. 在直角坐标系中,位移可写为

$$\Delta \mathbf{r} = (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j} + (z_B - z_A)\mathbf{k} \quad (1.1-7)$$

位移  $\Delta \mathbf{r}$  反映的是质点在时间  $\Delta t$  内位置的变化,不代表质点在该段时间内的实际路程,因此位移和路程是两个完全不同的概念. 用  $\Delta s = \widehat{AB}$  表示在  $\Delta t$  时间内质点沿轨迹所走过的路程,一般情况下  $\Delta s \neq |\Delta \mathbf{r}|$ . 当一质点经历一个闭合路径回到原来的初始位置,其位移为零,而路程却不为零,即  $|\Delta \mathbf{r}| = 0, \Delta s \neq 0$ . 只有在  $\Delta t \rightarrow 0$  的极限情况下,元位移的大小  $|\mathrm{d}\mathbf{r}|$  才等于元路程  $\mathrm{d}s$ .

### 1.1.3 速度 速率

在图 1.1-3 中,若质点在  $\Delta t$  时间内,完成了位移  $\Delta \mathbf{r}$ ,那么为了说明质点位置改变的快慢和方向,需考察质点的位移  $\Delta \mathbf{r}$  与经过的时间  $\Delta t$  的比值  $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ . 定义质点的位矢在  $\Delta t$  时间内的平均变化率为平均速度  $\bar{\mathbf{v}}$ ,即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.1-8)$$

平均速度是矢量,其方向与位移方向一致. 当  $\Delta t \rightarrow 0$  时,得到平均速度的极限——瞬时速度,简称速度,表示为

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}t} \quad (1.1-9)$$

速度  $\mathbf{v}$  是位矢  $\mathbf{r}$  的时间变化率,是既有大小又有方向的矢量,即速度  $\mathbf{v}$  等于位矢  $\mathbf{r}$  对时间的一阶导数;速度的方向为  $\Delta t \rightarrow 0$  时位移  $\Delta \mathbf{r}$  的极限方向,即沿运动轨道的切线方向指向运动的前方,如图 1.1-3 所示.

由(1.1-3)式和(1.1-9)式,可知在直角坐标系中,质点的速度  $\mathbf{v}$  可以表示为

$$\mathbf{v} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\mathbf{i} + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\mathbf{j} + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\mathbf{k} \quad (1.1-10)$$

可以认为,速度矢量  $\mathbf{v}$  可以分解为三个速度分量  $v_x, v_y, v_z$ ,有

$$v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}, v_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}, v_z = \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$$

也可以认为,速度矢量  $\mathbf{v}$  是沿  $x, y, z$  三个坐标轴方向的速度分量  $v_x, v_y, v_z$  的合成,如图 1.1-4 所示,即

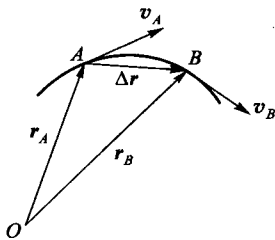


图 1.1-3 质点的速度

$$\boldsymbol{v} = v_x \boldsymbol{i} + v_y \boldsymbol{j} + v_z \boldsymbol{k} \quad (1.1-11)$$

速度的大小为

$$|\boldsymbol{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.1-12)$$

在国际单位制(SI)中,速度的单位为 m/s.

常用速率描述质点运动的快慢,速率为一个标量,定义为单位时间内质点所经历的路程,即

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (1.1-13)$$

速率  $v$  等于路程  $s$  对时间的一阶导数. 在  $\Delta t \rightarrow$

0 的情况下,路程  $\Delta s$  的元路程  $ds = |d\boldsymbol{r}|$ , 于是速率为速度的大小, 即

$$v = |\boldsymbol{v}| = \frac{ds}{dt} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

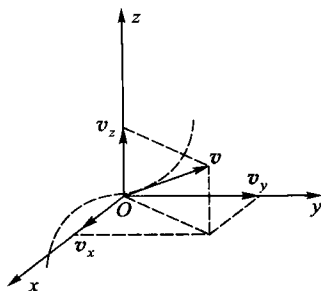


图 1.1-4 速度的分解

### 1.1.4 加速度

质点做曲线运动的过程中,速度的大小和方向随时间在改变,速度的变化情况用加速度表示. 如图 1.1-5 所示,时刻  $t$ ,质点在  $A$  处,其速度为  $\boldsymbol{v}_A$ ;时刻  $t+\Delta t$ ,质点运动到  $B$  处,其速度为  $\boldsymbol{v}_B$ . 速度矢量的变化为  $\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A$ . 那么,质点在时间间隔  $\Delta t$  内,速度的平均变化率为平均加速度,即

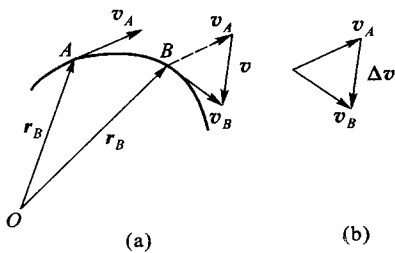


图 1.1-5 质点速度的改变

$$\boldsymbol{a} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} \quad (1.1-14)$$

在  $\Delta t \rightarrow 0$  时,平均加速度的极限为质点在时刻  $t$  或某位置的瞬时加速度,它精确地描述质点在任意时刻(或位置)的速度变化率,等于速度  $\boldsymbol{v}$  对时间的一阶导数:

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} \quad (1.1-15)$$

或等于位矢  $\boldsymbol{r}$  对时间的二阶导数:

$$\boldsymbol{a} = \frac{d^2 \boldsymbol{r}}{dt^2} \quad (1.1-16)$$

加速度是矢量,其方向就是  $\Delta t \rightarrow 0$  时,速度增量  $\Delta \boldsymbol{v}$  的极限方向. 在一般情况下,  $\boldsymbol{v}$  与  $\Delta \boldsymbol{v}$  的极限方向不同,即在  $t$  时刻,加速度  $\boldsymbol{a}$  的方向与速度  $\boldsymbol{v}$  的方向不一致. 质点速率增加时,  $\boldsymbol{a}$  的方向与速度  $\boldsymbol{v}$  的方向成锐角; 质点速率减少时,  $\boldsymbol{a}$  的方向与速度  $\boldsymbol{v}$  的方向成钝角; 若质点速率不变, 则  $\boldsymbol{a}$  的方向与速度  $\boldsymbol{v}$  的方向成直角. 例如行星绕太阳运动的轨迹是椭圆, 太阳处于椭圆的一个焦点上, 行星的加速度  $\boldsymbol{a}$  总是指向太阳. 在图 1.1-6(a) 中, 当行星的位置在  $A$  点时, 行星的速度与加速度之间的夹角是锐角,  $\theta_A < \pi/2$ , 行星的速率是在增加; 当行星的位置在  $B$  点时, 行星的速度与加速度之间的夹角为钝角,  $\theta_B > \pi/2$ , 行星的速率是在减少; 图 1.1-6(b) 中, 做圆周运动的物体, 其速度与加速度  $\boldsymbol{a}_n$  始终垂直.

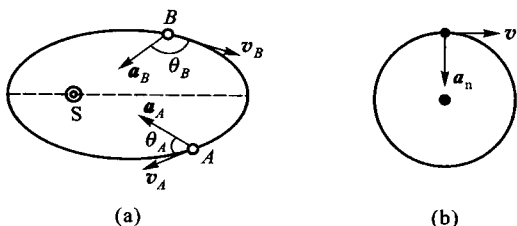


图 1.1-6 曲线运动中加速度与速度的方向

在直角坐标系中,加速度的三个分量  $a_x$ 、 $a_y$ 、 $a_z$  分别是

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} \\ a_y &= \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} \\ a_z &= \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2} \end{aligned} \quad (1.1-17)$$

加速度矢量可以写作

$$\boldsymbol{a} = a_x \boldsymbol{i} + a_y \boldsymbol{j} + a_z \boldsymbol{k} = \frac{dv_x}{dt} \boldsymbol{i} + \frac{dv_y}{dt} \boldsymbol{j} + \frac{dv_z}{dt} \boldsymbol{k} \quad (1.1-18)$$

加速度的大小为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1.1-19)$$

在国际单位制中,加速度的单位为  $\text{m/s}^2$ .

**例 1.1-1** 一质点的运动方程可表示为  $\boldsymbol{r}(t) = 3t\boldsymbol{i} + (6-2t^2)\boldsymbol{j}$  (SI), 求:

- (1)  $t=0$  和  $t=2$  s 时质点的速度和加速度;  
 (2) 该质点的运动轨迹.

解:(1) 由运动方程  $\boldsymbol{r}(t) = 3t\boldsymbol{i} + (6-2t^2)\boldsymbol{j}$  可得速度与加速度分别为

$$\boldsymbol{v}(t) = \frac{d\boldsymbol{r}(t)}{dt} = \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} = 3\boldsymbol{i} - 4t\boldsymbol{j}$$

$$\boldsymbol{a}(t) = \frac{d^2\boldsymbol{r}(t)}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2}\boldsymbol{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\boldsymbol{j} = -4\boldsymbol{j}$$

将  $t=0$  和  $t=2$  分别代入上式有

$$\boldsymbol{v}|_{t=0} = 3\boldsymbol{i}, \quad \boldsymbol{v}|_{t=2} = 3\boldsymbol{i} - 8\boldsymbol{j}$$

$$\boldsymbol{a}|_{t=0} = -4\boldsymbol{j}, \quad \boldsymbol{a}|_{t=2} = -4\boldsymbol{j}$$

- (2) 由已知可得运动方程的分量式为

$$x(t) = 3t$$

$$y(t) = 6 - 2t^2$$

消去运动方程中的参数  $t$ , 得轨道方程:  $9y = -2x^2 + 54$ .

## § 1.2 质点运动的合成与分解

实验事实表明,若质点同时参与两个或以上的运动时,其总的运动效果是由各个分运动的合成得到的,各个分运动彼此独立,互不干扰.这就是质点运动的叠加原理.该原理说明了质点运动的独立性和可叠加性.反过来,质点的运动,特别是较为复杂的运动,分析时可以按实际情况将其分解为几个分运动.运动的合成与分解遵从平行四边形定则,分运动的基本形式是直线运动.

### 1.2.1 直线运动

当质点的运动只在一条直线上,这个运动只涉及一个维度的空间变化,运动的量均能在—维坐标上以标量表示其大小和变化.假设运动直线与  $x$  轴重合,选定坐标原点  $O$ ,—维运动的运动方程为

$$x = x(t) \tag{1.2-1}$$

瞬时速度和瞬时加速度分别为

$$v = \frac{dx}{dt} \tag{1.2-2}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \tag{1.2-3}$$

其正负分别表明指向  $x$  轴的正方向和负方向.在直线运动中,从质点位置  $x$  随时间  $t$  的函数变化关系,可得到质点的速度和加速度.

若质点以恒定加速度  $a$  做直线运动,由(1.2-3)式可以得到



$$dv = a dt$$

假设在  $t=0$  时刻, 质点的位置为  $x(0) = x_0$ , 质点的速度为  $v(0) = v_0$ ; 在任一时刻  $t$ , 质点的位置为  $x$ , 质点的速度为  $v$ , 那么将上式积分:

$$\int_{v_0}^v dv = \int_0^t a dt$$

有

$$v - v_0 = at \quad \text{或} \quad v = v_0 + at$$

由(1.2-2)式有

$$dx = v dt$$

从  $t=0$  到时刻  $t$  的一段有限长的时间间隔内, 质点的位移为

$$x - x_0 = \int_0^t v dt = \int_0^t (v_0 + at) dt$$

故

$$x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

或

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

从而得到匀加速直线运动的位置  $x$  与时间  $t$  的关系, 此即匀加速直线运动的运动方程.

再由(1.2-3)式, 有

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v \frac{dv}{dx}$$

则有

$$v dv = a dx$$

对等式两端积分

$$\int_{v_0}^v v dv = \int_{x_0}^x a dx$$

得匀加速直线运动质点的位置与速度的关系式:

$$\frac{1}{2} (v^2 - v_0^2) = a(x - x_0) \quad \text{或} \quad v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$

### 1.2.2 抛体运动

从地面上某点以一定的抛射角  $\theta$  和初速度  $v_0$  向空中抛出一个物体, 它在空中的运动就叫抛体运动. 抛体运动是最常见的一种平面曲线运动. 在地球表面附近不太大的范围内, 抛体的重力加速度  $g$  可视为常量. 在研究抛体运动时, 忽略