



21世纪高等学校规划教材

大学物理 简明教程

主 编 赵近芳 王登龙

主 审 张承琚

(第2版)

DAXUE WULI

JIANMING JIAOCHENG



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



21 世纪高等学校规划教材

大学物理简明教程

(第 2 版)

主 编 赵近芳 王登龙

主 审 张承璐

北京邮电大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书依据 2010 年教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》的精神,考虑到国内高校目前许多专业对少学时教材的需要,在总结多年教材改革实践的基础上,吸取国内外优秀教材的精华编写而成。

全书包含力学、热学、电磁学、波动与光学及近代物理基础,共 5 篇。

本书可作为高等工科院校、农林院校等各专业的物理教材,也可作为综合大学和师范院校非物理专业的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理简明教程/赵近芳,王登龙主编. —2 版. -- 北京:北京邮电大学出版社,2013. 1(2013. 11 重印)
ISBN 978-7-5635-3382-4

I. ①大… II. ①赵… ②王… 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 316415 号

书 名 大学物理简明教程(第 2 版)
主 编 赵近芳 王登龙
责任编辑 唐咸荣
出版发行 北京邮电大学出版社
社 址 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真 010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址 www.buptpress3.com
电子信箱 ctrd@buptpress.com
经 销 各地新华书店
印 刷 北京联兴华印刷厂
开 本 787 mm×960 mm 1/16
印 张 24
字 数 513 千字
版 次 2013 年 1 月第 2 版 2013 年 11 月第 4 次印刷

ISBN 978-7-5635-3382-4

定价: 42.00 元

如有质量问题请与发行部联系
版权所有 侵权必究

前 言

物理学是一切自然科学的基础,处于诸多自然科学学科的核心地位.物理学研究的粒子和原子构成了蛋白质、基因、器官、生物体,构成了一切天然的和人造的物质以及广袤的陆地、海洋、大气,甚至整个宇宙.因此,物理学是化学、生物、材料科学、地球物理和天体物理等学科的基础.今天,物理学和这些学科之间的边缘领域中又形成了一系列分支学科和交叉学科,如粒子物理、核物理、凝聚态物理、原子分子物理、电子物理、生物物理等.这些学科都取得了引人瞩目的成就.

物理学的发展,广泛而直接地推动着技术的革命和社会的文明.18世纪60年代开始的第一次技术革命以蒸汽机应用为标志,它是牛顿力学和热力学发展的结果.19世纪70年代开始的第二次技术革命以电力的广泛应用和无线电通信为标志,它是电磁学发展的结果.20世纪40年代兴起的并一直延续至今的第三次技术革命是相对论和量子论发展的结果.事实证明,几乎所有重大的新技术领域学科(如电子学、原子能、激光和信息技术等)的创立,事前都在物理学中经过长期的酝酿、在理论和实验两方面积累了大量知识后,才突然迸发出来的.物理学是科技生产力发展的不竭源泉.

目前,整个世界正面临着以信息、能源、材料、生物工程和空间技术等为核心的一场新技术革命.在这些高科技领域中必将层出不穷地涌现人们今天尚不知道的一系列新技术和新产品.物理学以其最广泛和最基本的内容正成为各个新兴学科的先导.

大学物理课程是理工科大学学生一门重要的基础课,对于非物理专业的读者来说,在今后可能不会直接运用物理学的定律和公式去解决工作中的问题,但是我们相信读者在今后的工作和生活当中,都将会从所学到的物理学知识及物理学研究方法中得到益处、受到启迪,甚至激发出灵感.考虑到学时较少的特点,教材叙述尽量简明扼要,难度适中.其中打*号的内容,视专业需要和学时多少可由任课老师自行取舍.

本书由王凤姣编写流体静力学之外的全部力学部分和振动与波,杨友田编写热学、近代物理基础,谢月娥编写电磁学,王登龙编写流体静力学、波动光学,最后由赵近芳教授和王登龙教授负责全书的修改和定稿工作.张承琚教授对本书进行了审稿,提出了许多宝贵意见.在编写过程中,许多学校的老师提出了一些建议和要求,尤其是得到了北京航空航天大学、北京邮电大学、厦门大学、华南理工大学、武汉理工大学、中北大学、江汉大学、中南大学、湖南大学、湘潭大学、南华大学、长沙理工大学、中南林业大学等学校老师的帮助和指导.北京邮电大学出版社有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量的劳动,在此一并致谢.

由于编者水平有限,不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正,以便再版时改进.

编 者

第一篇 力学基础

第 1 章 质点运动学	2
§ 1.1 参考系 坐标系 物理模型	2
§ 1.2 位矢、位移、速度及加速度	4
§ 1.3 曲线运动的描述	9
§ 1.4 运动学中的两类问题	13
§ 1.5 相对运动	14
本章提要	17
习题 1	18
第 2 章 质点动力学	20
§ 2.1 牛顿运动定律	20
§ 2.2 动量 动量守恒定律	26
§ 2.3 功 动能 势能 机械能守恒定律	30
§ 2.4 角动量 角动量守恒定律	40
本章提要	43
习题 2	44
第 3 章 刚体力学基础	46
§ 3.1 刚体 刚体定轴转动的描述	46
§ 3.2 刚体定轴转动的转动定律	49
§ 3.3 刚体定轴转动的动能定理	53
§ 3.4 刚体定轴转动的角动量定理和角动量守恒定律	55
本章提要	60
习题 3	61
第 4 章 流体力学	63
§ 4.1 流体静力学	63
§ 4.2 理想流体的稳定流动	67

§ 4.3 伯努利方程	69
§ 4.4 伯努利方程和连续性方程的应用	70
§ 4.5 液体的黏滞性 层流	74
本章提要	77
习题 4	78

第二篇 气体动理论和热力学

第 5 章 气体动理论基础	81
§ 5.1 平衡态 温度 理想气体状态方程	81
§ 5.2 理想气体的压强和温度	84
§ 5.3 能量均分定理 理想气体的内能	88
*§ 5.4 麦克斯韦分子速率分布定律	91
*§ 5.5 分子平均碰撞频率和平均自由程	96
本章提要	99
习题 5	100
第 6 章 热力学基础	102
§ 6.1 热力学第一定律	102
§ 6.2 理想气体等值过程和绝热过程	105
§ 6.3 循环过程	113
§ 6.4 热力学第二定律	118
§ 6.5 熵 熵增加原理	122
*§ 6.6 热力学第二定律的统计意义 玻耳兹曼熵	128
本章提要	130
习题 6	131

第三篇 电磁学

第 7 章 静电场	135
§ 7.1 电场 电场强度	135
§ 7.2 电通量 高斯定理	142
§ 7.3 电场力的功 电势	147
§ 7.4 静电场中的导体和电介质	153
§ 7.5 电容 电容器	159
§ 7.6 电场的能量	161
本章提要	163
习题 7	165

第 8 章 稳恒磁场	168
§ 8.1 电流 电动势	168
§ 8.2 磁场 磁感应强度	170
§ 8.3 安培环路定理	178
§ 8.4 磁场对载流导线的作用	182
§ 8.5 磁场对运动电荷的作用	187
§ 8.6 磁介质	191
本章提要	198
习题 8	199
第 9 章 电磁感应与电磁场	202
§ 9.1 电磁感应定律	202
§ 9.2 动生电动势与感生电动势	205
§ 9.3 自感应与互感应	208
§ 9.4 磁场能量	211
*§ 9.5 麦克斯韦电磁场理论简介	212
本章提要	217
习题 9	218

第四篇 波动与光学

第 10 章 机械振动	221
§ 10.1 简谐振动的动力学特征	221
§ 10.2 简谐振动的运动学	224
§ 10.3 简谐振动的能量	229
§ 10.4 简谐振动的合成	231
本章提要	235
习题 10	236
第 11 章 机械波	238
§ 11.1 机械波的形成和传播	238
§ 11.2 平面简谐波的波函数	243
§ 11.3 波的能量	248
§ 11.4 惠更斯原理 波的叠加和干涉	251
§ 11.5 驻波	256
本章提要	260
习题 11	261

第 12 章 波动光学	263
§ 12.1 杨氏双缝干涉	263
§ 12.2 薄膜干涉	271
§ 12.3 光的衍射	279
§ 12.4 光栅衍射	285
§ 12.5 光的偏振	289
本章提要	296
习题 12	299

第五篇 近代物理基础

第 13 章 狭义相对论	302
§ 13.1 伽利略变换 力学相对性原理	302
§ 13.2 狭义相对论基本原理 洛伦兹变换	304
§ 13.3 狭义相对论时空观	308
*§ 13.4 相对论动力学的基本结论	313
本章提要	316
习题 13	318
第 14 章 量子物理基础	319
§ 14.1 黑体辐射 普朗克量子假说	319
§ 14.2 光的量子性	322
§ 14.3 玻尔的氢原子理论	328
§ 14.4 粒子的波动性	334
§ 14.5 测不准关系	336
§ 14.6 波函数 薛定谔方程	338
§ 14.7 电子自旋 原子的壳层结构	341
本章提要	345
习题 14	347
附录 I 矢量	349
附录 II 国际单位制(SI)	357
附录 III 常用基本物理常量表	359
附录 IV 物理量的名称、符号和单位(SI)一览表	360
附录 V 空气、水、地球、太阳系一些常用数据	363
附录 VI 历年诺贝尔物理学奖获得者	364
习题答案	371

第一篇 力学基础

力学是物理学中最古老和发展最完美的学科. 它起源于公元前 4 世纪古希腊学者亚里士多德关于力产生运动的说法, 以及我国《墨经》中关于杠杆原理的论述等; 但其成为一门科学理论则始于 17 世纪伽利略论述惯性运动及牛顿提出的力学三个运动定律. 以牛顿运动定律为基础的力学理论称为牛顿力学或经典力学. 它所研究的对象是物体的机械运动. 经典力学有严谨的理论体系和完备的研究方法, 如观察现象、分析和综合实验结果、建立物理模型、运用数学表述、作出推论和预言, 以及用实践检验和校正结果等. 因此, 它曾被人们誉为完美普遍的理论而兴盛了约 300 年. 直至 20 世纪初才发现它在高速和微观领域的局限性, 从而在这两个领域分别被相对论和量子力学所取代. 但在一般的技术领域, 如机械制造、土木建筑、水利设施、航空航天等工程技术中, 经典力学仍然是必不可少的重要的基础理论.

本篇主要讲述质点力学、刚体力学和流体力学, 着重阐明动量、角动量和能量诸概念及相应的守恒定律.

第1章 质点运动学

力学所研究的是物体机械运动的规律. 宏观物体之间(或物体各部分之间)相对位置的变动称为机械运动. 在经典力学中, 通常将力学分为运动学、动力学和静力学. 本章只研究运动学规律. 运动学是从几何的观点来描述物体的运动, 即研究物体的空间位置随时间的变化关系, 不涉及引发物体运动和改变运动状态的原因.

§ 1.1 参考系 坐标系 物理模型

为了描述物体的运动必须作三点准备, 即选择参考系、建立坐标系、提出物理模型.

一、运动的绝对性和相对性

众所周知, 运动是物质的存在形式, 运动是物质的固有属性. 从这种意义上讲, 运动是绝对的. 但我们所讨论的运动, 还不是这种哲学意义上的广义运动. 即使以机械运动形式而言, 任何物体在任何时刻都在不停地运动着. 例如, 地球就在自转的同时绕太阳公转, 太阳又相对于银河系中心以大约 $250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率运动, 而我们所处的银河系又相对于其他银河系大约以 $600 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率运动着. 总之, 绝对不运动的物体是不存在的.

然而运动又是相对的. 因为我们所研究的物体的运动, 都是在一定的环境和特定的条件下运动. 例如, 当我们说一列火车开动了, 这显然是指火车相对于地球(即车站)而言的, 因此离开特定的环境、特定的条件谈论运动没有任何意义. 正如恩格斯所说:“单个物体的运动是不存在的——只有在相对的意义下才可以谈运动.”

二、参考系

运动是绝对的, 但运动的描述却是相对的; 因此, 在确定研究对象的位置时, 必须先选定一个标准物体(或相对静止的几个物体)作为基准, 那么这个被选作标准的物体或物体群, 就称为参考系.

同一物体的运动, 由于我们所选参考系不同, 对其运动的描述就会不同. 例如在匀速直

线运动的车厢中,物体的自由下落,相对于车厢是作直线运动;相对于地面,却是作抛物线运动;相对于太阳或其他天体,运动的描述则更为复杂.这一事实,充分说明了运动的描述是相对的.

从运动学的角度讲,参考系的选择是任意的,通常以对问题的研究最方便最简单为原则.研究地球上物体的运动,在大多数情况下,以地球为参考系最为方便(以后如不作特别说明,研究地面上物体的运动,都是以地球为参考系).但是,当我们在地球上发射人造“宇宙小天体”时,则应以太阳为参考系.

三、坐标系

要想定量地描述物体的运动,就必须在参考系上建立适当的坐标系.在力学中常用的有直角坐标系.根据需要,我们也可选用极坐标系、自然坐标系、球面坐标系或柱面坐标系等.限于学时,我们基本上只讨论直角坐标系.

总的说来,当参考系选定后,无论选择何种坐标系,物体的运动性质都不会改变.然而,坐标系选择得当,可使计算简化.

四、物理模型

任何一个真实的物理过程都是极其复杂的.为了寻找某过程中最本质、最基本的规律,我们总是根据所提问题(或所要回答的问题),对真实过程进行理想化的简化,然后经过抽象提出一个可供数学描述的物理模型.

现在我们所提的问题是确定物体在空间的位置.若物体的尺度比它运动的空间范围小很多,例如绕太阳公转的地球和调度室中铁路运行图上的列车等;或当物体作平动时,物体上各部分的运动情况(轨迹、速度、加速度)完全相同,这时我们可以忽略物体的形状、大小而把它看成一个具有一定质量的几何点,并称之为质点.

若物体的运动在上述两种情形之外,我们还可推出质点系的概念.即把这个物体看成是由许许多多满足第一种情况的质点所组成的系统.当我们把组成这个物体的各个质点的运动情况弄清楚了,也就描述了整个物体的运动.

综上所述:选择合适的参考系,以方便确定物体的运动性质;建立恰当的坐标系,以定量地描述物体的运动;提出较准确的物理模型,以确定所提问题最基本的运动规律.

* 五、国际单位制和量纲

各国使用的单位制种类繁多.就力学而言,常用的就有国际单位制,厘米、克、秒制和工程单位制……这给国际科学技术交流带来很大不便.为此在第十四届国际计量会议上选择了7个物理量为基本量,规定了相应单位为基本单位,在此基础上建立了国际单位制(SI).我国国务院在1984年把国际单位制的单位定为法定计量单位.

国际单位制的7个基本量为长度、质量、时间、电流、温度、物质的量和发光强度,其相应的单位见书后

附录 II.

有了基本单位,通过物理量的定义或物理定律就可导出其他物理量的单位.从基本量导出的量称为导出量,相应的单位称为导出单位.例如速度的国际单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,力的国际单位是 $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ (简称为牛,符号是 N).因为导出量是基本量导出的,所以导出量可用基本量的某种组合(乘、除、幂等)表示.这种由基本量的组合来表示物理量的式子称为该物理量的量纲式,如果用 L, M 和 T 分别表示长度、质量和时间,则力学中其他物理量的量纲式可表示为

$$[Q] = L^p M^q T^r.$$

例如,在国际单位制中力的量纲式为

$$[F] = LMT^{-2}.$$

量纲式和量纲在物理学中很有用处.只有量纲式相同的量才能相加、相减或用等式相连,这一法则称为量纲法则.所以我们可以用量纲法则进行单位换算;检验新建方程或检验公式的正确性和完整性;还可探索复杂的物理规律提供线索.量纲分析法在科学研究中具有重要作用.

在物理学中,除采用国际单位制以外,基于不同需要,还常用其他一些非法定计量单位.如长度在原子线度和光波中常用“埃”(Å)作单位

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}.$$

在国家标准 GB 3102 中明确指出“推荐使用纳米(nm)”.对于原子核线度,常用“飞米”(fm)作单位.

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}, \quad 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}.$$

在天体物理中,常用“天文单位”和“光年”作长度单位.一天文单位定义为地球和太阳的平均距离,光年是光在一年时间通过的距离,即

$$1 \text{ 天文单位} = 1.496 \times 10^{11} \text{ m},$$

$$1 \text{ 光年} = 9.46 \times 10^{15} \text{ m}.$$

§ 1.2 位矢、位移、速度及加速度

一、位置矢量

为了表示运动质点的位置,首先应该选取参考系,然后在参考系上选定坐标系的原点和坐标轴.图 1-1 中点 P 在直角坐标系中的位置可由 P 所在点的三个坐标 x, y, z 来确定,或者用从原点 O 到 P 点的有向线段 $\vec{OP} = \boldsymbol{r}$ 来表示,矢量 \boldsymbol{r} 叫作位置矢量(简称位矢,又称矢径).相应地,坐标 x, y, z 也就是位矢 \boldsymbol{r} 在坐标轴上的三个分量.

在直角坐标系中,位矢 \boldsymbol{r} 可以表示成

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}, \quad (1-1)$$

式中 $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$ 分别表示沿 x, y, z 轴正方向的单位矢量.位矢 \boldsymbol{r} 的大小为

$$|\boldsymbol{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (1-2)$$

位矢的方向余弦是

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

质点的机械运动是质点的空间位置随时间变化的过程. 这时质点的坐标 x, y, z 和位矢 r 都是时间 t 的函数. 表示运动过程的函数式称为**运动方程**, 可以写成

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1-3a)$$

或

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t). \quad (1-3b)$$

知道了运动方程, 就能确定任一时刻质点的位置, 从而确定质点的运动. 力学的主要任务之一, 正是根据各种问题的具体条件, 求解质点的运动方程.

质点在空间的运动路径称为**轨道**. 质点的运动轨道为直线时, 称为直线运动. 质点的运动轨道为曲线时, 称为曲线运动. 从(1-3a)式中消去 t 即可得到**轨道方程**. (1-3a)式就是轨道的参数方程.

轨道方程和运动方程最明显的区别, 就在于轨道方程不是时间 t 的显函数. 例如, 已知某质点的运动方程为

$$x = 3 \sin \frac{\pi}{6} t, \quad y = 3 \cos \frac{\pi}{6} t, \quad z = 0,$$

式中 t 以 s 计, x, y, z 以 m 计. 从 x, y 两式中消去 t 后, 得轨道方程

$$x^2 + y^2 = 9, \quad z = 0.$$

这表明质点是在 $z=0$ 的平面内, 作以原点为圆心, 半径为 3 m 的圆周运动.

二、位移

如图 1-2 所示, 设质点沿曲线轨道 \widehat{AB} 运动, 在 t 时刻, 质点在 A 处, 在 $t + \Delta t$ 时刻, 质点运动到 B 处. A, B 两点的位矢分别由 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 表示, 质点在 Δt 时间间隔内位矢的增量

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1, \quad (1-4)$$

我们称之为**位移**, 它是描述物体位置变动大小和方向的物理量, 在图 1-2 中就是由起始位置 A 指向终止位置 B 的一个矢量. 位移是矢量, 它的运算遵守矢量加法的平行四边形法则(或三角形法则).

如图 1-3 所示, 位移的模只能记作 $|\Delta \mathbf{r}|$, 不能记作 Δr . Δr 通常表示两个位矢的模的增量, 即 $\Delta r = |\mathbf{r}_2| - |\mathbf{r}_1|$, 而 $|\Delta \mathbf{r}|$ 则是位矢增量的模(即位移的模), 而且在通常情况下 $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta r$.

必须注意, 位移表示物体位置的改变, 并非质点所经历的路程. 例如在图 1-2 中, 位移是有向线段 \overrightarrow{AB} , 它的量值 $|\Delta \mathbf{r}|$ 为割线 AB 的长度. 路程是标量, 即曲线 \widehat{AB} 的长度, 通常记作 Δs . 一般说来, $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta s$. 显然, 只有在 Δt 趋近于零时, 才有 $|\mathrm{d}\mathbf{r}| = \mathrm{d}s$. 应当指出, 即使在

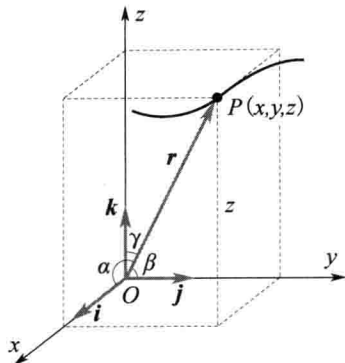


图 1-1 直角坐标系下的位矢

$\Delta t \rightarrow 0$ 时,也没有 $|\mathrm{d}\mathbf{r}| = \mathrm{d}r$ 这个等式成立.

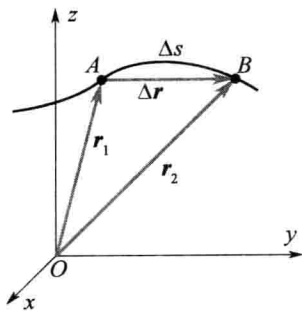


图 1-2 位移

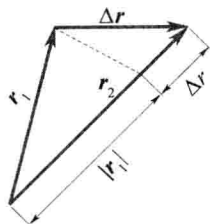


图 1-3 位移的大小

在直角坐标系中,位移的表达式为

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k}, \quad (1-5)$$

位移的模为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (1-6)$$

位移和路程的单位均是长度的单位,国际单位制中为 m.

三、速度

研究质点的运动,不仅要知道质点的位移,还必须知道在多长时间通过这段位移,亦即要知道质点运动的快慢程度.

如图 1-2 所示,在时刻 t 到 $t + \Delta t$ 这段时间内,质点的位移为 $\Delta \mathbf{r}$. 那么 $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 的比值,称为质点在 t 时刻附近 Δt 时间内的平均速度

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\overrightarrow{AB}}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}. \quad (1-7)$$

这就是说,平均速度的方向与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同,平均速度的大小与在相应的时间 Δt 内单位时间的位移大小相同.

显然,用平均速度描述物体的运动是比较粗糙的. 因为在 Δt 时间内,质点各个时刻的运动情况不一定相同,质点的运动可以时快时慢,方向也可以不断改变,平均速度不能反映质点运动的真实细节. 如果我们要精确地知道质点在某时刻或某一位置的实际运动情况,应使 Δt 尽量减小,即 $\Delta t \rightarrow 0$,用平均速度的极限值——瞬时速度(简称速度)来描述.

质点在某时刻或某位置的瞬时速度,等于该时刻附近 Δt 趋近于零时平均速度的极限值,数学表示式为

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}t}. \quad (1-8)$$

可见速度等于位矢对时间的一阶导数.

速度的方向就是 Δt 趋近于零时, 平均速度 $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 或位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向, 即沿质点所在处轨道的切线方向, 并指向质点前进的一方。

速度是矢量, 具有大小和方向. 描述质点运动时, 我们也常采用一个叫作速率的物理量. 速率是标量, 等于质点单位时间内所行经的路程, 而不考虑质点运动的方向. 如图 1-2 所示, 在 Δt 时间内质点所行经的路程为曲线 \widehat{AB} , 设曲线 \widehat{AB} 的长度为 Δs , 那么 Δs 与 Δt 的比值就称为 t 时刻附近 Δt 时间内的平均速率, 即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad (1-9)$$

平均速率与平均速度不能等同看待. 例如, 在某一段时间内, 质点环行了一个闭合路径, 显然质点的位移等于零, 平均速度也为零, 而质点的平均速率则不等于零.

虽然如此, 但在 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限条件下, 曲线 \widehat{AB} 的长度 Δs 与直线 AB 的长度 $|\Delta \mathbf{r}|$ 相等, 即在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $ds = |d\mathbf{r}|$, 所以瞬时速率

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = |\mathbf{v}|, \quad (1-10)$$

即瞬时速率就是瞬时速度的模.

在直角坐标系中, 由(1-1)式可知, 速度可表示成

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k}, \quad (1-11)$$

式中 $v_x = \frac{dx}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt}$, $v_z = \frac{dz}{dt}$ 叫作速度在 x, y, z 轴的分量. 这时速度的模可以表示成

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

速度和速率在量值上都是长度与时间之比, 国际单位制中为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

四、加速度

在力学中, 位矢 \mathbf{r} 和速度 \mathbf{v} 都是描述物体机械运动的状态参量. 即 \mathbf{r} 和 \mathbf{v} 已知, 质点的力学运动状态就确定了. 我们即将引入的加速度概念则是用来描述速度矢量随时间变化的物理量.

在变速运动中, 物体的速度是随时间变化的. 这个变化可以是运动快慢的变化, 也可以是运动方向的变化. 一般情况下速度的方向和大小都在变化. 加速度就是描述质点的速度(大小和方向)随时间变化快慢的物理量. 如图 1-4 所示, \mathbf{v}_A 表示质点在时刻 t 、位置 A 处的速度, \mathbf{v}_B 表示质点在时刻 $t + \Delta t$ 、位置 B 处的速度. 从速度矢量图可以看出, 在时间 Δt 内质点速度的增量为

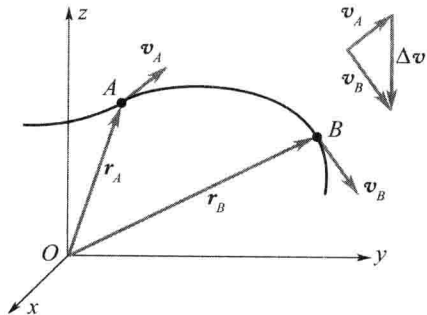


图 1-4 速度的增量

$$\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A.$$

与平均速度的定义相类似, 比值 $\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$ 称为 t 时刻附近 Δt 时间内的平均加速度, 即

$$\bar{\boldsymbol{a}} = \frac{\boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A}{\Delta t} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}. \quad (1-13)$$

平均加速度只是反映在时间 Δt 内速度的平均变化率. 为了准确地描述质点在某一时刻 t (或某一位置处) 的速度变化率, 须引入瞬时加速度.

质点在某一时刻或某位置处的瞬时加速度 (简称加速度) 等于该时刻附近 Δt 趋近于零时平均加速度的极限值, 其数学式为

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2 \boldsymbol{r}}{dt^2}. \quad (1-14)$$

可见, 加速度是速度对时间的一阶导数, 或位矢对时间的二阶导数.

在直角坐标系中, 加速度的表示式为

$$\boldsymbol{a} = \frac{d^2 \boldsymbol{r}}{dt^2} = \frac{d^2 x}{dt^2} \boldsymbol{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \boldsymbol{j} + \frac{d^2 z}{dt^2} \boldsymbol{k} = a_x \boldsymbol{i} + a_y \boldsymbol{j} + a_z \boldsymbol{k}, \quad (1-15)$$

式中 $a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}$, $a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2}$, $a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2}$, 称为加速度在 x, y, z 轴的分量. 加速度的模为

$$a = |\boldsymbol{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}. \quad (1-16)$$

加速度的方向是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 平均加速度 $\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$ 或速度增量的极限方向.

例 1-1

如图 1-5 所示, 一人用绳子拉着小车前进. 小车位于高出绳端 h 的平台上, 人的速度 v_0 不变, 求小车的速度大小与人的位置坐标 ξ 的关系.

解 小车沿直线运动, 以小车前进方向为 x 轴正方向, 以滑轮为坐标原点, 小车的坐标为 x , 人的位置坐标为 ξ , 由速度的定义, 小车和人的速度大小应为

$$v_{\text{车}} = \frac{dx}{dt}, \quad v_{\text{人}} = \frac{d\xi}{dt} = v_0.$$

由于定滑轮不改变绳长, 所以小车坐标的变化率等于拉小车的绳长的变化率, 即

$$v_{\text{车}} = \frac{dx}{dt} = \frac{dl}{dt}.$$

又由图 1-5 可以看出有 $l^2 = \xi^2 + h^2$, 两边对 t 求得

$$2l \frac{dl}{dt} = 2\xi \frac{d\xi}{dt},$$

即

$$v_{\text{车}} = \frac{v_{\text{人}} \xi}{l} = v_{\text{人}} \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + h^2}} = \frac{v_0 \xi}{\sqrt{\xi^2 + h^2}}.$$

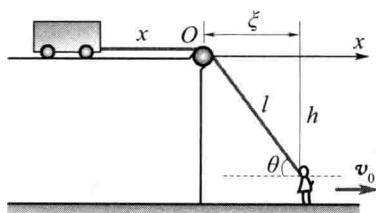


图 1-5

§ 1.3 曲线运动的描述

一、一般的平面曲线运动 切向加速度 法向加速度

质点作曲线运动时, $\Delta \boldsymbol{v}$ 的方向和 $\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$ 的极限方向一般不同于速度 \boldsymbol{v} 的方向, 而且在曲线运动中, 加速度的方向总是指向曲线凹进的一边; 如果速率是减小的 ($|\boldsymbol{v}_B| < |\boldsymbol{v}_A|$), 则 \boldsymbol{a} 与 \boldsymbol{v} 的方向夹角为钝角; 如果速率是增大的 ($|\boldsymbol{v}_B| > |\boldsymbol{v}_A|$), 则 \boldsymbol{a} 与 \boldsymbol{v} 的方向夹角为锐角; 如果速率不变 ($|\boldsymbol{v}_B| = |\boldsymbol{v}_A|$), 则 \boldsymbol{a} 与 \boldsymbol{v} 的方向夹角为直角, 如图 1-6 所示。

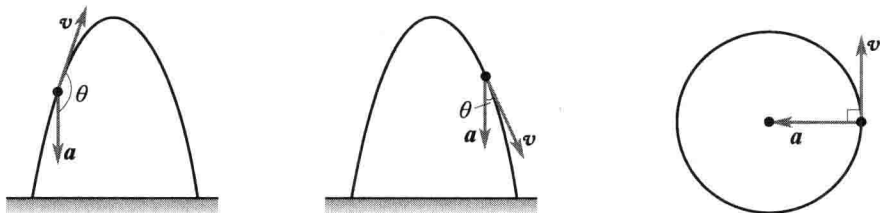


图 1-6 曲线运动中的加速度

为运算方便起见, 常采用平面自然坐标系予以讨论. 即将加速度沿着质点所处轨道的切线方向和法线方向进行分解, 这样得到的加速度分量分别叫作切向加速度和法向加速度.

设质点的运动轨道如图 1-7(a) 所示, t 时刻质点在 P_1 点, 速度为 \boldsymbol{v}_1 ; $t + \Delta t$ 时刻质点运动到 P_2 点, 速度为 \boldsymbol{v}_2 , P_1, P_2 两点邻切角为 $\Delta\theta$, 在 Δt 时间内, 速度增量为 $\Delta \boldsymbol{v}$. 图 1-7(b) 表示 $\boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2, \Delta \boldsymbol{v}$ 三者之间的关系, 图中 $\Delta \boldsymbol{v}$ 就是矢量 \overrightarrow{BC} . 如果在 \overrightarrow{AC} 上截取 $|\overrightarrow{AD}| = |\overrightarrow{AB}| = |\boldsymbol{v}_1|$, 则剩下的部分

$$|\overrightarrow{DC}| = |\overrightarrow{AC}| - |\overrightarrow{AD}| = |\boldsymbol{v}_2| - |\boldsymbol{v}_1| = |\Delta \boldsymbol{v}_\tau| = \Delta v,$$

即

$$|\Delta \boldsymbol{v}_\tau| = \Delta v,$$

反映了速度模的增量. 连接 BD , 并记作 $\Delta \boldsymbol{v}_n$, 其反映了速度方向的增量. 于是速度增量 $\Delta \boldsymbol{v}$ 所包含的速度大小的增量和速度方向的增量这两个方面的含义, 通过 $\Delta \boldsymbol{v}_\tau$ 和 $\Delta \boldsymbol{v}_n$ 得到了定量的描述, 即 $\Delta \boldsymbol{v} = \Delta \boldsymbol{v}_\tau + \Delta \boldsymbol{v}_n$.

由图 1-7(c) 可看出, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta\theta \rightarrow 0$, 则 $\angle ABD \rightarrow \frac{\pi}{2}$, 即在极限条件下, $\Delta \boldsymbol{v}_n$ 的方向垂直于过 P_1 点的切线, 亦即沿曲线在 P_1 点的法线方向; 同时, 在 $\Delta\theta \rightarrow 0$ 的极限条件下 $\Delta \boldsymbol{v}_\tau$