



普通高等教育“十五”国家级规划教材

(高职高专教育)

物理学

第二版

李迺伯 主编
李寿松 张世良 郭呈祥 改编

高等教育出版社



普通高等教育“十五”国家级规划教材

(高职高专教育)

物 理 学

第二版

李通伯 主编

李寿松 张世良 郭呈祥 改编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,也是教育部高职高专规划教材。本书在第一版的基础上,依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育物理课程教学基本要求》进行了全面修改。全书内容包括运动和力、动量守恒、能量守恒、刚体的定轴转动、热力学基础、静电场、稳恒磁场、电磁感应、机械振动、机械波、波动光学、狭义相对论和量子物理等12章,书末备有附录和习题答案。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校开办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校各专业的大学物理课程教材。

图书在版编目(CIP)数据

物理学/李迺伯主编. —2版. —北京:高等教育出版社, 2004.3

ISBN 7-04-013897-2

I. 物... II. 李... III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第003220号

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 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 煤炭工业出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 16.25
字 数 390 000

版 次 1993年5月第1版
2004年3月第2版
印 次 2004年7月第2次印刷
定 价 25.00元(含光盘)

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

出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作,2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号),提出了“力争经过5年的努力,编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标,并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施:先用2至3年时间,在继承原有教材建设成果的基础上,充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验,解决好高职高专教育教材的有无问题;然后,再用2至3年的时间,在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神,有关院校和出版社从2000年秋季开始,积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的,随着这些教材的陆续出版,基本上解决了高职高专教材的有无问题,完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题,将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略,抓好重点规划”为指导方针,重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设,特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订,使其逐步形成精品教材;同时还要扩大教材品种,实现教材系列配套,并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、纸制教材与电子教材的关系,在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

第二版前言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材，也是教育部高职高专规划教材。本书在李迺伯主编的《物理学》（简称第一版）的基础上，依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育物理课程教学基本要求》进行了全面的修改。教材的内容的主要变动如下：

1. 根据1999年制定的基本要求，《物理学（第二版）》增加了“相对论”和“量子物理”两章。

2. 删去第一版中“流体的运动”、“气体动理论”、“热量的传递”、“等离子体”和“传感器”等内容。

本书改编工作由李寿松主持。各改编作者分工如下：张世良（第一章、第二章、第五章、第六章、第七章）、郭呈祥（第三章、第四章、第十二章和§10-12）、李寿松（第八章、第九章、第十章、第十一章、附录），并由李寿松修改、定稿，由扬州大学邵耀椿教授主审。

由于编者水平有限，书中一定存在不少错误和不妥之处，敬请使用本书的教师和读者批评指正。

编 者
2003年10月

第一版前言

1990年7月,国家教委高等学校工程专科物理课程教材编审组在长春制订了《高等学校工程专科物理学课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)。本书按此《基本要求》编写。它有如下特点:

1. 按《基本要求》精选和组织内容。在“以必须、够用为度”的原则指导下,着重阐述物理学的基本规律,并注意到一定的知识覆盖面。
2. 对重点和难点内容的阐述力求清晰、透彻。编写中不追求缜密的推导和论证,着重讲清物理概念,交代清楚物理结论,帮助学生建立形象的物理图像。
3. 加强理论联系实际,强化应用,是高等工程专科培养目标对教学的要求。本书重视物理学理论在生产技术中的应用。
4. 本书适当地介绍了近代物理学的结论。注意把辩证唯物主义的观点渗透于全书之中。
5. 本书在有关内容中采用了模型法、对比法、综合分析法和近似计算法等。此类方法,有利于学生对物理规律的理解,节省授课学时和提高教学效果,也有利于训练学生的科学思维能力,便于学生自学。

本书用大字体排印者是《基本要求》规定的知识。此外,还用小字体排印了少量《基本要求》以外内容,供学生阅读。

本书采用以国际单位制(SI)为基础的我国法定计量单位;物理学名词使用全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词(基础物理学部分)》(1988)的表述;按国家标准(GB)的规定表示物理量的符号和科学符号。

本书习题分三种形式:选择题、填空题和计算题。一个选择题中放入若干选项,学生根据它们思考、计算和比较,从中找出正确的结果。一方面,通过比较各选项细枝末节的差异,以增强学生的鉴别能力;另一方面,各选项给学生提供了思考的线索和途径。对初学者,也许这种作法比较好。

本书在编写和审稿过程中,得到国家教委的关心和高等教育出版社的支持;参加审稿工作的王殖东、郑伯坚、崔砚生、林铁生等四位教授和国家教委高等学校工程专科物理课程教材编审组的全体同志提出了许多宝贵意见;各编者所在学校亦给予了大力支持。此外,本书成稿后,吴永盛同志受高等教育出版社和国家教委高等学校工程专科物理课程教材编审组的委托,又认真仔细审阅了全稿,提出了许多具体修改意见。编者在此对给编写本书以各种帮助的领导和同志,谨致衷心感谢。

本书编者为李迺伯(中国计量学院,编写绪论、第一章至第七章、附录)、张世良(北京联合大学自动化工程学院,编写第八章至第十章)、李寿松(扬州工学院,编写第十一章至第十四章)、郭呈祥(蚌埠高等专科学校,编写第十五章至第十八章)。由李迺伯主编,国家教

委高等学校工程专科物理课程教材编审组组长佟恒智主审。

编者水平有限，疏漏错误之处，恳请指出。

编 者

1992 年 4 月

目 录

第一章 运动和力	(1)	§ 5-4 电容 静电场的能量	(85)
§ 1-1 位置矢量 运动方程	(1)	§ 5-5 电介质	(90)
§ 1-2 速度	(5)	习题	(91)
§ 1-3 加速度	(7)	第六章 稳恒磁场	(95)
§ 1-4 牛顿运动定律	(10)	§ 6-1 磁感强度	(95)
习题	(15)	§ 6-2 磁场对运动电荷的作用	(100)
第二章 动量守恒 能量守恒	(19)	§ 6-3 磁介质	(104)
§ 2-1 动量定理	(19)	习题	(107)
§ 2-2 动量守恒定律	(20)	第七章 电磁感应	(111)
§ 2-3 变力的功 动能定理	(22)	§ 7-1 电源的电动势	(111)
§ 2-4 势能	(25)	§ 7-2 法拉第电磁感应定律	(112)
§ 2-5 功能原理 能量守恒定律	(28)	§ 7-3 动生电动势和感生电动势	(114)
习题	(29)	§ 7-4 自感 互感 磁场的能量	(118)
第三章 刚体的定轴转动	(32)	习题	(121)
§ 3-1 角速度和角加速度	(32)	第八章 机械振动	(124)
§ 3-2 刚体转动的动能定理	(34)	§ 8-1 简谐振动	(124)
§ 3-3 转动定律	(38)	§ 8-2 简谐振动的特征量	(126)
§ 3-4 角动量守恒定律	(40)	§ 8-3 旋转矢量法	(131)
习题	(43)	§ 8-4 简谐振动的能量	(132)
第四章 热力学基础	(46)	§ 8-5 振动的合成	(133)
§ 4-1 理想气体的物态方程 准静态 过程	(46)	§ 8-6 阻尼振动 受迫振动 共振	(135)
§ 4-2 热力学第一定律	(48)	§ 8-7 振动的分解 频谱	(137)
§ 4-3 热力学第一定律对于理想气体 几个过程的应用	(50)	习题	(139)
§ 4-4 循环过程 热机	(54)	第九章 机械波	(142)
§ 4-5 热力学第二定律 卡诺定理	(58)	§ 9-1 机械波的产生和传播	(142)
§ 4-6 熵 熵增加原理	(60)	§ 9-2 平面简谐波波动方程	(144)
§ 4-7 耗散结构	(63)	§ 9-3 波的能量 能流密度	(147)
* § 4-8 能源与节能	(65)	§ 9-4 惠更斯原理 波的干涉	(149)
习题	(67)	§ 9-5 驻波	(152)
第五章 静电场	(71)	§ 9-6 声波	(154)
§ 5-1 库仑定律	(71)	§ 9-7 多普勒效应	(160)
§ 5-2 电场强度	(72)	习题	(161)
§ 5-3 电势	(79)	第十章 波动光学	(165)
		§ 10-1 电磁波 光的电磁特性	(165)
		§ 10-2 相干光	(169)

§ 10-3 杨氏双缝实验	(170)	第十二章 量子物理	(214)
§ 10-4 光程	(172)	§ 12-1 黑体辐射 普朗克量子 假设	(214)
§ 10-5 薄膜干涉	(174)	§ 12-2 光的粒子性	(217)
§ 10-6 惠更斯-菲涅耳原理	(179)	§ 12-3 德布罗意波 实物粒子的 二象性	(221)
§ 10-7 单缝衍射	(180)	§ 12-4 不确定关系	(222)
§ 10-8 圆孔衍射 光学仪器的分 辨率	(183)	§ 12-5 波函数及其统计解释	(224)
§ 10-9 衍射光栅	(185)	*§ 12-6 薛定谔方程	(226)
§ 10-10 光的偏振性 马吕斯定律	(187)	§ 12-7 激光	(229)
§ 10-11 反射光和折射光的偏振	(190)	§ 12-8 固体的能带	(232)
*§ 10-12 光度	(191)	*§ 12-9 纳米科技	(233)
习题	(196)	习题	(235)
第十一章 狭义相对论	(199)	附录一 矢量代数简介	(238)
§ 11-1 伽利略变换式 牛顿的绝对 时空观	(199)	附录二 我国法定计量单位和国际 单位制 (SI)	(243)
§ 11-2 狭义相对论的基本原理 洛 伦兹变换式	(201)	附录三 一些基本物理常量	(245)
§ 11-3 狭义相对论的时空相对性	(206)	习题 (计算题) 答案	(246)
§ 11-4 狭义相对论力学	(209)		
习题	(212)		

第一章 运动和力

宇宙中所有的物质都在不停地运动着,绝对静止的物质是不存在的,这就是通常所说的运动的绝对性.为了研究某物体的运动,就必须选取其他物体作为标准,选取的标准物不同,对物体运动情况的描述也不同,这就是运动描述的相对性.

为描述物体的运动而选取的标准物体称为参考系.参考系的选取是任意的.在研究地面上物体运动时,通常选取地球作为参考系.为了定量地描述物体的位置及其变化,还要在参考系上建立一个坐标系.最常用的是直角坐标系.

本章的主要内容是位置矢量,运动方程,位移,速度,加速度和牛顿运动定律.

§ 1 - 1 位置矢量^① 运动方程

一、时间和空间

任何物体运动都是在时间和空间中进行的,物体的运动不能脱离时间和空间.人类的“时空观念”,即人类对时间和空间的认识,是科学技术发展阶段的产物,人类的时空观念的发展是一个无限的认识过程.从牛顿的绝对时空观,到爱因斯坦的相对论时空观(参见第十一章),到正在发展的新宇宙学的宇宙时空观,大体经历了三个不同的历史发展阶段.

时间本身具有单方向性,是一维的.描述运动需建立时间坐标轴,坐标原点即计时起点.“时刻”是时间轴上的一点.时刻为正或负表明在计时起点以后或以前.在一定的参考系中研究物体的运动时,与某一时刻对应的是物体所在的某一位置.时间间隔是指某一初始时刻至终止时刻所经历的时间,它与时间轴上的某一区间相对应,与运动物体位置的变动相对应.

1960年第十一届国际计量大会通过了国际单位制(SI),时间为七个基本量之一.时间的单位是秒,符号为s.

下面列出某些时间间隔的数量级:

Z^0 粒子的寿命	10^{-22} s
Σ^0 超子的寿命	10^{-19} s
π^0 介子的寿命	10^{-16} s
μ 子寿命	10^{-6} s
钟摆的周期	10^0 s
自由中子的寿命	10^3 s
地球自转的周期	10^5 s
地球公转的周期	10^7 s

① 学习这一节内容,建议读者阅读附录一“矢量代数简介”.

人类的寿命	10^9 s
人类文明史	10^{11} s
古人类出现至今	10^{14} s
地球的年龄	10^{17} s
宇宙的年龄	10^{18} s

空间反映物质运动的广延性. 物体在三维空间里的位置可由三个相互独立的坐标轴来确定. 空间中两点之间的距离称为长度.

在 SI 中, 长度为七个基本量之一. 长度的单位是米, 符号为 m.

下面列出某些物体长度的数量级:

质子的半径	10^{-15} m
原子的半径	10^{-10} m
病毒的线度	10^{-7} m
阿米巴变形虫的线度	10^{-4} m
人的身长	10^0 m
珠穆朗玛峰的高度	10^4 m
地球半径	10^7 m
太阳半径	10^9 m
地球与最近恒星的距离	10^{16} m
银河系的尺度	10^{21} m
星系团	10^{23} m
超星系团	10^{24} m
可探测类星体的最远距离	10^{26} m

数量级在物理学中很重要. 研究对象在空间尺度上属于不同的数量, 便可能属于不同的研究领域. 数量级的估计在对未知现象的探索和工程实践中都很有意义. 意大利物理学家费米根据纸片漂浮过的距离估计原子弹爆炸威力的数量级, 其估计的结果和经仪器测量计算出的数据相符, 这是数量级估计应用的实例之一.

二、质点

物体的运动是复杂的, 根据研究的需要, 提出其中最本质的内容, 建立一个与实际情况差距不大的“理想模型”, 用来进行研究是非常重要的. 力学中一个极其重要的理想模型是质点. 当研究物体的运动时, 如果物体的大小和形状可以忽略时, 就可把物体当作是一个有一定质量的点, 这样的点称为质点. 质点保留了实际物体的两个主要特征: 物体的质量和物体的空间位置. 在下列情况下可以把物体当作质点对待.

1. 物体作平动. 这时物体内各点具有相似的轨道, 相同的速度和加速度. 因而只要研究其中一点的轨道、速度和加速度, 就足以认识平动物体的全貌. 据此, 可以把平动物体简化为质点.

2. 物体的几何尺寸比观察它运动的范围小许多, 其形状和大小可以忽略. 这时也可把此物体当作质点.

同一物体在一个力学问题中可以当作质点,而在另一个力学问题中却不能.例如地球,在研究它绕太阳的运动时,由于地球半径比它和太阳之间的距离小得多,可以把它看成质点.但是在研究地球的自转时,就不能再把它看成质点.

如果所研究的物体不能当作一个质点处理,那么可以把它看成是由许多质点(或质元^①)组成.这些质点或质元的组合,称为质点系.

在 SI 中,质量为七个基本量之一.质量的单位是千克(公斤),符号为 kg.

下面列出某些物体质量的数量级:

电子质量	10^{-30} kg
质子质量	10^{-27} kg
血红蛋白质量	10^{-22} kg
流感病毒质量	10^{-19} kg
阿米巴变形虫质量	10^{-8} kg
蚂蚁质量	10^{-5} kg
人体质量	10^2 kg
金字塔质量	10^{10} kg
地球质量	10^{24} kg
太阳质量	10^{30} kg
银河系质量	10^{41} kg
宇宙(现在知道的)	10^{53} kg

三、位置矢量

为了描述质点的运动,首先要有确定质点位置的方法.如图 1-1 所示,从坐标原点 O 画一个指向质点 P 的有向线段 $\overrightarrow{OP}$. 此有向线段的长度指出质点 P 到原点的距离,其箭头指出质点 P 所在的方向. 这种可以用来确定质点所在位置的矢量,称为位置矢量,简称位矢.

如果质点在空间运动,确定它的坐标可用空间直角坐标系. 图 1-1 画出空间直角坐标系,它有三个互相垂直的坐标轴 Ox 、 Oy 和 Oz . 质点 P 在三个坐标轴上的投影点的坐标分别为 x 、 y 和 z . 于是,位置矢量 $\mathbf{r}$ 就可表示成直角坐标形式:

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

式中 $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 为坐标轴 Ox 、 Oy 和 Oz 的正方向的单位矢量. 如果质点在平面上运动,那么在该平面上取平面直角坐标系 xOy , 就可以确定质点的位置:

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} \quad (1-1b)$$

如果质点沿一直线运动,那么在该直线上规定坐标的原点、正方向和坐标的单位长度,就可确定此质点的位置:

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} \quad (1-1c)$$

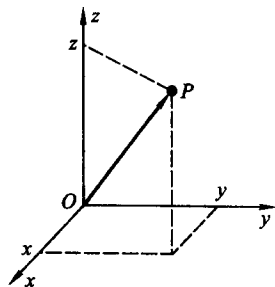


图 1-1 位置矢量

^① 元,小而基本的意义.

四、运动学方程

如果图 1-1 的质点 P 在运动, 那么它的位置矢量 $\mathbf{r}$ 将随时间变化. 也就是说, 位置矢量 $\mathbf{r}$ 是时间 t 的函数:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-2a)$$

位置矢量 $\mathbf{r}$ 随时间 t 变化的函数式称为质点的运动学方程. 显然, 这时质点的坐标 x 、 y 和 z 也是时间 t 的函数:

$$\left. \begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \\ z &= z(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-2b)$$

上式称为质点运动学方程的直角坐标分量形式. 它表示, 质点在空间的运动 $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ 可以看成是质点在 x 、 y 和 z 轴上同时参与三个直线运动 $x = x(t)$ 、 $y = y(t)$ 和 $z = z(t)$. 式 (1-2b) 中的三个直线运动称为式 (1-2a) 所表示的质点运动在三个坐标轴上的分运动. 中学物理曾讨论过质点作匀加速直线运动, 它的运动学方程为

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

在上式中, a 是质点的加速度, v_0 是质点初始时刻 ($t = 0$) 的速度, 称为初速度, x_0 是初始时刻质点位置的坐标. 还讨论过质点作平抛运动, 它的运动学方程为

$$\left. \begin{aligned} x &= v_0 t \\ y &= h - \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned} \right\}$$

在上式中, v_0 是质点水平抛出的初速度, h 是初始时刻质点距原点的高度, g 是重力加速度, 负号表示加速度 g 的方向与 Oy 轴的正方向相反.

上述讨论表明, 质点的曲线运动可以用直角坐标系分解为两个(平面上质点的运动)或三个(空间中质点的运动)直线运动. 由此可见, 直线运动是分析曲线运动的基础.

例 1-1 湖中有一小船, 岸边有人用绳子跨过离水面高 h 的滑轮拉船靠岸, 如图 1-2 所示. 设绳的原长为 l_0 , 人以匀速 v_0 拉绳. 试写出小船的运动学方程.

解 建立如图所示的坐标轴 Ox , 按题意, 初始时刻 ($t = 0$), 滑轮至小船的绳长是 l_0 . 此后某时刻 t , 绳长减少到 $l_0 - v_0 t$, 此刻船的位置坐标是

$$x = \sqrt{(l_0 - v_0 t)^2 - h^2}$$

上式是小船的运动学方程. 它指出小船位置 x 随时间 t 变化的规律.

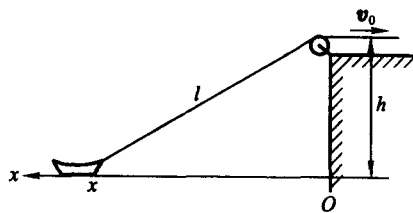


图 1-2 例 1-1 图

§ 1 - 2 速 度

一、位移

质点在平面上作曲线运动, 从位置 A 沿一曲线移动到位置 B , 如图 1-3 所示. 用从 A 指向 B 的矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 表示质点位置的移动, 把 $\Delta \mathbf{r}$ 称为这段时间内的位移. 位移是描述一段时间内质点位置变更的物理量, 它同时指出质点位置变更的大小和方向. 它只和始、末位置有关, 与轨道曲线无关.

从 A 到 B 的位移等于质点在 B (末位置) 的位置矢量 $\mathbf{r}_B$ 和质点在 A (初位置) 的位置矢量 $\mathbf{r}_A$ 之差.

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

在平面坐标系中, 位移

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} \quad (1-3b)$$

在上式中

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= x_B - x_A \\ \Delta y &= y_B - y_A \end{aligned} \right\} \quad (1-3c)$$

是同一段时间内质点坐标的增量.

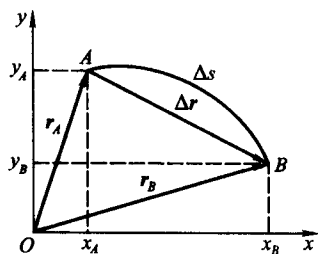


图 1-3 质点的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 和路程 Δs

二、路程

如图 1-3 所示, 质点从 A 到 B 走过的路程是质点沿轨道曲线从 A 到 B 移动的长度. 路程是恒为正值标量. 随着时间增加, 路程也增加, 即路程是正的增函数. 通常, 用符号 Δs 或 s 表示路程.

图 1-4(a) 画出某质点所经历的一段轨道的曲线. t 、 t_1 、 t_2 、 t_3 各时刻质点分别位于 A 、 C 、 D 、 B 各点. $t \sim t_1$ 、 $t_1 \sim t_2$ 、 $t_2 \sim t_3$ 三段时间内质点的位移分别是 $\Delta \mathbf{r}_1$ 、 $\Delta \mathbf{r}_2$ 和 $\Delta \mathbf{r}_3$. 由图可知, $t \sim t_3$ 时间内的位移:

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta \mathbf{r}_1 + \Delta \mathbf{r}_2 + \Delta \mathbf{r}_3 \quad (1-4)$$

上式指出, 总位移等于各分段位移的矢量和.

如果把 $t \sim t_3$ 这一段时间细分为无穷多段时间间隔, 就得到无穷多个无穷小位移. 用符号 $d\mathbf{r}$ 表示无穷小位移. 它的大小是无穷小量, 它的方向是沿轨道的切线指向质点前进的方向, 如图 1-4(b) 所示. 从图中还可以看出, 这些无穷小位移的矢量和仍然是 $\Delta \mathbf{r}$.

在 dt 时间内的位移 $d\mathbf{r}$ 是无穷小矢量, 对应的路程是无穷小标量. 用符号 ds 表示无穷小路程, 图 1-4(b) 表明:

$$|d\mathbf{r}| = ds \quad (1-5)$$

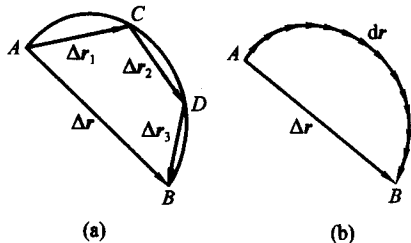


图 1-4 总位移等于各分段位移的矢量和

上式指出, 在无穷小时间内, 位移的大小 $|\mathrm{d}\boldsymbol{r}|$ 等于对应的路程 $\mathrm{d}s$.

三、平均速度和平均速率

如图 1-5 所示, 设 t 时刻, 质点在 A 处, $t + \Delta t$ 时刻运动到 B 点. Δt 时间内, 从 A 到 B 质点的位移是 $\Delta\boldsymbol{r}$, 经历的路程是 Δs .

当 $\Delta\boldsymbol{r}$ 一定时, 如果 Δt 越小, 质点从 A 到 B 的变化越快; 如果 Δt 较大, 则从 A 到 B 的变化较慢. 为了描述 Δt 时间内单位时间位置的变化, 引入平均速度的概念. 把 $\Delta\boldsymbol{r}$ 与 Δt 之比称为 Δt 时间内质点的平均速度, 用符号 $\bar{\boldsymbol{v}}$ 表示:

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

平均速度是矢量, 它的方向与位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 的方向相同.

与此相似, 为了描述 Δt 时间内单位时间质点走过的路程, 引入平均速率的概念. 把路程 Δs 与对应时间 Δt 之比称为 Δt 时间内质点的平均速率, 用符号 $\bar{v}$ 表示:

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

平均速率是标量, 恒为正值.

平均速度和平均速率不仅与所讨论的起始时刻 t 有关, 还与此后所取时间 Δt 的长短有关. 显然, 用它们描述质点的运动是粗糙的.

四、瞬时速度和瞬时速率

当时间 Δt 取得越小, 平均速度和平均速率对质点运动的描述越精确. 如果 $\Delta t \rightarrow 0$, 得到平均速度的极限 $\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$ 和平均速率的极限 $\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$.

把 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均速度的极限 $\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$ 称为质点在 t 时刻的瞬时速度, 简称速度, 用符号 $\boldsymbol{v}$ 表示:

$$\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \quad (1-8)$$

速度是描述运动质点在某一瞬时位置变化率的物理量. 式(1-8)表明, 速度 $\boldsymbol{v}$ 与 $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 同方向, 是沿轨道的切线指向质点前进的方向.

把 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均速率的极限 $\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$ 称为质点在 t 时刻的瞬时速率, 简称速率, 用符号 v 表示:

$$v = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} \quad (1-9)$$

速率是描述质点在某一瞬时运动快慢的物理量, 它恒为正值.

由式(1-5), $|\mathrm{d}\boldsymbol{r}| = \mathrm{d}s$, 可得 $|\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}| = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$, 即

$$|\boldsymbol{v}| = v \quad (1-10)$$

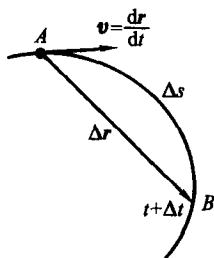


图 1-5 平均速度是 $\bar{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}$

速度是 $\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$

上式指出, 在任一时刻, 质点速度的大小与速率相等.

综上所述, 质点运动时, 其速度的方向是沿轨道切线指向质点前进的方向, 而速度的大小与速率相等.

在平面坐标系中质点的运动学方程是

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

利用速度定义式(1-8), 得

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} \quad (1-11a)$$

用符号 v_x 和 v_y 分别表示 $\frac{dx}{dt}$ 和 $\frac{dy}{dt}$, 得速度在直角坐标系中的分量式:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} \\ v_y &= \frac{dy}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-11b)$$

如果已知 v_x 和 v_y , 可求得速度的大小(速率)

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

和方向(用速度 $\mathbf{v}$ 与 Ox 轴正方向的夹角 α 表示)

$$\tan \alpha = \frac{v_y}{v_x} \quad (1-12b)$$

在 SI 中, 速度的单位是米每秒, 符号为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

例 1-2 一质点作直线运动, 其运动学方程是

$$x = 1 + 2t - t^2 \quad (1)$$

式中, x 以 m 为单位, t 以 s 为单位. 求质点的(1)速度公式; (2)速率公式.

解 (1) 对式(1)求导数, 得此质点的速度公式:

$$v_x = 2 - 2t \quad (2)$$

(2) 上式指出, 此质点作变速运动, 而且, 当 $t < 1\text{s}$ 时, 速度 $v_x > 0$, 质点沿 x 轴正方向运动; 当 $t > 1\text{s}$ 时, 速度 $v_x < 0$, 质点沿 x 轴负方向运动. 所以, 此质点的速率公式是

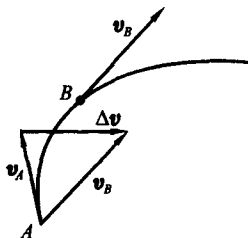
$$v = |v_x| = \begin{cases} 2 - 2t & (t < 1\text{s}) \\ 2t - 2 & (t > 1\text{s}) \end{cases}$$

§ 1 - 3 加 速 度

一、瞬时加速度

如图 1-6 所示, 质点作曲线运动. t 时刻, 质点位于 A 点, 速度为 $\mathbf{v}_A$; 在 $t + \Delta t$ 时刻, 质点位于 B 点, 速度为 $\mathbf{v}_B$. 则 $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A$ 是 Δt 时间内质点速度的增量.

把 $\Delta \mathbf{v}$ 与 Δt 之比称为质点在这段时间的平均加速度, 用符号 $\bar{\mathbf{a}}$ 表示: 图 1-6 速度的增量 $\Delta \mathbf{v}$



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

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均加速度的极限 $\frac{dv}{dt}$, 被称为质点在 t 时刻的瞬时加速度, 简称加速度, 用符号 a 表示:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (1-13)$$

加速度是矢量. 它是描述运动质点的速度的大小和方向随时间变化率的物理量.

将式(1-11a)、(1-11b)代入式(1-13), 得直角坐标系中加速度的表示式:

$$a = \frac{dv_x}{dt}i + \frac{dv_y}{dt}j = \frac{d^2x}{dt^2}i + \frac{d^2y}{dt^2}j \quad (1-14a)$$

用符号 a_x 和 a_y 分别表示 Ox 轴和 Oy 轴方向的加速度分量, 则

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1-14b)$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}$$

如果已知 a_x 和 a_y , 可求得加速度的大小

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (1-15a)$$

和方向(用 a 与 Ox 轴正方向的夹角 α 表示)

$$\tan \alpha = \frac{a_y}{a_x} \quad (1-15b)$$

在 SI 中, 加速度的单位是米每二次方秒, 符号为 $m \cdot s^{-2}$.

二、法向加速度和切向加速度

加速度矢量除了像上述那样按直角坐标系分解外, 还可以按质点运动轨道的法线方向和切线方向分解.

如图 1-7 所示, 一质点在圆轨道上运动到 A 点. 在 A 点沿圆的切线作一坐标轴 AT , 以质点运动的方向取为正方向, 称为切向坐标轴; 再沿半径方向指向圆心作坐标轴 AN , 称为法向坐标轴. 圆周上每一点都有自己的切向坐标轴和法向坐标轴.

中学物理已经指出, 作匀速圆周运动的质点, 由于速度方向的变化, 其加速度的大小等于 $\frac{v^2}{R}$, 方向指向圆心, 称为向心加速度.

如果质点作变速圆周运动, 质点速度的方向和大小均发生变化. 可以证明, 此时质点加速度有两个分矢量, 一是由于速度方向变化所引起的, 其方向指向圆心, 即沿法向坐标轴的正方向, 其大小等于 $\frac{v^2}{R}$, 称为法向加速度, 用符号 a_n 表示:

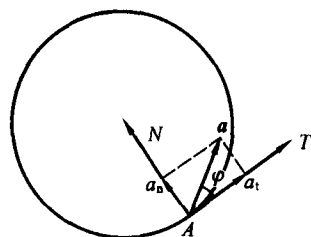


图 1-7 圆周上每一点都有自己的切向坐标轴和法向坐标轴