



北京理工大学 远程教育学院系列教材
Beijing Institute Of Technology

物理学导论 ——大学网络教程

主编 胡海云 苟秉聪



国防工业出版社
National Defense Industry Press



北京理工大学 远程教育学院系列教材
Beijing Institute Of Technology

物理学导论 ——大学网络教程

主编 胡海云 苟秉聪

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书共五篇22章,第一篇为力学,包括质点运动学、牛顿运动定律、质点系与动量守恒、功和能、角动量和角动量守恒、刚体绕固定轴的转动;第二篇为电磁学,包括静电场、电势、静电场中的导体和电介质、磁力、稳恒磁场、电磁感应;第三篇为波动与光学,包括振动、波动、光的干涉、光的衍射、光的偏振;第四篇为热学,包括气体动理论、热力学第一定律、热力学第二定律;第五篇为近代物理基础,包括狭义相对论力学基础、微观粒子的波粒二象性、薛定谔方程及其应用。各章后均有本章提要 and 习题,书末备有习题参考答案。

本书适合普通高校、远程教育、成人院校、电大选用为理工科各专业的大学物理课程的教材及教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

物理学导论:大学网络教程/胡海云,苟秉聪主编.

北京:国防工业出版社,2009.5

ISBN 978-7-118-06272-4

I. 物... II. ①胡...②苟... 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043654号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 28½ 字数 712 千字

2009年5月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 49.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用的自然科学,它具有完整的科学体系、独特有效的研究方法、丰富的知识,所有这些对于培养 21 世纪的科学研究工作者及工程技术人员都是必不可少的。因此以物理学基础为内容的大学物理课程是高等学校各类非物理专业本科生必修的一门基础课。

21 世纪是一个高度信息化的时代,以计算机和网络技术为核心的现代信息技术正在改变着我们的生产方式、生活方式、工作方式和学习方式,并可能引起教育和教学的革命性改革。北京理工大学充分利用自身的教育资源优势,在办好全日制高等教育的同时,一直积极开展远程教育和继续教育。为帮助学生理论联系实际,建立起对物理学和工程技术的相互联系及整体认识,根据教育部颁布的 2008 年版的《理工科类大学物理课程教学基本要求》和我们多年的教学改革实践,大学物理课程建立了适合于远程教育的教学体系,教学内容按力学、电磁学、波动与光学、热学、近代物理基础五个模块顺序讲授。

为了便于同学们更好地在网上学习课程,我们组织了北京理工大学理学院物理系教师编写了这本教材。本教材为北京理工大学远程教育学院精品课程专用教材,本书由胡海云教授和苟秉聪教授主编,参加各章节的编写工作的老师有:刘兆龙(第 1 章~第 5 章),宋克辉(第 6 章、第 13 章、第 14 章),吴晓丽(第 7 章、第 8 章),苟秉聪(第 9 章),郑少波(第 10 章~第 12 章),缪劲松(第 15 章~第 17 章),冯艳全(第 18 章~第 21 章),胡海云(第 22 章、第 23 章)。

本教材力求物理概念明确、物理图像清晰、论述深入浅出并有适量的技术应用和理论扩展。本教材与网上教学相得益彰,对同学们的网上学习将起到很好的辅助作用。既有利于同学们掌握基础知识,同时便于在网上学习之余复习相关内容。对同学们提高学习效率以及学以致用也会起到潜移默化的作用。

编 者

2009 年 3 月

目 录

第一篇 力 学

第1章 质点运动学	1
1.1 位置矢量与位移	2
1.2 速度	5
1.3 加速度	6
1.4 相对运动	8
1.5 匀加速运动	10
1.6 圆周运动	13
本章提要	18
习题	19
第2章 牛顿运动定律	21
2.1 牛顿运动定律	21
2.2 自然界中的力	24
2.3 牛顿运动定律的应用	28
2.4 非惯性系与惯性力	32
本章提要	35
习题	35
第3章 质点系与动量守恒	40
3.1 质点的动量定理	40
3.2 质点系的动量定理	43
3.3 动量守恒定律	44
3.4 质点系的质心及其运动规律	48
本章提要	51
习题	51
第4章 功和能	54
4.1 功	54
4.2 动能定理	58
4.3 保守力和势能	60
4.4 机械能守恒	63
本章提要	65
习题	66
第5章 角动量和角动量守恒	69

5.1 质点的角动量	69
5.2 角动量定理	70
5.3 角动量守恒定律	72
本章提要	74
习题	74
第6章 刚体绕固定轴的转动	76
6.1 刚体的运动及其描述	76
6.2 刚体定轴转动定律 转动惯量	80
6.3 刚体定轴转动定律的应用	86
6.4 对定轴的角动量守恒	89
6.5 定轴转动中的功和能	93
本章提要	97
习题	99

第二篇 电磁学

第7章 静电场	103
7.1 电荷	103
7.2 库仑定律	104
7.3 电场 电场强度	106
7.4 电场线 电通量	112
7.5 静电场的高斯定理	114
7.6 高斯定理的应用	116
本章提要	119
习题	120
第8章 电势	123
8.1 静电场的环路定理	123
8.2 静电势能	124
8.3 电势 电势差	125
8.4 电势的计算	126
8.5 等势面 电势梯度	129
本章提要	131
习题	131
第9章 静电场中的导体和电介质	134
9.1 导体的静电平衡条件	134
9.2 静电平衡时导体上电荷的分布	135
9.3 静电屏蔽	136
9.4 电介质对电场的影响	137
9.5 电介质的极化	138

9.6 有介质时的高斯定理	140
9.7 电容电容器	141
9.8 静电场的能量	144
本章提要	145
习题	146
第 10 章 磁力	150
10.1 基本磁现象	150
10.2 磁场 磁感应强度	151
10.3 磁感应线 磁场的高斯定理	152
10.4 磁场对运动电荷的作用	153
10.5 磁场对电流的作用	155
10.6 磁场对平面载流线圈的作用	157
本章提要	157
习题	158
第 11 章 稳恒磁场	161
11.1 毕奥—萨伐尔—拉普拉斯定律	161
11.2 安培环路定理	165
11.3 磁介质中的磁场	169
本章提要	173
习题	173
第 12 章 电磁感应	176
12.1 法拉第电磁感应定律	176
12.2 动生电动势 感生电动势	180
12.3 自感 互感	185
12.4 磁场的能量	188
12.5 位移电流 麦克斯韦方程组	190
本章提要	194
习题	196

第三篇 波动与光学

第 13 章 振动	200
13.1 简谐振动的描述	200
13.2 简谐振动的动力学特征	206
13.3 简谐振动的能量	209
13.4 简谐振动的合成	210
本章提要	215
习题	216
第 14 章 波动	219

14.1	波动的基本特征	219
14.2	平面简谐波的波函数	223
14.3	波的能量	229
14.4	惠更斯原理波的衍射	233
14.5	波的叠加	235
	本章提要	243
	习题	245
第 15 章	光的干涉	249
15.1	相干光及光程差	249
15.2	杨氏双缝干涉	253
15.3	薄膜干涉	255
15.4	迈克尔逊干涉仪	263
	本章提要	264
	习题	266
第 16 章	光的衍射	269
16.1	夫琅和费单缝衍射	270
16.2	夫琅和费圆孔衍射	273
16.3	光栅衍射	276
	本章提要	281
	习题	282
第 17 章	光的偏振	284
17.1	光的偏振状态	284
17.2	偏振片起偏 马吕斯定律	286
17.3	反射和折射起偏 布儒斯特定律	288
	本章提要	289
	习题	290

第四篇 热 学

第 18 章	气体动理论	292
18.1	热力学系统 状态 理想气体状态方程	292
18.2	理想气体的压强	294
18.3	理想气体温度的微观解释	297
18.4	能量均分定理和理想气体内能	299
18.5	麦克斯韦速率分布律	302
18.6	气体分子平均自由程	306
	本章提要	307
	习题	309
第 19 章	热力学第一定律	312

19.1	热力学第一定律	312
19.2	功和热量的确定	314
19.3	理想气体的三个等值过程	317
19.4	理想气体的绝热过程	321
19.5	循环过程 卡诺循环	324
	本章提要	329
	习题	330
第 20 章	热力学第二定律	333
20.1	自然过程的方向性	333
20.2	热力学第二定律的表述	334
20.3	热力学第二定律的微观意义	334
20.4	玻耳兹曼熵	335
20.5	克劳修斯熵	336
20.6	熵增原理	337
	本章提要	339
	习题	339

第五篇 近代物理基础

第 21 章	狭义相对论力学基础	341
21.1	狭义相对论的基本原理	341
21.2	洛伦兹变换	345
21.3	时间延缓和长度收缩	348
21.4	相对论动力学基础	353
	本章提要	357
	习题	357
第 22 章	微观粒子的波粒二象性	360
22.1	黑体辐射 普朗克能量子假设	360
22.2	光电效应 爱因斯坦光量子理论	367
22.3	康普顿效应	373
22.4	粒子的波动性 玻恩的统计解释	378
22.5	不确定关系	388
	本章提要	391
	习题	393
第 23 章	薛定谔方程及其应用	395
23.1	薛定谔方程	395
23.2	一维方势阱中的粒子	399
23.3	简谐振子	406
23.4	原子中的电子	408

本章提要.....	419
习题.....	421
习题答案.....	423
索引.....	431
物理常数表.....	445
参考文献.....	446

第一篇 力学

第1章 质点运动学

人类生活在自然界中,观察到了各种各样的物质运动。四季的交替、生命的诞生与死亡、天体的运动、河水的流动、阳光的折射和反射、灯泡的发光、金属的热胀冷缩、载人航天飞船的发射……。从有人类思想记载以来的历史看,我们总是希望将观察到的这些纷繁多样的现象归类,根据各类运动的特点来研究它们所遵循的规律;同时探索各类运动间的相互联系。于是,科学逐渐发展起来。今天我们知道,科学由许多研究领域组成,例如物理学、化学、生物学、天文学等。

物理学是关于物质和能量的科学,其研究内容包括:粒子的运动,波动,粒子间的相互作用,分子、原子和原子核的性质,以及宏观的多粒子系统,例如气体、液体、固体等。物理学是整个科学的重要基础,因为它的基本原理、基本观点、研究方法和已经取得的研究成果是其他各门科学分支之基础。一般来说,我们将19世纪末以前物理学所研究的内容称为经典物理学,它包括力学、电磁学、光学、热学、声学。19世纪末20世纪初,电子、X射线以及原子核放射性的发现拓展了物理学的研究领域,量子力学和爱因斯坦相对论的建立标志着物理学的研究进入了一个新的阶段。量子力学阐述了微观粒子运动的特殊性,而相对论阐明了时间、空间和物质及其运动间的关系。量子力学和相对论的应用使得物理学的研究范围进入了由分子、原子、原子核、基本粒子及其组成的微观粒子系统。人类开始从微观角度解释物体的宏观性质,并且建立起了新的时空观。通常将这部分内容称为近代物理。

力学是物理学的一个分支,其研究对象是物体的机械运动,这是一种最常见、最简单、也是最基本的物质运动形式。机械运动是指物体位置的变化,它包括一个物体相对于另外一个物体位置的变化以及一个物体的某部分相对于其他部分位置的变化。各种机器的运动、弹簧的伸长压缩、河水及空气的流动、我们在地球上看到的天体位置的变化等都是机械运动。

由于人类实践活动的需要和数学的不断进步,在自然科学中力学最早形成一门完整、系统的学科。早在公元前4世纪,中国的墨子及其弟子在他们的著作《墨经》中就论述了时空概念、力、杠杆原理等许多方面的力学知识。在西方,古希腊的亚里士多德(约前384—前322)和阿基米德(约前287—前212)研究了物体的运动和平衡问题。15世纪后期,文艺复兴促进了力学在欧洲的发展,17世纪牛顿运动定律和万有引力定律的提出,标志着经典力学基础的奠定,之后经典力学获得了长足的发展,到19世纪初力学已发展成为一门相对完善的学科。相对论与量子力学是近代物理的基础,它们的建立明确了经典力学的适用领域,即宏观物体的低速运动。

尽管力学很古老,但是仍然极具生命力。目前在力学领域中,不断涌现出一些新兴学科,如爆炸力学、生物力学、等离子体动力学、空气动力学等。科学技术发展日新月异的今天,在载人飞船的发射、火箭的升空、机械制造、天体运行等方面的探索中,力学规律仍然是诸多研究的基础和有力工具。

实际物体的运动非常复杂,为了定量地研究其运动规律,在物理学中经常将实际物体抽象为某种理想模型,突出并如实地反映出研究对象的基本性质,以简化问题,便于研究。宏观物体都具有形状和大小,在运动过程中,其上各个点的运动也许是不同的。但是在研究物体的机械运动时,根据我们的研究目的和物体的特点,有时可以忽略该物体的大小和形状,将其全部质量视为集中在一个点上。这种具有一定质量但是无形状和体积的“点”被称为质点。任何物体,小到分子、原子,大到星系,都可以被抽象为质点,只要这些物体的内部结构、大小和形状可以被合理地忽略。

质点是力学中常见的一种理想模型,除此之外,力学中还常用到刚体、完全弹性体和理想流体三种理想模型。针对这四种模型,经典力学分为质点力学、刚体力学、弹性力学和流体力学。本书中只涉及前两种模型。

本书力学篇由质点力学和刚体力学基础两大部分组成。

第1章~第5章是关于质点的力学知识。这一部分将讲述质点和质点系在运动过程中遵循的基本定律、定理和规律。质点力学可以分为质点运动学和质点动力学两部分。质点运动学是从几何的角度对质点运动进行研究,探究质点位置随时间的变化规律,描述质点的运动状态。质点动力学以牛顿运动定律为基础,给出了质点运动状态变化的原因及其所遵循的规律。

1.1 位置矢量与位移

1. 位置矢量与运动函数

1) 位置矢量

在研究机械运动时,常常要寻找物体位置变化的规律。我们知道,物体的位置及位置的变化具有相对性。不同观察者看到物体的位置和其位置变化情况可能是不同的。站在地面上的观察者认为树木是静止的,而坐在行驶车辆内的人则看到树木向后运动。一个物体相对于不同观察者运动状态可能不同,这个特性称为机械运动的相对性。要准确地描述某个物体的位置和运动状态,需要选择其他物体做为参考。为了确定一个物体的运动状态而被选来做参考的另一个物体称为参照物,或参考系。若要精确定量地研究质点的运动,则需在参考系上建立固定于其上的坐标系。

从数学上讲,在坐标系中,一个点的位置常常用其坐标值来确定。而在质点运动学中,通常用一个矢量来确定物体的位置。选定坐标系,从坐标系原点向物体所在位置引一个有向线段,这个矢量称为位置矢量,简称位矢或矢径,记为 $\mathbf{r}$ 。质点运动学中采用位矢 $\mathbf{r}$ 来描述质点位置。

在各种坐标系中,最常使用的坐标系是直角坐标系。图1-1中, x 、 y 、 z 三个彼此垂直的坐标轴相交于一个固定点 O ,构成一个直角坐标系,这个固定点 O 就是坐标系的原点。一个质点在空间沿着曲线 AB 运动。在某一时刻 t ,质点位于 P 点,该点坐标为 (x, y, z) 。从原点 O 到物

体所在位置 P 点引一条有向线段 $\overrightarrow{OP}$, 这个有向线段代表的矢量就是位矢 $\mathbf{r}$ 。在直角坐标系中, 位矢 $\mathbf{r}$ 的数学表达式为

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

其中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为 x, y, z 轴上的单位矢量, 式中 x, y, z 的值可正可负, 它们的正负由质点在坐标系中的位置确定。位矢的大小记为 r , 它与该点坐标值间的关系为

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

设位矢与 x, y, z 轴的夹角分别为 α, β 和 γ , 则它们的余弦值与该点坐标值间的关系为

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \\ \cos \beta = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \\ \cos \gamma = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \end{cases} \quad (1-3)$$

由式(1-1)、式(1-2)和式(1-3)可以看出, 位矢精确地描述了质点的位置, 它的长度表明了质点距坐标原点的距离, 它的方向给出了质点相对于坐标系原点的方位。

在国际单位制(SI)中, 位矢的单位为米(m)。

2) 运动函数

由于质点的运动, 位矢 $\mathbf{r}$ 随时间变化, 即位矢是时间 t 的函数,

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-4)$$

式(1-4)称为质点的运动函数。

在直角坐标系中, 运动函数可以表示为

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

运动质点的坐标值 x, y, z 会随着时间变化, 即 x, y, z 是时间的函数,

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-5)$$

式(1-5)为直角坐标系中质点的运动函数。

运动函数给出了物体的位置随时间变化的函数关系。一旦知道了质点的运动函数, 就可以求得物体的速度、加速度、轨道等, 从而了解物体的运动状态。因此, 在质点运动学中, 运动函数对于了解质点运动是非常重要的。

例 1-1 已知质点从 $t=0$ 时刻起, 在 x, y 平面内由静止开始运动, 其运动函数为 $\mathbf{r}(t) = t\mathbf{i} + 2t^2\mathbf{j}$ (SI)。

求: (1) $t=3\text{s}$ 时质点的位矢。

(2) 该质点的运动轨道。

解 (1) 将 $t=3\text{s}$ 代入题中给出的运动函数, 得到 $t=3\text{s}$ 时质点的位矢

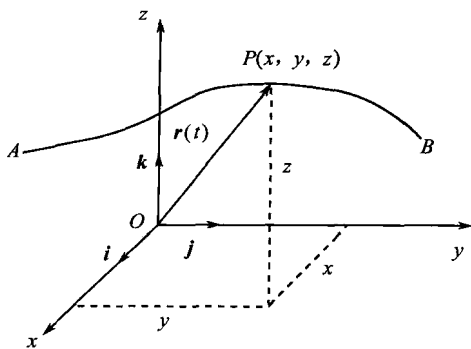


图 1-1 质点的位矢

$$\mathbf{r} = 3\mathbf{i} + 2 \times 3^2\mathbf{j} = 3\mathbf{i} + 18\mathbf{j}(\text{m})$$

此时该质点的 x 坐标值为 $x=3(\text{m})$, 其 y 坐标值为 $y=18(\text{m})$ 。

(2) 由该质点的运动方程可知, 它的 x 、 y 坐标值随时间变化的函数关系为

$$x(t) = t$$

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

由以上两个方程消去时间 t 就可以得到质点的轨道方程

$$y(x) = 2x^2$$

根据这个轨道方程和题中所给的条件可以判断, 该质点的运动轨道为求出的 $y(x) = 2x^2$ 这一抛物线 $x \geq 0$ 的部分, 如图 1-2 所示。

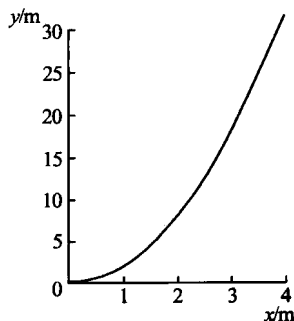


图 1-2 例 1-1 用图

2. 位移矢量

质点在运动过程中, 位置会发生变化。在质点运动学中, 为了定量地描述质点位置的改变, 引入了位移矢量的概念。图 1-3 中曲线 AB 为质点的运动轨道。 t 时刻, 物体位于 AB 曲线上的 P 点, 此时质点的位矢为 $\mathbf{r}(t)$, 经过时间间隔 Δt 后, 在 $t + \Delta t$ 时刻质点运动到轨道的 P' 处, 位矢为 $\mathbf{r}(t + \Delta t)$ 。从 P 点向 P' 引有向线段 $\overrightarrow{PP'}$, 这个矢量称为质点在 Δt 时间间隔内的位移, 记作 $\Delta \mathbf{r}$ 。根据矢量运算法则, 由图 1-3 可以看出, t 到 $t + \Delta t$ 时间间隔内质点的位移是 $t + \Delta t$ 时刻与 t 时刻质点的位矢之差。即在一段时间间隔内质点的位移矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 是从起点到终点的有向线段, 它等于终点位矢与起点位矢的差, 即

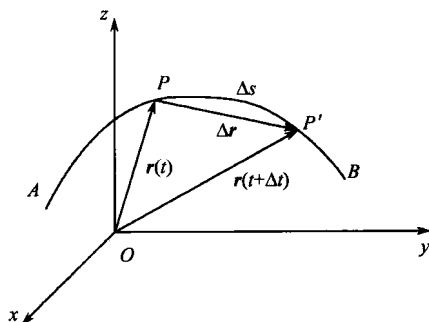


图 1-3 质点的位移

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t) \quad (1-6)$$

位移矢量表示出了物体在 Δt 时间间隔内质点位置的变化情况。位移矢量的大小, 用 $|\Delta \mathbf{r}|$ 表示, 给出了质点在 Δt 时间间隔内终点与起点间的距离; 位移的方向确定了 Δt 时间间隔内质点的运动终点相对于运动起点的方位。

除了位移之外, 路程有时也被用来描述物体位置的变化。路程是质点在空间走过的实际路径的长度。它是一个标量, 记为 Δs 。位移描述的是物体位置的改变, 不是物体通过的实际路程。一般情况下, 即使是位移的大小也与路程不相等。图 1-3 中物体从 P 点运动到 P' 点走过的路程值是曲线 PP' 的长度, 而位移的大小是直线段 PP' 的长度。两者是不同的。但是如果 P' 点无限地接近 P 点, 也就是从 P 点运动到 P' 点的时间间隔 Δt 趋近于零, 那么 PP' 曲线的长度就趋近于 PP' 直线的长度, 于是 $|\mathrm{d}\mathbf{r}| = \mathrm{d}s$, 即无限小位移的大小与无限小路程的值相等。

在国际单位制 (SI) 中位移的单位是米 (m)。

例 1-2 一质点在 xy 平面内运动,其轨迹如图 1-4 中的曲线所示。求:质点由 P_1 点运动到 P_2 点的位移。

解 质点的位移矢量为由起点 P_1 引向 P_2 点的有向线段,如图 1-4 所示。在所给的直角坐标系中,其解析表达式为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j}$$

从图 1-4 中读出 P_1 、 P_2 两个点的坐标值分别为 $(1, 8)$ 和 $(3, 12)$,代入上式得到所求的位移矢量为

$$\Delta \mathbf{r} = (3 - 1)\mathbf{i} + (12 - 8)\mathbf{j} = 2\mathbf{i} + 4\mathbf{j}(\text{m})$$

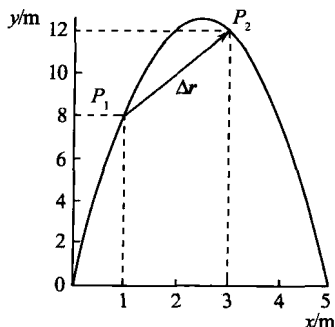


图 1-4 例 1-2 用图

1.2 速 度

质点机械运动的过程中,位置在不停地变化。一般来说,不同的质点在相同时间间隔内位置的变化情况是不同的,即使是同一个质点在两个相等的时间间隔内位置的变化情况也可能不同。例如:蜗牛每秒钟爬行距离约为 1mm ,而赛车每秒钟可行驶 100m 。在日常生活中,我们通常说物体运动的快慢不同。为了定量地描述物体位置随时间变化的快慢情况,运动学中引入了速度这一物理概念。

1. 平均速度 $\bar{v}$

设质点在时间间隔 Δt 内的位移为 $\Delta \mathbf{r}$,定义位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与时间间隔 Δt 的比值为质点的平均速度,以符号 $\bar{v}$ 来表示。平均速度定义的数学表达式为

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

由平均速度的定义可以看出,质点的平均速度是一个矢量,它的方向与位移的方向一致,平均速度的大小,用 $\bar{v}$ 表示,等于位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 与时间间隔 Δt 的比值。即

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

这里要注意 $|\Delta \mathbf{r}|$ 与 Δr 的区别。 Δr 是 Δt 时间间隔内位矢长度的增量,即 $\Delta r = r(t + \Delta t) - r(t)$,而 $|\Delta \mathbf{r}|$ 是位移的大小。两者不是一个物理量,但是在书写上容易混淆。在图 1-3 中, $|\Delta \mathbf{r}|$ 为线段 PP' 的长度,而 Δr 为线段 OP' 与线段 OP 之差,即 $\Delta r = OP' - OP$ 。

国际单位制中,平均速度的单位为米/秒(m/s)。

2. 瞬时速度 v

平均速度粗略地给出在一段时间间隔内物体运动的快慢情况。要描述物体在某一个时刻运动的快慢就要借助瞬时速度这个物理量。

定义瞬时速度,简称速度,等于平均速度在时间间隔 Δt 趋近于零时的极限。该定义的数学表示式为

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

速度等于位矢对时间的一阶导数,是位矢对时间的变化率。由速度的定义和式(1-8)可以看出速度是一个矢量。

速度的方向是 Δt 趋近于零时平均速度的方向。图 1-5 中, t 时刻质点位于 P 点, $t + \Delta t$ 时刻质点运动到 P' 点, 当 Δt 趋近于零时, P' 点无限地接近 P 点, 而位移的方向趋近于轨道 AB 在 P 点的切线方向。因此质点在轨道上某点的速度方向为: 沿轨道在该点的切线方向, 指向运动的前方。

速度的大小称为速率, 用 v 表示。

$$v = |\mathbf{v}| = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = \frac{ds}{dt} \quad (1-9)$$

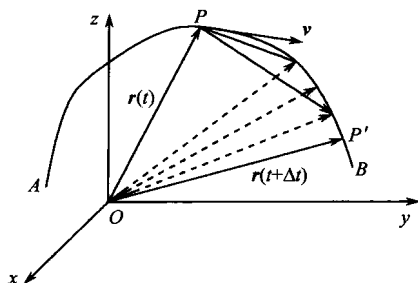


图 1-5 质点的速度

质点的速率等于路程对时间的一阶导数, 也就是路程对时间的变化率。

由以上论述可以看出, 质点的速度精确地描述了它在某个时刻运动的方向和快慢。

在直角坐标系中, 位矢的解析表达式为

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

将上式代入速度的定义式(1-8)中, 由于 $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 分别为 x 、 y 、 z 轴上的单位矢量, 它们的大小和方向恒定, 因此得到质点速度在直角坐标系中的解析式为

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1-10)$$

其中,

$$v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt} \quad (1-11)$$

v_x, v_y, v_z 分别是速度沿着 x, y, z 轴的三个分量, 它们的值可正可负, 其正负由速度方向及坐标轴的正向来确定。根据矢量运算的法则, 质点的速率可以由速度在直角坐标系中的分量 v_x, v_y, v_z 来计算, 为

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

速度是位矢对时间的一阶导数。要注意矢量与标量有着不同的运算法则, 因此矢量的微分与标量的微分是不完全相同的。对矢量的微分不仅要考虑这个矢量大小的变化, 还要考虑它的方向的变化。

在国际单位制中速度的单位为米/秒(m/s)。

1.3 加速度

通常物体的运动速度会随着时间变化, 例如飞机在起飞过程中, 速度越来越大; 而在降落过程中, 速度的值越来越小。质点速度随时间变化的快慢用加速度这一物理量来描述。

1. 平均加速度 $\bar{\mathbf{a}}$

图 1-6 中的 AB 曲线为某质点在空间的运动轨道。设 t 时刻, 质点的速度为 $\mathbf{v}(t)$, $t + \Delta t$

时刻质点的速度为 $\mathbf{v}(t + \Delta t)$ 。定义质点的平均加速度等于速度的增量与所用时间的比值,即

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}(t + \Delta t) - \mathbf{v}(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1-13)$$

平均加速度等于单位时间间隔内速度的增量,它是一个矢量,方向沿 Δt 时间间隔内速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 的方向。

国际单位制中,平均加速度的单位为米/秒² (m/s^2)。

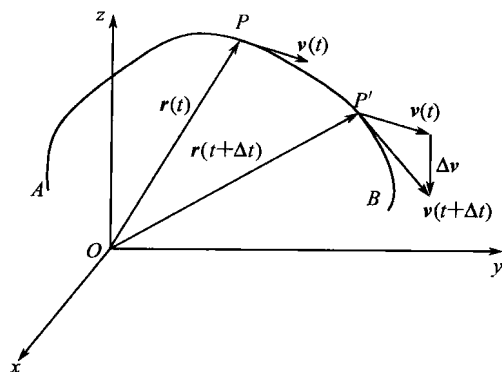


图 1-6 质点速度的增量

2. 瞬时加速度(加速度) $\mathbf{a}$

由平均加速度的定义出发,可以定义质点的瞬时加速度,简称加速度。定义质点的加速度等于其平均加速度在时间间隔 Δt 趋近于零时的极限,

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1-14)$$

加速度等于速度对时间的一阶导数,即速度对时间的变化率。

我们已经知道,速度等于位矢对时间的一阶导数,将式(1-8)代入加速度的定义式得

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-15)$$

即加速度等于位矢对时间的二阶导数。

直角坐标系中的加速度解析式为

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt} \mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt} \mathbf{k} = \frac{d^2 x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \mathbf{j} + \frac{d^2 z}{dt^2} \mathbf{k} \quad (1-16)$$

可以将加速度写为如下形式

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} \quad (1-17)$$

式中

$$\begin{cases} a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} \\ a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2} \end{cases} \quad (1-18)$$

a_x, a_y, a_z 为加速度在直角坐标系 x, y, z 坐标轴上的分量,它们的值可正可负,其正负由加速度矢量的方向和所选用的坐标轴的正方向来确定。加速度的大小用 a 表示,根据矢量的运算法则,可以由加速度在直角坐标系中的分量来计算加速度的大小,为

$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1-19)$$