

普通高等学校“十二五”规划教材系列

新编大学物理^上

王秀敏 / 主编

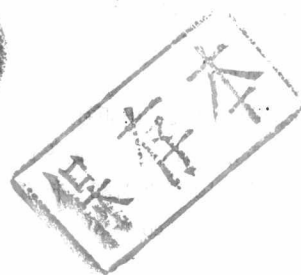


北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

04
467/1

新编大学物理(上)

主 编 王秀敏



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书是面向应用型本科非物理类学生编写的教学用书。编写的指导思想是:多形象分析,少抽象推演;多用通俗易懂的语言描述,少用深奥晦涩的术语论证。全套共分上、下两册,建议总学时为128学时,其中加※号及热学部分内容教师可根据实际教学需要进行取舍。本书整体架构清晰、内容设置具有层次性,因而也可作为其他本、专科院校进行大学物理教学或教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

新编大学物理·上册/王秀敏主编. —北京:北京邮电大学出版社,2012.9

ISBN 978-7-5635-3152-3

I. ①新… II. ①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 171324 号

书 名:新编大学物理(上)

主 编:王秀敏

责任编辑:王丹丹

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(邮编:100876)

发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail:publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京联兴华印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:16.25

字 数:324 千字

印 数:1—3000 册

版 次:2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-3152-3

定 价:36.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

QIANYAN 前言

本书是在《大学物理》(2008年,北京邮电大学出版社出版)基础之上,吸纳几年来使用本教材的各院校建议,进行修改而成。本书依据2004年教育部“非物理类专业基础物理课程教学指导委员会”颁布的“大学物理课程教学基本要求”选择教学内容,针对应用型本科学生的特点,面向非物理类应用型本科学生编写的物理课程教材。本书主要特点是:

1. 注重科学思维,整体架构清晰

物理学科在理工科院校是基础课程,它要完成的一个主要任务就是通过此课程的学习培养学生的科学思维品质,要培养学生理性的、逻辑的思维。因此本书在结构和内容的安排上力求具有较强的逻辑性,从而给学生一个完整知识体系框架和一个清晰的脉络层次。本书共分上、下两册,上册包括力学、机械振动和机械波、热学三部分,下册包括波动光学、电磁学、近代物理三部分。

2. 注重精讲多练,重点内容突出

“精讲”体现在两个方面:一是根据教学需要精选重点内容;二是在博采众家所长基础上,针对应用型本科学生的基础和学习特点,采用最优化方案精讲重点内容。“多练”也体现在两个方面:一是多介绍知识在生产生活中的应用;二是对于重点内容和典型问题设有例题、练习、习题三个环节进行强化和巩固,这三个环节相辅相成,共同实现对内容掌握的牢固性和应用的灵活性。

3. 注重细节设计,适应不同学生

一是考虑不同需求,内容划分层次。标有“*”号的章节内容为自选内

容,教师可以根据教学需求进行取舍,无论取与舍,都不影响内容的完整性和逻辑性。习题按难度分为 A、B 两类,学生可以根据自身情况选做对应难度的题目。

二是注意过渡与衔接,方便学生的预习和自学。每部分内容开始都有引言,结束都有小结,构造出清晰的物理知识体系和脉络。

三是注重学法指导,降低学习难度。对于中学相对陌生的内容,进行专门学习方法说明。如刚体一章开始即强调类比方法的运用,并编写了大量的类比表格。

四是精选物理学家的故事作为阅读材料,激发学习兴趣,培养奋斗精神。

在本教材编写的过程中大连理工大学城市学院的各级领导给予了大力的支持,北京邮电大学出版社给予了多方的帮助,兄弟院校的同仁们提出了中肯的建议,在此一并表示衷心的感谢。

本书习题的编写及答案的校对由大连理工大学城市学院的葛楠老师完成。

编写适合应用型本科学生的教材是一种尝试,尽管编者努力以求尽善尽美,但由于水平有限,加之时间仓促,难免存在缺憾和遗漏之处,恳请读者和同行批评指正。

编 者

Contents 目录

第一篇 力学

1

第 1 章 质点运动学	2
1.1 参考系 坐标系 质点模型	2
1.2 质点运动的描述	4
1.3 直线运动 运动学的两类问题	10
1.4 运动叠加原理 抛体运动	13
1.5 圆周运动	16
1.6 相对运动	22
小 结	23
阅读材料一:物理学的产生和发展	25
习题 1	28

第 2 章 质点动力学	31
2.1 常见力	31
2.2 牛顿运动定律及其应用	35
2.3 非惯性系和惯性力	40
2.4 质点的动量定理	42
2.5 质点系动量定理及其守恒定律	48
2.6 功 动能定理	52
2.7 功能原理 机械能守恒定律	58
2.8 碰撞问题	63
小 结	65
阅读材料二:经典物理的奠基人——牛顿	66

习题 2	68
------------	----

第 3 章 刚体的定轴转动	73
3.1 刚体定轴转动的描述	73
3.2 刚体定轴转动定律 转动惯量	75
3.3 转动定律的应用	79
3.4 转动动能定理	82
3.5 角动量定理 角动量守恒定律	86
小 结	90
习题 3	91

第 4 章 狭义相对论	95
4.1 力学相对性原理 经典力学时空观	95
4.2 狭义相对论基本原理 洛伦兹变换	98
4.3 狭义相对论的时空观	102
4.4 狭义相对论的动力学基础	106
阅读材料三:物理学的革命者——爱因斯坦	110
小 结	112
习题 4	113

第二篇 机械振动和机械波 116

第 5 章 机械振动	117
5.1 简谐振动的特征	117
5.2 描述简谐振动的物理量	122
5.3 简谐振动的描述方法	125
5.4 阻尼振动 受迫振动 共振	131
5.5 简谐振动的合成	133
小 结	141
习题 5	142

第 6 章 机械波	146
6.1 机械波的产生和传播	146
6.2 平面简谐波表达式的建立与意义	153
6.3 波的能量	158
6.4 声波	161
6.5 波的叠加原理 波的干涉	163
6.6 驻波	166
※6.7 多普勒效应	169
小 结	171
阅读材料四:钟摆的发明者——惠更斯	173
习题 6	175

第三篇 热学 177

第 7 章 气体动理论	178
7.1 热力学系统 平衡态 理想气体状态方程	178
7.2 理想气体的压强公式	181
7.3 理想气体的温度公式	185
7.4 能量按自由度均分定理 理想气体内能	186
7.5 麦克斯韦速率分布律	190
7.6 分子的平均碰撞频率和平均自由程	193
7.7 玻尔兹曼分布	196
小 结	198
习题 7	199

第 8 章 热力学基础	202
8.1 准静态过程 功	202
8.2 热量 热力学第一定律	205
8.3 理想气体的等值过程	206

8.4 气体的摩尔热容量	210
8.5 绝热过程	213
8.6 循环过程	216
* 8.7 热力学第二定律 熵	224
小 结	230
阅读材料五:热功当量的测量者——焦耳	232
习题 8	234

附录一 矢量及其运算	236
附录二 国际单位制	241
附录三 习题参考答案	244

第一篇 | 力学

力学是研究物体的机械运动及其规律的一门学科。

自然界中的一切物质都处于永不停息的运动状态之中,这些运动的形式是千变万化的,其中最普遍、最基本的运动形式即为机械运动,机械运动是指物体间或物体内部各组成部分之间相对位置的变化。例如行星绕太阳的运转、地球的自转、物体从高处下落、树叶的摆动、人体姿势的变化等都是机械运动。

力学是物理学中最古老的一个分支,也是人类最早建立的学科之一。其历史可以追溯到公元前 4 世纪,古希腊学者亚里士多德关于力产生运动的论述被认为是力学的开篇之作。在我国,公元前 5 世纪的《墨经》中已有关于杠杆原理的论述。但力学作为一门独立学科发展起来应始于 17 世纪伽利略关于惯性的论述,之后牛顿在总结前人经验和理论上所提出的力学三个基本定律和万有引力定律,及其在 1687 年发表的《自然哲学的数学原理》则标志着牛顿力学时代的开始。牛顿力学又称经典力学,它有着严谨的理论体系和完备的研究方法,并在生产实践中得到了广泛的应用,即使是到了 20 世纪,人们发现了经典力学在高速和微观领域的局限性,进而建立了相对论和量子力学,经典力学也仍是现代物理学和自然科学的基础,在一般的技术领域,如在机械制造、土木建筑、航天技术等方面仍具有广泛而精确的指导意义。

本篇包括 4 章内容:质点运动学、质点动力学、刚体的定轴转动以及狭义相对论基础。

质点运动学主要研究质点运动的描述问题;质点动力学主要研究力与质点运动状态变化之间的关系问题,即解释运动;刚体的定轴转动主要研究刚体定轴转动的描述及力矩与刚体转动状态变化之间的关系等问题;狭义相对论基础主要研究在高速领域描述运动的一些基本原理和观念。

第 1 章 质点运动学

质点运动学的任务是描述质点的运动,即从几何学的观点出发描述质点机械运动的状态随时间变化的关系,而不追究引起质点运动及运动状态变化的原因。本章主要介绍位置矢量、位移、速度、加速度等描述质点运动的物理量以及它们之间的关系,介绍反映质点运动情况的运动方程、反映质点运动轨迹的轨迹方程,并在此基础上研究几种特殊的机械运动形式。

1.1 参考系 坐标系 质点模型

1.1.1 参考系

自然界中的物质都处于永不停息的运动状态之中,运动是物质的存在形式,是物质的固有属性,运动和物质是不可分割的,这就是运动的绝对性,绝对静止的物体是不存在的。例如,列车茶几上看似静止的茶杯其实在随列车一起向前运动,地面上看似静止的物体其实是以 $3.0 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度随地球一起绕太阳运动,研究行星运动时认为静止的太阳其实也是以 $2.5 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度在银河系中运动。

物体的运动是绝对的,但对于运动的描述却是相对的。描述同一个物体的运动,不同的人往往得出不同的结论。例如,研究列车茶几上茶杯的运动,列车上的乘客认为茶杯是静止的,但站在站台上的人则认为茶杯是运动的。为什么同一个物体的运动,不同的人会得出不同的观察结果呢?原因就是这两个人在描述茶杯运动情况时选择了不同的参考物体,列车上的乘客以茶几为参考物体,得出茶杯静止的结论;而站台上的人以地面为参考物体,则得出茶杯运动的结论。再比如,从匀速上升电梯的顶棚落下一枚钉子,在电梯中的人看来,这枚钉子作的是自由落体运动,钉子直接下落到电梯的地面;而在地面上的人看来,这枚钉子则在作有一定初速度的竖直上抛运动,钉子是先上升一段高度,然后再下落。这两个人描述同一枚钉子的运动却得出不同结论,仍然是因为他们选择了不同的物体作为参考,电梯中的人是以电梯的地面为参考物体,而地面的人则是以电梯外的地面作为参考物体的。

可见,描述物体运动时,必须选择另一个物体作为参考物,离开所选择的参考物去描述某一个运动是没有意义的,这个运动也是无法描述的。在描述物体运动时,选作参考的物体称为参考系。在以后我们描述物体运动时,必须事先指出选择什么物体作为参考系。参考系的选择可以是任意的,可视问题的性质和研究问题的方便而定。例如,研究地面附近物体的运动时,我们一般选择地球或相对于地球静止的物体为参考系(如不加特殊说明,在本书中都是以地球或相对于地球静止的物体为参考系讨论问题),而如果研究天体的运动,则一般选择太阳为参考系。

1.1.2 坐标系

在选择合适的参考系之后,要定量地描述物体相对于参考系的运动情况,还需要在选定的参考系中建立适当的坐标系,坐标系是参考系的数学表示。坐标系有许多种,如直角坐标系、极坐标系、自然坐标系等。坐标系的选择也是任意的,一般视问题的性质和方便而定,无论选取哪类坐标系,物体运动性质都不会改变。当然,如果选取的坐标系适当,可以使问题的研究得以简化。

最常用的坐标系是直角坐标系(也称笛卡儿坐标系)。坐标系的原点 O 与参考系固定在一起,沿相互垂直的方向选取三个坐标轴,分别记为 x 、 y 、 z 轴,这样的坐标系称为空间直角坐标系,记为 $Oxyz$ 坐标系;如果所研究的物体作平面运动,我们也可以在平面内沿相互垂直方向建立两个坐标轴,分别记为 x 、 y 轴,这样的坐标系称为平面直角坐标系,记为 Oxy 坐标系;如果所研究的物体作直线运动,我们则只需建立一个坐标轴,记为 Ox 坐标轴。在具体问题中,需要建立几个坐标轴,坐标轴的正向指向哪里同样以问题的方便而定。

1.1.3 质点模型

实际问题中的物理过程往往都是比较复杂的,在讨论问题过程中,我们经常把实际的问题进行适当的简化,抓住问题的主要矛盾,从实际的问题中抽象出可以进行数学描述的理想物理模型,从而找出问题中最基本、最本质的规律。

质点即是力学中常用的一种理想物理模型。如果在某些运动中,有大小和形状的物体的各个组成部分具有相同的运动规律,或者物体的大小和形状对于所研究的问题没有影响,或者即使有影响,其影响也可以忽略不计,这时,我们就可以把物体视为一个没有大小和形状而有质量的点,这个点即为质点。一般地,在以下两种情形中我们可以把物体视为质点。

(1)物体运动时,其上所有点的运动情况相同,物体的大小和形状对于所研究的问题没有影响。例如,在桌面上平移一个杯子,组成杯子的各点运动情况相同,此时如果我们了解了杯子上任意一个点的运动情况,那么杯子上其他点的运动情况我们也就清楚了,因此,我们可以用这一个点来代替其他

所有的点,通过研究这个点的运动来了解整个杯子的运动,也就是说,此时,我们在研究杯子的运动时把整个杯子视为一个有质量的点——质点,而没有必要去考虑杯子的大小和形状。

(2)物体的大小和形状对所讨论问题的影响可以忽略不计。例如,我们在研究地球绕太阳的公转时,虽然地球自身尺度和形状会使地球上各点的运动情况不尽相同,但相比较地球到太阳的距离(约 $1.5 \times 10^8 \text{ km}$)而言,地球的尺度(约 $6\,370 \text{ km}$)太小了,地球尺度造成的各点运动情况的差异也太小了,这个差异不会影响我们对公转运动的研究,因此此时也可以把地球视为一个质点来研究其绕太阳的公转问题。

需要指出的是:一个物体是否可以视为质点还要视具体问题性质而定。例如,同是一个地球,我们在研究地球绕太阳的公转时可以把它视为质点,但如果要研究地球自转问题,地球则不可以视为质点,因为这时地球自身的大小和形状所引起的各点运动情况的差异是不可以忽略的,正是这种差异才使地球能够自转,如果忽略了这种差异,那么地球的自转是无法解释的。

建立理想物理模型是物理学中常用的研究方法之一。在以后的学习中,还会接触到质点系、刚体、弹簧振子、理想气体等理想物理模型。

练习题

雨点自空中相对于地面匀速竖直下落,试讨论在下述参考系中观察时,雨点的运动情况:(1)地面上静止的人群;(2)地面上匀速行驶的车中;(3)与雨点速度相同竖直下落的升降机中。

质点运动的描述

选择合适的参考系,建立合适的坐标系之后,我们就可以对质点的运动进行描述了。本节我们首先研究质点位置的描述,介绍描述位置的位置矢量,以及描述位置变化情况的运动方程、轨迹方程;然后,我们介绍描述运动的其他几个物理量,并讨论它们之间的关系。

1.2.1 质点位置的描述

1. 位置矢量

我们知道,当质点处于空间某一位置时,这个位置与所建立的坐标系中的一组坐标值是一一对应的,如图 1-1 所示,因而可以用这一组坐标值(x, y, z)来描述质点的位置。

我们还可以用一个矢量来描述这个点的位置。如图 1-1 所示,对于坐标系中的一个点 P ,我们可以从原点 O 引一个指向该点的有向线段 $\overrightarrow{OP}$,有向线段可以用来表示矢量, $\overrightarrow{OP}$ 所表示的矢量我们可以记为 $\boldsymbol{r}$ 。在坐标系中,点的

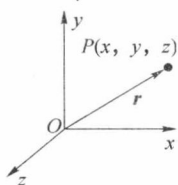


图 1-1 位置矢量

位置与有向线段是一一对应的,而有向线段与矢量也是一一对应的,因此,可以说,点的位置与矢量是一一对应的,所以可以用矢量 $\mathbf{r}$ 来描述质点的位置,这个用来描述质点位置的矢量称为位置矢量(简称位矢,又称径矢)。相应地,质点在坐标系中的坐标 x, y, z 称为位置矢量在对应坐标轴上的分量。

如图 1-2 所示,在直角坐标系中,位置矢量 $\mathbf{r}$ 可以表示成

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

式(1-1)称为位置矢量在坐标系中的分量形式。式中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别表示沿 x, y, z 三个坐标轴方向的单位矢量,它们的方向分别与三个坐标轴的正向一致,大小都为 1。

位置矢量的大小为

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

位置矢量的方向可以用矢量与坐标轴的夹角余弦表示,分别为

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \cos\beta = \frac{y}{r} \quad (1-3)$$

例题 1-1 如图 1-3 所示,试写出 A 点对应位置矢量的分量形式,并求出其大小和方向。

解 在平面直角坐标系中, A 点对应位置矢量的分量形式可写为

$$\mathbf{r}_A = \mathbf{i} + 2\mathbf{j} \text{ m}$$

位置矢量的大小为

$$r_A = \sqrt{1^2 + 2^2} = \sqrt{5} \text{ m}$$

与 x 轴正向的夹角余弦为

$$\cos\alpha = \frac{x}{r} = \frac{1}{\sqrt{5}} = \frac{\sqrt{5}}{5}$$

2. 运动方程

质点作机械运动时,其位置随时间是变化的,质点在坐标系中对应的坐标 x, y, z 也是随时间变化的,相应地,描述质点位置的位置矢量也是随时间变化的,这时位置矢量可以写为时间 t 的函数,即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1-4)$$

对于具体的机械运动,如果知道了式(1-4)的具体形式,则带入相关的时间值,即可得到该时刻质点的位置矢量,可见此式能够反映出质点的位置随时间的变化情况,因而我们称此式为质点的运动方程。

例题 1-2 已知一质点的运动方程为 $\mathbf{r} = t^2\mathbf{i} + 2t\mathbf{j}$, 式中 $\mathbf{r}$ 的单位是 m , t 的单位是 s 。试求: $t = 2\text{s}$ 时质点的位置矢量。

解 把 $t = 2\text{s}$ 代入运动方程可得

$$\mathbf{r}_2 = t^2\mathbf{i} + 2t\mathbf{j} = 2^2\mathbf{i} + 2 \times 2\mathbf{j} = 4\mathbf{i} + 4\mathbf{j} \text{ m}$$

3. 轨迹方程

运动方程中各坐标轴上分量如果分别表示出来,可写为

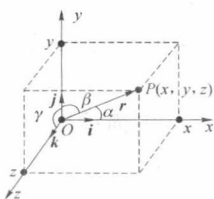


图 1-2 位置矢量的坐标表示

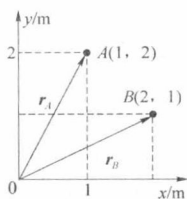


图 1-3 例题 1-1 用图

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

式(1-5)是运动方程的参数形式。由运动方程的参数形式,消去时间参数 t , 可得到反映质点运动时对应坐标之间关系的方程 $f(x, y, z)=0$, 根据这个方程, 可以描绘出质点运动时所经历的轨迹的形状, 因而, 这个消去时间 t 而得到的方程称为轨迹方程。

例题 1-3 已知如例题 1-2, 试求: 质点运动的轨迹方程, 并描绘出质点运动的轨迹。

解 根据运动方程可写出对应的参数形式为

$$\begin{cases} x=t^2 \\ y=2t \end{cases}$$

消去参数形式中的时间参数 t , 可得质点的轨迹方程为

$$x=\frac{1}{4}y^2$$

根据轨迹方程可知, 此质点的运动轨迹是一条关于 x 轴对称、开口向 x 轴正向的抛物线, 如图 1-4 所示。

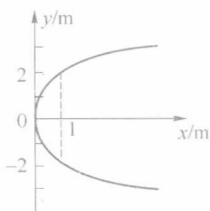


图 1-4 例题 1-3
用图

按照运动轨迹的形状不同, 可以把质点的运动进行分类: 运动轨迹为直线的运动, 称为直线运动; 运动轨迹为曲线的运动称为曲线运动。对于曲线运动, 当轨迹为抛物线时称为抛体运动, 轨迹为圆时称为圆周运动, 轨迹形状不规则的则称为一般曲线运动。

4. 位移

研究质点的运动, 不仅要知道质点在任意一时刻位置情况, 还要知道一段时间内质点位置的变化情况。描述质点位置变化情况的物理量称为位移, 用 $\Delta \mathbf{r}$ 表示。如图 1-5 所示, 质点在 Oxy 平面内运动, t 时刻位于 A 点, $t+\Delta t$ 时刻位于 B 点, 则 Δt 时间内质点的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 为由 A 点指向 B 点的有向线段。若 A 点对应的位置矢量为 $\mathbf{r}_A = x_A \mathbf{i} + y_A \mathbf{j}$, B 点对应的位置矢量为 $\mathbf{r}_B = x_B \mathbf{i} + y_B \mathbf{j}$, 根据矢量减法运算三角形法则可知

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} \quad (1-6)$$

式中: $\Delta x = x_B - x_A$, $\Delta y = y_B - y_A$ 。

位移是矢量, 其大小为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

方向同样可用矢量与坐标轴的夹角余弦表示

$$\cos \alpha = \frac{\Delta x}{|\Delta \mathbf{r}|}$$

对于位移的理解, 需要注意以下几点:

(1) 位移不同于路程。位移表示的是质点始末位置的变化情况, 而路程反映质点在这两个位置之间所经历的实际行程, 用 ΔS 表示; 位移是矢量, 既

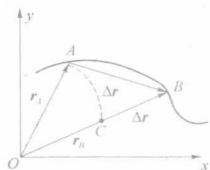


图 1-5 位移

有大小,又有方向,路程是标量,只有大小,没有方向;位移的大小也不同于路程,如图 1-5 所示,位移的大小对应于图中 A、B 两点间的直线段长,而路程对应于 A、B 两点间的弧线长,只有当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,我们方可认为二者大小相同。另外,即使在直线运动中,位移和路程也是两个截然不同的物理量。例如,以初速度 $v_0 = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 竖直向上抛出物体,在抛出后的 2s 内此物体的位移为零(因物体又落回抛出点),但路程却不为零,路程的大小为 9.8m。

(2) $\Delta \mathbf{r}$ 不同于 Δr 。 $\Delta \mathbf{r}$ 表示两点间的位移,是矢量。在图 1-5 中, $\Delta \mathbf{r}$ 大小对应于 A、B 两点间的直线段长; Δr 表示位置矢量大小的变化,是质点到坐标原点距离的变化,是标量。在图 1-5 中, Δr 大小对应于 B、C 两点间的直线段长。

在国际单位制,即 SI 制中,位置矢量和位移的单位都为米(m)。常用的单位还有千米(km)和厘米(cm)。

1.2.2 速度和速率

1. 平均速度和瞬时速度

速度是描述物体运动快慢的物理量。一段时间内物体的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与发生这段位移所经历的时间 Δt 的比值称为这段时间内物体的平均速度,用 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示,即

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

式中; $\Delta \mathbf{r}$ 是矢量, Δt 是标量,因而平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 是矢量,其方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 方向相同,如图 1-6 所示。平均速度只能是这段时间内物体运动快慢及运动方向的一个粗略的描述,如果想知道某一时刻质点运动的快慢和运动的方向如何,则需要把考虑的时间间隔 Δt 尽可能的取小,时间间隔越小,描述将是越细致的。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均速度的极限值称为瞬时速度(简称速度),用 $\mathbf{v}$ 表示,即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$$

根据微积分知识可知,这个极限应等于位置矢量 $\mathbf{r}$ 对时间的一阶倒数,即

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1-8)$$

式中; $v_x = \frac{dx}{dt}$ 、 $v_y = \frac{dy}{dt}$ 、 $v_z = \frac{dz}{dt}$ 分别称为速度沿三个坐标轴的分量。根据各分量可计算速度大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

速度的方向可表示为

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

速度是矢量,速度的方向为 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\Delta \mathbf{r}$ 方向。由图 1-6 可知, $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\Delta \mathbf{r}$ 方向为轨迹的切线方向,所以速度的方向应沿该时刻质点所在位置轨迹切线且指向运动的前方。

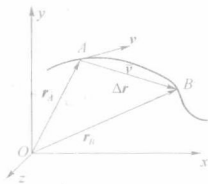


图 1-6 平均速度
和瞬时速度

2. 平均速率和瞬时速率

一段时间内物体运动的路程与发生这段路程所经历的时间 Δt 的比值称为这段时间内物体的平均速率,用 $\bar{v}$ 表示,即

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

式中: ΔS 是标量, Δt 是标量, 因而平均速率 $\bar{v}$ 是标量。

与平均速度相似, 平均速率也只能是这段时间内物体运动快慢的一个粗略的描述, 如果想知道某一时刻质点运动的快慢如何, 则需要把考虑的时间间隔 Δt 尽可能的取小, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 平均速率的极限值称为瞬时速率(简称速率), 用 v 表示, 即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt} \quad (1-10)$$

瞬时速率也是标量。

对于以上四个物理量理解时, 需要注意以下几点:

(1) 在国际单位制(SI)中, 它们的单位都是米每秒($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 生活中常用的单位还有千米每秒($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)和千米每小时($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)。

(2) 平均速度和瞬时速度都是矢量, 既有大小又有方向; 平均速率和瞬时速率都是标量, 只有大小, 没有方向。

(3) 平均速率和平均速度的大小并不相等。平均速率的大小是路程除以时间, 而平均速度的大小是位移的大小除以时间, 路程与位移的大小不相等, 因而平均速率与平均速度的大小不相等。

(4) 瞬时速率和瞬时速度的大小相等。由前面分析可知, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 路程与位移的大小相等, 因而有

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta r|}{\Delta t} = |\bar{v}| \quad (1-11)$$

例题 1-4 已知如例题 1-2。试求: (1) 质点在 $t=1\text{s}$ 至 $t=3\text{s}$ 时间内的位移; (2) $t=1\text{s}$ 时质点速度的大小和方向。

解 (1) 根据 $r = t^2 i + 2t j$, 把时间 $t=1\text{s}$ 和 $t=3\text{s}$ 分别代入运动方程, 可得两时刻质点的位置矢量分别为

$$\begin{aligned} r_1 &= 1^2 i + 2 \times 1 j = i + 2j \\ r_3 &= 3^2 i + 2 \times 3 j = 9i + 6j \end{aligned}$$

质点的位移为

$$\Delta r = r_3 - r_1 = 9i + 6j - (i + 2j) = 8i + 4j \text{ m}$$

(2) 根据运动方程, 可得速度表达式为

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{d(t^2)}{dt} i + \frac{d(2t)}{dt} j = 2t i + 2j$$

代入时间值, 得 $t=1\text{s}$ 时质点的速度为

$$v_1 = 2 \times 1 i + 2j = 2i + 2j$$

速度的大小为