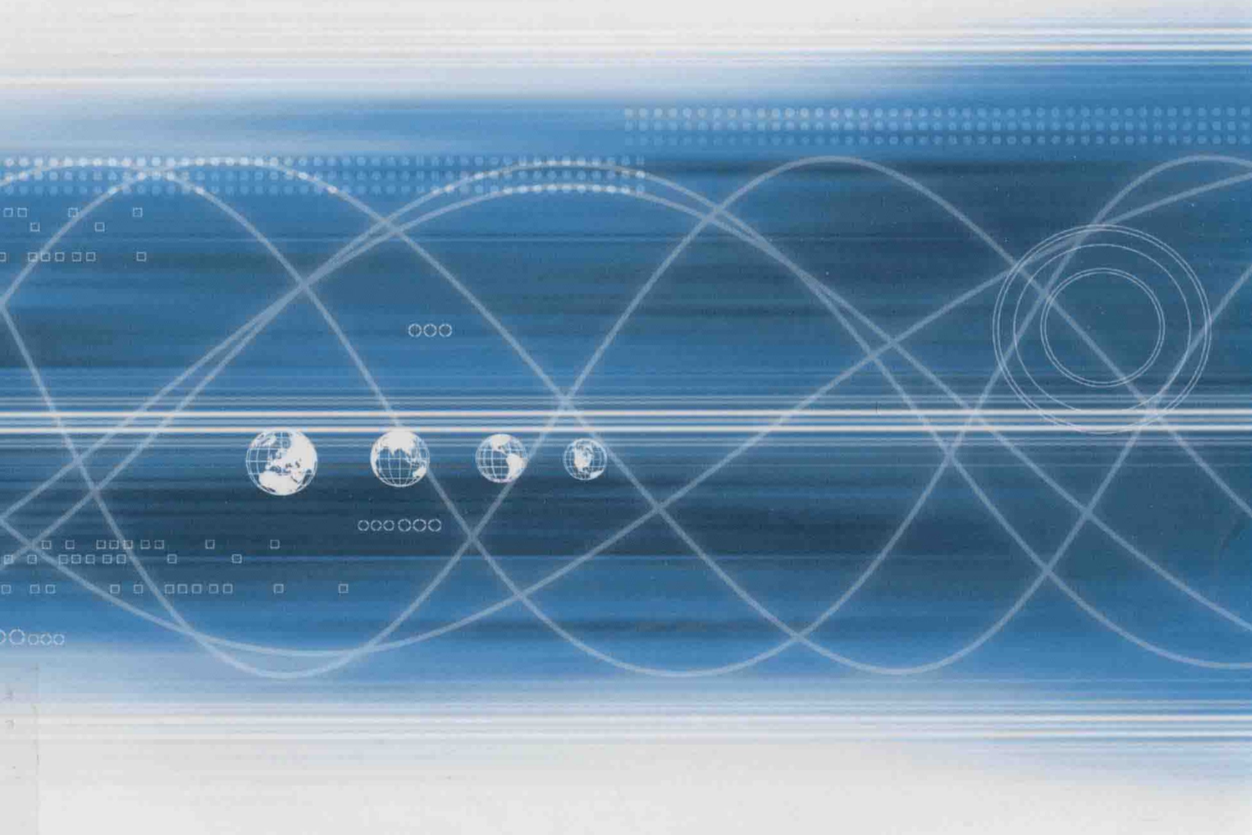
高等学校教材

大学物理（上册）

主　编　王亚民
副主编　班丽瑛　常　琳
　　　　田玉仙　孟泉水



高等教育出版社

高等学校教材

大学物理（上册）

主　编　王亚民
副主编　班丽瑛　常　琳
田玉仙　孟泉水

高等教育出版社·北京

内容简介

本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》（2010年版）编写而成。本书知识体系完整，内容科学性强；概念准确，语言表述简洁；数学推导严谨，繁简适当。本书力图在切实加强基础理论的同时，突出训练和培养学生的科学素质及分析问题、解决问题的能力。本书包括力学、电磁学、热学、振动与波动、波动光学、近代物理基础等内容。

本书可作为高等学校工科各专业的大学物理课程教材，也可供理科非物理类专业选用。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理. 上册 / 王亚民主编. -- 北京 ：高等教育出版社，2018.3

ISBN 978-7-04-047371-1

Ⅰ. ①大… 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（2017）第 021773 号

Daxue Wuli

策划编辑 忻　蓓　　责任编辑 忻　蓓　　封面设计 赵　阳　　版式设计 杜微言
插图绘制 杜晓丹　　责任校对 陈旭颖　　责任印制 毛斯璐

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 100120
印　　刷 三河市华骏印务包装有限公司
开　　本 787 mm×1092 mm　1/16
印　　张 16.75
字　　数 350千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网　　址 http://www.hep.edu.cn
　　　　 http://www.hep.com.cn
网上订购 http://www.hepmall.com.cn
　　　　 http://www.hepmall.com
　　　　 http://www.hepmall.cn
版　　次 2018年3月第1版
印　　次 2018年3月第1次印刷
定　　价 30.70元

物 料 号 47371-00

○ 前　　言

在科学与技术快速发展的今天，新兴学科与交叉学科不断地涌现，物理学的概念、研究方法，以及严谨而富有创新性的逻辑思维方式和实验技术在其他学科得到了广泛的应用和认同，显示了物理学在自然科学和社会科学中重要的基础性作用。为了适应当今科技、经济、社会发展对人才的需求，高等院校开设了学时不等的物理学课程以满足各学科专业的需求。

大学物理是一门理论性、实践性很强的基础课程，其重要性在于它所提供的一定基础的、系统的物理知识，和它所蕴涵的科学思想、方法和态度，以及激发学习者创新的能力。学习物理学可增强学生分析问题和解决问题的能力，培养学生的探索精神和创新意识，以实现学生知识、能力、素质的协调发展。

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》（2010 年版），并结合一般工科院校专业的教学特点编写而成的。全书分上下册，上册内容为：力学和电磁学；下册内容为：热学、振动与波动、光学、近代物理基础及现代物理技术。在编写中考虑到各个层次学生教育的特点，基本指导思想如下：

（1）充分突出理工科的教学特点，内容简明扼要、深入浅出，信息量大，实用性强。依据本课程教学基本要求，在提高学生分析问题、解决问题能力的基础上，强化物理原理在现代工程技术中的应用。

（2）在教材内容处理上，删减重复、陈旧的内容，精选、补充现代精华的内容，在保证稳定物理基础理论的同时，加强高新技术、前沿科学知识的引入，把最新的科技知识和成果带进课堂，寓物理学方法论于知识性教学之中，融理论阐述、概念辅导、程序例题、综合应用于一体。

（3）在教材处理上，把重点放在基本概念和基本方法方面；在内容先后次序安排上，采用循序渐进的方法，以便读者吸收掌握；在文字叙述上，力求通俗易懂，概念的引出、定理的证明和例题的阐述力求简明清晰，并尽量配合图形，使读者易于接受。

（4）教材中嵌入二维码影音，实现“一纸多屏”阅读体验，为读者提供更多的内容增值和演示实验。

本书由王亚民教授任主编，由孟泉水、班丽瑛、常琳和田玉仙任副主编。第 1、2、3、4、10 章由班丽瑛编写，第 5、9、11、12、16 章和附录由王亚民编写，第 6、8 章由常琳编写，第 7 章由田玉仙编写，第 13、14、15 章由孟泉水编写。全书由王亚民统稿，解忧教授主审。

在本书的编写和出版过程中，得到西安科技大学理学院物理系、教材科的关注和支持；教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会提供资助；张涛教授、

炎正馨教授和忻蓓编辑等为本书的编写提供了不少帮助。在此编者一并向他们表示诚挚的谢意。

由于时间仓促，编者水平有限，书中难免存在错误和不足之处，恳请专家、同行和读者斧正。

编者

2016年3月

○ 目　　录

第一篇　力　　学

第二篇　电　磁　学

第一篇　力　　学

自然界是由各种物质组成的，一切物质都在不断地运动和变化着．物质运动的基本形式有五种：机械的、物理的（包括分子热运动、电磁运动和原子及其内部粒子的运动等)、化学的、生物的和社会的运动形式．宏观物体之间或物体内部各部分之间相对位置随时间变化的过程称为机械运动，机械运动是最简单、最基本、最普遍的运动形式，而力学是研究物体机械运动的规律及其应用的学科．力学分为运动学、动力学和静力学三部分．运动学是描述和研究物体位置随时间变化规律的，仅就各运动量之间的关系而言，它不涉及引起物体位置和运动状态改变的原因；动力学研究的是物体运动与物体的相互作用之间的内在联系；静力学研究的是物体在相互作用下的平衡问题，本书不涉及静力学的内容．

本篇研究的内容是以牛顿定律为基础的经典力学．经典力学有其局限性，在高速领域被狭义相对论取代，在微观领域被量子力学取代．尽管如此，经典力学依然十分重要，在日常生活、工程技术、天文学研究中得到了广泛的应用，它的实用性是重要原因．经典力学又是物理学的重要基础．动量、角动量、能量等是物理学的基本概念，动量守恒、角动量守恒、能量守恒等是自然界的普遍规律．物理学是一门改变世界的科学，要学好物理学首先要学好经典力学．

第一章
质点运动学

物体的运动一般比较复杂. 由于物体本身具有一定的形状和大小，物体上各点处于空间的不同位置，因而在运动时，物体上各点的位置变动通常也不尽相同；同时，物体本身的大小和形状也可以不断改变. 所以，要详细描写物体的运动并不容易. 为了简化问题，引进质点模型来代表物体. 本章我们将首先讨论对物体运动的基本描述，通过对描述物体运动的基本物理思想和方法的介绍，引入位置矢量、位移、速度和加速度等物理量，而后把它们应用在直线运动和平面运动的讨论上. 在直线运动中，我们将讨论变加速直线运动；在曲线运动中我们将提到一般的曲线运动，且着重讨论圆周运动.

§1-1　参考系　坐标系　质点

一、参考系和坐标系

一切物质均处于永恒不息的运动中，运动是物质存在的形式、物质的固有属性，它包括宇宙中所发生的一切变化和过程，从简单的位置变动起直到思维止. 物质的各种运动形式都有其特殊的规律，运动和物质是不可分割的. 物质运动存在于人类意识之外，这便是所谓运动本身的绝对性. 绝对静止是不存在的，运动是绝对的，静止是相对的. 要描写一个物体的运动，必须选择另一个也在运动的物体，或几个虽在运动但相互间相对静止的物体作为参考. 然后，研究该物体相对于被选作参考的物体是如何运动的. 被选作参考的物体称为参考系.

从运动学的角度而言，参考系的选择可以是任意的，要视问题的性质和研究的方便而定. 例如，要研究物体在地面上的运动，最方便的是选择地球作为参考系. 当星际火箭进入绕太阳运行的轨道时，要研究它对太阳的运动，就应把太阳选作参考系. 在本篇中，如不做特别说明，一般均是取地球作为参考系.

所选取的参考系不同，对同一物体的运动的描述就会不同. 例如，在匀速前进的车厢中的自由落体，如果以车厢为参考系，是作直线运动；但如果以地球为参考系，却是作抛物线运动. 因此，同一物体的运动，对不同的参考系，可以作不同的描述. 这一事实，称为运动的相对性. 由于运动的相对性，我们在说明一种运动时，必须明确指出或清楚地理解，这一运动是相对于哪一个参考系来说的.

为了定量地描述一个物体相对某参考系的位置，在选择合适的参考系后，在参考物上任意选定一个参考点 O，并安置一个以 O 为原点的坐标系.

坐标系的选择也要看问题的性质和研究的方便而定. 常用的一种坐标系包括

一个原点和三条相互垂直的坐标轴（x 轴、y 轴、z 轴），这种坐标系称为直角坐标系或正交坐标系. 根据需要，也可选用其他的坐标系，如极坐标系、自然坐标系、球面坐标系或圆柱面坐标系等来研究物体的运动.

在研究曲线运动时，往往使用自然坐标. 在有些情况下，质点相对参考系的运动轨迹是已知的，例如，以地面为参考系，火车（视为质点）的运动轨迹（铁路轨道）是已知的. 在这种情况下，可以采用如下的方法确定质点的位置：首先在已知的运动轨迹上任选一固定点 O，然后规定从 O 点起，沿轨迹的某一方向（例如向右）量得的曲线长度 s 取正值，这个方向常称为自然坐标的正向；反之为负向，s 取负值，如图 1-1 所示. 这样质点在轨迹上的位置就可以用 s 唯一地确定，这种确定质点位置的方法称为自然法. O 点称为自然坐标的原点，s 称为自然坐标. 显然 s 和直角坐标（x，y，z）一样是代数量，其大小反映了质点与原点之间的曲线距离，其正负表明这个曲线距离是从轨迹上 O 点起沿哪个方向量得的.

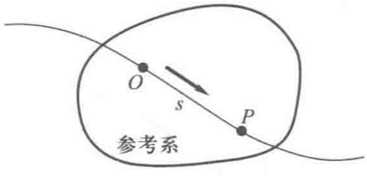


图 1-1

二、质点

物理学中常采用突出研究对象的主要性质（主要矛盾），而忽略次要因素（次要矛盾）的方法，用抽象化的理想模型来代替，找出其运动规律性，而又不影响所求解问题的精确度. 这是一种科学的思维方法和研究方法. 由于任何物体都有一定的大小和形状（表 1-1 列出了一些物体的质量和长度大小），当物体做机械运动时，物体上各点的位置变化不一定相同，所以要精确描写一般物体的运动，仍然不是一件容易的事情. 为使问题简化，可以采用抽象的方法：在一定的问题中，若物体的形状和大小可以忽略，则把这物体看成是一个具有一定质量的几何点，这就是质点的概念. 在很多问题中，固体在受力和运动过程中变形很小，我们假定无论外力有多大，物体的形状和大小不变，这就是刚体. 实际上，任何固体在力的作用下或多或少总会发生形变，有时形变还会是关键问题. 对此，人们又提出弹性体这一理想模型：物体形状和体积的变化如在外力撤销后随之消失，则该物体就是弹性体.

质点是一个相对的概念，把物体当作质点是有条件的、相对的，而不是无条件的、绝对的，因而对具体情况要作具体分析. 例如研究地球绕太阳公转时，由于地球至太阳的平均距离约为地球半径的 10^4 倍，故地球上各点相对于太阳的运动可以看作是相同的，所以在研究地球公转时可以把地球当作质点. 但是，在研究地球上物体的运动情况时，就不能再把地球当作质点处理了. 又如，一个做平动的物体，它上面各点的运动情况都相同，在这情况下，物体的线度和形状就不起作用，当然可以把它看作质点. 所以，一物体是否能看成质点，完全决定于我们所要研究问题的性质.

把物体看成质点是初步的研究方法，当我们进一步研究物体的运动时，常把

整个物体看作由无数个质点组成，通过分析这些质点的运动，便可弄清楚整个物体的运动. 所以，研究质点运动是研究物体运动的基础.

表 1-1

	质量 m/kg		长度 l/m
电子质量	10^{-30}	原子核的半径	10^{-15}
质子质量	10^{-27}	原子的半径	10^{-10}
血红蛋白质量	10^{-22}	病毒的线度	10^{-7}
流感病毒质量	10^{-19}	阿米巴变形虫的线度	10^{-4}
阿米巴变形虫质量	10^{-8}	人的身长	10^{0}
雨滴质量	10^{-6}	珠穆朗玛峰的高度	10^{4}
人的质量	10^{1}	地球半径	10^{7}
土星 5 号火箭质量	10^{6}	太阳半径	10^{9}
金字塔质量	10^{10}	太阳系半径	10^{13}
地球质量	10^{24}	地球与最近恒星的距离	10^{16}
太阳质量	10^{30}	银河系的尺度	10^{21}
银河系质量	10^{41}		

§1-2 位置矢量 位移

一、位置矢量

上面已经指出，描述物体的运动必须选定参考系. 在参考系选定以后，为定量有直角坐标系、极坐标系和自然坐标系等. 如图 1-1 所示. s 表示质点的运动轨道，某时刻质点到达空间一点 P.

在如图 1-2 所示的直角坐标系中，在时刻 t，质点 P 在坐标系里的位置可用位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 来表示. 位置矢量简称位矢或矢径，它是一个有向线段，其始端位于坐标系的原点 O，末端则与质点 P 在 t 时刻的位置相重合. 从图 1-2 中可以看出，位矢 $\boldsymbol{r}$ 在 Ox 轴、Oy 轴和 Oz 轴上的投影（即质点的坐标）分别为 x、y 和 z. 所以，质点 P 在 $Oxyz$ 的直角坐标系中的位置，既可用位矢 $\boldsymbol{r}$ 来表示，也可用坐标 x、y 和 z 来表示. 如取 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$ 和 $\boldsymbol{k}$ 分别为沿 Ox 轴、Oy 轴和 Oz 轴的单位矢量，那么位矢 $\boldsymbol{r}$ 亦可写成

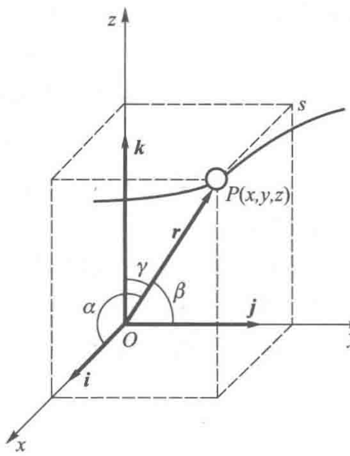


图 1-2

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k} \tag{1-1}$$

位置矢量的大小由下式决定

$$r=|\boldsymbol{r}|=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$$

位置矢量的方向余弦是

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

式中，α、β、γ 分别是位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 与坐标轴 x、y、z 之间的夹角.

由于方向余弦满足以下关系：

$$\cos^2\alpha+\cos^2\beta+\cos^2\gamma=1$$

则 α、β、γ 只有两个是独立的.

当质点限制在一个平面内运动时，我们可以采用极坐标系. 在极坐标系中质点的位置由坐标 r 和 θ 决定，如图 1-3 所示. 其中 $\boldsymbol{e}_r$ 沿径向，大小为 1，称为径向单位矢量；$\boldsymbol{e}_\theta$ 沿横向（与径向垂直，且指向 θ 角增加的方向），大小也为 1，称为横向单位矢量. 质点的位置矢量可表示为

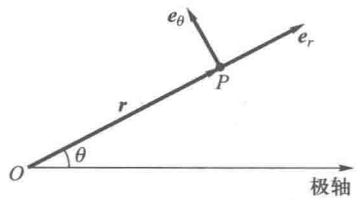


图 1-3

$$\boldsymbol{r}=r\boldsymbol{e}_r \tag{1-2}$$

质点在不同位置时 $\boldsymbol{e}_r$ 和 $\boldsymbol{e}_\theta$ 的大小虽然不变（恒等于 1），但是它们的方向与质点的 θ 坐标有关，而 θ 本身又是时间的函数.

二、运动方程　轨迹方程

当质点相对于参考系作机械运动时，质点的空间位置随时间而变化. 因此，位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 是时间 t 的函数，可表述为

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t) \tag{1-3a}$$

这是一个矢量函数，称为质点的运动方程. 根据运动方程，可确定各个时刻 t_1，t_2，…的质点位置 $\boldsymbol{r}_1$，$\boldsymbol{r}_2$，…这时，在所选取的直角坐标系 $Oxyz$ 中，位矢 $\boldsymbol{r}$ 沿各坐标轴的分量 x、y、z 也相应地随时刻 t 在变化，即

$$x=x(t),\ y=y(t),\ z=z(t) \tag{1-3b}$$

上述运动方程在直角坐标系 $Oxyz$ 中正交分解式可写作

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)=x(t)\boldsymbol{i}+y(t)\boldsymbol{j}+z(t)\boldsymbol{k} \tag{1-3c}$$

式（1-3a）和式（1-3c）是矢量形式的运动方程，而式（1-3b）是标量形式的运动方程.

已知运动方程，就确定了质点的运动. 力学的主要任务之一，就是根据各种问题的具体条件，求解质点的运动方程.

当质点在选定的 Oxy 平面内运动时，运动方程为

$$x=x(t),\ y=y(t)$$

或

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

若质点沿直线运动，则运动方程简化为

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)=x(t)\boldsymbol{i}$$

或写成标量形式

$$x=x(t)$$

即在直线运动中只需一个坐标（设为 x）描述. 在这个坐标轴上取定坐标原点，并规定坐标轴的正方向，显然 x 随 t 而变，x 为正值时表示质点的位置在原点的正向一侧；x 为负值时表示质点的位置在原点的负向一侧.

运动质点在空间所经过的路径称为轨迹. 轨迹为直线的运动，称为直线运动，轨迹为曲线的运动，称为曲线运动. 从运动方程（1-3b）中消去 t，就可以得到轨迹方程. 而式（1-3b）也可看作是轨迹的参数方程.

例 1-1 一小车在水平面上的直角坐标系 Oxy 中的运动方程为

$$\boldsymbol{r}=(6\cos\ \pi t)\boldsymbol{i}+(6\sin\ \pi t)\boldsymbol{j}$$

式中，r 的单位是 m，t 的单位是 s，求小车的轨迹方程.

解 由题设的运动方程，可得相应的分量式为

$$\begin{cases} x=6\cos\ \pi t & (1) \\ y=6\sin\ \pi t & (2) \end{cases}$$

将式（1）、（2）的两边分别平方，然后相加，得小车的轨迹方程为

$$x^2+y^2=36$$

这表明小车在水平面上沿着以原点 O 为圆心，半径为 6 m 的圆形轨迹运动.

三、位移

在图 1-4 中，一质点由 A 点经曲线路径到 B 点. 设在时刻 t 质点在 A 点处，在时刻 $t+\Delta t$ 到达 B 点处. 若质点在 A、B 两点的位置矢量分别用 $\boldsymbol{r}_A$、$\boldsymbol{r}_B$ 表示，那么，在 Δt 时间内质点的位置变化可以用从 A 点到 B 点的有向线段 $\overrightarrow{AB}=\Delta\boldsymbol{r}$ 来表示. $\Delta\boldsymbol{r}$ 叫做质点在 Δt 时间内的位移. A、B 两点的直线距离为位移的大小，从 A 点指向 B 点的方向为位移的方向，位移具有大小和方向，而且位移相加遵从平行四边形法则，所以位移是矢量.

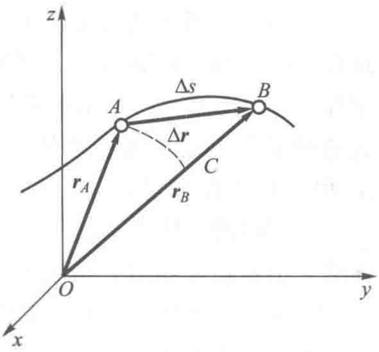


图 1-4

从图 1-4 中可以看出

$$\boldsymbol{r}_A+\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_B$$

所以位移

$$\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_B-\boldsymbol{r}_A \tag{1-4}$$

即质点在某一段时间内的位移等于同一段时间内位矢的增量.

由式（1-1）知

$$\boldsymbol{r}_A=x_A\boldsymbol{i}+y_A\boldsymbol{j}+z_A\boldsymbol{k}$$
$$\boldsymbol{r}_B=x_B\boldsymbol{i}+y_B\boldsymbol{j}+z_B\boldsymbol{k}$$

代入式（1-4），得

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

或写成

$$\Delta \boldsymbol{r}=\Delta x\boldsymbol{i}+\Delta y\boldsymbol{j}+\Delta z\boldsymbol{k} \tag{1-5}$$

所以，位移的大小为

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

位移的方向余弦为

$$\cos\alpha=\frac{\Delta x}{|\Delta \boldsymbol{r}|},\ \cos\beta=\frac{\Delta y}{|\Delta \boldsymbol{r}|},\ \cos\gamma=\frac{\Delta z}{|\Delta \boldsymbol{r}|}$$

质点在平面上运动时，位移

$$\Delta \boldsymbol{r}=\Delta x\boldsymbol{i}+\Delta y\boldsymbol{j}$$

质点在一直线上运动时，位移

$$\Delta \boldsymbol{r}=\Delta x\boldsymbol{i}$$

为方便计算，直线运动中的位移可当作标量来处理，用 Δx 表示. Δx 为正值，表示位移方向与 x 轴正方向一致；Δx 为负值，表示位移方向与 x 轴正方向相反.

位移和位矢不同，位矢反映某一时刻质点的位置，位移则描述某段时间内质点始末位置的变化.

对于相对静止的不同坐标系来说，位矢依赖于坐标系的选择，而位移则与所选取的坐标系无关. 对此读者可以自己绘图证明. 位移只反映出一段时间始末质点位置的变化，它不涉及质点位置变化过程的细节.

在运动中所通过的实际路线的长度，如图 1-4 中曲线$\overset{\frown}{AB}$的长度叫做路程，路程只有长短，没有方向，所以路程是标量. 路程可记作 Δs. Δs 和$|\Delta \boldsymbol{r}|$一般说来并不相等. 例如，一质点从位置 A 出发，绕一半径为 R 的圆圈仍回到 A. 虽然它通过了 $2\pi R$ 的路程，可是位置并无变化，即位移为零. 在时间 Δt 趋近于零时，Δs 和$|\Delta \boldsymbol{r}|$可视为相等，可简记为 $\mathrm{d}s=|\mathrm{d}\boldsymbol{r}|$. 即使在直线运动中，位移和路程也是截然不同的两个概念. 在直线运动中，若物体的运动方向保持不变，虽然这时位移的大小和路程相等，但若运动方向有变化，位移的大小和路程一般就不相等了. 例如，一质点沿直线从 A 到 B 又折回 A，显然路程等于 A、B 之间距离的两倍，而位移却为零.

还要指出的是，位移 $\Delta \boldsymbol{r}$（即位矢的增量）的大小$|\Delta \boldsymbol{r}|$与位矢大小的增量 Δr 一般是不相等的. 设时间 Δt 内位矢大小的增量为 Δr，即

$$\Delta r=|\boldsymbol{r}_B|-|\boldsymbol{r}_A| \tag{1-6}$$

在图 1-4 中，以 O 点为圆心，以 $\boldsymbol{r}_A$ 的长度为半径作圆弧，它与位矢 $\boldsymbol{r}_B$ 相交于 C 点，则 $\overline{CB}$ 即为 Δr，而位移的大小则为 $|\Delta \boldsymbol{r}|=\overline{AB}$. 因此一般情况下，$|\Delta \boldsymbol{r}|\neq\Delta r$.

大小和方向随时间变化的任一矢量 $\boldsymbol{A}$（$\boldsymbol{A}$ 可以是位矢也可以是后面即将介绍的速度矢量 $\boldsymbol{v}$ 或加速度矢量 $\boldsymbol{a}$ 等）在某段时间 Δt 内增量的大小$|\Delta \boldsymbol{A}|$与同一时间内该矢量大小的增量 ΔA，一般说来不相等.

§1-3 速度 加速度

在力学中，若仅知道质点在某时刻的位矢，而不能同时知道该质点是静还是动，是动又动到什么程度，就不能确定质点的运动状态. 只有当质点的位矢和速度同时被确定时，其运动状态才被确知. 所以，位矢和速度是描述质点运动状态的两个物理量.

一、速度

1. 平均速度

如图 1-4 所示，质点沿轨迹按运动方程 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)$ 作一般曲线运动，时间 Δt 内质点的位移为 $\Delta\boldsymbol{r}$. 质点的位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 与发生这个位移所经历的时间 Δt 之比，称为这一段时间内质点的平均速度，用 $\overline{\boldsymbol{v}}$ 表示，即

$$\overline{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t} \tag{1-7a}$$

在直角坐标系中表示为

$$\overline{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta x}{\Delta t}\boldsymbol{i}+\frac{\Delta y}{\Delta t}\boldsymbol{j}+\frac{\Delta z}{\Delta t}\boldsymbol{k} \tag{1-7b}$$

平均速度是矢量，其方向与位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 的方向相同. 它表示在时间 Δt 内位矢 $\boldsymbol{r}(t)$ 随时间的平均变化率.

平均速度的大小 $|\overline{\boldsymbol{v}}|=\left|\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}\right|$. 显然，一般情况下 $|\overline{\boldsymbol{v}}|\neq\left|\frac{\Delta r}{\Delta t}\right|$. 描述质点运动时，我们也常采用一个叫做“速率”的物理量. 速率是标量，它等于质点在单位时间内所经历的路程，而不考虑质点的运动方向. 平均速率等于质点经历的路程 Δs 与经历这段路程所用时间 Δt 之比，即

$$\bar{v}=\frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{1-8}$$

显然平均速度的大小与平均速率不同.

一般来说，平均速度（包括大小和方向）与所取的时间长短有关. 所以，在谈到平均速度时，必须指出是在哪一段时间内的平均速度.

因为平均速度只反映一段时间内位移的平均变化，所以用平均速度来描写物体的运动是比较粗糙的. 如要精确地描述物体的运动情况，我们必须知道物体在每一时刻（或每一位置）的速度，即瞬时速度.

2. 瞬时速度

平均速度 $\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}$ 的大小和方向都随所取时间 Δt 的不同而异. 当使 Δt 尽量减小并趋近于零时，则 $\Delta\boldsymbol{r}$ 的大小（即割线 AB 段的长度，见图 1-5）也逐渐缩短而趋近于零；从而 B 点逐渐趋近于 A 点，位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 的方向也从割线 $\overrightarrow{AB}$ 的方向逐渐趋近于

A 点的切线方向. 于是，质点在某一时刻 t 的运动情况，便可用 Δt 趋近于零时平均速度$\dfrac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}$所趋向的极限（包括大小和方向的极限）即瞬时速度，简称速度，用 $\boldsymbol{v}$ 表示，即

$$\boldsymbol{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\overline{\boldsymbol{v}}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \tag{1-9a}$$

即速度等于位矢对时间的一阶导数. 只要知道了用位矢表示的质点运动学方程$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)$，就可以求出质点的速度.

从速度的定义式（1-9a）可知，t 时刻质点速度 $\boldsymbol{v}$ 的方向就是当 $\Delta t\to 0$ 时平均速度 $\overline{\boldsymbol{v}}$ 的极限方向. 由图 1-5 可以看出，当 $\Delta t\to 0$ 时，B 点将趋近于 A 点，$\overline{\boldsymbol{v}}$ 将变得与轨迹上 A 点处的切线重合并指向运动一方，故 t 时刻质点速度沿着该时刻质点所在位置 A 点轨迹的切线方向，并指向质点运动的一方. 质点在作曲线运动时，速度沿轨迹的切线方向，这在日常生活中经常可见，如转动雨伞，水滴将沿切线方向离开雨伞等.

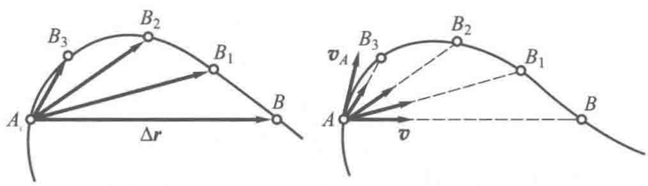


图 1-5

速度的定义式是一个矢量导数，在实际计算时，常采用其坐标式. 在直角坐标系中，速度可表述为

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k} \tag{1-9b}$$

式中，$\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$、$\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}$、$\dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$分别是速度在三个坐标轴上的分量 v_x、v_y、v_z，则上式可写成

$$\boldsymbol{v}=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j}+v_z\boldsymbol{k}$$

显然，速度的大小为

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

当质点作平面曲线运动时，速度

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j}$$

其大小为

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

速度 $\boldsymbol{v}$ 和 x 轴的夹角 θ 由下式决定，即

$$\tan\theta=\frac{v_{Ay}}{v_{Ax}}$$