高等学校教材

大学物理（上）

主编　熊红彦　赵宝群

高等教育出版社

高 等 学 校 教 材

大学物理（上）

主 编 熊红彦 赵宝群

高等教育出版社·北京

内容简介

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）在保留系列教材基本风格的基础上，特别针对本科院校大学物理课程教学的需求，对教学内容进行了更新与整合，并结合国内外非物理类尤其是工科物理教材改革动态和编者多年的教学实践经验编写而成的。

全书分为上、下两册，上册包括力学基础、振动与波动、热学等内容；下册包括电磁学、波动光学、近代物理学等内容。本书内容注意联系生活实际，满足高等学校多样化人才培养的要求，突出应用、特色鲜明。本书反映了人才培养模式和教学改革的最新趋势，可作为应用型本科院校中各个专业大学物理课程的教学用书，还可作为一般读者了解基础物理理论与工程技术中应用物理内容的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 上 / 熊红彦,赵宝群主编. --北京：高等教育出版社,2015. 12

ISBN 978-7-04-043986-1

Ⅰ. ①大… Ⅱ. ①熊… ②赵… 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(2015)第 234594 号

策划编辑 张海雁　责任编辑 王　硕　封面设计 赵　阳　版式设计 童　丹
插图绘制 杜晓丹　责任校对 刘娟娟　责任印制 赵义民

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社　　址	北京市西城区德外大街 4 号	网　　址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印　　刷	北京市密东印刷有限公司	网上订购	http://www.landraco.com
开　　本	787mm×1092mm 1/16		http://www.landraco.com.cn
印　　张	15		
字　　数	370 千字	版　　次	2015 年 12 月第 1 版
插　　页	1	印　　次	2015 年 12 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定　　价	26.80 元

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

物 料 号　43986-00

前 言

本书针对本科院校大学物理课程的教学需求，在教学结构和教学内容上，相对以往工科物理教材均有较大的变化和更新。本书可满足高等学校多样化人才培养的要求，突出应用、特色鲜明。本书反映了人才培养模式和教学改革的最新趋势，主要具有以下特色：

(1) 内容简练且系统性强。在内容设置上，我们力求基本物理内容形成完整体系，并且针对各类专业选择应用物理内容；在内容处理上我们尽量简化数学推导，突出物理思想和物理规律的应用。

(2) 密切联系实际，突出应用。本书的各章内容，我们都力图结合实际问题，着重介绍物理理论在实际工程中的具体应用。

(3) 适用面广。本书可以作为应用型本科院校中各个专业大学物理课程的教学用书，还可作为一般读者了解基础物理理论与工程技术中应用物理内容的参考书。

全书内容可以分为两部分。一部分为基础内容，包括运动的描述、运动定律、振动与波、热物理学、静电场、恒定磁场、电磁感应及电磁场、波动光学、狭义相对论和量子物理学等内容；基本内容按照60学时左右设计，打星号的内容属于选讲内容，可以满足多样化人才培养的要求。另一部分为应用内容，包括流体运动、物体的弹性、直流电路、交流电路、光谱光度学、激光、X射线、核放射和核磁共振等，应用内容自成体系，可作为各类专业物理课程的教学内容，各个不同的专业可以具体选择相关章节。

本书采用国际单位制，物理量的名称及其表示符号执行国家现行标准。

熊红彦、赵宝群担任本书主编，对全书内容进行了设计、修改和审定。王玉国教授作为主审。参加编写工作的有：赵宝群（第1、第2章）、门高夫（第3章）、徐静（第4、第5章）、王意（第2、第5、第6、第7、第18章）、熊红彦（第8、第9、第21章）、王学（第2章）、张春元（第12、第13章）、赵剑锋（第10、第14章）、张寰臻（第15、第16、第17章）、张红（第19、第20章）、王光建（第22章）。

由于时间仓促，编者水平有限，书中可能还存在一些缺点和错误，衷心希望广大读者提出宝贵意见。

编 者

2015年6月

目 录

第一篇 力学基础

第二篇 振动与波动

第三篇 热 学

第一篇　力学基础

力学是研究物体机械运动规律的学科.物质的运动形式包括:机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核运动,等等.其中机械运动是物质的各种运动形式中最简单、最基本的运动形式,它是指物体之间(或物体内各部分之间)相对位置的变动.力学是物理学中最古老和发展最完美的学科,它在各门自然学科中发展得最早.早在17世纪,力学已经形成一门理论严密、体系完整的学科.它曾被人们誉为完美、普遍的理论而兴盛了约三百年.直到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,经典力学仍然是不可或缺的基础理论.

力学是本课程中最基本的内容.学习这一部分内容不仅可以使读者学到基本规律,而且还能够学习运用科学思维和基本概念、原理去分析解决具体问题,提高学习能力.

力学是一切工程技术的基础理论知识,如机械制造、土木建筑、水利设施、电子技术、信息技术等工程技术领域.系统掌握力学知识可以为进一步学习相关后续课程打下基础.

研究力学,通常是先研究运动的描述,即单纯地用几何观点描述物体的位置如何随时间变化而在空间的运动情况,而不涉及物体的质量和所受的力,这叫做运动学.然后考虑物体的质量和物体之间的相互作用,进一步研究运动的规律,即在怎样的条件下发生怎样的运动,这叫做动力学.本篇共分3章.第1章介绍运动的描述.第2章介绍运动定律,这是动力学的基本规律,本章包括牛顿运动定律及其应用,动量以及动量守恒定律,功和能以及能量守恒定律.第3章介绍刚体的运动.

第 1 章　运动的描述

自然界的物质都处于不停的运动之中,物质有各种不同的运动形式,其中机械运动是物质的各种运动形式中最简单、最基本的运动形式,它是指物体之间(或物体内各部分之间)相对位置的变动.例如:车辆的行驶、弹簧的振动、机器的运转、河水的流动等,都是我们日常中所观察到的机械运动.另外,地球绕太阳的运转,人造地球卫星绕地球的运转,火箭喷出的气体的运动等,也都是机械运动.机械运动的基本形式有平动和转动.物体在平动过程中,物体内各点都做同样的运动,物体上任一点的运动都可以用来代表整个物体的运动.所以物体的运动可用一个具有该物体质量的点的运动来代替.这种不计物体的形状和大小而具有该物体全部质量的点称为**质点**.本章主要介绍质点运动的描述方法.

本章主要内容为:运动的描述方法,运动的描述(位置矢量、位移、速度、加速度),切向加速度,法向加速度,圆周运动,线量与角量的关系,相对运动.

1.1　运动的描述方法

为了描述物体的运动,必须选择参考系,建立坐标系,提出物理模型.

1.1.1　运动的绝对性和相对性

星体运动、江河奔流、车辆行驶、机器运转等,宇宙间万物都在永恒不停地运动着.运动是物质的存在形式,是物质的固有属性,所以**运动是绝对的**.任何物体在任何时刻都在不停地运动着,即使看起来静止不动的高山峻岭、高楼大厦,也在昼夜不停地随着地球一起自转和绕太阳公转,而太阳系绕银河系中心以大约 250 $\mathrm{km \cdot s^{-1}}$ 的速率运动,银河系也在宇宙中相对于其他星系以大约 600 $\mathrm{km \cdot s^{-1}}$ 的速率高速地运动.总之,自然界中绝对不运动的物体是不存在的,运动是永恒的.

而“静止”只有相对的意义.同一物体的运动,从不同的角度看来可以得出完全不同的结论.例如,火车在辽阔的田野疾驰而过,站在地面铁道边上的人看起来,火车在高速地运动,而该火车车厢里的乘客看来,火车车厢相对于自己没有运动,而铁路边的人和树木等都在向后退.因此,**运动又具有相对性**.物体的运动,都是在一定的环境和特定的条件下进行的,离开一定的环境和特定的条件谈论运动是没有任何意义的.

1.1.2　参考系

运动是绝对的,但是对运动的描述是相对的.在观察一个物体的位置以及位置的变化时,必须先指明运动是相对于哪个参考物体而言的,即必须先选定一个物体作为基准.这个被选作参考、作为基准的物体就叫做**参考系**.所选参考系不同,对同一物体的运动的描述就不同.这就是**运动描述的相对性**.例如,做匀速直线运动的火车车厢中,一物体自由下落,相对于车厢,它做自由落体运动;而在地面上静止的人看来,它做抛物线运动;而从航天飞机上来看,其运动形式更复杂.

从运动学的角度来看,参考系是可以任意选择的.通常以对问题的研究方便、简单为原则.讨论地面上物体的运动时(例如研究汽车的运动),通常选地球表面(地面)为参考系最为方便.以后如果不作特别说明,研究地面上物体的运动,都以地面为参考系.研究人造地球卫星的运动,以地球中心为参考系最方便;研究行星的运动,则以太阳为参考系最方便.人们常用的参考系有:太阳参考系(太阳-恒星参考系)、地心参考系(地球-行星参考系)、地面参考系(实验室参考系)和质心参考系等.

1.1.3 坐标系

选定参考系后,为了定量描述一个物体在各时刻相对于参考系的运动规律,还需要建立适当的**坐标系**,固定在被选作参考的物体上.运动物体的位置就由它在坐标系中的坐标值确定.这个坐标系既然与参考系牢固地连接成一体,则物体相对于坐标系的运动,就是相对于参考系的运动.在力学中,通常采用直角坐标系,也可根据需要选用平面极坐标系、自然坐标系、球坐标系或柱坐标系等.在同一个参考系中,坐标系可以任意选择,但仍以对问题的研究方便、数学描述简单为原则.

1.1.4 物理模型 质点

实际物体都有一定的大小、形状,而且物体运动时,可以既有平动又有转动和变形.例如,火车的运动除了整体沿铁轨平移外,还有车厢的上下左右晃动,车轮的转动等.一般来讲,物体上各点的运动情况是不同的.任何一个真实的物体运动过程都是极其复杂的.要想对物体的实际运动情况做出全面的描述是困难的,而且也没有必要这么做.我们只能分清主次,逐个解决.在科学研究中,为了研究某一过程中最本质、最基本的规律,常根据所研究问题的性质,抓住主要因素,忽略次要因素,对真实过程进行简化,然后经过抽象,提出一个可供数学描述的理想化的**物理模型**.这是经常采用的一种科学思维方法.这样做,可以使问题大为简化但又不失其客观真实性.

当我们研究物体在空间的位置时,如果我们只研究物体整体的平移规律(比如火车沿铁轨的整体平移规律,炮弹的空间轨道),或者物体做平动时,同一时刻物体上各部分运动情况(轨迹、速度、加速度)完全相同,或者物体的线度比它运动的空间范围小得多(例如地球绕太阳的公转等),我们可以忽略那些与整体运动关系不大的次要运动,把物体上各点的运动都看成完全一样,这样我们就可以不用考虑物体的形状和大小,或者说只考虑其平动,物体的运动就可以用一个具有该物体全部质量的、没有形状和大小的点的运动来代替.这种不计物体的形状和大小而具有该物体全部质量的点称为**质点**.

质点是一种理想化的物理模型,是在一定的环境和条件下对实际物体的一种科学抽象和简化.对这样的科学抽象,可以使所研究的问题大大简化而不影响主要结论.能否把一个物体看成质点,不在于物体的绝对大小,而主要取决于所研究问题的性质等具体情况.例如,当研究地球绕太阳的公转运动时,由于地球的半径(约为 6.4×10^6 m)远小于地球公转的轨道半径(约为 1.5×10^{11} m),故地球上各点绕太阳的运动情况可看成基本上是相同的.所以在研究地球绕太阳公转时,可以不考虑地球的大小和形状,可把地球当成一个质点.但当研究地球的自转运动时,或者研究地球表面不同地点的潮汐运动规律时,就必须考虑地球的大小和形状,不能再把它当成一个质点了.

把物体视为质点这种研究方法，在理论上和实践上都具有重要的意义.当我们所研究的运动的物体不能视为一个质点时，可以通过数学上的无穷分割方法，把整个物体分割成无穷多个无穷小的质量元，每一个质量元都可以看成一个质点，一个实际的物体就可以看成由许多个乃至于无穷多个质点组成的系统，这就是**质点系**的概念.当把组成这个物体所有质点的运动情况都弄清楚了，也就描述了整个物体的运动情况.因此，研究质点的运动规律也就是研究一般物体更为复杂运动规律的基础.

用理想模型的方法来研究问题是一种常用的科学研究方法，这种方法在物理学中经常遇到.除了质点模型，在后面我们还会遇到诸如刚体、弹簧振子、简谐振动、平面简谐波、理想气体、点电荷等许多理想化的物理模型.但应注意，任何一个理想模型都有其适用条件，在一定条件下，它能否反映客观实际，还要通过实践来检验.

总之，要描述物体的运动，我们需要：① 选择合适的参考系，以方便确定物体的运动性质；② 在参考系上建立恰当的坐标系，以定量描述物体的运动；③ 提出较准确的物理模型，以确定研究对象在特定情况下最基本的运动规律.

思考题

思 1.1 一个物体能否被看成质点，你认为主要由以下三个因素中的哪个因素决定：① 物体的大小和形状；② 物体的内部结构；③ 所研究问题的性质.

思 1.2 一只小蚂蚁和地球，哪个可以看成质点？你将如何回答？

1.2 运动的描述

1.2.1 位置矢量 运动方程 轨迹

1. 位置矢量

为了描述质点的运动，首先需要选择合适的参考系，然后在参考系上选定坐标系的原点和坐标轴，建立恰当的坐标系.例如，建立图 1-1 所示的三维直角坐标系 $Oxyz$.确定在任意时刻 t，质点相对于参考系的位置 P，可用质点所在点 P 的一组有序直角坐标 (x,y,z) 来确定.质点在平面上运动时，可在该平面上建立二维直角坐标系 Oxy，质点的位置可用两个坐标 (x,y) 来确定.如果质点做直线运动，就只需要一个坐标就可以确定质点的位置了.当然，用坐标法确定质点的位置，不限于直角坐标系，根据问题的不同特点，也可以选用其他坐标系，如平面极坐标系、球坐标系、柱坐标系、自然坐标系等，这里就不一一介绍了.

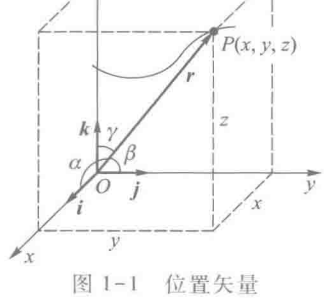

图 1-1 位置矢量

质点的位置还可以用**位置矢量** $\boldsymbol{r}$ 表示.位置矢量又可以简称为**位矢**（又称**径矢**）.它是一个有向线段，在选定的参考系上任选一固定点 O，质点在任一时刻 t 的位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 的始端位于 O 点，末端与质点在该时刻的位置 P 点相重合.位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 的大小和方向完全确定了质点相对于参考系的位置.矢量以加粗字体印刷，手写时在字母上加箭头.例如位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 手写时写为：$\vec{r}$.

以位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 的起点 O 为坐标原点，建立直角坐标系，位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 在 x 轴、y 轴和 z 轴方向的投影（即质点的坐标）分别为 x、y 和 z，即 x、y 和 z 分别是位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 在 x 轴、y 轴和 z 轴三个坐标轴上的分量.如取 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$ 和 $\boldsymbol{k}$ 分别表示沿 x 轴、y 轴和 z 轴方向的单位矢量，$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$ 和 $\boldsymbol{k}$ 都是大小和方向不变的常矢量.那么，在直角坐标系中位置矢量可以写成

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k} \tag{1.1}$$

位置矢量的模（大小）为

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

位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 的方向可以由其与 x 轴、y 轴和 z 轴正向之间的夹角 α、β、γ 来表示，其方向余弦分别为

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

2. 质点的运动方程

当质点在空间运动时，它的位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 以及质点的坐标都随时间变化，都是时间 t 的单值、连续函数.

用直角坐标表示质点的位置时，有

$$x = x(t),\quad y = y(t),\quad z = z(t) \tag{1.2a}$$

用位置矢量表示质点的位置时，有

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \tag{1.2b}$$

式（1.2）从数学上确定了在选定的参考系中质点相对于坐标系的位置随时间变化的关系，叫做**质点的运动方程**.

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.

3. 轨迹方程

质点在空间的运动路径称为**轨迹**.质点的运动轨迹为直线时，称质点做直线运动；质点的运动轨迹为曲线时，称质点做曲线运动.从运动方程（1.2a）中消去时间 t 即得质点运动的轨迹方程.

例 1.1 已知一质点的运动方程为

$$\boldsymbol{r}(t) = 2t\boldsymbol{i} + (7 - 4t^2)\boldsymbol{j}$$

其中各物理量的单位都采用国际单位制（SI）.求该质点的轨迹方程.

解 显然，该质点在 Oxy 平面运动.在任一时刻 t，该质点的坐标值为

$$x(t) = 2t,\quad y(t) = 7 - 4t^2$$

由以上二式消去时间 t 后，即得轨迹方程

$$y = 7 - x^2$$

这表明质点的轨迹是在 Oxy 平面内的一条抛物线.

思考题

思 1.3 一个质点在运动中，如果位置矢量的模 $|\boldsymbol{r}|$ 为常量，则该质点的运动情况可能是：① 在一直线上运动；② 在一平面上做任意曲线运动；③ 在以位置矢量起点为中心的球面上做任意曲线运动.

思 1.4 说地球同步卫星定位于赤道上空某点不动，是以什么为参考系的？若以地球中心

为参考系，它的运动轨迹如何？若以太阳为参考系，它的运动轨迹又大致如何？

1.2.2 位移

质点运动时，其位置在空间连续变化，形成一条运动轨迹.如图 1-2 所示，设一质点的运动轨迹为曲线 $\widehat{AB}$，在 t 时刻，质点在 A 点，在 $t+\Delta t$ 时刻，质点运动到了 B 点，在 A、B 两点，质点相对于坐标原点 O 的位置矢量分别以 $\boldsymbol{r}_A$ 和 $\boldsymbol{r}_B$ 表示.质点在时间间隔 Δt 内，位置矢量的大小和方向都发生了变化，我们将由始点 A 指向终点 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 称为 Δt 这段时间内的**位移矢量**，简称为**位移**.位移反映了质点位置矢量的变化，即在时间间隔 Δt 内位置矢量的增量，一般写作 $\Delta \boldsymbol{r}$：

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A \tag{1.3}$$

位移是描述质点在时间间隔 Δt 内位置变动大小和方向的物理量，在图上就是由起始位置 A 指向终点位置 B 的一个矢量.位移是一个矢量，它的运算遵从矢量运算的法则.例如，位移的加法运算遵从平行四边形法则（或三角形法则）.位移和位置矢量不同，位置矢量反映某一时刻质点的位置.

位移的模，即位移的大小，是由始点 A 指向终点 B 的有向直线段 $\overrightarrow{AB}$ 的长度，它记为 $|\Delta \boldsymbol{r}|$，$|\Delta \boldsymbol{r}| = |\boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A|$，即图 1-3 中的 AB 直线段的长度.注意，位移的大小不能写成 Δr. Δr 表示位置矢量的模的增量，即 $\Delta r = \Delta|\boldsymbol{r}| = |\boldsymbol{r}_B| - |\boldsymbol{r}_A|$，在图 1-3 中取 OC 段的长度等于 OA 段的长度，即 $OC = |\boldsymbol{r}_A|$，因为 $OB = |\boldsymbol{r}_B|$，所以 $\Delta r = |\boldsymbol{r}_B| - |\boldsymbol{r}_A| = CB$. 而 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 表示位移的模，即位置矢量增量的模，$|\Delta \boldsymbol{r}| = AB$，由图 1-3 可知，在通常情况下 $|\Delta \boldsymbol{r}| \neq \Delta r$. 例如，一质点做半径为 R 的匀速圆周运动，以圆心为坐标原点，半个周期内，质点位移的大小为 $|\Delta \boldsymbol{r}| = 2R$，而位置矢量的模的增量 $\Delta r = R - R = 0$.

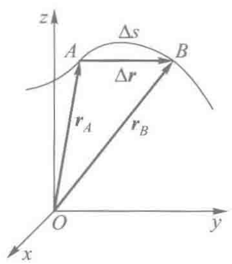

图 1-2 位移

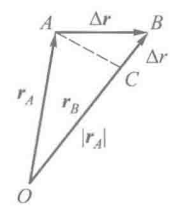

图 1-3 位移的大小

必须注意，位移表示在 Δt 时间间隔内位置的变动，它是一个矢量，有大小，有方向.位移不涉及质点位置变化过程的细节.例如在图 1-2 中，位移是有向线段 $\overrightarrow{AB}$，位移的方向为：由始点 A 指向终点 B 的方向；位移的大小（位移的模）是割线 AB 的长度，是 A 到 B 的直线距离，但这并不意味着质点一定是从 A 点沿直线 AB 运动到 B 点.位移并非质点所经历的路程.质点在 Δt 时间间隔内从 A 点沿曲线 $\widehat{AB}$ 运动到 B 点所经历的实际路径的长度，即曲线 $\widehat{AB}$ 的长度，称为质点在该段时间内的**路程**.路程通常记为 Δs. 路程是标量，所以不能说位移等于或不等于路程，因为一个矢量和一个标量谈不上比较其是否相等的问题.但一个矢量的模（大小）可以和一个相同单位的标

量比较大小.所以位移的大小和路程可以比较,但一般来讲位移的大小不一定总等于路程,即一般 $|\Delta \boldsymbol{r}| \neq \Delta s$. 例如当质点经历一个任意闭合路径回到起始位置时,其位移为零,而路程则不为零.显然,在 Δt 趋近于零时,位移的大小总是等于路程,有 $|\mathrm{d}\boldsymbol{r}| = \mathrm{d}s$.

在直角坐标系中,质点在 A、B 两点的位置矢量可分别表示为

$$\boldsymbol{r}_A = x_A \boldsymbol{i} + y_A \boldsymbol{j} + z_A \boldsymbol{k}$$

$$\boldsymbol{r}_B = x_B \boldsymbol{i} + y_B \boldsymbol{j} + z_B \boldsymbol{k}$$

于是,位移可以写成

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

上式表明,质点的位移等于它在 x 轴、y 轴和 z 轴上的分位移 $\Delta x \boldsymbol{i}$ 、$\Delta y \boldsymbol{j}$ 和 $\Delta z \boldsymbol{k}$ 的矢量和.其中 $\Delta x = x_B - x_A$ 、$\Delta y = y_B - y_A$ 和 $\Delta z = z_B - z_A$ 均为代数量,分别表示位移在 x 轴、y 轴和 z 轴方向的分量.

位移的模为

$$|\Delta \boldsymbol{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}$$

位移与路程的单位均为长度的单位,在国际单位制中,其单位为米(m).

1.2.3 速度

在力学中,仅知道质点在某时刻的位置矢量,是不能知道质点是动还是静、动又动到什么程度的,这不足以确定质点的运动状态.只有当质点的位置矢量和速度同时被确定时,才能确知它的运动状态.所以,位置矢量和速度是描述质点运动状态的两个物理量.

位移矢量只说明了质点在某段时间间隔 Δt 内的位置变化,还不足以充分描述这段时间内质点的运动情况.为了描述质点运动的快慢程度和方向,我们引进速度这一物理量.

在图 1-2 中,质点做曲线运动,在 t 时刻,质点在 A 点,其位置矢量为 $\boldsymbol{r}_A(t)$, 在 $t + \Delta t$ 时刻,质点运动到了 B 点,其位置矢量为 $\boldsymbol{r}_B(t + \Delta t)$. 在 Δt 时间内,质点的位移为 $\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A$. 定义:在 Δt 时间内,质点的**平均速度**为

$$\overline{\boldsymbol{v}} = \frac{\boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A}{\Delta t} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \tag{1.4}$$

平均速度即单位时间内的位移,它与所研究的时刻 t 和所取的时间间隔 Δt 有关系,表示在所取的时间间隔 Δt 内位置矢量对时间的平均变化率,它可用来近似描述 t 时刻附近质点运动的快慢和方向.平均速度是一个矢量,它的方向为位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的方向,它的大小为 t 时刻附近单位时间内的位移大小.

在直角坐标系中,平均速度可表示为

$$\overline{\boldsymbol{v}} = \frac{\boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A}{\Delta t} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\boldsymbol{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t}\boldsymbol{j} + \frac{\Delta z}{\Delta t}\boldsymbol{k} = \overline{v}_x \boldsymbol{i} + \overline{v}_y \boldsymbol{j} + \overline{v}_z \boldsymbol{k}$$

其中, $\overline{v}_x = \dfrac{\Delta x}{\Delta t}$ 、$\overline{v}_y = \dfrac{\Delta y}{\Delta t}$ 和 $\overline{v}_z = \dfrac{\Delta z}{\Delta t}$ 分别表示平均速度 $\overline{\boldsymbol{v}}$ 在 x 轴、y 轴和 z 轴方向的分量.

显然,用平均速度只能近似地描述质点在 t 时刻附近运动的快慢和方向. Δt 取得越短,近似程度就越好,平均速度就越能准确地反映质点在 t 时刻的真实运动情况.当 $\Delta t \to 0$ 时,平均速度 $\overline{\boldsymbol{v}} = \dfrac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}$ 趋近于一个确定的极限矢量,这个极限矢量确切地描述了质点在 t 时刻运动的快慢和方

向.我们把这个极限矢量定义为质点在 t 时刻的**瞬时速度**,简称**速度**,用 v 表示,记为

$$\boldsymbol{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \tag{1.5}$$

可见,速度等于质点的位置矢量对时间的一阶导数,即质点在 t 时刻的瞬时速度 $\boldsymbol{v}$ 也就是在该时刻位置矢量对时间的变化率.

速度是一个矢量,具有大小和方向.速度的方向就是当 $\Delta t\to 0$ 时平均速度矢量 $\overline{\boldsymbol{v}}$(或者位移矢量 $\Delta \boldsymbol{r}$)的极限方向.如图 1-4 所示,当 $\Delta t\to 0$ 时,位移矢量 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的极限方向趋于轨道的切线方向.因此,**质点在任意时刻的速度方向总是沿该时刻质点所在点处轨道曲线的切线方向,并指向质点前进的方向**.质点在做曲线运动时,速度方向沿轨迹的切线方向,这在日常生活中经常可见,如转动雨伞,水滴沿切线方向离开雨伞,自行车车轮甩出的泥点,砂轮切割金属时火花沿切线方向飞出等.在直线运动中,质点运动轨迹为一条直线,速度方向即沿该直线,指向前进方向.速度的方向反映了质点的运动方向.

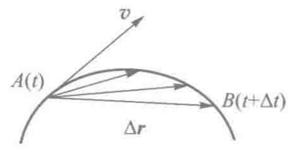

图 1-4 速度的方向

描述质点运动时,也常使用另一个物理量,叫做速率.速率是标量,它等于质点在单位时间内所经过的路程,而不考虑质点运动的方向.如图 1-2 所示,质点在 Δt 时间内所经过的路径为曲线段 $\overset{\frown}{AB}$, 设 $\overset{\frown}{AB}$ 的长度为 Δs, 则 Δs 与 Δt 的比值就称为 t 时刻附近 Δt 时间内质点的**平均速率**,即

$$\overline{v}=\frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{1.6}$$

平均速率与平均速度是两个不同的概念.平均速率是一个标量,恒取非负值;而平均速度是一个矢量,有大小,有方向.而且在一般情况下,位移的模不一定等于路程,即有 $|\Delta \boldsymbol{r}|\neq \Delta s$, 所以平均速度的模一般不等于平均速率.例如,在某一段时间内,质点经历了一个闭合路径,质点的位移为零,所以这段时间内质点的平均速度等于零;而路程不等于零,质点的平均速率不等于零.

质点在某时刻的**瞬时速率**(简称为**速率**)为

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} \tag{1.7}$$

速率的物理意义为:质点在某时刻的速率等于该时刻附近质点在单位时间内所走过的路程.式(1.7)中的 $s=s(t)$ 是质点运动轨道的弧长(路程)函数(自然坐标).因此,速率等于路程随时间的变化率.速率直接反映了质点运动的快慢.速率是一个标量,恒取非负值.

在 $\Delta t\to 0$ 的极限条件下,曲线段 $\overset{\frown}{AB}$ 的长度 Δs 与直线段 AB 的长度 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 相等,即在 $\Delta t\to 0$ 时,路程等于位移的模, $\mathrm{d}s=|\mathrm{d}\boldsymbol{r}|$. 所以瞬时速度的模为

$$|\boldsymbol{v}|=\lim_{\Delta t\to 0}\left|\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}\right|=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=v \tag{1.8}$$

即任意时刻瞬时速度的模总等于瞬时速率,故用 v 来表示瞬时速度的模.

在国际单位制中,速度和速率的单位都是米每秒($\mathrm{m\cdot s^{-1}}$).

由上述讨论可知,速度是描述质点在某一时刻的瞬时运动状态的物理量,是一个状态量.一般来说,速度可以是随时间变化的,即不同时刻(或质点处于不同位置),质点具有不同的速

度，即

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}(t)$$

因为 $\boldsymbol{v}$ 是矢量，所以函数 $\boldsymbol{v}(t)$ 表示速度矢量随时间变化的规律，既包括速度大小的变化，也包括速度方向的变化.

在直角坐标系中，考虑到所选用的是在参考系中的固定坐标系，单位矢量 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 的大小和方向都不随时间变化，故速度可以表示成

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j}+v_z\boldsymbol{k} \tag{1.9a}$$

其中，$v_x=\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$，$v_y=\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}$ 和 $v_z=\dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$ 是速度在 x 轴、y 轴和 z 轴上的分量，简称速度分量.它们都是代数量.如以 $\boldsymbol{v}_x$、$\boldsymbol{v}_y$ 和 $\boldsymbol{v}_z$ 矢量分别表示速度在 x 轴、y 轴和 z 轴上的分速度（注意：它们是矢量！）则有 $\boldsymbol{v}_x=v_x\boldsymbol{i}$，$\boldsymbol{v}_y=v_y\boldsymbol{j}$，$\boldsymbol{v}_z=v_z\boldsymbol{k}$，速度也可写成

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_x+\boldsymbol{v}_y+\boldsymbol{v}_z \tag{1.9b}$$

速度的模（即速率）可以表示成

$$v=|\boldsymbol{v}|=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2} \tag{1.10}$$

在力学中，位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 和速度 $\boldsymbol{v}$ 是描述质点机械运动状态的两个物理量.

1.2.4 加速度

速度是一个矢量，既有大小又有方向.当质点做一般曲线运动时，曲线上各点的切线方向不断改变，所以速度的方向在不断改变；而运动的快慢也可以随时间改变，即速度的大小也在不断改变.为了定量描述各个时刻速度矢量的变化情况，我们引进加速度的概念.

设在 t 时刻，质点在 A 点，其速度为 $\boldsymbol{v}_A$，在 $t+\Delta t$ 时刻，质点运动到了 B 点，其速度变为 $\boldsymbol{v}_B$，如图 1-5 所示.在 Δt 时间内，速度的大小和方向都发生了变化.为了看清楚速度的变化情况，在图 1-5 中把矢量 $\boldsymbol{v}_A$ 和 $\boldsymbol{v}_B$ 平移到同一点.从速度矢量图可以看出，质点速度的增量为

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

它反映了在 Δt 时间内质点速度矢量的变化情况（包括速度大小的变化和速度方向的变化）.

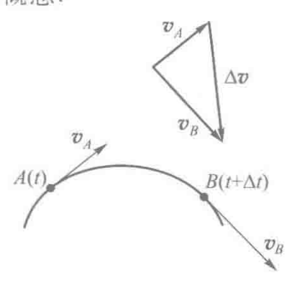

图 1-5 速度的增量

与平均速度的定义类似，定义在 t 时刻附近、Δt 时间间隔内质点的**平均加速度**为

$$\bar{\boldsymbol{a}}=\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}=\frac{\boldsymbol{v}_B-\boldsymbol{v}_A}{\Delta t} \tag{1.11}$$

平均加速度表示质点在 t 时刻附近、Δt 时间间隔内速度的平均变化率.与平均速度类似，平均加速度也只是一种粗略的描述. Δt 取得越小，$\dfrac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}$ 越接近于 t 时刻速度变化的实际情况.为了精确地描述质点速度的变化情况，可将时间间隔 Δt 无限减小，并使之趋近于零，即 $\Delta t\to 0$，这样，质点的平均加速度 $\dfrac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}$ 就会趋向于一个确定的极限矢量.这个极限矢量就称为质点在 t 时刻的**瞬时**

加速度，简称**加速度**，用 $\boldsymbol{a}$ 表示.其定义式为

$$\boldsymbol{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} \tag{1.12}$$

可见，**加速度等于质点的速度矢量对时间的一阶导数，或位置矢量对时间的二阶导数.只要知道了质点的速度 $\boldsymbol{v}(t)$ 或位置矢量 $\boldsymbol{r}(t)$，就可以求出质点的加速度.**

加速度是一个矢量，加速度 $\boldsymbol{a}$ 的方向是 $\Delta t\to 0$ 时 $\Delta\boldsymbol{v}$ 的极限方向，而加速度 $\boldsymbol{a}$ 的大小(模)是

$$|\boldsymbol{a}|=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta \boldsymbol{v}|}{\Delta t}=\frac{|\mathrm{d}\boldsymbol{v}|}{\mathrm{d}t}$$

加速度既反映了速度大小的变化，又反映了速度方向的变化.所以质点做曲线运动时，任一时刻加速度的方向并不与速度方向相同，即加速度的方向不沿曲线的切线方向.由图 1-5 可知，在曲线运动中，加速度的方向总是指向曲线凹的一侧.

一般来说，加速度可以是随时间变化的，即不同时刻(或质点处于不同位置)，质点具有不同的加速度，即

$$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}(t)$$

因为加速度是矢量，所以函数 $\boldsymbol{a}(t)$ 既包括加速度大小如何变化，也包括加速度方向如何变化.

在国际单位制中，加速度的单位是米每二次方秒($\mathrm{m\cdot s^{-2}}$).

在直角坐标系中，加速度可以表示成

$$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}=a_x\boldsymbol{i}+a_y\boldsymbol{j}+a_z\boldsymbol{k} \tag{1.13a}$$

或者写成

$$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2}=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{k} \tag{1.13b}$$

其中，$a_x=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$，$a_y=\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}$，$a_z=\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}$ 分别是加速度在 x 轴、y 轴和 z 轴上的分量，它们都是代数量.

加速度的模为

$$a=|\boldsymbol{a}|=\sqrt{a_x^2+a_y^2+a_z^2} \tag{1.14}$$

思考题

思 1.5 $|\Delta\boldsymbol{r}|$ 与 $|\Delta r|$ 有无不同？$\left|\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right|$ 与 $\left|\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right|$ 有无不同？$\left|\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}\right|$ 与 $\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$ 有无不同？其不同在哪里？试举例说明.

思 1.6 一个质点沿半径为 R 的圆周匀速率运动，其周期为 T. 试求：在以下时间间隔内质点的平均速率和平均速度的大小：① $\frac{T}{2}$；② T；③ $\frac{3T}{2}$.

思 1.7 一个质点以恒定速率 v 沿半径为 R 的圆周运动，已知时刻 t 质点在轨道上的 A 点，在时刻 $t+\Delta t$，质点运动到 B 点，$AB=2R$. 取圆心 O 为位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 的原点.试写出：(1) Δt 时间内