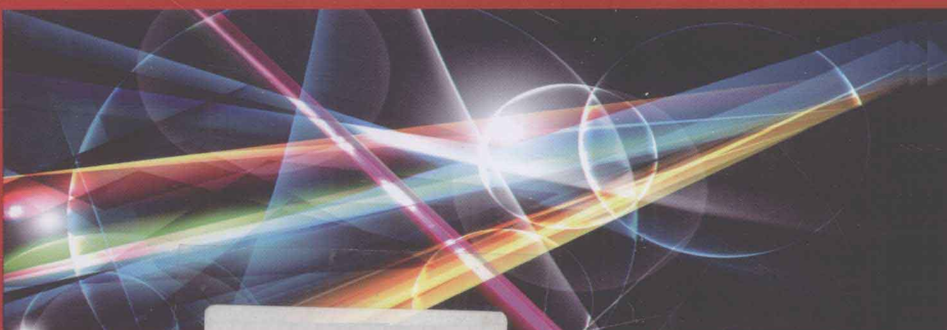
普通高等院校“十二五”规划教材

University PhysicS Course

大学物理教程（上册）

宋 伟 李凤舞 肖长江 主编
朱艳英 主审



国防工业出版社
National Defense Industry Press

普通高等院校“十二五”规划教材

大学物理教程

（上 册）

宋 伟 李凤舞 肖长江 主 编

姚爱巧 魏 勇 副主编

朱艳英 主 审

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程:全 2 册/宋伟,李凤舞,肖长江主编.—北京:国防工业出版社,2013.1

普通高等院校"十二五"规划教材

ISBN 978-7-118-08671-3

Ⅰ.①大... Ⅱ.①宋...②李...③肖... Ⅲ.①物理学-高等学校-教材 Ⅳ.①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 020249 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 **印张** 19 **字数** 343 千字

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 **印数** 1—4000 册 **定价** 68.00 元 上册 34.00 元 / 下册 34.00 元

国防书店:(010)88540777 发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755 发行业务:(010)88540717

前　言

《大学物理》是参照教育部非物理专业物理基础课程教学指导分委会新制订的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求(讨论稿)》的基本精神,在总结多年来教学及教学改革经验的基础上编写而成的。

本书在编写中力求体现以下特点:

1. 适当调整教材结构体系。本书在目前大学物理传统教材的基础上作了适当调整。全书分为上、下册,上册包括力学、狭义相对论、振动和波动及波动光学;下册包括热学、电磁学和近代物理。这样安排的好处有两点:其一,可避免传统教材体系中电磁学的内容被两个学期分成两部分;其二,将整个教材的重点内容——力学和电磁学及难点内容——近代物理分别放在两个学期讲授,重点、难点分散,便于教师讲授和学生学习。

2. 调整了起点,解决好与中学物理内容的衔接问题。如何处理好大学物理与中学物理内容的衔接是许多物理教学工作者长期以来一直想要解决的问题。本书在学生可接受的前提下,适当地调整了起点。凡是中学已讲过的内容,本书一般不再重复讲授。在力学和电磁学两部分内容的编写中做了较大的改动,力求在结构上避免与中学物理重复,在层次上能在中学物理的基础上得以深化,在内容上纳入更多的现代物理信息。

3. 适当地增加例题的数量并提高了质量。本书除了保留一些典型例题外,增加了一些题意新、难度较大的例题和习题,并加强了矢量代数和微积分方法的应用。以此加深学生对讲课内容的理解,启发解题的思路,进一步掌握用数学工具解析物理问题的方法。

本书由宋伟、李凤舞、肖长江任主编;姚爱巧、魏勇任副主编;全书由朱艳英教授主审。在编写过程中参考了若干现有教材和参考书,这里难以一一列出,仅在此一并致谢。

由于编者水平有限,错误与不妥之处在所难免,望从事大学物理教学的同仁和读者批评指正,编者不胜感谢。

编　者

2012 年 12 月

目　录

第一章　质点运动学 …… 1
第一节　描述运动的基本概念 …… 1
第二节　描述质点运动的物理量 …… 6
第三节　质点运动学的基本问题 …… 10
第四节　曲线运动 …… 13
第五节　运动叠加原理及应用 …… 17
习题 …… 20
第二章　动量　动量守恒定律 …… 24
第一节　惯性　质量 …… 24
第二节　动量　力 …… 27
第三节　牛顿定律的应用 …… 33
第四节　质心运动定理 …… 39
第五节　动量定理　动量守恒定律 …… 43
习题 …… 51
第三章　能量　能量守恒定律 …… 56
第一节　动能 …… 56
第二节　功　动能定理 …… 58
第三节　势能 …… 64
第四节　功能原理　机械能守恒定律 …… 69
习题 …… 71
第四章　刚体力学 …… 75
第一节　刚体运动及其描述 …… 75
第二节　角动量　转动惯量 …… 78
第三节　力矩　转动定律 …… 85
第四节　角动量定理　角动量守恒定律 …… 92
第五节　力矩的功　刚体定轴转动的动能定理 …… 98
第六节　碰撞 …… 102
习题 …… 106

第五章　狭义相对论 ………… 112
第一节　伽利略变换　力学相对性原理………… 112
第二节　狭义相对论基本原理　洛仑兹变换………… 116
第三节　狭义相对论时空观………… 122
第四节　相对论动力学………… 127
习题………… 134
第六章　机械振动 ………… 136
第一节　谐振动………… 136
第二节　用旋转矢量法研究谐振动………… 147
第三节　谐振动的能量………… 150
第四节　谐振动的合成………… 153
第五节　阻尼振动　受迫振动　共振………… 160
习题………… 165
第七章　机械波 ………… 170
第一节　机械波的产生和传播………… 170
第二节　简谐波………… 174
第三节　波的能量………… 181
第四节　惠更斯原理　波的衍射………… 186
第五节　波的叠加原理　波的干涉　驻波………… 189
第六节　声波………… 196
第七节　多普勒效应………… 201
习题………… 204
第八章　光的干涉 ………… 209
第一节　光源　光的单色性和相干性………… 210
第二节　获得相干光的方法………… 215
第三节　等倾干涉和等厚干涉　迈克耳逊干涉仪………… 223
第四节　干涉现象的应用………… 229
习题………… 234
第九章　光的衍射 ………… 239
第一节　惠更斯—菲涅耳原理………… 239
第二节　单缝的夫琅和费衍射………… 241
第三节　圆孔衍射　光学仪器的分辨本领………… 248
第四节　衍射光栅………… 252
第五节　X 射线的衍射………… 261

习题…… 263
第十章　光的偏振 …… 267
第一节　自然光　偏振光…… 267
第二节　起偏与检偏　马吕斯定律…… 269
第三节　反射光和折射光的偏振…… 271
第四节　双折射现象…… 274
第五节　旋光现象…… 281
习题…… 283
附录 A　常用物理量…… 286
附录 B　关于太阳系的一些数据 …… 287
附录 C　习题答案 …… 288

第一章 质点运动学

运动是物质的存在形式和固有属性。在各种各样的运动形式中，最简单而又最基本的运动是物体位置的变化，称为机械运动。运动学的任务就是描述物体在空间的位置如何随时间而变化，建立物体的运动方程并求解方程。不涉及运动的起因。

建立理想模型是物理学常用的研究方法，本章主要研究质点的运动。矢量和微积分是定量描述物体运动的基本工具，因为物体的运动离不开空间和时间，借助矢量的语言可以简洁而完备地描述物体在空间的运动，同时采用微分和积分，又可精确描述物体的瞬时行为和物体在某一空间范围和时间间隔内的运动行为。

本章首先从描述质点运动问题的方法入手，介绍描述运动的基本概念——质点、时间和空间、参照系和坐标系；然后重点介绍描述运动的物理量——位移、速度、加速度，并用它们求解运动学的两类基本问题。

第一节 描述运动的基本概念

一、质点

任何物体都有其形状和大小。物体的运动情况一般说来是比较复杂的，其内部各点的运动状况各不相同。例如在平直公路上行驶的汽车，对车身来说是沿公路作平动，而对车轮来说，它除了平动外还有转动；乒乓球在空中既有向前的运动，又有绕自身轴的转动；双原子分子或多原子分子，除了平动、转动外，各个原子还在各自平衡位置附近作振动。由于运动的复杂性，要精确描述某一物体的实际运动，不是一件简单的事情。因此在描述机械运动时，对于一个具体问题，需要根据一定的条件和要求，突出主要因素，忽略次要因素，以简化研究的问题。一方面需要把研究对象简化成**理想模型**，如质点、刚体、谐振子、理想气体、理想流体、粘滞流体等；另一方面要适当运用一些**理想化方法**，如封闭系统、理想实验、近似条件等。这种理想模型和理想化方法都是常用的物理学方法，也是其他学科研究问题的一般方法。

质点是力学中常用的理想模型。

质点是指具有一定质量，而无大小和形状的点。一般在下述两种情况下，把物体抽象为质点。其一是物体平动时，物体中各点的运动情况完全相同，其上任一点的运动都能代表整体的运动，例如，研究汽车或火车行驶的路程和速度时，只需研究整体的平动，即可把汽车或火车视为质点；其二是物体的形状和线度对所研究问题的性质影响很小，例如，研究地球绕太阳公转时，由于地球的半径（约6370km）较之公转运动的轨道半径（约 1.5×10^8km）小得多，地球上各点相对于太阳的运动基本上可视为相同，因此在研究地球绕太阳公转时，可以把地球视为质点。

物体能否抽象为质点，要视问题的性质来定，同一物体在不同的问题中，有时可看成质点，有时则不能。例如，研究汽车、火车轮子的转动或研究地球的自转时，其上各点的运动就大不相同了，不能再把汽车、火车、地球作为质点处理。可见把物体看作质点是有条件的、相对的。

当研究物体运动过程中，不能忽略物体的大小和形状时，质点模型就不适用了，这时可把物体看成是由若干质点组成的**质点系**。

质点是经过科学抽象的理想模型，实际上并不存在。但对于一定问题中的研究对象，则是充分近似的。这种理想模型，突出了问题的主要矛盾，把握住了事物的主要方面，从而易于求出与实际情况接近的结果。该方法在物理学乃至其他学科中已证明是相当有效的一种研究方法，因而得到日益广泛的应用。

二、空间和时间

空间和时间是运动着的物质存在的根本条件。空间表征物质客体的广延性，时间表征物质运动过程的持续性、连贯性。空间和时间都是不能脱离物质和物质的运动而存在的客观现实。

人们对空间和时间客观本性的认识（时空观）有一个逐步深化和日趋全面的辩证过程。牛顿（I. Newton，1642—1727）认为，空间和时间是不依赖于物质的独立的客观存在。空间又称为虚空，是一个大容器，其中装有物质时能感觉到容器的存在，其中没有物质时容器自身依然存在；时间则是纯粹的持续性，不依赖于物质是否运动而绝对均匀单方向地流逝着。并且时间和空间是彼此独立的。这就是经典力学中的**绝对时间**和**绝对空间**。而德国数学家和哲学家莱布尼兹（G. W. Leibniz，1646—1716）认为，空间和时间是物质上下左右的排列形式和先后久暂的持续形式，没有具体的物质和物质的运动，就没有空间和时间。牛顿强调空间和时间的客观存在而忽视其与物质运动的联系性；莱布尼兹强调空间和时间与物质运动的联系而忽视了它的客观性。真正从科学上揭示空间—时间的

统一性，以及它们与物质运动关系的是爱因斯坦(A. Einstein，1879—1955)，他于 1905 年创立的狭义相对论，揭示了时间与空间特性的相互依赖及其与物质客体的联系。闵可夫斯基(H. Minkowski，1846—1909)引入的四维时空的概念，给予爱因斯坦的思想以更完美的描述。

在物体的运动速度远低于光速的条件下，牛顿的时空观还是能够近似地符合空间和时间客观性质的。在经典力学中不妨有条件地采用这种观点。

在量子理论中，粒子的状态是用概率波函数来描述的，因而并不满足相对论的时空要求，因此时空观念还要进一步发展。

人们对空间和时间的认识是从量度开始的。建立在实验基础上的物理学首先要求对时间和空间有合乎一定精确度的**量度**。

量度同类量大小的标准叫做计量单位。理论上讲，人们可以任意选择客观自然物体作为计量标准，所选择的标准要求准确，并尽量排除外界的影响。下面介绍时间、空间的**量度**。

1. 空间的量度　涉及长度、面积和体积。其中长度的测量是最基本的。

任何长度的测量，都是通过与某一长度标准比较而进行的。计量长度的标准单位是米，国际符号为 m。国际上对米的定义曾有过三次正式规定。最初在 1875 年规定通过巴黎的地球子午线的四千万分之一为 1m。1889 年第一届国际计量大会确认米为国际通用的长度单位，并按上述标准用铂铱合金(含**铂 90%、铱 10%**)制成截面呈 X 形的棒作为国际米原器，将其安放在法国巴黎国际计量局的地下室内，各国都保存有一支它的复制品。此基准一直延用了 71 年，它的相对精度约为 10^{-7}。1960 年第十一届国际计量大会重新规定：1m 等于氪－86 原子的 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁辐射真空波长的 1650763.73 倍的长度。根据此定义，1m 的相对精度为 4×10^{-10}。根据光的电磁理论，光在真空中的传播速度是一个常量。随着激光技术的发展，人们已能够相当精确地测定光在真空中传播的速度。1983 年 10 月第十七届国际计量大会正式通过米的新定义：**米是光在真空中，在(1/299 792 458)s 的时间间隔内运行距离的长度**。这种新的米定义的特点是：把真空中的光速值作为一个固定不变的基本物理常量，光速值不再是一个物理学中可测量的量，而是一个换算常数，长度测量可通过时间或频率的测量导出，从而使长度单位和时间单位结合起来。这种米的新定义具有复现方便和足够的精确度等明显的优点。长度标准的改进反映了科学技术对空间测量精密度日益增长的要求。

表 1－1 列出了几种长度的数量级。目前量度的空间范围为从宇宙范围的尺度 10^{27} m 到微观粒子尺度 10^{-15} m。根据近代物理理论，极限的空间长度为普朗克长度 10^{-35} m，小于此长度，现有的时空概念就不适用了。

表 1-1　几种长度的数量级　(m)

已观测的宇宙范围	10^{27}	电视塔的高度	10^{2}
银河系的半径	$10^{21}\sim10^{18}$	小孩的高度	1
太阳到最近恒星的距离	4×10^{16}	尘埃	10^{-3}
冥王星的轨道半径	$10^{15}\sim10^{12}$	一张纸的厚度	10^{-4}
日地平均距离	1.5×10^{11}	人类红血球细胞直径	10^{-6}
太阳半径	7.0×10^{8}	巨型分子，可见光波长	10^{-7}
地球半径	6.4×10^{6}	原子的线度	10^{-10}
喷气式客机的飞行高度	10^{4}	原子核的线度	10^{-15}
无线电中波波长	10^{3}	普朗克长度	10^{-35}

2. 时间的量度　时间的计量是一个计数的过程。原则上，各种能够重复的周期性过程都可用来计量时间。例如日月经天、心脏的跳动、单摆的摆动、原子的振动等。我国早在周代已用圭表刻漏等来确定季节和计时。伽利略(G. Galileo，1564—1642)发现了单摆的周期性导致了惠更斯(G. Huygens，1629—1695)于 1657 年发明了第一座有现代意义的摆钟。

国际上规定计量时间的基本单位是秒，符号为 s。最早曾定义 1s 为平均太阳日(全年太阳日的平均值，太阳日是太阳连续两次经过某地子午面上空的时间间隔)的 1/86 400。1956 年国际计量大会定义秒为 1900 年回归年(太阳相继两次通过春分点的时间间隔为回归年)的 1/31 556 925.7947。因地球自转速率受大气、潮汐和地核变化的影响，使该计时标准的精确度受到影响，而且确定它也非常费时。1967 年第十三届国际计量大会正式决定用铯原子钟作为新的时间计量标准：**秒是铯－133 原子基态的两个超精细能级($F=4, M_F=0$ 和 $F=3, M_F=0$)之间跃迁辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间**。这个跃迁频率测量的准确度可达到 $10^{-12}\sim10^{-13}$ 数量级。

表 1-2 列出了几种时间的数量级。目前量度时间的范围为宇宙的年龄 10^{18} s 到微观粒子的最短寿命 10^{-24} s，极限时间间隔为普朗克时间 10^{-43} s，小于该时间间隔时，现有的时间概念就不再适用了。

表 1-2　几种时间的数量级　(s)

宇宙年龄	10^{18}	无线电波的周期	10^{-6}
太阳系年龄	1.4×10^{17}	π^+ 介子的平均寿命	10^{-9}
地球的年龄	10^{17}	分子转动周期	10^{-12}
人的平均寿命	10^{9}	原子振动周期	10^{-15}
地球的公转(一年)	3.2×10^{7}	光经过一个原子的时间	10^{-18}
地球的自转(一天)	8.6×10^{4}	核振动的周期	10^{-21}
光从太阳射到地球	5×10^{2}	光经过一个原子核的时间	10^{-24}
人的心脏跳动周期	1	普朗克时间	10^{-43}

三、参考系和坐标系

1. 运动描述的相对性 自然界中所有物体都在不停地运动，绝对静止的物体是不存在的。如，放在桌子上的书相对桌子是静止的，但它却随地球以 $3.0\times10^4\,m\cdot s^{-1}$ 的速率绕太阳旋转；太阳以 $2.5\times10^5\,m\cdot s^{-1}$ 的速率绕银河系的中心旋转。从这个意义上说，运动是绝对的。描述物体的运动要找一个参照物，相对不同的参照物，物体的运动状态是不相同的。例如，在一平稳行驶的轮船中，静坐的乘客相对于轮船是静止的，而相对于岸又是运动的。船和岸都是参照物。可见，相对于不同的参照物，物体运动情况的描述是不同的，这就是运动描述的相对性。

2. 参考系和坐标系　物理学中把为描述物体运动而选的参照物叫做**参考系**，也叫做**参照系**。参考系可以是单个物体，也可以是由几个相对静止的物体组成的物体系。由于不同的参考系对同一物体运动情况的描述是不同的，因此，在描述物体运动情况时，必须指明是对哪个参考系而言。在地面附近讨论物体运动时，通常选择地球为参考系；在讨论地球及其他行星运动时，常以太阳为参考系。

为了定量地描述物体的位置和位置随时间的变化，必须在参考系上建立坐标系，这样才可以用数学的语言来描述物体的运动状态。

数学上坐标系的种类很多，例如直角坐标系、极坐标系、球坐标系等，下面介绍在描述物体作机械运动时常用的两种坐标系。

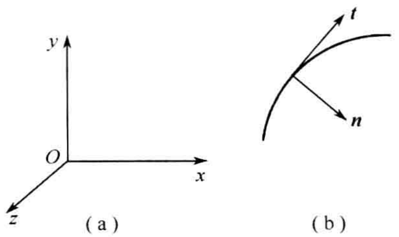


图 1－1　坐标系

(a) 直角坐标系；(b) 自然坐标系。

1) 直角坐标系。数学上又称为**笛卡儿坐标系**，它由三根相互正交的坐标轴 xyz 组成，xyz 以右旋排序，即右手四指从 x 轴转向 y 轴时，大拇指的指向是 z 轴，如图 1－1(a)所示。

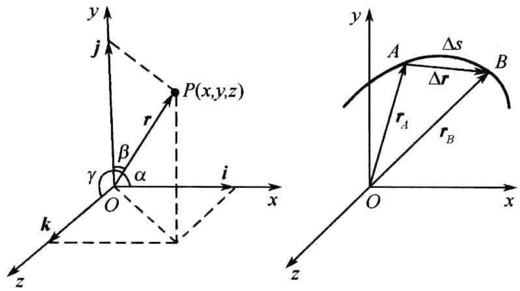
2) 自然坐标系。它也是一种正交系。当物体作曲线运动时，以物体所在位置为坐标原点，两根正交的坐标轴，一根沿轨道的切线，指向物体运动的一方，称为**切向轴**，用 $\boldsymbol{t}$ 表示；另一根沿着轨道的法线，指向曲线凹的一方，称为**法向轴**，用 $\boldsymbol{n}$ 表示，如图 1－1(b)所示。显然描述物体作曲线运动时用自然坐标系较为方便。

第二节　描述质点运动的物理量

一、位置矢量　运动方程

如图 1 - 2(a)所示，在直角坐标系中，P 点的位置可由坐标 x、y、z 来表示；也可由原点 O 到 P 点的有向线段 $\boldsymbol{r}$ 来表示。矢量 $\boldsymbol{r}$ 叫做**位置矢量**，简称**位矢**，可表示为

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



(a)　　　　　　(b)

图 1－2　位置矢量和位移矢量

(a) 位置矢量；(b) 位移矢量。

式中，$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别表示沿 x、y、z 轴的单位矢量，位矢 $\boldsymbol{r}$ 的大小为

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

位矢的方向余弦可由下式确定

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

α、β、γ 分别为 $\boldsymbol{r}$ 与 x、y、z 轴的夹角，称为方向角，满足

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

质点运动时，它的位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 是随时间而变化的，因此质点的坐标 x、y、z 和位矢 $\boldsymbol{r}$ 都是时间的函数，记作

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

或

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

上述函数式表示了质点位置随时间变化的规律，称为质点的**运动方程**。如果质点限制在平面上运动，运动方程可写成

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

应当指出，运动学的任务之一就在于找出各种具体运动所遵循的运动方程。

运动质点在空间所经过的路径称为**轨迹（或轨道）**。从式(1－1b)中消去参数 t 可得轨迹方程

$$f(x,y,z) = 0 \tag{1-1d}$$

而式(1-1d)是轨道方程。

例如，已知质点在一平面上运动，它的运动方程为 $x=3\sin\pi t$，$y=3\cos\pi t$，式中 t 以 s 计，x、y 以 m 计。则质点的位置矢量为

$$\boldsymbol{r} = 3\sin\pi t\boldsymbol{i} + 3\cos\pi t\boldsymbol{j}$$

轨迹方程为

$$x^2 + y^2 = 9$$

说明质点作以原点为中心，半径为 3m 的圆周运动。

二、位移

如图 1-2(b)所示，质点沿曲线运动，在时刻 t，质点在 A 点处，其位矢为 $\boldsymbol{r}_A$；在时刻 $t+\Delta t$，质点在 B 点处，其位矢为 $\boldsymbol{r}_B$。在 Δt 时间内，质点位置的变化可用 A 到 B 的有向线段 $\Delta\boldsymbol{r}$ 来表示，称为**质点在时间间隔 Δt 内的位移**。$\Delta\boldsymbol{r}$ 是矢量，由图可知

$$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A = \Delta x\boldsymbol{i} + \Delta y\boldsymbol{j} + \Delta z\boldsymbol{k} \tag{1-2}$$

大小为

$$|\Delta\boldsymbol{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \tag{1-3}$$

位移矢量的方向角为

$$\alpha = \arccos\frac{\Delta x}{|\Delta\boldsymbol{r}|} \quad \beta = \arccos\frac{\Delta y}{|\Delta\boldsymbol{r}|} \quad \gamma = \arccos\frac{\Delta z}{|\Delta\boldsymbol{r}|} \tag{1-4}$$

值得注意的是，位移表示质点位置的改变，是矢量，它的量值 $|\Delta\boldsymbol{r}|$ 是 AB 的长度。而**路程** Δs 指的是 Δt 时间内，质点在轨迹上经过路径的长度，即 Δs 为 $\overset{\frown}{AB}$ 的长度，显然是标量。一般情况下，Δs 和 $|\Delta\boldsymbol{r}|$ 并不相等，如甲乙两地直线距离为 5m，走一个来回，其位移值为零，路程为 10m。只有在时间 Δt 趋近于零时，位移的大小与路程可视为相等，即 $|\mathrm{d}\boldsymbol{r}| = \mathrm{d}s$。

在国际单位制(SI)中，位矢和位移的单位均为米，用符号 m 表示。

三、速度

速度是描述物体运动方向及快慢的物理量，可分为平均速度和瞬时速度。

1. 平均速度　由图 1-2(b)可知，在时间 $t\sim(t+\Delta t)$内，质点由 A 运动到 B，其位移为 $\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_B-\boldsymbol{r}_A$，那么 $\Delta\boldsymbol{r}$ 与 Δt 的比值，称为质点在时间 Δt 内的**平均速度**，记作

$$\bar{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}\tag{1-5}$$

平均速度的方向就是 Δt 时间内位移的方向。显然用平均速度描述物体的运动是粗糙的，因为平均速度所反映的是在一段时间内物体运动的平均快慢。

2. 瞬时速度　平均速度不仅是时刻 t 的函数，而且与时间间隔 Δt 有关，Δt 越短，平均速度就越能如实地反映质点在 A 点附近的运动，当 $\Delta t\to0$ 时，$\Delta\boldsymbol{r}\to0$，但这时 $\Delta\boldsymbol{r}/\Delta t$ 却趋于某一极限值，该值叫做 A 点的**瞬时速度**，简称**速度**，记作

$$\boldsymbol{v}=\lim_{\Delta t\to0}\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\tag{1-6}$$

瞬时速度的方向是 $\Delta t\to0$ 时位移矢量的极限方向，即运动轨迹上 A 点的切线方向。

瞬时速度可描述某时刻或某位置质点运动的方向和快慢程度。在直角坐标系中，速度可表示为

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j}+v_z\boldsymbol{k}\tag{1-7}$$

速度大小为

$$v=|\boldsymbol{v}|=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_x^2}\tag{1-8}$$

方向可用方向角表示

$$\alpha=\arccos\frac{v_x}{v}\quad\beta=\arccos\frac{v_y}{v}\quad\gamma=\arccos\frac{v_z}{v}\tag{1-9}$$

3. 速率　速率是标量，等于质点在单位时间内所经历的路程。如图 1-2(b)所示，在 Δt 时间内，质点所经过的路程为 Δs，那么，Δs 与 Δt 的比值称为 Δt 时间内质点的**平均速率**，即

$$\bar{v}=\frac{\Delta s}{\Delta t}\tag{1-10}$$

$\Delta t\to0$ 时，可认为 $\mathrm{d}s=|\mathrm{d}\boldsymbol{r}|$，所以**瞬时速率**(简称**速率**)，记作

$$v=\lim_{\Delta t\to0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=\frac{|\mathrm{d}\boldsymbol{r}|}{\mathrm{d}t}=|\boldsymbol{v}|\tag{1-11}$$

瞬时速度的大小等于速率，而平均速度的大小一般不等于平均速率。

在国际单位制(SI)中，速率和速度的单位均为米·秒$^{-1}$，符号为 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$。

四、加速度

加速度是描述质点运动速度变化快慢的物理量，它既包括速度大小的变化，也包括速度方向的变化。分为平均加速度和瞬时加速度。

1. 平均加速度　如图 1－3 所示，t 时刻，质点在位置 A 处，速度为 $\boldsymbol{v}_A$；$t+\Delta t$ 时刻，质点在位置 B 处，速度为 $\boldsymbol{v}_B$。Δt 时间内，质点速度的变化用速度增量 $\Delta\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_B-\boldsymbol{v}_A$ 表示。则 $\Delta\boldsymbol{v}$ 与 Δt 的比值定义为质点在 Δt 时间内的**平均加速度**，即

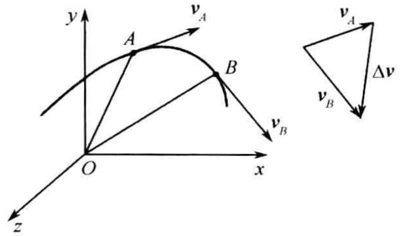


图 1－3　速度的增量

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

平均加速度只反映质点在时间 Δt 内速度的平均变化率，其方向是质点速度增量的方向。

2. 瞬时加速度　Δt 很短时，这段时间内速度的变化量很小，当 $\Delta t\to 0$ 时，相应的 $\Delta\boldsymbol{v}\to 0$，比值 $\Delta\boldsymbol{v}/\Delta t$ 趋近于一个极限值，该值叫做质点在时刻 t 的**瞬时加速度**，简称**加速度**，可表示为

$$\boldsymbol{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} \tag{1-12}$$

加速度反映了质点在任一时刻的速度变化率，其方向是 $\Delta t\to 0$ 时 $\Delta\boldsymbol{v}$ 的极限方向。一般情况下，同一时刻加速度的方向与速度方向不相一致。在曲线运动中，加速度总是指向曲线凹的一边。在直线运动中，质点加速运动时，$\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 同向；减速运动时，$\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 反向。

在直角坐标系中，加速度可表示为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{a}&=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}=\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2}\\&=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{k}=a_x\boldsymbol{i}+a_y\boldsymbol{j}+a_z\boldsymbol{k}\end{aligned} \tag{1-13}$$

在国际单位制(SI)中，加速度的单位为米·秒$^{-2}$，符号是 $\mathrm{m \cdot s^{-2}}$。

以上介绍了描述质点运动的一些物理量，如位矢、位移、速度、加速度等。在这些物理量中，哪几个量是描述物体运动状态的参量呢？质点运动时，在某一时刻，只要物质所在的位置和速度是确定的，就认为质点的运动状态是确定的。运

动状态变化时，将有加速度，因此说，加速度是描述质点运动状态变化的物理量。

第三节　质点运动学的基本问题

质点运动学的主要任务是解决质点运动的描述问题。一旦知道了质点的运动方程，就可以了解质点运动的全部情况。因此运动方程是运动学的核心。质点运动学的基本问题可分为两类：一类是已知质点的运动方程，求质点运动的速度和加速度；另一类是已知质点的初始条件和加速度，求质点运动的速度和运动方程。

例 1-1　质点在 xOy 平面内依照 $x=t^2$ 的规律沿曲线 $y=x^3/320$ 运动，式中 t 以 s 计，x、y 以 m 计。求：

1）质点从第 2s 末到第 4s 末的位移及平均速度；

2）质点在第 2s 末和第 4s 末的速度；

3）质点在第 2s 末和第 4s 末的加速度。

解　根据已知条件可求出 y 随 t 变化的函数关系式。将 $x=t^2$ 代入 $y=x^3/320$ 中，得 $y=t^6/320$。则质点的运动方程为

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}=t^2\boldsymbol{i}+\frac{t^6}{320}\boldsymbol{j}$$

$t_1=2\text{s}$ 时　$\boldsymbol{r}_1=(4.0\boldsymbol{i}+0.2\boldsymbol{j})\ \text{m}$

$t_2=4\text{s}$ 时　$\boldsymbol{r}_2=(16.0\boldsymbol{i}+12.8\boldsymbol{j})\ \text{m}$

1）第 2s 末到第 4s 末的位移为

$$\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_2-\boldsymbol{r}_1=[(16.0-4.0)\boldsymbol{i}+(12.8-0.2)\boldsymbol{j}]\text{m}=(12.0\boldsymbol{i}+12.6\boldsymbol{j})\text{m}$$

大小

$$|\Delta\boldsymbol{r}|=\sqrt{12.0^2+12.6^2}=17.4\text{m}$$

$\Delta\boldsymbol{r}$ 与 x 轴之间的夹角为

$$\theta=\arctan\frac{\Delta y}{\Delta x}=\arctan\frac{12.6}{12.0}=46.4^\circ$$

第 2s 末到第 4s 末的平均速度为

$$\bar{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\Delta x}{\Delta t}\boldsymbol{i}+\frac{\Delta y}{\Delta t}\boldsymbol{j}=\left(\frac{12.0}{2}\boldsymbol{i}+\frac{12.6}{2}\boldsymbol{j}\right)\text{m}\cdot\text{s}^{-1}=(6.0\boldsymbol{i}+6.3\boldsymbol{j})\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

大小为

$$|\bar{\boldsymbol{v}}|=\sqrt{\bar{v}_x^2+\bar{v}_y^2}=\sqrt{6.0^2+6.3^2}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}=8.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

方向与位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 相同。