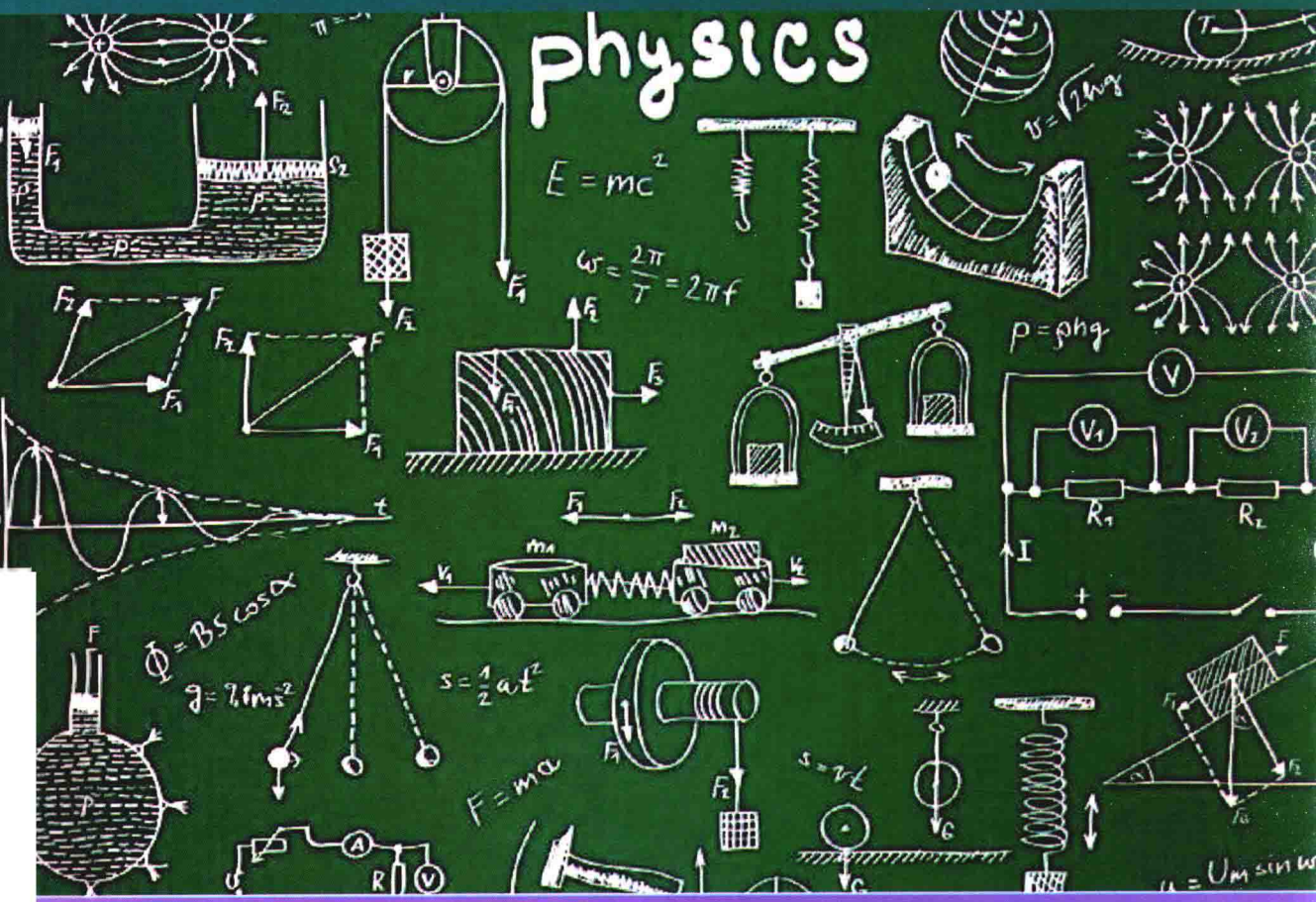
高等院校“十三五”规划教材·公共基础类

DAXUE WULI

大学物理

主编 ◎ 楚淑芳 吉莉 姚晓玲



西北工业大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

大学物理

主　编　楚淑芳　吉　莉　姚晓玲
副主编　常　江　徐　威

西北工业大学出版社

【内容简介】本书共分 12 章，涉及力学、热学、电磁学、振动和波、波动光学、狭义相对论和量子物理基础，内容深广度适当，物理概念清晰。每章包括基本内容、阅读材料、本章提要和练习题、相关著名物理学家简介等。

本书可以作为高等院校物理专业、工程专业、机械专业、生物化工专业、农科专业及相关力学、电气专业课程的教材，也可以供相关从业人员学习参考。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理 / 楚淑芳，吉莉，姚晓玲主编. -- 西安 : 西北工业大学出版社，2017.4

ISBN 978-7-5612-5272-7

Ⅰ. ①大… Ⅱ. ①楚… ②吉… ③姚… Ⅲ. ①物理学－高等职业教育－教材 Ⅳ. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 061693 号

策　　划：牧野春晖

责任编辑：王　　蓁

出版发行：西北工业大学出版社

通信地址：西安市友谊西路 127 号

电　　话：（029）88493844　88491757

网　　址：www.nwpup.com

印 刷 者：北京合众伟业印刷有限公司

开　　本：787 mm×1 092 mm　　1/16

印　　张：21

字　　数：421 千字

版　　次：2018 年 1 月第 1 版　　2018 年 1 月第 1 次印刷

定　　价：56.00 元

前　言

物理学是自然科学的基础，是工程技术和机械技术的重要支柱，是培养学生科学素养和科学思维方法以及提高科学研究能力和创新能力的重要基础课。随着科学技术的迅速发展，各门学科都在强烈地朝着相互交叉、渗透和综合的方向发展。物理学的理论、研究方法、实验技术在化学、生物科学、机械科学中已得到广泛的应用，并取得了丰硕的成果。

在编写本书的过程中，我们坚持科学性、应用性、趣味性的原则。考虑到历年来许多高等院校物理学课时少的特点，精选和组织了高等院校学生必备的物理学基础知识，通过知识的传授，促使学生逐步掌握物理思想和研究方法，培养学生发现问题、分析问题、解决问题的能力，提高学生的科学素养和创新能力。同时，结合高等院校的特点，适当地为物理学前沿和应用打开窗口。本书内容紧密结合理论的应用，自编了部分例题和习题，以提高学生应用理论知识解决实际问题的能力，从而激发学习物理学的积极性。

本书在编写中力求使学生掌握物理学的基本概念和规律，建立较完整的物理思想，同时渗透人文社会科学知识，让学生活用所学知识，加强应用能力，实现知识、能力与素质的协调发展。

本书主要内容包括质点运动学、质点动力学、刚体的运动、气体动理论、热力学基础、静电场、稳恒磁场、电磁感应、振动和波、波动光学、狭义相对论和量子物理基础共 12 章，书后有附录。

本书可以作为高等院校物理专业、工程专业、机械专业、生物化工专业、农科专业及相关力学、电气专业课程的教材，也可以供相关从业人员学习参考。

本书由营口市卫生学校楚淑芳、大连科技学院吉莉、信阳职业技术学院姚晓玲担任主编，由无锡太湖学院常江、徐威担任副主编。具体编写分工如下：楚淑芳负责编写第 1 章、第 2 章、第 3 章和第 12 章；吉莉负责编写第 4 章和第 5 章；姚晓玲负责编写第 6 章和第 7 章；常江负责编写第 8 章和第 9 章；徐威负责编写第 10 章和第 11 章；全书由楚淑芳统稿。

由于水平所限，书中难免存在不当及疏漏之处，敬请读者不吝指正。

编　者

2017 年 12 月

目　录

第1章　质点运动学 …… 1

1.1　质点运动的描述 …… 1

1.2　自然坐标系　切向加速度和法向加速度 …… 6

1.3　相对运动 …… 9

练习题 …… 11

第2章　质点动力学 …… 13

2.1　牛顿运动定律 …… 13

2.2　功和能 …… 18

2.3　动量和动量守恒定律 …… 22

练习题 …… 26

第3章　刚体的运动 …… 29

3.1　刚体运动的描述 …… 29

3.2　转动定律转动惯量 …… 32

3.3　力矩的功转动动能 …… 36

3.4　角动量　角动量守恒定律 …… 37

练习题 …… 43

第4章　气体动理论 …… 46

4.1　气体动理论的基本概念 …… 46

4.2　分子平均动能按自由度均分的统计规律 …… 52

4.3　气体分子速率分布的统计规律 …… 56

4.4　气体分子能量分布的统计规律 …… 63

4.5　气体分子碰撞的统计规律 …… 65

4.6　气体的输运规律 …… 67

4.7　真实气体的状态方程 …… 72

练习题 …… 77

第5章　热力学基础 …… 79

5.1　热力学第零定律　温度 …… 79

需要全本请访问 www.ertongbook.com

5.2 热力学第一定律及其应用……82
5.3 循环过程 卡诺循环……91
5.4 热力学第二定律 卡诺定理……95
练习题……98
第6章 静电场……101
6.1 静电场电场强度……101
6.2 静电场的高斯定理……109
6.3 静电场的环路定理电势……116
6.4 静电场中的导体与电介质……124
6.5 电容电容器 静电场的能量……134
练习题……140
第7章 稳恒磁场……144
7.1 磁场 磁感应强度……144
7.2 毕奥-萨伐尔定律及其应用……146
7.3 磁场的高斯定理和安培环路定理……150
7.4 磁场对运动电荷和载流导线的作用……155
7.5 磁介质中的磁场……163
练习题……168
第8章 电磁感应……172
8.1 电磁感应定律……172
8.2 动生电动势……174
8.3 感生电动势……176
8.4 磁场的能量……180
8.5 麦克斯韦方程……183
练习题……187
第9章 振动和波……190
9.1 线性振动……190
9.2 振动的合成……202
9.3 平面简谐波……208
9.4 波的能量……220
9.5 惠更斯原理 波的传播特性……223

9.6　波的干涉 …… 227
练习题 …… 234
第 10 章　波动光学 …… 237
10.1　光源光的相干性 …… 237
10.2　分波阵面干涉 …… 242
10.3　薄膜干涉 …… 246
10.4　光的衍射 …… 253
10.5　光栅衍射 …… 258
*10.6　圆孔的夫琅禾费衍射　光学仪器的分辨本领 …… 262
10.7　光的偏振现象 …… 264
*10.8　激光简介 …… 269
练习题 …… 273
第 11 章　狭义相对论 …… 278
11.1　力学相对性原理和伽利略变换 …… 278
11.2　爱因斯坦假设与洛伦兹变换 …… 281
11.3　狭义相对论时空观 …… 293
11.4　狭义相对论动力学基础 …… 298
练习题 …… 303
第 12 章　量子物理基础 …… 305
12.1　量子论的形成 …… 305
12.2　物质波不确定关系 …… 315
*12.3　波函数薛定谔方程 …… 319
练习题 …… 325
附录 …… 327
附录Ⅰ　常用的基本物理常量 …… 327
附录Ⅱ　保留大卫和标准值 …… 328
参考文献 …… 329

第 1 章　质点运动学

质点运动学是研究质点位置随时间而改变的运动规律的理论。本章主要内容有位置矢量、位移、速度和加速度、质点的运动方程、切向加速度和法向加速度、相对运动等。

1.1　质点运动的描述

1.1.1　时间与空间

描述物体的运动，要用到时间和空间这两个概念。时间这个概念的出现是人类对物质存在过程的抽象认识，时间本身和物质存在密不可分，因为没有物质存在就没有了物质存在时间的意义，所以我们通常所指的时间是衡量物质运动的变化程度或说是物质存在的运动过程。时间是什么？所谓时间，是用以表述事件之间的先后顺序性和持续性。在物体运动描述中，通常把某一瞬时称为时刻，用 t 表示，可以把某一时刻称为始时刻，另一时刻称为终时刻，始时刻与终时刻的时间间隔就是时间。

空间的概念是什么？所谓空间是用以表述事物相互之间的位形和广延性，是普遍联系中的物质运动存在过程。该过程以物质的大小、形状、质量的变化来体现。时间和长度的绝对性是经典力学或牛顿力学的基础，以后我们将介绍，当相对运动的速度接近于光速时，时间和空间的测量将依赖于相对运动的速度。只是由于牛顿力学所涉及物体的运动速度远小于光速，所以在牛顿力学范围内，时间与空间的测量才可以视为与参考系的选取无关，然而，在牛顿力学范围内，运动质点的位移、速度和运动轨迹则与参考系的选取有关。

1.1.2　质点

自然界的一切客观物体都有一定的大小和形状。一般，当物体做机械运动时，其运动状况是十分复杂的。例如，地球绕太阳的运动，地球除了绕太阳公转以外，地球本身还有自转；地球上的各个不同部分在运动过程中具有不同的轨道，且任何一个瞬间不同部分的运动快慢以及这种快慢的变化也都是不同的。这样，就给我们在描述地球的运动时带来了困难。但是，如果我们只是研究地球绕太阳的公转，而不去关心地球的自转，那么，由于地球到太阳的距离远大

于地球本身的大小(约 10^4 倍)，地球上的各点相对于太阳的运动可以认为是近似相同的，因此可以用一个具有地球质量的点来代表整个地球，于是地球绕太阳的运动便可简化为这个点绕太阳的转动。一般情况下，在描述物体的运动时，如果物体的形状和大小对所研究的问题影响不大而可以忽略，或者物体上各部分具有相同的运动规律，那么就可以把物体当作是一个具有一定质量的几何点，这样的几何点称为质点(particle)。

在物理学中处理一些较为复杂的问题时，为了突出要研究的主题，且使问题的处理简单起见，往往根据所研究问题的性质，去寻找事物的主要矛盾，忽略一些次要因素，建立一个理想化的模型来代替实际的研究对象，从而使问题大大地简化，这是一种常用的科学研究方法。因此，质点是描述物体机械运动的最简单的物理模型。

1.1.3 参考系

自然界中任何物体都处于永恒不息的运动之中，绝对静止的物体是没有的。运动虽然具有绝对性，但对一个物体运动的描述却具有相对性。在观察一个物体的位置及位置变化时，总要选取其他物体作为标准，选取的标准物不同，物体将具有不同的运动状况，这就是运动的相对性，用来描述物体运动而被选作参考的物体或物体系称为参考系(reference system)。参考系可任选，不同参考系中物体的运动形式(如轨迹、速度等)可以不同。常用参考系有太阳参考系(太阳—恒星参考系)、地心参考系(地球—恒星参考系)、地面参考系或实验室参考系、质心参考系等。

1.1.4 坐标系

参考系选定以后，为了能够定量地描述物体的位置及位置随时间的改变，还必须在参考系上建立一个适当的坐标系(coordinate system)。把坐标系的原点和轴线固定在参考系上，运动物体的位置就可由它在坐标系中的坐标表明。在具体问题中，如果指明了坐标系，就意味着已经选定了参考系，即坐标系为参考系的数学抽象。坐标系还可任选，在同一参考系中用不同的坐标系描述同一运动，物体的运动形式相同，但其运动形式的数学表述却可以不同，常用坐标系有直角坐标系(x，y，2)，极坐标系(r，θ，φ)，柱坐标系(ρ，φ，z)以及自然坐标系(e_t，e_n)。

1.1.5 位置矢量

位置矢量(position vector)：用来确定某时刻质点位置(用矢端表示)的矢量，位置矢量又简称为位矢或矢径(radius)。如图 1-1 所示的直角坐标系中，在时刻 t，质点 P 在坐标系的位置可用位置矢量 $r(t)$来表示。可写成

$$r = xi + yj + zk \tag{1-1}$$

大小为 $|r| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$，方向余弦

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

1.1.6　运动方程

机械运动是物体(质点)位置随时间的改变，在坐标系中配上一套同步时钟，可给出质点运动到各处的时刻，从而得到质点位置坐标和时间的函数关系，该函数关系称为质点的运动方程，即

$$r(t)=x(t)i+y(t)j+z(t)k \tag{1-2}$$

式中 i，j，k 分别为 x，y，z 轴上的单位矢量。从式(1-2)中消去参数 t，可得质点的轨迹方程。

1.1.7　位移

位移(displacement vector)：质点在一段时间(Δt)内位置的改变(Δr)称为它在这段时间内的位移。如图 1-2 所示的 $Oxyz$ 直角坐标系中，有一质点沿曲线从时刻 t 的点 P_1 运动到时刻 $t+\Delta t$ 的点 P_2，将 Δr 称为在时间 Δt 内质点的位移。位移 Δr 可以写成

$$\Delta r=r(t+\Delta t)-r(t)\begin{cases}\text{大小：}|\Delta r|=\overline{P_1P_2}\\ \text{方向：}P_1\rightarrow P_2\end{cases} \tag{1-3}$$

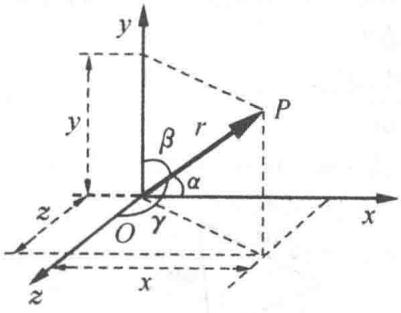


图 1-1　位置矢量图

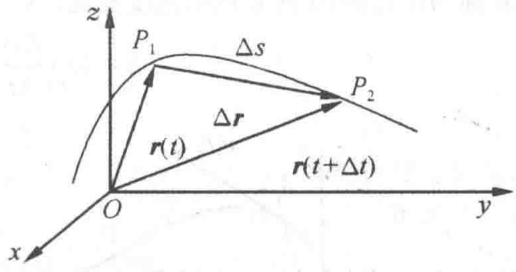


图 1-2　位移矢量图

1.1.8　速度

速度是描述质点运动快慢和运动方向的物理量，在力学中，只有当质点的位矢和速度同时被确定时，其运动状态才被确定，所以，位矢和速度是描述质点运动状态的两个物理量。

在 Δt 时间内，质点位移为 Δr，则平均速度(average velocity)

$$\bar{v}=\frac{\Delta r}{\Delta t} \tag{1-4}$$

当$\Delta t \to 0$时，平均速度的极限值称为瞬时速度(instantaneous velocity)，简称为速度，用υ表示，即质点的速度是位矢对时间的变化率。

$$\upsilon = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} \tag{1-5}$$

速度方向：沿轨迹切线方向。

速度大小(速率)：

$$\upsilon = |\upsilon| = \frac{|\mathrm{d}r|}{\mathrm{d}t} \tag{1-6}$$

质点在三维空间中运动的速度(沿三个坐标轴方向)

$$\upsilon(t) = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} i + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} j + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} k \tag{1-7}$$

其中

$$\upsilon_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}, \upsilon_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}, \upsilon_z = \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$$

1.1.9 加速度

作为描述质点运动状态的一个物理量，速度是一个矢量，所以无论是速度的数值改变，还是其方向发生改变，都表示速度发生了变化，为衡量速度的变化将引出加速度的概念。

加速度(instantaneous acceleration)：速度对时间的变化率。

如图 1-3 所示的 $Oxyz$ 直角坐标系中，有一质点沿曲线从时刻 t 的点 P_1 运动到时刻 $t+\Delta t$ 的点 P_2，将 $\Delta\upsilon$ 称为在时间 Δt 内质点的速度变化，则加速度

$$a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \upsilon}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}t} \tag{1-8}$$

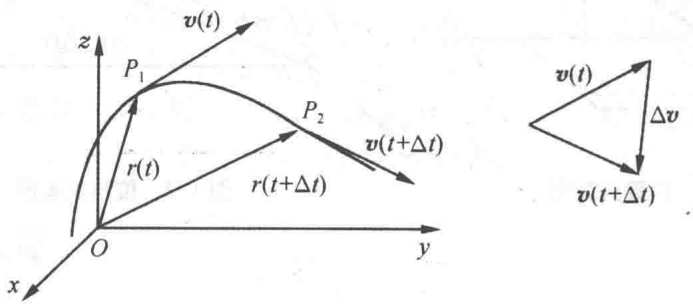


图 1-3　曲线运动的加速度

加速度的方向为υ变化的方向；加速度的大小为$a = |a| = \left|\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}t}\right|$。

质点在三维直角坐标系中的加速度

需要全本请访问 www.ertongbook.com

$$a(t)=\frac{\mathrm{d}\upsilon_x}{\mathrm{d}t}i+\frac{\mathrm{d}\upsilon_y}{\mathrm{d}t}j+\frac{\mathrm{d}\upsilon_z}{\mathrm{d}t}k=a_x i+a_y j+a_z k \tag{1-9}$$

加速度的大小

$$a=\sqrt{a_x^2+a_y^2+a_z^2}$$

【例 1-1】　已知弹性小球在抛物线轨道上运动的位矢随时间变化的函数形式为 $r=4t^2i+(3+2t)j$，(SI)，求：

(1) 弹性小球的轨道；

(2) 从 $t=0$ 到 $t=1$ s 的位移；

(3) $t=0$ 和 $t=1$ s 两时刻的速度。

分析：根据运动方程得到分量式 $x=x(t)$和 $y=y(t)$，从中消去参数 t，即得质点的轨迹方程。平均速度是反映质点在一段时间内位置的变化率，由运动方程求速度、加速度属于运动学第一类问题。

解　(1) 由 $r=4t^2i+(3+2t)j$，可知

$$x=4t^2$$
$$y=3+2t$$

消去 t，得轨道方程为

$$x=(y-3)^2$$

(2) 由 $\upsilon=\dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=8ti+2j$，得

$$\Delta r=\int_0^1 \upsilon \mathrm{d}t=\int_0^1(8ti+2j)\mathrm{d}t=4i+2j \quad \text{(SI)}$$

(3) $\upsilon(0)=2j$　(SI)，$\upsilon(1)=8i+2j$　(SI)

【例 1-2】　一艘正在沿直线行驶的电艇，在发动机关闭后，其加速度方向与速度方向相反，大小与速度平方成正比，即 $\mathrm{d}\upsilon/\mathrm{d}t=-K\upsilon^2$，式中 K 为常量。试证明电艇在关闭发动机后又行驶 z 距离时的速度为 $\upsilon=\upsilon_0 \mathrm{e}^{-Kx}$。其中，$\upsilon_0$ 是发动机关闭时的速度。

证明

$$\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}x}\cdot\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=\upsilon\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}x}=-K\upsilon^2$$

$$\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\upsilon}=-K\mathrm{d}x$$

$$\int_{\upsilon_0}^{\upsilon}\frac{1}{\upsilon}\mathrm{d}\upsilon=-\int_0^x K\mathrm{d}x,\ln\frac{\upsilon}{\upsilon_0}=-Kx$$

所以 $\upsilon=\upsilon_0 \mathrm{e}^{-Kx}$。

1.2 自然坐标系切向加速度和法向加速度

1.2.1 自然坐标系下的速度和加速度

在研究质点的平面曲线运动时，有时也采用自然坐标系(natural coordinates)。在质点运动轨道上任取一个点作为自然坐标系的原点 O，在运动质点上沿轨道的切线方向和法线方向建立两个相互垂直的坐标轴。切向坐标轴的方向指向质点前进的方向，其单位矢量用 e_t 表示，规定法向坐标轴的方向指向曲线的凹侧，其单位矢量用 e_n 来表示，运动质点在轨道上某一点的坐标用距离原点 O 的路程 S 表示，这样的坐标系称为自然坐标系，如图 1-4 所示。

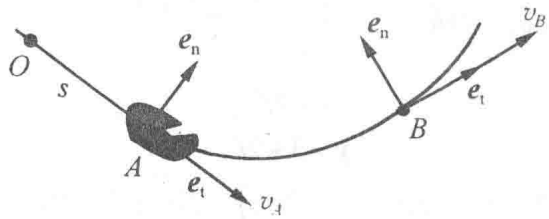


图 1-4 在自然坐标系中研究

质点的平面曲线运动

1．速度

运动质点的位置坐标随时间 t 的变化规律可表示为

$$s=s(t) \tag{1-10}$$

这就是自然坐标系中质点的运动方程。

因为质点运动的速度总沿轨道切线方向，所以在自然坐标系中速度矢量可表示为

$$\upsilon=\upsilon e_t \tag{1-11}$$

2．加速度

一般来说，质点做曲线运动时，不仅速度的方向要发生改变，而且大小也会发生改变，根据加速度的定义有

$$a=\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(\upsilon e_t)}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}t}e_t+\upsilon\frac{\mathrm{d}e_t}{\mathrm{d}t} \tag{1-12}$$

从式(1-12)可以看出，加速度 a 具有两个分量，式中第一项 $\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}t}e_t$，是由于速度大小变化而引起的，其方向为 e_t 的方向，即与速度 υ 的方向相同，因此，此项加速度分矢量称为切向加速度，用 a_t 表示，有

$$a_{\mathrm{t}}=\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}t}e_{\mathrm{t}} \tag{1-13}$$

下面，讨论式(1-12)中的第二项$\frac{\mathrm{d}e_{\mathrm{t}}}{\mathrm{d}t}$。如图 1-5 所示，质点在$\Delta t$时间内沿曲线经历的路程为一段弧线，该处的曲率半径为ρ，相应的曲率中心为O。当时间间隔Δt很小时，曲线上的路程Δs可以看成半径为ρ的一段圆弧长度，单位矢量e_{t}在t到t+Δt时间内的增量为$\Delta e_t=e_{\mathrm{t}}(t+\Delta t)-e_{\mathrm{t}}(t)$，表示了质点运动方向在$\Delta t$时间内的变化，当$\Delta t\to 0$时，$\Delta e_t$的方向变化趋势如图 1-6 所示。

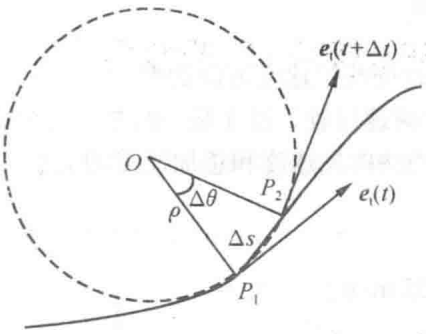


图 1-5　位矢量 e_t 的方向随时间的变化

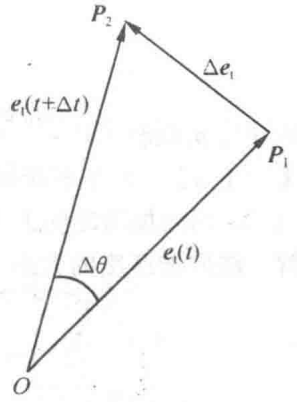


图 1-6　当 $\Delta t\to 0$ 时，Δe_t 的方向变化趋势

$\Delta\theta\to 0$，P_2点趋近于P_1点，所以有

$$\left|\Delta e_{\mathrm{t}}\right|=\left|e_{\mathrm{t}}\right|\Delta\theta=\Delta\theta$$

此时Δe_{t}的方向趋向于e_{t}的垂直方向，即法线e_{n}的方向，以上的分析用数学式可表示为

$$\frac{\mathrm{d}e_{\mathrm{t}}}{\mathrm{d}t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta e_{\mathrm{t}}}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\theta}{\Delta t}e_{\mathrm{n}} \tag{1-14}$$

又因为$\Delta\theta=\frac{\Delta s}{\rho}$，代入式(1-14)可得

$$\frac{\mathrm{d}e_{\mathrm{t}}}{\mathrm{d}t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\rho\Delta t}e_{\mathrm{n}}=\frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}e_{\mathrm{n}}=\frac{\upsilon}{\rho}e_{\mathrm{n}} \tag{1-15}$$

故式(1-12)中第二项可表示为

$$\upsilon\frac{\mathrm{d}e_{\mathrm{t}}}{\mathrm{d}t}=\frac{\upsilon^2}{\rho}e_{\mathrm{n}} \tag{1-16}$$

该项可称为法向加速度，用a_{n}表示，有

$$a_{\mathrm{n}}=\frac{\upsilon^2}{\rho}e_{\mathrm{n}} \tag{1-17}$$

综上所述，质点的加速度 a 可表示为

$$a = a_t + a_n = \frac{d\upsilon}{dt}e_n + \frac{\upsilon^2}{\rho}e_n \tag{1-18}$$

质点在平面曲线运动中的加速度等于质点的切向加速度与法向加速度的矢量和。加速度大小为

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_t^2} \tag{1-19}$$

加速度的方向与切线方向夹角 θ 的关系为

$$\tan\theta = \frac{a_n}{a_t} \tag{1-20}$$

切向加速度 a_t 反映了速度大小的变化；法向加速度 a_n 反映了速度方向的变化。

【例 1-3】 汽车在半径为 400 m 的圆弧弯道上减速行驶，设在某一时刻，汽车的速率为 $10\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$，切向加速度的大小为 $0.2\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$。求汽车的法向加速度和总加速度的大小及方向。

解 法向加速度的大小

$$a_n = \frac{\upsilon^2}{\rho} = \frac{10^2}{400} = 0.25\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$$

方向指向圆心。

总加速度的大小

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = \sqrt{0.2^2 + 0.25^2} = 0.32\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$$

则总加速度的方向与速度方向夹角 $\theta = 90° + a = 128°40'$。

1.2.2 圆周运动

1. 平面极坐标系

设有一质点在如图 1-7 所示的 Oxy 平面内运动，某时刻它位于点 A。由坐标原点 O 到点 A 的有向线段 r 称为径矢，r 与 Ox 轴之间的夹角为 θ。于是，质点在点 A 的位置可由$(r,\ \theta)$来确定。这种以$(r,\ \theta)$为坐标的参考系称为平面极坐标系。而在平面直角坐标系内，点 A 的坐标则为$(x,\ y)$。这两个坐标系的坐标之间的变换关系为 $x = r\cos\theta$，$y = r\sin\theta$。

2. 圆周运动的角速度

如图 1-8 所示，一个质点在 Oxy 平面上做半径为 r 的圆周运动(circular motion)，某时刻它位于点 A，且在平面极坐标系中的径矢为 r。当质点在圆周上运动时，径矢 r 与 Ox 轴之间的夹角 θ 随时间而改变，即 θ 是时间的函数 $\theta(t)$。角坐标 $\theta(t)$ 随时间的变化率即 $\dfrac{d\theta}{dt}$，称为角速度(angular velocity)，则有

$$\omega=\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} \tag{1-21}$$

通常用弧度(rad)来度量 ω，所以角速度的单位为弧度·秒$^{-1}$(rad·s^{-1})。

如果在时间 Δt 内，质点由图上的点 A 运动到点 B，所经过的圆弧则为 $\Delta s=r\Delta\theta$，$\Delta\theta$ 为时间 Δt 内质点所转过的角度。当 $\Delta t\to 0$ 时，$\dfrac{\Delta s}{\Delta t}$ 的极限值为

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=r\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

即

$$\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=r\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$$

而 $\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$ 为质点在点 A 的速率，用 υ 表示，$\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$ 则为质点在点 A 的角速度 ω，故有

$$\upsilon=r\omega \tag{1-22}$$

式(1-22)为质点做圆周运动时速率和角速度之间的瞬时关系。

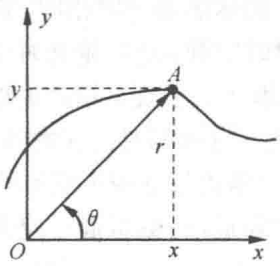


图 1-7　平面极坐标系

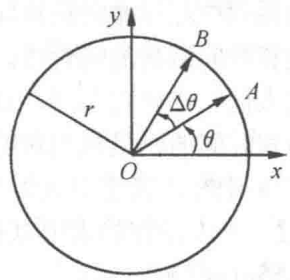


图 1-8　质点在 Oxy 平面上做圆周运动

3．圆周运动的角加速度

角速度对时间的变化率，定义为角加速度(angular acceleration)，用 a 表示，即

$$a=\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} \tag{1-23}$$

在国际单位制中，角加速度的单位为弧度·秒$^{-2}$(rad·s^{-2})。

在质点做圆周运动时，其加速度可表示为

$$a=a_{\mathrm{t}}+a_{\mathrm{n}}=\frac{\upsilon^2}{r}e_{\mathrm{n}}+\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}t}e_{\mathrm{t}}=\omega^2re_{\mathrm{n}}+rae_{\mathrm{t}} \tag{1-24}$$

1.3　相 对 运 动

物体的运动总是相对于某个参考系而言的。由于所选取的参考系不同，在描述同一物体的

运动时将会给出不同的结果，这就是运动描述的相对性。一个人站在做匀速直线运动的车上，竖直向上抛出一个铜球，车上的观察者看到铜球竖直上升并竖直下落，但站在地面上的另一个人却看到铜球的运动轨迹为一抛物线，因此，相对运动(relative motion)问题指的是在不同参考系中观察同一物体运动所给出的运动描述之间的关系问题。

以下我们仅讨论一参考系 S' 相对另一参考系 S 以速度 u 平动时，同一物体在两参考系中的两个速度之间和两个加速度之间的关系。

由图 1-9 知位移关系为

$$r = r_0 + r' \tag{1-25}$$

式(1-25)两边除以 Δt，再取极限，得速度关系

$$\upsilon = u + \upsilon' \tag{1-26}$$

式中，υ 称为绝对速度(absolute velocity)；υ' 称为相对速度(relativevelocity)；u 称为牵连速度(convected velocity)。式(1-26)给出了质点在两个以恒定的速度做相对运动的参考系中速度与参考系之间的关系，即质点的速度变换关系式，这个式子称为伽利略速度变换式。

将式(1-26)再对时间求导，得

$$a = a' \tag{1-27}$$

这一结果说明在相互做匀速直线运动的两参考系中，物体的加速度相同，在相对运动中给出了长度测量和时间测量的绝对性，这构成了牛顿的绝对时空观，这种绝对时空观在过去相当长的时间内被人们当作客观真理，直至 1905 年，爱因斯坦建立了狭义相对论以后，人们才逐渐认识到空间和时间的测量是相对的，与物体的运动有关。这种相对性在物体做高速运动(与真空中的光速相同)时，表现得较为明显。因此，本节中的结论只适用于低速的物体。

【例 1-4】 一人能在静水中以 $1.10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度划船前进，今欲横渡一宽为 $1\text{-}00\times10^3$ m，水流速度为 $0.55\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大河。

(1) 他若要从出发点横渡该河而到达正对岸的一点，那么应如何确定划行方向？到达正对岸需多少时间？

(2) 如果希望用最短的时间过河，应如何确定划行方向？船到达对岸的位置在什么地方？

解 (1) 如图 1-10 所示，由 $\upsilon = \upsilon' + u$ 可知，$a = \arcsin\dfrac{u}{\upsilon'}$，则船到达正对岸所需时间

$$t = \frac{d}{\upsilon} = \frac{d}{\upsilon'\cos a} = 1.05\times10^3\ \text{s}$$

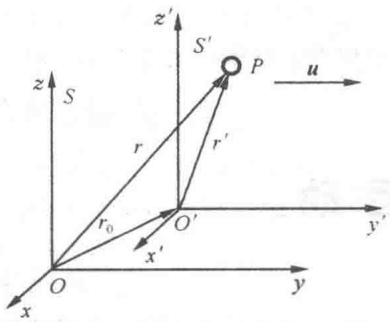


图 1-9 质点的相对运动

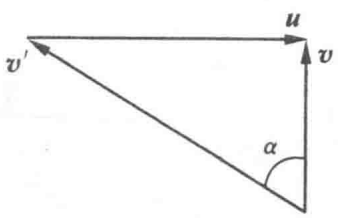


图 1-10 例 1-4 图

需要全本请访问 www.ertongbook.com