

高等学校教材

大学物理学

(第二版) 上册

University
Physics



唐南 王佳眉 主编

杨德智 向黎 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校教材

大学物理学

(第二版) 上册

Daxue Wulixue

唐南 王佳眉 主编

杨德智 向黎 编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书第一版是作者在重庆大学多年教学经验的基础上编写的大学物理教材,现对第一版内容进行修订。教材以新制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)为依据,在教材结构和编写内容上做了一定改动。全书内容精炼、概念清晰,力图在有限的课时内清晰准确地讲授大学物理的基本内容。本书将能力培养与知识的传授有机地融为一体,在内容的选取上涵盖了大学物理最基本、最重要的知识点,在保留经典物理基本框架的同时,对近代物理部分(相对论和量子物理)和新技术的基本物理原理进行了加强和拓展。全书各章均有内容提要及丰富的例题和习题,并附有习题答案。全书共三册,上册为力学和热学,中册为电磁学,下册为波动学、相对论和量子物理。

本书可作为理工科非物理专业的大学物理教材,也可供相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上册/唐南,王佳眉主编;杨德智,向黎编.--2版.--北京:高等教育出版社,2013.6
ISBN 978-7-04-037120-8

I. ①大… II. ①唐… ②王… ③杨… ④向…
III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①O4

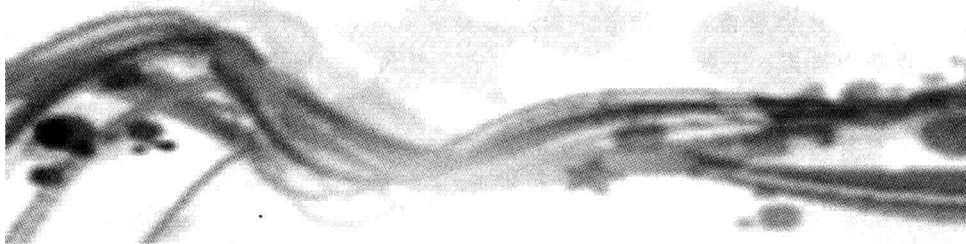
中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第060681号

策划编辑 王 硕 责任编辑 王 硕 封面设计 于 涛 版式设计 杜微言
插图绘制 尹文军 责任校对 陈 杨 责任印制 毛斯璐

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	国防工业出版社印刷厂		http://www.landaco.com.cn
开 本	787mm×960mm 1/16	版 次	2003年12月第1版
印 张	15.25		2013年6月第2版
字 数	270千字	印 次	2013年6月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	21.20元
咨询电话	400-810-0598		

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
版权所有 侵权必究
物 料 号 37120-00

再版前言



物理学研究物质结构和物质运动的基本规律及其相互作用和相互转化的基本规律。物理学属于基础科学，它是所有自然科学及工程技术科学的理论基础。

“大学物理学”是一门面向非物理专业本科生的基础课程，该课程向大学生介绍物理学的基本理论和研究方法，同时为后续的技术基础课及专业基础课奠定必要的物理基础。大学物理学将给学生建立一个基本完整的物理的理论框架，并涵盖最基本、最重要的知识点。教学内容原则上不包含具体的专业技术知识，专业技术内容应放在技术基础课中讲授。新技术的基本物理原理如激光原理、半导体原理等纳入物理教学内容。大学物理学注重培养学生的科学素质，最终的教学目的是为学生构建一个合理的知识-能力结构，使之具有终生学习和开拓创新的能力。物理教学为人才的综合素质培养服务，特别是要培养学生的唯物主义思想和科学的方法论，以及在科学进步中不断探索的献身精神。

《大学物理学》作为一门基础理论课程的教材有其自身的风格，一些科普性的阅读内容未纳入这本教材中，使教材的表述较为统一，容量也较小。有些并非基础理论但仍很重要的有关应用和前沿热点的内容，应该开设为选修课，不必进入大学物理学的教材内容。本教材注重可教性，注重学生的认知规律，在重点和难点的处理上，融入了更多的教学经验。对于最基本的知识点，如物理模型的建立，物理概念的引入以及物理规律的确立方面，作了较多的阐述。对于学习上的难点，例如高等数学在物理上的应用，以及相对论时空观和量子概念的理解等，在本教材中都有恰当的处理，从形象到抽象，由浅显而深入，循序渐进，便于阅读。教材的每一章都有简略的内容提要，帮助学生总结复习，教材的例题较多，习题的内容和形式也较多，便于教师选择和学生自学。

本教材第一版自 2003 年出版以来，由于其符合教学规律、可教性好、内

II 再版前言

容精炼、适于阅读而深受教师、学生好评。再版教材沿袭了原教材的优点，对理论阐述的科学性及流畅性做了进一步的优化，对例题和习题也做了适度的调整，使之更合乎教学的实际要求。

再版教材由唐南、王佳眉主编。上册由唐南、王佳眉、杨德智、向黎编写，中册由唐南、王佳眉、胡炳全、陈宁、曾代敏、向黎编写，下册由唐南、王佳眉、胡炳全、李熙涵编写。

本教材的编写者均为任教多年的教师，也均有教材编写的经验，但考虑不周之处肯定在所难免，望读者谅解和指正。

编者

2012年12月6日于重庆大学



目录

第 I 篇 力学

第一章 质点运动学	3
§ 1-1 质点运动的描述	4
一 位置和位移	4
二 速度	6
三 加速度	8
§ 1-2 切向加速度和法向加速度 自然坐标系	13
一 圆周运动的切向加速度和法向加速度	13
二 一般曲线运动中的切向加速度和法向加速度 自然坐标系	16
§ 1-3 圆周运动的角量描述 平面极坐标系	18
一 圆周运动的角量描述	18
二 角量和线量的关系	20
§ 1-4 相对运动	22
一 相对位置和相对位移	23
二 相对速度和相对加速度	23
内容提要	26
习题	28
第二章 牛顿运动定律	31
§ 2-1 牛顿运动定律	31
一 牛顿运动定律	31
二 理解牛顿运动定律应注意的几个问题	33

§ 2-2 物理量的单位和量纲	36
一 SI 单位	36
二 量纲	38
§ 2-3 自然力与常见力	39
一 基本自然力	39
二 技术中常见的力	42
§ 2-4 牛顿运动定律的应用	46
§ 2-5 非惯性系中的力学问题	53
内容提要	55
习题	56
第三章 动量和角动量	60
§ 3-1 质点的动量定理	60
§ 3-2 质点系的动量定理	65
§ 3-3 动量守恒定律	67
一 动量守恒定律	67
二 碰撞过程中的动量守恒现象	68
三 动量守恒定律与牛顿运动定律	69
§ 3-4 角动量 质点的角动量定理	73
一 质点的角动量	73
二 质点的角动量定理	75
§ 3-5 角动量守恒定律	77
§ 3-6 质点系的角动量定理	79
内容提要	82
习题	83
第四章 功与能	87
§ 4-1 功	87
一 功 功的计算	87
二 合力的功	88
三 功率	89
四 一对力的功	91
§ 4-2 动能定理	92
一 质点的动能定理	92

二 质点系的动能定理	93
§ 4-3 势能	95
一 保守力和非保守力	95
二 势能	97
三 势能的计算 势能曲线	98
四 由势函数求保守力	100
§ 4-4 机械能守恒定律	101
一 质点系功能原理	101
二 机械能守恒定律	102
三 能量守恒定律	102
内容提要	105
习题	106
第五章 刚体定轴转动	111
§ 5-1 刚体的平动和定轴转动	111
一 刚体的平动	111
二 刚体的定轴转动	112
三 角速度矢量和角加速度矢量	113
§ 5-2 刚体定轴转动定律	115
一 对定轴的力矩	115
二 刚体对定轴的角动量	116
三 转动惯量	118
四 刚体定轴转动的转动定律	121
§ 5-3 转动定律的应用	122
§ 5-4 刚体定轴转动的角动量守恒定律	125
§ 5-5 刚体定轴转动中的功和能	130
一 力矩的功	130
二 转动动能	131
三 定轴转动的动能定理	132
四 刚体的重力势能	132
五 刚体的功能原理和机械能守恒定律	133
内容提要	135
习题	138

第 2 篇 热学

第六章 气体动理论	145
§ 6-1 理想气体物态方程	145
一 平衡态	145
二 状态参量	146
三 理想气体物态方程	147
§ 6-2 理想气体的压强和温度	148
一 物质的微观结构 统计规律性	148
二 理想气体的微观模型和统计性假设	150
三 理想气体压强公式的推导	151
四 理想气体的温度公式	153
§ 6-3 能量均分定理和理想气体的内能	154
一 自由度	155
二 能量均分定理	156
三 理想气体的内能	157
§ 6-4 分子的速率分布和能量分布	159
一 速率分布函数	159
二 麦克斯韦速率分布律	160
三 玻尔兹曼能量分布律	164
§ 6-5 气体分子的碰撞	166
一 分子碰撞的意义和基本模型	166
二 平均碰撞频率和平均自由程	166
§ 6-6 输运过程的宏观规律及其微观解释	168
一 黏滞现象	169
二 热传导现象	170
三 扩散现象	170
内容提要	171
习题	173
第七章 热力学基础	176
§ 7-1 热力学第一定律	176
一 准静态过程	176

二 内能	178
三 热量	178
四 功 热功当量	179
五 热力学第一定律	180
§ 7-2 内能增量 功和热量的计算	180
一 内能增量的计算	180
二 准静态过程中功的计算	181
三 热量的计算	182
§ 7-3 理想气体的等值过程	184
§ 7-4 绝热过程、多方过程	188
一 绝热过程	188
二 多方过程	190
§ 7-5 循环	195
一 循环	195
二 热机的效率和制冷机的制冷系数	196
三 卡诺循环	197
§ 7-6 热力学第二定律	202
一 热力学第二定律的两种表述	202
二 开尔文表述与克劳修斯表述的等效性	204
三 可逆过程和不可逆过程	206
四 卡诺定理	207
五 能量的退化	207
§ 7-7 热力学第二定律的统计意义	208
一 热力学过程与系统无序度的变化	208
二 无序度与微观状态数	209
三 熵与热力学概率 玻尔兹曼关系式	211
内容提要	211
习题	214
附录	221
常用物理量	221
力学和热学的量和单位	222
习题答案	223

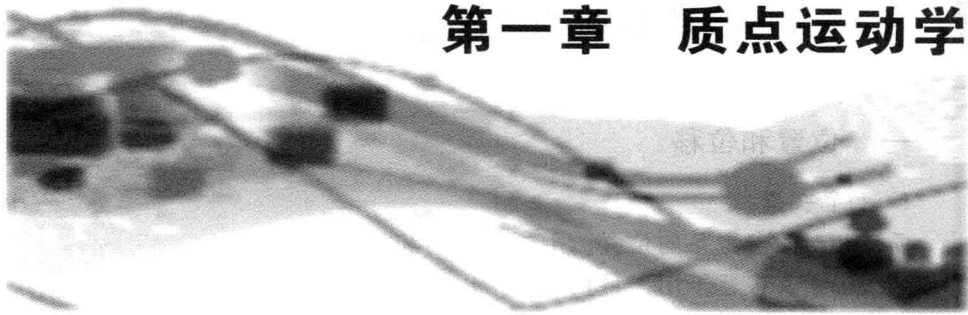


力 学

力学讨论物体的机械运动，即物体的位置随时间而变化的规律。力学是整个物理学的基础，力学中的重要概念、重要规律将被直接引入到热学、电磁学、波动学等领域中，去构建新的理论。力学在总体上可分为运动学和动力学两个部分，运动学讨论物体运动的描述及规律性，动力学探讨物体运动状态变化的原因及在运动中各物体之间的相互关系。本篇第一章讨论质点运动的描述，第二章至第四章从受力、动量、角动量及能量变化的角度讨论质点和质点系运动状态变化的原因，第五章讨论刚体的运动规律。

本书采用国际单位制(SI)，即米(m) - 千克(kg) - 秒(s)制，各个物理量采用SI单位。

第一章 质点运动学



质点是一个抽象模型，当在一个力学问题中物体的大小、形状可以忽略时，我们可以把物体当做一个有质量的点来处理，这就是质点概念。在一个具体问题中，一个物体是否适用质点模型，并不在于物体本身的大小，而在于问题中物体的大小形状是否确实可以忽略。例如在我们讨论地球的公转时，由于地球的半径远远小于地球到太阳的距离，可以近似认为地球上各点的运动情况是相同的，这时可以把地球作为一个质点来处理而误差很小。但是如果我们讨论的是地球的自转，就不能把它当做质点来处理，因为点是无从考虑转动的。质点模型的优点是能使复杂问题在一定的条件下得以简化，使我们能够忽略那些次要因素而专注于问题的主流。进而言之，由于任何物体都能看作质点的集合，所以讨论质点的运动规律，也就构成了讨论任何复杂物体运动规律的基础。

质点运动学讨论质点运动的描述，这包括质点的位置、位移、速度和加速度等。物体的运动具有相对性，这首先表现在位置上。当我们谈到某物体的位置时，总是要相对于另一参考物体而言。如我们在学校里可以说：“电话亭在第一教学楼南面 50 m 处”。描述很清楚。但如果仅仅说：“电话亭在南面 50 m 处”，就实在令人费解了。这个在运动的描述中选用的参考物又称作**参考系**，上例中的“第一教学楼”就是描述中的参考系。为了能对运动进行定量的描述，可以在参考系上建立一个**坐标系**，最常见的是笛卡儿直角坐标系。笛卡儿坐标系是右手系，即当我们伸直右手大拇指指向 x 方向并弯曲其余四个手指时，可以由 y 方向转 90° 到 z 方向。

§ 1-1 质点运动的描述

一 位置和位移

1 位置矢量

质点相对于参考系的位置, 主要是距离和方向两个因素, 很适于用矢量描述. 采用笛卡儿坐标系, 如图 1-1 所示, 一质点位于 P 点, 作矢量 $\boldsymbol{r} = \overrightarrow{OP}$, 质点位置即可以用矢量 \boldsymbol{r} 来描述. \boldsymbol{r} 称为质点的位置矢量, 简称位矢或矢径. 位矢 \boldsymbol{r} 的大小 $r = |\boldsymbol{r}|$ 为质点到原点 O 的距离, 位矢 \boldsymbol{r} 的方向即为质点相对于原点的方向, 也即在 O 点观测质点的方向.

设 P 点在 x 、 y 、 z 三个坐标轴上的坐标(投影)为 x 、 y 、 z , 则可以把 \boldsymbol{r} 表示为

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

其中 \boldsymbol{i} 、 \boldsymbol{j} 、 \boldsymbol{k} 为沿三个坐标轴方向的单位矢量(大小为 1, 单位为 1, 仅表示方向). 习惯上把 x 、 y 、 z 称为位矢 \boldsymbol{r} 的三个分量, 分量是标量, 只有大小和符号(指正、负号). 由位矢的三个分量可以求出位矢的大小(模)以及方向余弦. 位矢的大小为

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

位矢的方向可用位矢与三个坐标轴的夹角的余弦表示, 称为位矢的方向余弦

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

当质点在 Oxy 平面内做二维运动时, 位矢的方向可以用位矢的斜率来表示. 位矢的斜率为

$$\tan \alpha = \frac{y}{x} \quad (1-4)$$

2 运动方程

质点运动时, 其位矢 \boldsymbol{r} 随时间而变, 也就是说, 位矢 \boldsymbol{r} 是时间 t 的函数, 这意味着位矢的分量 x 、 y 、 z 也是时间的函数:

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) = x(t)\boldsymbol{i} + y(t)\boldsymbol{j} + z(t)\boldsymbol{k} \quad (1-5)$$

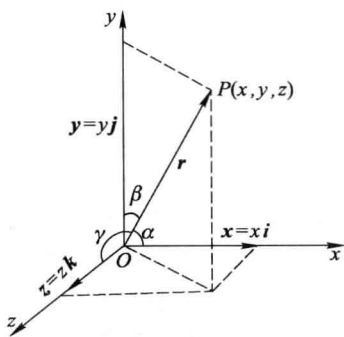


图 1-1 笛卡儿坐标

上式也可以用分量表示为

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1-6)$$

在任何一个具体问题中, 上式中的 x 、 y 、 z 都是具体的函数. 例如对 Oxy 平面内的平抛物体运动, 质点的位矢 $\mathbf{r} = v_0 t \mathbf{i} + \frac{1}{2} g t^2 \mathbf{j}$, 其分量为 $x = v_0 t$, $y = \frac{1}{2} g t^2$.

(1-5) 式表示质点位置随时间的变化规律, 由它可以确定质点在任意时刻 t 的位矢 \mathbf{r} , 故称为质点的运动方程, (1-6) 式为运动方程的分量形式. 质点运动方程包含了质点运动中的全部信息, 是解决质点运动学问题的关键所在.

3 轨道方程

轨道为质点运动时在空间形成的轨迹, 其曲线方程称为轨道方程. 运动方程的分量形式(1-6)式就是以时间 t 为参量的轨道方程, 从(1-6)式中消去 t , 即可得到一般的轨道方程. 例如对于前面谈到的平抛运动, 由 $x = v_0 t$, $y = \frac{1}{2} g t^2$ 中消去 t 即可得到 $y = \frac{g x^2}{2 v_0^2}$, 这是一个抛物线方程.

4 位移

机械运动意味着物体的位置随着时间而变化. 对于质点, 我们用位移的概念来描述在一个运动过程中质点位置的变化. 如图 1-2 所示, 质点 t 时刻在 P_1 点, 位矢为 \mathbf{r}_1 , $t + \Delta t$ 时刻在 P_2 点, 位矢为 \mathbf{r}_2 , 则定义该过程中质点的位移为矢量 $\overrightarrow{P_1 P_2} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = \Delta \mathbf{r}$. 记作位移矢量:

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1-7)$$

按运动方程(1-5)式有

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 &= (x_2 - x_1) \mathbf{i} + (y_2 - y_1) \mathbf{j} + (z_2 - z_1) \mathbf{k} \\ &= \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} + \Delta z \mathbf{k} \end{aligned} \quad (1-8)$$

可见位移矢量的三个分量为

$$\Delta x = x_2 - x_1, \quad \Delta y = y_2 - y_1, \quad \Delta z = z_2 - z_1 \quad (1-9)$$

若知道了位移矢量的三个分量 Δx 、 Δy 和 Δz , 则位移的大小和方向余弦可以按照求位矢大小和方向时所用的方法求出:

$$\begin{aligned} |\Delta \mathbf{r}| &= \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \\ \cos \alpha &= \frac{\Delta x}{|\Delta \mathbf{r}|}, \quad \cos \beta = \frac{\Delta y}{|\Delta \mathbf{r}|}, \quad \cos \gamma = \frac{\Delta z}{|\Delta \mathbf{r}|} \end{aligned}$$

另一个描述质点位置变化的物理量是路程. 路程 s 定义为质点在运动过程中所经历的轨迹的长度. 路程只有大小, 没有方向, 这一点容易和位移区别. 而且在一般情况下, 路程与位移的大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 也不相等. 见图 1-2, 在 t 到 $t + \Delta t$

过程中, 质点路程 s 为 P_1 与 P_2 两点之间的弧长 $\widehat{P_1P_2}$, 而位移的大小 $|\Delta\mathbf{r}|$ 为 P_1 与 P_2 之间直线的长度 P_1P_2 . 但是在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 路程等于位移的大小: $ds = |d\mathbf{r}|$.

运动过程中质点到原点 O 的距离 r 的变化用 $\Delta r = \Delta|r|$ 表示, 见图 1-2. 在一般情况下, 它与位移的大小 $|\Delta\mathbf{r}|$ 也不相等, 即 $\Delta r \neq |\Delta\mathbf{r}|$. 例如圆周运动, 若以圆心为坐标原点, 则质点到原点 O 的距离 r 是一个常量, 即有 $\Delta r = 0$, 但是质点位移的大小 $|\Delta\mathbf{r}|$ 则显然不为零.

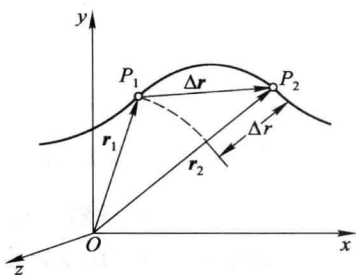


图 1-2 位移矢量

二 速度

速度描述质点运动的快慢和运动的方向, 用位移与时间的比值来表示.

1 平均速度

质点在一个过程中的平均速度直接定义为过程中质点的位移与时间间隔的比值:

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta\mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-10)$$

显然, 平均速度是一个矢量, 它的方向也就是过程中质点位移的方向. 把 (1-8) 式代入 (1-10) 式可以得到平均速度的三个分量为

$$\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad \bar{v}_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}, \quad \bar{v}_z = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (1-11)$$

2 瞬时速度

按照平均速度的定义可以理解, 时间间隔 Δt 取得越短, 则平均速度对质点运动的描述就越精确. 我们把 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的平均速度的极限定义为质点在时刻 t 的瞬时速度, 简称为速度,

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-12)$$

即速度为位矢对时间的变化率.

速度通常被表述为质点在单位时间的位移, 但它并不定义于单位时间, 而是定义于无穷小的时间间隔, 故称为瞬时速度. 速度是矢量, 它的方向为 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\Delta\mathbf{r}$ 的极限方向. 在图 1-3 中可以看出, $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\Delta\mathbf{r}$ 趋于轨道在 P_1 点的切线方向. 所以我们说: 速度的方向是沿着轨道的切线方向, 且指向前进的一方. 质点的速度描述质点的运动状态, 速度的大小表示质点运动的快慢,

速度的方向即为质点的运动方向.

把(1-5)式代入(1-12)式, 注意到 i 、 j 、 k 为常量, 有

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dz}{dt}\boldsymbol{k} \quad (1-13)$$

速度矢量与它的三个分量的关系定义为

$$\boldsymbol{v} = v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k} \quad (1-14)$$

对比可知速度矢量的三个分量为

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt} \quad (1-15)$$

速度的大小和方向余弦可以由它的三个分量确定.

另一个描述质点运动快慢的物理量是速率, 平均速率定义为路程与时间间隔的比值 $\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$. 瞬时速率简称速率, 定义为路程对时间的变化率 $v = \frac{ds}{dt}$, 由于在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $ds = |d\boldsymbol{r}|$, 而 dt 永远是正量, 所以有

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{|d\boldsymbol{r}|}{dt} = \left| \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right| = |\boldsymbol{v}|$$

即速率等于速度矢量的大小.

速度 \boldsymbol{v} 的定义表示, 速度是位矢 \boldsymbol{r} 对时间 t 的导数, 那么反过来, 位矢 \boldsymbol{r} 就应该能用速度 \boldsymbol{v} 对时间 t 的积分来表示. 由(1-12)式可得

$$d\boldsymbol{r} = \boldsymbol{v} dt$$

此式表示: 在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 质点的位移 $d\boldsymbol{r}$ 等于速度 \boldsymbol{v} 与时间间隔 dt 的乘积. 这很像匀速运动, 因为在极短的时间内, 速度确实可以看做是不变的. 若初始条件为 $t=0$ 时质点位矢为 \boldsymbol{r}_0 , 又设在任意 t 时质点位矢为 \boldsymbol{r} , 把上式对过程积分, 则有

$$\int_{\boldsymbol{r}_0}^{\boldsymbol{r}} d\boldsymbol{r} = \int_0^t \boldsymbol{v} dt$$

即

$$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_0 = \int_0^t \boldsymbol{v} dt$$

或

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_0 + \int_0^t \boldsymbol{v} dt \quad (1-16)$$

上式表示位移与速度的积分关系, 称为位移公式. 用这个公式可由速度 \boldsymbol{v} 来求位移 $\Delta\boldsymbol{r}$, 进而通过初始位置 \boldsymbol{r}_0 来求位矢 \boldsymbol{r} . 把(1-5)式和(1-14)式代入(1-16)式, 可得到位移公式的三个分量式:

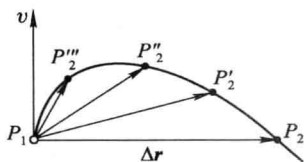


图 1-3 质点速度的方向
沿着轨道的切向