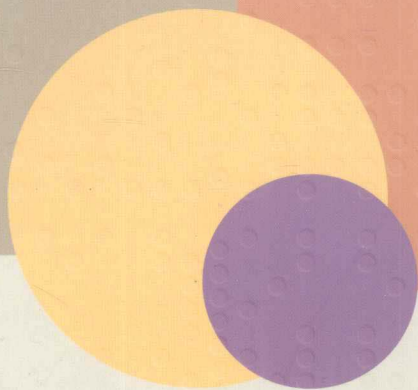




全国教育科学“十一五”规划课题研究成果



# 大学物理学 上册

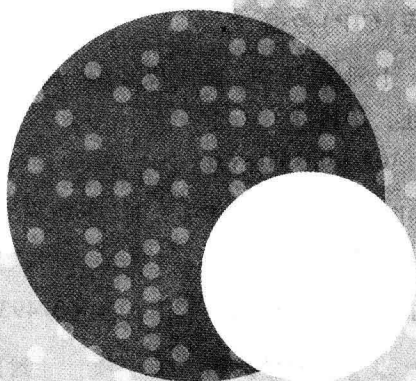
吴泽华 陈小凤



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果



# 大学物理学 上册

D A X U E W U L I X U E

吴泽华 陈小凤



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

## 内容简介

本书是全国教育科学“十一五”规划课题“我国高校应用型人才培养模式研究”物理类子项目的一项研究成果,是参照教育部制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求(2008年版)》编写而成的。本书立足大众化教育,内容简明,注重物理思想和物理图像,淡化数学推导,简化理论论证过程,是一套适合应用型院校学时较少的大学物理课程的教材,可供各类高等学校有关专业使用。

本书分为上、下两册。上册包括力学、振动与波动、热学;下册包括电磁学、光学、狭义相对论、量子物理等。与本书配套出版的还有电子教案及辅助教材《大学物理学习题分析与解答》。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 上册/吴泽华, 陈小凤主编. —北京:  
高等教育出版社, 2011. 3

ISBN 978 - 7 - 04 - 031410 - 6

I. ①大… II. ①吴… ②陈… 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(2011)第 007493 号

策划编辑 郭亚嫫 责任编辑 王 硕 封面设计 张 楠  
责任绘图 尹 莉 版式设计 马敬茹 责任校对 杨凤玲  
责任印制 毛斯璐

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	咨询电话	400 - 810 - 0598
邮政编码	100120	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a> <a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a> <a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
印 刷	国防工业出版社印刷厂	畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787 × 960 1/16	版 次	2011 年 3 月第 1 版
印 张	13.25	印 次	2011 年 3 月第 1 次印刷
字 数	240 000	定 价	18.60 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。

版权所有 侵权必究

物料号 31410 - 00

# 前 言

在我国高等教育步入大众化发展的新形势下,研究和探索如何以立足大众化教育,培养适应社会需要的应用型人才为目标进行教学和教学改革,建设优质教学资源,提高教学质量,是我们面临的重大课题。本书是全国教育科学“十一五”规划课题“我国高校应用型人才培养模式研究”物理类子项目的一项研究成果,是一套适合一般应用型本科院校,学时较少的大学物理课程的教材。

本书是参照教育部制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求(2008年版)》编写而成的。全书以因材施教为原则,努力紧扣培养目标,在广度上基本涵盖了A类核心内容,同时选取了少量B类扩展内容;在深度上力求层次分明,定位正确,并注意适当压缩经典部分,加强近代内容。

本书立足大众化教育,内容简明,注重物理思想和物理图像,简化理论论证过程。在具体内容的处理上,以联系实际和应用为原则,突出重点,化解难点。在阐明定理和定律的过程中,注意强调物理模型和物理方法,尽可能淡化数学推导但又保持物理概念的严谨。例如,“电磁学”中一些基本定理和定律的建立,电介质中的电场,磁介质中的磁场等教学难点,本书从实验现象、实验结果和特例出发得到结论,回避了烦琐的数学推导,使教材具有更大的可教性和可读性。为了加强物理学在工程技术上的应用,在振动、波动、电学、光学中选择了部分B类内容,并作简要的定性介绍。

对近代物理内容的叙述力求通俗,使内容的现代化更具可接受性和可操作性。如“狭义相对论”属A类内容,考虑到课时的限制,所以这部分编写得非常简短。本书给出了狭义相对论基本原理和狭义相对论时空观的重要结论,内容丰富但没有数学推导,便于读者自学和阅读。同时注意了“量子物理”在教材中应占的比重,编写中遵循简明易读的原则,不出现大篇数学公式,不作过深的理论探讨。例如对薛定谔方程,本书仅介绍方程的引入和方程形式,没有数学过程。“激光”和“半导体”是20世纪量子物理对近代科学技术做出的两项巨大贡献,本书对此作了通俗介绍。

本书在阐述基本概念和理论的同时,注意将科学的思想方法和研究方法体现在教材中,将科学家的思想方法和治学精神介绍给读者,使读者从中受到物理学方法论的教育和启迪。并在页下注中介绍了一些著名物理学家和诺贝尔物

理学奖获得者的重大贡献和治学精神，以激发学生探索科学的热情，培养创新意识。

本书分为上、下两册。上册包括力学、振动与波动、热学；下册包括电磁学、光学、狭义相对论、量子物理。其中加\*的或小字排印的章节可以灵活选用，如删去这些部分，全书仍保持应有的系统性和完整性。为便于教师和学生使用本教材，与本书配套出版的还有电子教案及辅助教材《大学物理学习题分析与解答》。

编写者的具体分工是：力学、振动与波动、热学由陈小凤编写，电磁学、光学、狭义相对论、量子物理学由吴泽华编写。全书由吴泽华统稿和定稿。胡昉制作和修改了部分插图。

作者在编写过程中已将初稿印成讲义，在浙江大学宁波理工学院和东南大学成贤学院 2009 级学生中使用。感谢使用本教材的老师和学生在试用过程中提出了大量宝贵的意见。限于编者水平，不妥和错误仍会存在，恳请广大读者批评指正。

本书是浙江大学宁波理工学院和东南大学成贤学院联合承担的全国教育科学“十一五”规划课题教材。作者在编写过程中得到院领导始终如一的支持，在此表示感谢。

编 者

2010 年 9 月

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010)58581897/58581896/58581879

反盗版举报传真：(010)82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

# 目 录

<b>第 1 章 质点运动学</b> .....	1
1-1 参考系 坐标系 .....	1
1-2 理想模型 质点 .....	2
1-3 描述运动的物理量 .....	3
1-3-1 位置矢量 运动方程 .....	3
1-3-2 位移 路程 .....	4
1-3-3 速度 速率 .....	6
1-3-4 加速度 .....	8
1-4 落体与抛体 运动叠加原理 .....	10
1-4-1 匀加速直线运动 .....	11
1-4-2 抛体运动 .....	13
1-4-3 运动叠加原理 .....	14
1-5 圆周运动 .....	16
1-5-1 圆周运动的角量描述 .....	16
1-5-2 匀速率圆周运动 向心加速度 .....	18
1-5-3 变速率圆周运动 切向加速度 法向加速度 .....	19
1-6 相对运动 经典力学的伽利略变换 .....	22
思考题与习题 .....	24
<b>第 2 章 质点动力学</b> .....	28
2-1 牛顿运动定律 .....	28
2-1-1 牛顿运动定律 .....	28
2-1-2 力学中常见的几种力 .....	30
2-1-3 牛顿运动定律的应用 .....	33
2-2 能量守恒定律 .....	40
2-2-1 能量与能量守恒概念的引入 .....	40
2-2-2 功与能量 .....	41
2-2-3 势能 .....	45
2-2-4 动能定理 .....	47
2-2-5 机械能守恒定律 .....	50

2-3 动量守恒定律 .....	54
2-3-1 动量 .....	54
2-3-2 牛顿第二定律与质点的动量定理 .....	55
2-3-3 动量守恒定律 .....	58
*2-3-4 碰撞问题 .....	61
2-4 角动量守恒定律 .....	64
2-4-1 质点的角动量 .....	65
2-4-2 牛顿第二定律与质点的角动量定理 .....	67
2-4-3 角动量守恒定律 .....	68
思考题与习题 .....	70
<b>第3章 刚体的定轴转动 .....</b>	<b>78</b>
3-1 刚体运动简介 .....	78
3-1-1 刚体的平动 .....	78
3-1-2 刚体的定轴转动 .....	79
3-2 转动动能 转动惯量 .....	81
3-2-1 转动动能 .....	81
3-2-2 转动惯量 .....	82
3-3 刚体定轴转动定律 .....	85
3-3-1 力对转轴的力矩 .....	85
3-3-2 刚体定轴转动定律 .....	86
3-3-3 刚体定轴转动定律的应用 .....	87
3-4 刚体定轴转动的角动量守恒定律 .....	91
3-4-1 刚体绕定轴转动的角动量 .....	91
3-4-2 刚体定轴转动的角动量定理和角动量守恒定律 .....	92
3-5 刚体定轴转动的功与能 .....	96
3-5-1 力矩的功与功率 .....	96
3-5-2 刚体定轴转动的动能定理 .....	97
3-5-3 刚体定轴转动的功能原理和机械能守恒定律 .....	98
思考题与习题 .....	100
<b>第4章 振动与波动 .....</b>	<b>107</b>
4-1 简谐振动的描述 .....	107
4-1-1 简谐振动的解析表示 .....	107
4-1-2 简谐振动的特征物理量 .....	108
4-1-3 简谐振动的振幅矢量图示法 .....	110
4-2 简谐振动的动力学特征 .....	114



4-2-1 弹簧振子模型及其动力学方程	114
4-2-2 简谐振动的能量	115
*4-3 物理系统的自由振动实例	118
4-4 简谐振动的合成	120
4-4-1 两个同频率、同振动方向简谐振动的合成	120
4-4-2 两个同振动方向、不同频率简谐振动的合成 拍	122
*4-4-3 两个振动方向互相垂直简谐振动的合成	123
*4-4-4 振动的分解	124
4-5 共振	125
4-5-1 受迫振动与共振	125
4-5-2 阻尼的存在对受迫振动的影响	126
*4-5-3 防震与减震	128
4-6 机械波的产生与传播	130
4-6-1 机械波产生的条件	130
4-6-2 横波与纵波	131
4-6-3 波动的几何描述	132
4-6-4 描述波动的基本物理量	132
4-7 平面简谐波	134
4-7-1 平面简谐波的波动方程	134
4-7-2 对平面简谐波波动方程的分析和讨论	135
4-8 波的能量与波的强度	138
4-8-1 波的能量	138
4-8-2 波的能流与波的强度	139
*4-8-3 声波 声强 声强级	139
4-9 波的干涉 驻波	141
4-9-1 波的叠加原理	141
4-9-2 波的干涉	141
4-9-3 驻波	144
4-10 多普勒效应	148
思考题与习题	152
<b>第5章 热学基础</b>	<b>158</b>
5-1 热力学系统与热力学状态的描述	158
5-1-1 热力学系统 环境	158
5-1-2 平衡态 状态参量 物态方程	159
5-1-3 温度 热力学第零定律	161

5-2 理想气体的温度、压强与内能 .....	162
5-2-1 理想气体模型与统计假设 .....	162
5-2-2 理想气体的压强与能量的关系 .....	163
5-2-3 理想气体的温度与能量的关系 .....	165
5-2-4 能量均分定理 .....	166
5-2-5 理想气体的内能 .....	168
5-3 麦克斯韦速率分布律 .....	169
5-3-1 麦克斯韦速率分布律 .....	169
5-3-2 三种统计速率 .....	170
5-3-3 玻耳兹曼能量分布 .....	172
5-4 热力学第一定律 .....	172
5-4-1 改变系统状态的两种方式 .....	173
5-4-2 准静态过程中功与热量的计算 .....	173
5-4-3 热力学第一定律 .....	175
5-4-4 热力学第一定律对理想气体特定过程的应用 .....	176
5-5 热机效率 制冷系数 .....	181
5-5-1 循环过程 .....	181
5-5-2 热机 热机的效率 .....	182
5-5-3 制冷机 制冷系数 .....	182
5-5-4 卡诺循环 卡诺定理 .....	183
5-5-5 不可逆过程 .....	185
5-6 热力学第二定律 熵 .....	185
5-6-1 热力学第二定律的表述 .....	186
5-6-2 熵的概念与热力学第二定律 .....	187
5-6-3 熵增加原理 .....	188
5-6-4 玻耳兹曼熵关系式 .....	189
思考题与习题 .....	192
习题参考答案 .....	196

# 第 1 章 质点运动学

力学是物理学发展最早的分支，它的研究对象是机械运动，即物体位置随时间的变化。机械运动是物质运动最简单、最直观的形式，自然界中几乎所有的物质运动（例如，天体的运动、落体的运动、地面上许多物体的运动等）都包含这种最基本的运动形式。此外，工程机械、道路桥梁、人造卫星、火箭发射等也都离不开力学知识。可以说，力学是许多科学技术的基础。

在力学中，仅涉及描述物体如何运动而不涉及物体为什么会做这种运动的内容，称为运动学。进一步研究物体运动与物体之间相互作用关系的内容，称为动力学。运动学虽然没有涉及物体运动的本质原因，但也有重大意义。例如，在许多机械结构中，常常着重研究组成该机械结构的各个部分的运动情况，考察它们是否完成了预定的任务，这往往是纯运动学问题。此外，动力学问题的真正解决，也离不开运动学的基础。只有把运动学知识与动力学规律结合起来，才能详尽地求解物体的运动情况。

本章介绍质点运动学的基础知识。

## 1-1 参考系 坐标系

“火车在奔驰”，“马达在旋转”，“鸟儿在飞翔”……这些都是人们用来描述物体运动的语言。可是，同一个物体的运动，不同观察者的描述却不尽相同。当你伫立船头向家人挥手告别时，岸边的亲人看到你正随船远去；当你静静地躺在床上休息时，你实际上是“坐地日行八万里，巡天遥看一千河”……可见，运动和静止都是一个相对的概念。

宇宙间的任何物体都在永恒不停地运动着，绝对静止的物体是没有的。不论运动还是静止，都是相对于另一个物体或物体群而言。因此，在描述物体的运动状态时，首先应该选择某一个物体或物体系作为参考，称为参考系。参考系一经选定后，对所研究物体运动的描述就有了依据。

究竟选择什么物体作为参考系，在运动学问题中可以是任意的，只要描述物体的运动简单方便就行；但是在动力学问题中必须慎重选择，这是因为一些重要的动力学定律只能在惯性参考系中才成立。一般情况下，在研究地面上的

物体运动时,大多选用地面作为参考系;研究行星运动时,则以太阳为参考系最为简单.

为了定量地描述物体的运动,还需要在参考系上选择适当的坐标系,以及安放在坐标系上的时钟.坐标系用来记录物体的空间位置,时钟用来记录各个时刻<sup>①</sup>.常用的坐标系有:直角坐标系、平面极坐标系、柱坐标系、球坐标系等.

坐标系是固定在参考系上的.选用不同的坐标系,或坐标系原点选择得不同,并不会改变所研究物体的运动性质,仅仅改变描述物体运动的参数.但坐标系选择得适当,将会大大简化运算,从而能方便地描述物体的运动情况.

## 1-2 理想模型 质点

自然界中物体的运动是十分复杂的.一个物体可能同时参与几种运动.例如:地球既绕太阳公转,本身又在自转.由于物体具有形状和大小,在运动时物体上各点的运动情况不一定相同.因此我们在分析物体的运动时,应分清哪些是主要因素,起决定性作用的因素;哪些是次要因素,暂且可以忽略不计.这样,就把本来比较复杂的实际对象简化成一种理想化的物理模型.用理想模型代替实际物体是物理学常用的研究方法之一.

质点就是一个理想化模型.什么时候可以采用质点模型呢?当物体的大小远远小于所研究问题中的有关距离,而且所研究的问题又不涉及转动时,就可以忽略物体的体积、形状及其内部结构,用一个没有体积大小也没有形状的“点”来代替实际物体.但是这个“点”并不是数学上的几何点,它具有整个物体的质量,也具有动量、能量,故称之为质点.



我们的太阳系

应该指出的是,通常我们说某物体在某个具体问题中可以看是质点,并不是说在所有的力学问题中都可以把该物体看成是质点.例如,在研究地球绕太阳公转时,由于地球的直径(约为  $1.3 \times 10^7$  m)比它到太阳的距离(约为  $1.5 \times 10^{11}$  m)小得多,我们可以把地球当做质点;但在研究地球的自转及地球

<sup>①</sup> 在物体运动时,时间和空间位置的确定涉及时间和长度的测量.要进行这样的测量,首先需要选择时间与长度的计量标准.最近选定的标准如下:1967年,第13届国际计量大会规定,时间的单位为秒,符号为s,1s等于铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射周期的9 192 631 770倍,其精度可达到  $10^{-13}$ ;1983年,第17届国际计量大会规定,长度的单位为米,符号为m,1m等于光在真空中在  $(1/299\,792\,458)$ s的时间间隔内所通过的路程长度.

本身的其他问题时,就不能把地球当做质点了.同一个物体能否被看做质点,完全取决于所研究物体的具体运动情况.

质点这个概念的作用还远不止于此!一般说来,当我们研究某一物体的运动时,常常会把该物体分成许多微小部分来研究,若每一部分都非常小,以至于组成它的各微小部分的运动状态接近于相同,就可以把这些微小部分分别当做质点来处理.整个物体就是组成该物体的所有质点的组合(称为质点系).如果组成物体的各个质点的运动状态都知道了,则该物体的运动状态也就知道了.将一个物体或物体系抽象为一个质点系,也是物理学常用的一种研究方法.

## 1-3 描述运动的物理量

通常,我们说到一个物体的运动情况时往往要交代该物体“什么时候,到什么地点,朝什么方向,快慢如何”.也就是说,首先要确定物体在空间的位置,以及物体在空间的位置如何随时间变化.在选定了参考系和坐标系后,运用质点这一理想模型,就可以定量地描述物体的运动状况.

### 1-3-1 位置矢量 运动方程

为了定量计算的方便,还需在参考系上建立坐标系.一个质点在空间的位置用它在坐标系中的三个坐标来表示,在直角坐标系中质点的位置坐标为 $(x, y, z)$ .运动质点的位置坐标是随时间变化的,用数学的语言说,质点的坐标是时间的函数,即

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-1)$$

从坐标原点 $O$ 到质点所在处 $P$ 引一带箭头的线段 $\overrightarrow{OP}$ 也可以用来表示质点在空间的位置, $\mathbf{r}$ 称为位置矢量<sup>①</sup>,简称位矢. $\mathbf{r}$ 的长度表示质点离坐标原点的距离, $\mathbf{r}$ 的方向表示质点相对于坐标原点的方位.位矢 $\mathbf{r}$ 的末端在坐标系中的坐标即质点在 $P$ 点的位置坐标.例如,在图1-1所示的直角坐标系中,位矢 $\mathbf{r}$ 的末端坐标为 $(x, y, z)$ .如果令 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别表示 $x, y, z$ 三

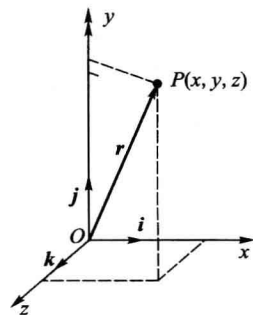


图1-1 位置矢量

<sup>①</sup> 在印刷品中,矢量一般用黑体字母表示,例如位矢 $\mathbf{r}$ ;在书写时,一般写成带箭头的字母,例如 $\vec{r}$ .请注意:数学中的矢量是一个有大小、有方向的量,而且其加减必须满足平行四边形法则.

个坐标轴方向的单位矢量，则位矢与它在直角坐标系中分量的关系如下：

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

位矢  $\mathbf{r}$  的大小也称为  $\mathbf{r}$  的模，记作  $|\mathbf{r}|$ ，则

$$|\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-3)$$

位矢  $\mathbf{r}$  的方向用  $\mathbf{r}$  与  $x$ ,  $y$ ,  $z$  三个坐标轴的夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  (也称方向角) 表示，如图 1-2 所示。其中

$$\cos \alpha = \frac{x}{|\mathbf{r}|}, \quad \cos \beta = \frac{y}{|\mathbf{r}|}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{|\mathbf{r}|} \quad (1-4)$$

显然有

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

质点运动时，它的位置是不断变化的，也就是说其位置矢量  $\mathbf{r}$  是时间的函数。方程组 (1-1) 和方程 (1-2) 给出了质点在任一时刻的位置，它们反映了质点的运动规律，称为质点的运动方程。质点运动学的任务就是确定质点的运动方程。

若一个质点在空间运动，将质点所经各点连成的曲线称为质点的运动轨道，如图 1-3 所示。从方程组 (1-1) 消去参数  $t$  就可以得到运动质点的轨道方程。

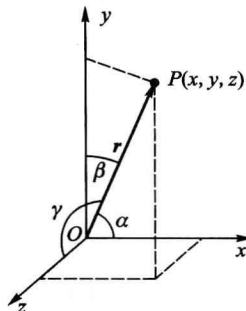


图 1-2 方向角

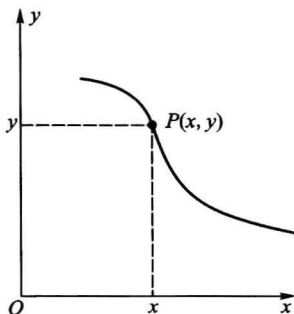


图 1-3 运动轨道

### 1-3-2 位移 路程

在日常生活中，人们常用“走了多少路”来说明位置的变化。但如果没有同时指出物体运动的实际轨道，我们并不能真正了解物体位置究竟如何改变。为了确切而简便地说明质点位置的变化，还需要一个新的概念——位移。

假设某一质点沿图 1-4 所示的曲线运动。在  $t_1$  时刻质点位于 A 点，其坐标为  $(x_1, y_1)$ ，位矢为  $\mathbf{r}_1$ ； $t_2$  时刻该质点运动到 B 点，其坐标为  $(x_2, y_2)$ ，位矢为  $\mathbf{r}_2$ 。在此过程中，质点位置的变化可以用从 A 点指向 B 点的矢量  $\Delta \mathbf{r}$  表示。 $\Delta \mathbf{r}$  称为质点由位置 A 到位置 B 的位移。根据平行四边形法则，由图 1-4 可以看出

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1-5)$$

在直角坐标系中，有

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

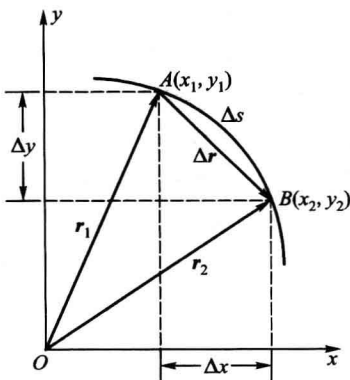


图 1-4 位移矢量

位移的大小为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (1-6)$$

图 1-4 为质点在平面上做曲线运动的示意图。请注意：质点从 A 点运动到 B 点实际上是沿着一条曲线  $\widehat{AB}$  进行的，通常将  $\widehat{AB}$  称为质点在  $\Delta t = t_2 - t_1$  时间间隔内运动的路程，一般记作  $\Delta s$ 。路程和位移是两个不同的概念：

(1) 路程指质点运动走过的实际路线的长，它与质点运动的具体路径有关；而位移表示质点在运动过程中位置变化的实际效果，不论其走过的实际路径如何，只要它从 A 移动到 B，则位移总为  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ 。

(2) 路程的大小为  $\Delta s$ ，是  $\widehat{AB}$  曲线的长度；位移的大小为  $|\Delta \mathbf{r}|$ ，是 AB 间的直线距离。一般情况下， $\Delta s \neq |\Delta \mathbf{r}|$ 。

(3) 路程是标量，按照代数法则则相加减；而位移是矢量，按照几何法则则相加减。只要我们知道质点的初始位置  $\mathbf{r}_1$  及位移  $\Delta \mathbf{r}$ ，立即可以知道质点的末位置

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

应该说位移这个物理量更确切也更简便地描述了质点位置的变化。

在国际单位制中，位移和路程的单位都为 m(米)。

**例 1-1** 一电子在电场中运动，其运动方程为  $x = 2t$ ， $y = 8 - 2t^2$ ，其中， $x$ 、 $y$  的单位为 m， $t$  的单位为 s。求：(1) 电子的运动轨道；(2)  $t = 1.0$  s、 $3.0$  s 时电子的位置矢量；(3) 从  $t = 1.0$  s 到  $t = 3.0$  s 这段时间内电子的位移  $\Delta \mathbf{r}$ ；(4) 从  $t = 1.0$  s 到  $t = 3.0$  s 这段时间内电子位置矢量大小(即位置矢量的模)的增量  $\Delta r$ 。

**解：**(1) 从运动方程的分量式

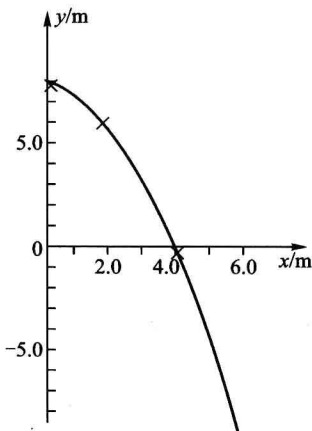
$$x = 2t, \quad y = 8 - 2t^2$$

消去时间  $t$ ，得电子的轨道方程

$$y = 8 - \frac{x^2}{2}$$

这是一条抛物线，各时刻质点的坐标见下表。用描点法可得质点的运动轨道，见例 1-1 图。

$t/s$	0	1.0	2.0	3.0	4.0
$x/m$	0	2.0	4.0	6.0	8.0
$y/m$	8.0	6.0	0	-10.0	-24.0



例 1-1 图

(2) 质点的运动方程

$$\boldsymbol{r} = 2t\boldsymbol{i} + (8 - 2t^2)\boldsymbol{j}$$

将时间  $t = 1.0 \text{ s}$ ,  $3.0 \text{ s}$  代入运动方程, 得

$$\boldsymbol{r}_1 = (2\boldsymbol{i} + 6\boldsymbol{j}) \text{ m}$$

$$\boldsymbol{r}_3 = (6\boldsymbol{i} - 10\boldsymbol{j}) \text{ m}$$

(3) 从  $t = 1.0 \text{ s}$  到  $t = 3.0 \text{ s}$  这段时间内电子的位移

$$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_3 - \boldsymbol{r}_1 = (4\boldsymbol{i} - 16\boldsymbol{j}) \text{ m}$$

位移的大小

$$|\Delta\boldsymbol{r}| = \sqrt{4^2 + (-16)^2} \text{ m} = 16.5 \text{ m}$$

(4) 为了求得位置矢量大小的增量  $\Delta r$ , 应先求出

$$|\boldsymbol{r}_1| = \sqrt{2^2 + 6^2} \text{ m} = 6.3 \text{ m}$$

$$|\boldsymbol{r}_3| = \sqrt{6^2 + (-10)^2} \text{ m} = 11.7 \text{ m}$$

$$\Delta r = |\boldsymbol{r}_3| - |\boldsymbol{r}_1| = 5.4 \text{ m}$$

可见, 位矢大小的增量并不等于位移的大小, 即

$$\Delta r \neq |\Delta\boldsymbol{r}|$$

### 1-3-3 速度 速率

在研究质点运动的问题中我们除了关心质点位置的变化外, 还关心质点位置变化的快慢, 为此, 需要引入速度这一物理量.

#### 1. 平均速度

仍以图 1-4 中的质点运动为例. 质点从  $A$  移动到  $B$  的位置变化为  $\Delta\boldsymbol{r}$ , 花费的时间为  $\Delta t = t_2 - t_1$ , 质点在这段时间内发生的位移与所经历的时间间隔之比定义为质点在这一时间间隔的平均速度, 即

$$\bar{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t} \quad (1-8)$$

平均速度只能粗略地描述质点运动的快慢, 它的大小和方向与所取的时间间隔有关. 因此, 在说到平均速度时, 必须明确地指出是哪个时间间隔内的平均速度.

平均速度是一个矢量, 它的方向与位移方向相同.

#### 2. 瞬时速度

为了详尽地掌握质点运动快慢的细致变化, 我们自然希望求得质点在各个瞬时的运动情况. 如图 1-5 所示, 如果  $\Delta t$  取得足够小, 在这段时间间隔内质点运动的快慢只有极其微小的改变, 特别是当  $\Delta t \rightarrow 0$  时, 平均速度的极限值表征了质点在瞬时  $t$  的运动情况, 定义

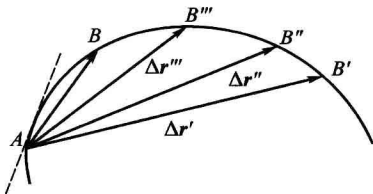


图 1-5 在  $\Delta t \rightarrow 0$  的过程中  $B$  点逐渐向  $A$  点趋近. 当  $B$  无限接近  $A$  时,  $\Delta\boldsymbol{r}$  的方向与轨道的切线方向相同



$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\boldsymbol{v}} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \quad (1-9)$$

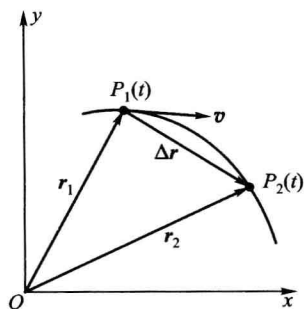
称为质点在  $t$  时刻的**瞬时速度**，简称**速度**。上式表明，质点在  $t$  时刻的**瞬时速度**等于其位置矢量  $\boldsymbol{r}$  对时间  $t$  的一阶导数。因此，只要知道质点的运动方程  $\boldsymbol{r}(t)$  就能求出任何时刻质点的瞬时速度。在直角坐标系中

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dz}{dt}\boldsymbol{k} \quad (1-10)$$

用分量表示，为

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt}$$

**瞬时速度是矢量**，它的方向表示质点前进的方向。由速度定义式(1-9)可知， $t$  时刻速度的方向就是  $\Delta t \rightarrow 0$  时该时刻  $\Delta \boldsymbol{r}$  的极限指向。如图 1-6 所示，在质点做曲线运动时， $\boldsymbol{v}$  的方向也就是该时刻质点所在处轨道的切线方向。日常生活中的许多现象已证明了这一点，例如下雨时，若你将雨伞旋转，会观察到水滴沿着雨伞边缘的切线方向飞出。



瞬时速度的大小为  $|\boldsymbol{v}| = \left| \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right|$ ，在直角坐标系中  $\boldsymbol{v}$  的方向也就是该时刻质点所在处轨道的切线方向

$$|\boldsymbol{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (1-11)$$

### 3. 速率

质点在轨道上运动的快慢称为**速率**。定义平均速率和瞬时速率

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \text{和} \quad v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-12)$$

式中， $s$  为质点运动的路程。

**速率是路程对时间的变化率，是标量**。一般说来，路程不等于位移的大小，所以平均速率也不等于平均速度的大小。但是，当  $\Delta t \rightarrow 0$  时， $ds = |d\boldsymbol{r}|$ ，因此有  $v = |\boldsymbol{v}|$ ，这表明瞬时速度的大小等于瞬时速率。

在国际单位制中，瞬时速度和瞬时速率的单位都为 m/s。

**例 1-2** 一物体在直线上运动，运动方程为  $x = 2.5 + 8.9t - 1.5t^3$ ，其中  $x$  以 m 为单位， $t$  以 s 为单位。试求：(1)瞬时速度的表达式；(2) $t = 2.0$  s 时的速度；(3) $t = 2.0$  s 时的速率。

解：(1) 瞬时速度的表示式