



“十三五”普通高等教育规划教材

DAXUE WULI JICHU JIAOCHENG

# 大学物理

## 基础教程

主 编 彭荣荣 王 帅 秦梅宝



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)



“十三五”普通高等教育规划教材

# 大学物理基础教程

主 编 彭荣荣 王 帅 秦梅宝  
副主编 陈博旺 龚 玲 张 丹

北京邮电大学出版社

• 北京 •

## 内 容 简 介

本书依据教育部颁布的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》，并结合编者多年的教学经验、多项教学改革研究成果，以及汲取同类优秀教材的精华编写而成。本书为“十三五”普通高等教育规划教材。

本书在编写时做了部分舍弃，将重点放在了机械运动和电学上，涵盖质点运动学、质点动力学、刚体、基础电学、静电场等主要内容。在编写过程中尽量弱化数学推导，注重基本概念、基本理论、基本方法，突出重难点知识，同时加入了生活化和趣味化实例，配备了相关课后习题和检测题。

本书可作为高等学校本、专科非物理专业、高职高专工科各专业及全国少数民族预科教育基地物理课程教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理基础教程 / 彭荣荣, 王帅, 秦梅宝主编 -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2017. 8  
ISBN 978-7-5635-5115-6

I. ①大… II. ①彭… ②王… ③秦… 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(2017)第 106222 号

---

书 名 大学物理基础教程  
主 编 彭荣荣 王 帅 秦梅宝  
责任编辑 沙一飞  
出版发行 北京邮电大学出版社  
社 址 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)  
电话传真 010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)  
网 址 www.buptpress3.com  
电子信箱 ctrd@buptpress.com  
经 销 各地新华书店  
印 刷 北京时捷印刷有限公司  
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16  
印 张 16.5  
字 数 411 千字  
版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-5635-5115-6

定价: 39.00 元

如有质量问题请与发行部联系  
版权所有 侵权必究

# 前 言

物理学是研究物质的基本结构、相互作用和物质最基本、最普遍的运动形式及其相互转化规律的学科,其基本理论渗透自然科学的一切领域,是自然科学的许多领域和工程技术的基础。大学物理是高校理工科大学生必修的一门重要公共基础课,一方面为学生学习后继课程和解决与专业有关的实际问题提供了必不可少的物理基础知识及常用的物理方法,另一方面使学生初步学习科学的思想方法和研究问题的方法,这些都起着开阔思路、激发探索和创新精神、增强适应能力、提高科学素质的重要作用。

本书在内容组织上,兼顾了知识的逻辑性、完整性与可读性,把核心内容放在力学和电学知识上面,使学生对基本概念、基本理论、基本技能有较好的掌握;另外引入了少数民族预科生所需的基础电学等知识,使预科生能够更好地进行知识的过渡,起到了承上启下、“金色桥梁”的作用。在教材深度上,编者弱化知识难度和理论推导过程,注重知识点与实际关联,加入了相关生活类和趣味类的实例。在课时安排上,做了调整和优化,特别适合少学时教学,同时配有相关的课后习题和检测题,使学生能够进行训练和自测。

本书由南昌工学院物理教研室主任彭荣荣策划编写大纲,负责制定全书的框架、思路,并组织编写、修订和统稿。参加编写人员分工为:陈博旺负责本书的外文资料收集与翻译工作,张丹编写第1章,龚玲编写第2章,王帅编写第3章,秦梅宝编写第5章,彭荣荣编写第4章、第6章、各章习题、检测题、矢量基础、国际单位制、微积分基础等。同时本书是南昌工学院多个教学改革研究课题的成果,课题名称及课题编号具体为:彭荣荣主持的“以应用技术型为导向的大学物理教学模式改革实证研究(编号:NGJG-2015-06)”、“在公共基础学科教学中培养大学生自主创新素质与能力的研究(编号:NGJG-2016-32)”,王帅主持的“民族预科物理教材建设的研究(编号:NGJG-2015-66)”、“地方性应用型本科高校大学物理教学模式改革与实践(编号:NGJG-2016-42)”,秦梅宝主持的“基于案例导入式的‘大学物理’课程模式的创新研究(编号:NGJG-2015-58)”,龚玲主持的“少数民族预科物理教学改革的研究(编号:NGJG-2015-57)”、“新建应用型本科高校‘大学物理’校本教材的研究与开发(编号:NGJG-2016-41)”,张丹主持的“以实践动手能力为培养目的的化学教学改革初步研究(编号:NGJG-2015-65)”、“分层教学背景下研讨式教学法的实施研究——以南昌工学院为例(编号:NGJG-16-33)”。

本书按照教育部、国家发展改革委、财政部关于引导部分地方普通高校向应用型转变的指导意见和建议要求,基于编者多年以来的教学经验及教改成果,同时汲取了国内同类教材的精

华编写而成。本书适合于本科非物理专业、高职高专工科专业及全国少数民族预科生,也可作为相关技术人员的教学参考资料。

在本书的编写过程中得到了南昌工学院基础教学部的大力支持,借此机会表示衷心的感谢;同时也对北京邮电大学出版社对本教材提出的很多宝贵意见表示感谢!由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免出现缺点与不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2017年5月

# 目 录

第 1 章 质点运动学	1
1.1 质点及其描述	1
1.1.1 质点	1
1.1.2 参考系	2
1.1.3 坐标系	2
1.2 描述质点运动的物理量	3
1.2.1 位置矢量与运动方程	3
1.2.2 位移与路程	4
1.2.3 速度与速率	5
1.2.4 加速度	8
1.3 质点运动学中的两类问题	10
1.3.1 求导问题	10
1.3.2 积分问题	14
1.4 运动叠加原理	16
1.5 圆周运动	19
1.5.1 圆周运动的线量描述	19
1.5.2 圆周运动的角量描述	23
1.5.3 线量与角量之间的关系	25
本章提要	28
习题	30
第 2 章 质点动力学	34
2.1 力学基础知识	34
2.1.1 力	34
2.1.2 常见力	35
2.1.3 基本力	40
2.1.4 共点力的合成与分解	40
2.2 牛顿运动定律	45
2.2.1 牛顿第一定律	45

2.2.2	牛顿第二定律	47
2.2.3	牛顿第三定律	49
2.2.4	牛顿定律的应用	49
2.3	动量与冲量	55
2.3.1	动量	55
2.3.2	冲量	55
2.3.3	质点的动量定理	56
2.3.4	质点系的动量定理	58
2.3.5	质点系的动量守恒定律	60
2.4	功与能	65
2.4.1	功 功率	65
2.4.2	保守力的功 势能	69
2.4.3	质点的动能定理	73
2.4.4	质点系的动能定理	74
2.4.5	质点系的功能原理	75
2.4.6	机械能守恒定律	76
2.4.7	能量守恒定律	77
	本章提要	81
	习题	84
<b>第3章</b>	<b>刚体力学基础</b>	<b>89</b>
3.1	刚体运动的描述	89
3.1.1	刚体的基本运动形式	89
3.1.2	定轴转动的角量描述	90
3.1.3	匀变速转动的计算	91
3.1.4	角量与线量之间的关系	92
3.2	刚体定轴转动的转动定律 转动惯量	94
3.2.1	力矩	94
3.2.2	质心	98
3.2.3	转动定律	100
3.2.4	转动惯量	101
3.2.5	转动定律应用	104
3.3	刚体定轴转动的功和能	106
3.3.1	力矩的功	106
3.3.2	刚体的重力势能	108
3.3.3	转动动能	108
3.3.4	刚体定轴转动的动能定理	109

3.4 定轴转动刚体角动量定理 角动量守恒定律 .....	110
3.4.1 角动量 .....	110
3.4.2 定轴转动刚体的角动量定理 .....	111
3.4.3 定轴转动刚体的角动量守恒定律 .....	112
本章提要 .....	114
习题 .....	115
<b>第4章 基础电学</b> .....	<b>121</b>
4.1 常见电学物理量 .....	121
4.1.1 电流 .....	121
4.1.2 电压 .....	122
4.1.3 导体与绝缘体 .....	123
4.1.4 电阻及计算 .....	123
4.1.5 电路及其状态 .....	124
4.2 电表及使用 .....	126
4.2.1 电流表的构造 .....	126
4.2.2 电流表的读数 .....	126
4.2.3 电流表使用的注意事项 .....	126
4.2.4 电压表的构造 .....	127
4.2.5 电压表的读数 .....	127
4.2.6 电压表使用的注意事项 .....	127
4.3 滑动变阻器及使用 .....	128
4.3.1 滑动变阻器的构造 .....	128
4.3.2 工作原理 .....	128
4.3.3 使用方法 .....	129
4.4 串、并联电路 .....	130
4.4.1 串联电路及其特点 .....	130
4.4.2 并联电路及其特点 .....	130
4.4.3 串、并联电路中电压、电流规律 .....	131
4.5 欧姆定律 .....	132
4.6 电阻的连接及测量 .....	134
4.6.1 电阻的串、并联 .....	134
4.6.2 电阻等效变换 .....	136
4.6.3 电阻的测量 .....	137
4.7 焦耳定律 .....	139
4.7.1 电功和电功率 .....	139
4.7.2 焦耳定律 .....	140



4.7.3	热功率 .....	140
4.7.4	电热的利用和防止 .....	142
4.8	家庭电路及安全用电 .....	142
4.8.1	家庭电路 .....	142
4.8.2	安全用电 .....	145
	本章提要 .....	146
	习题 .....	147
<b>第5章</b>	<b>静电场</b> .....	<b>156</b>
5.1	电荷 库仑定律 .....	156
5.1.1	电荷 .....	156
5.1.2	电荷守恒定律 .....	156
5.1.3	电荷量子化 .....	156
5.1.4	库仑定律 .....	157
5.2	静电场 电场强度 .....	158
5.2.1	静电场 .....	158
5.2.2	电场强度 .....	159
5.2.3	电场强度的计算 .....	160
5.3	静电场的高斯定理 .....	165
5.3.1	电场线 .....	165
5.3.2	电场强度通量 .....	167
5.3.3	静电场的高斯定理 .....	168
5.3.4	高斯定理的应用 .....	171
5.4	静电场的环路定理 .....	176
5.4.1	静电场力做功 .....	176
5.4.2	静电场的环路定理 .....	177
5.4.3	电势及电势的计算 .....	178
5.5	静电场中的导体 .....	184
5.5.1	静电平衡 .....	184
5.5.2	导体表面的电荷分布 .....	185
5.5.3	静电屏蔽 .....	187
5.6	电容器的电容 .....	189
5.6.1	孤立导体的电容 .....	189
5.6.2	电容器的电容 .....	189
5.6.3	电容器电容计算 .....	190
5.6.4	电容器电容的串联和并联 .....	192
	本章提要 .....	193

习题	195
<b>第 6 章 热学</b>	<b>199</b>
6.1 热力学基本概念	199
6.1.1 热力学系统和环境	199
6.1.2 过程与途径	200
6.1.3 热力学第零定律	200
6.1.4 准静态过程	201
6.2 热力学第一定律	201
6.2.1 热和功	201
6.2.2 热力学能	202
6.2.3 热力学第一定律	203
6.3 典型的热力学过程	203
6.3.1 等体过程 摩尔定体热容	204
6.3.2 等压过程 摩尔定压热容	204
6.3.3 等温过程	205
6.3.4 绝热过程	205
6.4 循环过程和卡诺循环	206
6.5 热力学第二定律	209
6.5.1 自发变化	209
6.5.2 热力学第二定律	209
6.5.3 卡诺定理	210
本章提要	211
习题	212
<b>附录 I 检测题</b>	<b>216</b>
检测题(一)	216
检测题(二)	219
<b>附录 II 矢量基础</b>	<b>224</b>
一、标量	224
二、矢量	224
<b>附录 III 国际单位制</b>	<b>229</b>
<b>附录 IV 微积分基础</b>	<b>232</b>
一、函数	232

二、函数的导数 .....	232
三、函数的微分 .....	235
四、函数的不定积分 .....	236
五、函数的定积分 .....	238
附录Ⅵ 历届诺贝尔物理学奖获得者 .....	241
附录Ⅴ 常用物理参数 .....	248
参考文献 .....	254

若研究对象不能被当作一个质点来处理,则可以把它分割成若干个小部分,每一个组成部分由于足够小,均可视为质点.由多个质点构成的对象叫作质点系.

### 1.1.2 参考系

在自然界中,所有的物体均处于不停的运动中,即自然界中没有绝对静止的物体,所以可以说运动是绝对的,而静止是相对的.在中学时已经学过机械运动,若要描述物体在机械运动中所处的位置以及位置的变化,则必须选定一个物体(或相对静止的若干物体)作为参照,这个被当作参照标准的物体或物体群就被称为参考系,也可称为参照系或参照物.

在同一个物体的运动中,若我们选择不同的物体作为参考系,则对此物体运动结果的描述一般也有差异.例如,匀速直线运动的一辆公交车,以后面座位上的人作为参考系,司机处于静止,但是以站台上等车的人作为参考系,则司机也在作匀速直线运动.但如果我们选的参考系是在空中做特技表演的飞机上的发动机上某个高速旋转的机械部件,则对物体的运动状态进行描述时将非常复杂.因此,要简单方便地对一个物体的运动状态进行描述,如何选择参考系非常重要.

从运动学角度来讲,参考系的选取可以是任意的.一般情况下,以对问题的描述和求解最方便和简单作为参考系选择的基本原则.例如,对地球表面上物体的运动进行研究时,通常选择地面作为参考系会使问题最为容易.但是具体问题要具体分析,比如当我们研究行星在宇宙中的运动轨迹时,则应该选择太阳作为参考系.

### 1.1.3 坐标系

在选择合适的参考系之后,若想对物体的运动规律进行定量描述,则还应该在参考系上建立一个相对于该参考系静止的标尺或其他测量体系,我们将这种带有测量体系的参考系称为坐标系.坐标系可以看作是参考系的数学抽象,即它是由固定在参考系上的一组带刻度的曲线、射线或角度来表示的.在同样的参考系中,若采用不同的坐标系描述同一物体的运动,得到的数学表达式是不同的,这与坐标系的选择有关.从原则上讲,对于同一参考系,坐标系的选择可以是任意的,但一般要以使物体的描述和得到的数学规律较简单为基本原则.在研究物体运动时,最常用的坐标系是直角坐标系,由三条相互垂直的坐标轴( $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴)组成.除此以外,依据所研究问题的差别,还可以选择平面极坐标系、自然坐标系、柱坐标系和球坐标系等.

对于同一个研究对象,选择不同的坐标系,虽然得到的描述物体运动的变量和数学表达式不同,但物体的运动性质不会变化.坐标系选择得恰当与否,只会影响求解过程的复杂程度(不恰当会导致问题难以求解),并不会改变物体运动的本性.

## 1.2 描述质点运动的物理量

### 1.2.1 位置矢量与运动方程

在坐标系中,质点所在位置通常用位置矢量来表示.其定义为:由坐标原点  $O$  点指向质点所处位置的有向线段称为位置矢量(简称位矢或矢径),用矢量  $\boldsymbol{r}$  表示,大小为  $|\boldsymbol{r}|$ . 在如图 1.2.1 所示的三维直角坐标系中,有向线段  $\overrightarrow{OM}$  记为  $\boldsymbol{r}$ . 之所以引入位置矢量的概念,是为了更方便、更准确地描述质点的运动.

当质点随时间运动时,其所处的空间位置也在不断地变化,所以位置矢量  $\boldsymbol{r}$  是关于时间的函数. 而描述质点所在空间位置随时间变化的函数表达式就称为运动方程(或运动函数),可以表示为

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \quad (1.2.1)$$

在三维直角坐标中,某时刻质点所在的位置可用它在坐标系中的三个坐标  $(x, y, z)$  来确定,所以坐标  $x, y, z$  也是时间  $t$  的函数,因此运动方程的分量(标量)形式为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1.2.2)$$

某时刻质点在三维直角坐标中的位置为  $(x, y, z)$ , 则此时刻质点的位矢  $\boldsymbol{r}$  可以表示为

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k} \quad (1.2.3)$$

其中,  $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$  分别表示  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴正方向上的单位矢量.

位矢  $\boldsymbol{r}$  的大小为

$$r = |\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.2.4)$$

方向由方向余弦表示为

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos \beta = \frac{y}{r}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{r} \quad (1.2.5)$$

其中,  $\alpha, \beta, \gamma$  分别是  $\boldsymbol{r}$  与  $Ox, Oy, Oz$  坐标轴间的夹角.

如果已知质点的运动方程,根据运动方程可以确定任时刻质点所处的位置,从而确定质点的运动. 即从质点的运动方程式(1.2.2)中消去时间  $t$ , 就可以得到质点运动的具体路径,即  $x, y, z$  三个坐标之间的数学表达式,设为

$$F = (x, y, z) \quad (1.2.6)$$

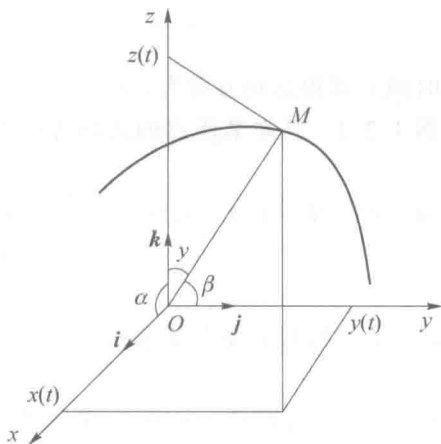


图 1.2.1 位置矢量

此表达式被称作质点的轨道方程(或轨迹方程). 如果物体的运动轨迹是直线, 则称为直线运动; 轨迹是曲线则称为曲线方程. 运动学的首要任务之一, 即是要找到各类具体运动遵守的运动方程.

同理, 在二维(平面)、一维(直线)坐标系中, 位置矢量  $\boldsymbol{r}$  分别为

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j}, \quad \boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} \quad (1.2.7)$$

**例 1.2.1** 已知质点的位置矢量与时间的关系为

$$\boldsymbol{r} = 6t^2\boldsymbol{i} + (5 - 2t^2)\boldsymbol{j}$$

求此质点的轨迹方程.

**解** 由运动方程  $\boldsymbol{r} = 6t^2\boldsymbol{i} + (5 - 2t^2)\boldsymbol{j}$  可得

$$\begin{cases} x = 6t^2 \\ y = 5 - 2t^2 \end{cases}$$

消去时间  $t$ , 可得运动方程为  $3y + x = 15$ , 可知运动轨迹是一条直线.

**例 1.2.2** 已知某质点的运动方程为  $\boldsymbol{r} = 0.8\cos t\boldsymbol{i} + 0.8\sin t\boldsymbol{j}$  (SI), 求质点运动的轨迹方程.

**解** 由运动方程  $\boldsymbol{r} = 0.8\cos t\boldsymbol{i} + 0.8\sin t\boldsymbol{j}$  转换为标量形式可得

$$\begin{cases} x = 0.8\cos t \\ y = 0.8\sin t \end{cases}$$

消去时间  $t$  可得其轨迹方程为

$$x^2 + y^2 = 0.8^2$$

即轨迹为一个圆, 其圆心在  $(0, 0)$  点, 半径为  $0.8 \text{ m}$ .

## 1.2.2 位移与路程

如图 1.2.2(a) 所示, 质点作一曲线运动.  $t$  时刻, 质点所在位置为  $A$  点, 经过  $\Delta t$  时刻之后, 即  $t + \Delta t$  时刻, 质点从  $A$  点沿曲线运动到  $B$  点.  $AB$  两点的位矢分别用  $\boldsymbol{r}_1 = \boldsymbol{r}(t)$  和  $\boldsymbol{r}_2 = \boldsymbol{r}(t + \Delta t)$  表示, 则在时间间隔  $\Delta t$  内, 质点位矢的变化为

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1 = \boldsymbol{r}(t + \Delta t) - \boldsymbol{r}(t) \quad (1.2.8)$$

矢量  $\Delta \boldsymbol{r}$  就称为  $A$  点到  $B$  点的位移矢量, 简称位移, 即质点在某一时间内位矢的增量, 它是初位置指向末位置的有向线段. 位移是描述物体位置改变的大小和方向的物理量.

在三维直角坐标系中

$$\begin{cases} \boldsymbol{r}_1 = x_1\boldsymbol{i} + y_1\boldsymbol{j} + z_1\boldsymbol{k} \\ \boldsymbol{r}_2 = x_2\boldsymbol{i} + y_2\boldsymbol{j} + z_2\boldsymbol{k} \end{cases} \quad (1.2.9)$$

$\Delta t$  时间内的位移为

$$\begin{aligned} \Delta \boldsymbol{r} &= \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1 = (x_2\boldsymbol{i} + y_2\boldsymbol{j} + z_2\boldsymbol{k}) - (x_1\boldsymbol{i} + y_1\boldsymbol{j} + z_1\boldsymbol{k}) \\ &= (x_2 - x_1)\boldsymbol{i} + (y_2 - y_1)\boldsymbol{j} + (z_2 - z_1)\boldsymbol{k} \end{aligned} \quad (1.2.10)$$

位移的大小为

$$|\Delta \boldsymbol{r}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

位移的方向为: 由初位置指向末位置.

**注意** (1) 位移  $\Delta \boldsymbol{r}$  与位矢  $\boldsymbol{r}$  的相同点为两者均是矢量; 不同点为: 位移  $\Delta \boldsymbol{r}$  是过程量, 而

位置矢量  $r$  是瞬时量。

(2) 位置矢量改变的大小(即位移的模)  $|\Delta r|$  与位置矢量大小的改变量  $\Delta r = |r_2| - |r_1|$  是不同的,  $\Delta r = |r_2| - |r_1| \neq |\Delta r| = |r_2 - r_1|$ , 如图 1.2.2(b) 所示。

(3) 位移是表示一段时间内质点始末位置改变的量, 并不涉及质点实际运动过程中所走的路径(或路程)。在图 1.2.2(a) 中, 位移指的是有向线段  $\overrightarrow{AB}$  的大小, 即位移  $|\Delta r|$  为 A 到 B 的直线距离。  $\Delta t$  时间内, 质点沿轨迹  $\widehat{AB}$  由 A 点移动到 B 点实际所经过的轨道的长度(即弧线  $\widehat{AB}$  的长度), 称为质点在  $\Delta t$  时间内的路程, 一般用  $\Delta s$  表示。它是一个非负标量。通常位移大小  $|\Delta r|$  与路程  $\Delta s$  不一定相同, 两者关系为

$$|\Delta r| \leq \Delta s \quad (1.2.11)$$

质点作单向直线运动时, 等号成立。

但对于无限小位移, 因为  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta r|$ , 即有

$$|dr| = ds \quad (1.2.12)$$

位移  $dr$  的方向与质点运动轨迹的切线方向相同, 并指向质点的运动方向。

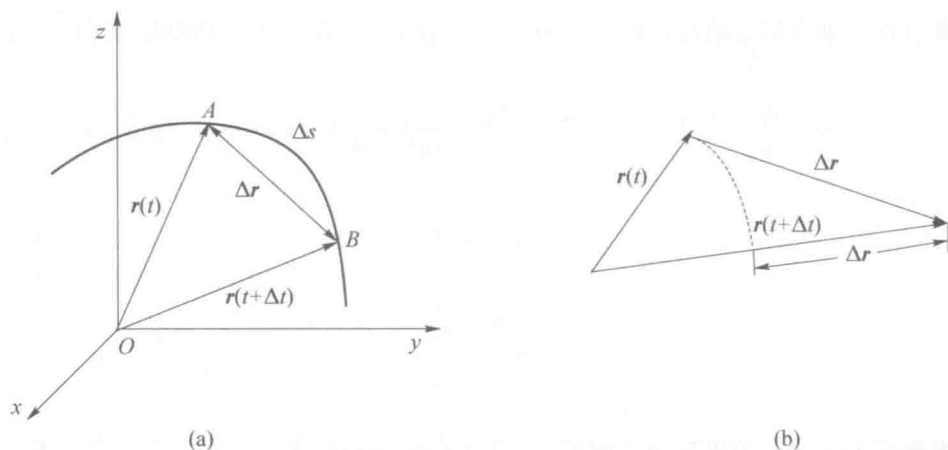


图 1.2.2 质点的位移

### 1.2.3 速度与速率

速度是表示质点运动快慢以及方向的物理量, 它能更准确地反映质点的运动状态。对于速度通常有下面两种情况。

如图 1.2.2(a) 所示, 将  $t \rightarrow t + \Delta t$  时间间隔内发生的位移  $\Delta r$  与这段位移所经历的时间  $\Delta t$  之比值, 称为这一段时间内质点的平均速度, 表示为  $\bar{v}$ , 则有

$$\bar{v} = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (1.2.13)$$

平均速度是矢量, 方向与位移  $\Delta r$  方向相同。

平均速度只是粗略地描述出  $\Delta t$  时间间隔内物体的运动快慢和运动方向, 不能反映质点在具体时刻的运动快慢和方向。如一质点作圆周运动,  $t_1$  时刻从圆周上的 A 点出发沿圆周运动,  $t_2$  时刻又第一次回到了 A 点, 若用平均速度表示  $t_1 \rightarrow t_2$  时间间隔内质点的运动快慢, 得到的

结论是平均速度的大小  $|\bar{v}| = 0$ , 即表示质点没有动, 但是此结论与质点的实际运动情况不相符。

因此, 要得到某个时刻质点的运动快慢和运动方向, 常采用极限方式. 当 A 点越来越靠近 B 点, A 点到 B 点所用的时间越来越短, 即 A 点与 B 点的位置足够近时, 时间间隔  $\Delta t$  将会趋于零, 此时  $\Delta r/\Delta t$  比值(即平均速度)的极限就可以准确反映出质点在 A 点的运动状态. 此极限即质点位置矢量对时间的瞬时变化率, 叫作质点在  $t$  时刻的瞬时速度(简称速度), 记为  $v$ . 因而

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (1.2.14)$$

速度的方向, 与  $\Delta t$  趋于零时位移  $dr$  的方向相同. 由图 1.2.2(a) 可知, 当  $\Delta t \rightarrow 0$  时, A 点向 B 点靠近, 位移  $dr$  的方向趋近于 A 点在运动轨迹的切线方向. 因此, 质点具有的瞬时速度的方向应沿着轨迹切线并指向质点前进的方向.

由式(1.2.14)可知, 质点的速度等于位置矢量对时间的一阶导数.

由国际制单位(SI)可知, 位矢的单位为米(m), 时间的单位为秒(s), 因此速度的单位应该是米/秒(m/s).

当质点在三维空间运动时, 由于  $r = xi + yj + zk$ , 所以在三维直角坐标系中, 速度可以表示为

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{d(xi + yj + zk)}{dt} = \frac{dx}{dt}i + \frac{dy}{dt}j + \frac{dz}{dt}k = v_x i + v_y j + v_z k \quad (1.2.15)$$

其中

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} \\ v_y = \frac{dy}{dt} \\ v_z = \frac{dz}{dt} \end{cases} \quad (1.2.16)$$

分别是速度在  $x, y, z$  三个坐标轴上的投影, 即分速度. 可知, 各分速度等于各个位置坐标对时间的一阶导数.

速度的大小(或模)可以表示为

$$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (1.2.17)$$

速度的方向可以表示为

$$\cos \alpha = \frac{v_x}{v}, \quad \cos \beta = \frac{v_y}{v}, \quad \cos \gamma = \frac{v_z}{v} \quad (1.2.18)$$

其中,  $\alpha, \beta, \gamma$  分别是  $v$  与  $Ox, Oy, Oz$  三个坐标轴间的夹角.

由式(1.2.11)可知, 质点在两点间的位移和路程是两个不同的物理量, 我们把质点实际所经过的轨道长度即路程  $\Delta s$  与经过此段路程所用的时间  $\Delta t$  的比值称为质点在此段时间内的平均速率. 数学表达式为

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1.2.19)$$

由于质点在同一时间段内的位移大小小于或等于路程, 即  $|\Delta r| \leq \Delta s$ , 则有  $|\bar{v}| \leq \bar{v}$ .

当  $\Delta t \rightarrow 0$  时, 时间间隔可认为不存在, 此时  $\Delta t$  时间段内的平均速率的极限称为瞬时速率,



简称速率. 它是用来描述质点在某个瞬时的运动快慢的物理量, 即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1.2.20)$$

平均速率与瞬时速率均是标量, 单位为米/秒(m/s).

虽然平均速度的大小不等于平均速率, 二者满足  $|\bar{v}| \leq v$ , 但由于  $|d\mathbf{r}| = ds$ , 故

$$|\mathbf{v}| = \frac{|d\mathbf{r}|}{dt} = \frac{ds}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = v \quad (1.2.21)$$

即瞬时速度的大小等于瞬时速率.

表 1.2.1 列举了部分物体运动速度大小的数量级.

表 1.2.1 部分物体运动速度大小的数量级 单位: m/s

运动的物体	速度大小的数量级
人类百米跑步	$1.0 \times 10^1$
机动赛车(最大)	$1.0 \times 10^2$
空气中声音传播(0℃)	$3.4 \times 10^2$
步枪子弹脱离枪口	$7.0 \times 10^2$
高空侦察机	$1.0 \times 10^3$
地球公转	$3.0 \times 10^4$
太阳绕银河系中心的活动	$3.0 \times 10^5$
光在真空中	$3.0 \times 10^8$

**例 1.2.3** 已知某一质点的运动方程为  $\mathbf{r}(t) = t\mathbf{i} + (t^2 + 2t + 1)\mathbf{j}$  (SI), 求:

- (1) 质点的轨迹方程以及质点的运动轨迹图;
- (2) 求  $t_1 = 2$  s 及  $t_2 = 3$  s 时的位置矢量;
- (3) 2 s 到 3 s 间质点的位移与平均速度;
- (4) 3 s 末质点的速度.

解 (1) 令

$$\begin{cases} x = t \\ y = t^2 + 2t + 1 \end{cases}$$

消去  $t$  之后得到

$$y = x^2 + 2x + 1$$

即质点的轨迹方程.

由轨迹方程可作得质点的运动轨迹图(见图 1.2.3).

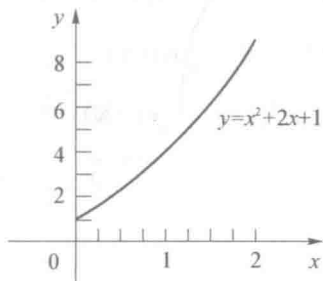


图 1.2.3 质点的运动轨迹图