

普通高等教育“十三五”规划教材

# 大学物理基础教程

DAXUE WULI JICHU JIAOCHENG

主 编 王 洵  
副主编 刘志敏 雷 宇  
主 审 郝虎在 黄克林

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等教育“十三五”规划教材

# 大学物理基础教程

主 编 王 洵  
副主编 刘志敏 雷 宇  
主 审 郝虎在 黄克林

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

## 内 容 简 介

本书是适应当前教育教学改革的需要,依据教育部高等学校非物理专业基础课教学指导分委员会制定的《非物理类理工科大学物理课程教学基本要求》(简称《基本要求》)的精神,在作者多年教学研究、教学实践和教改经验的基础上,结合学校各专业对物理课内容的要求而编写的。教材涵盖《基本要求》的核心内容,并考虑高校许多专业对少学时的教学需要,采取了压缩经典、简化近代内容、突出重点的方法精心组织内容,具有层次分明、叙述简练、概念准确、创意新颖和逻辑性强的特色。

— 全书共 18 章,包含力学、振动和波动、热学基础、电磁学、波动光学以及近代与当代物理基础六篇内容。参考授课 64~96 学时。

— 本书可作为高等院校非物理类专业本科少学时的大学物理课程的教材或教学参考书,也可以供其他有关专业选用和广大读者阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理基础教程/王洵主编. —北京:中国铁道出版社,2017.7

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-113-22605-3

I. ①大… II. ①王… 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(2016)第 317704 号

书 名: 大学物理基础教程  
作 者: 王 洵 主编

策 划: 曹莉群 周海燕  
责任编辑: 周海燕  
封面设计: 刘 颖  
封面制作: 白 雪  
责任校对: 张玉华  
责任印制: 郭向伟

读者热线: (010)63550836

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)  
网 址: <http://www.tdpress.com/51eds/>  
印 刷: 三河市宏盛印务有限公司  
版 次: 2017年7月第1版 2017年7月第1次印刷  
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 25.75 字数: 545 千  
书 号: ISBN 978-7-113-22605-3  
定 价: 55.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010)63550836

打击盗版举报电话:(010)51873659

# 前 言

物理学是一切自然科学的基础,物理学的发展广泛并且直接推动着技术的革命和文明的文明。因此,大学物理课程是理工科大学学生的一门重要基础课,其任务就是为提高大学生现代科学素质服务的,从而为培养人才打好必要科学基础;提高学生的逻辑思维能力和抽象思维能力;培养学生的创新思维和创新精神;为学生进一步学习专业知识,掌握专业理论、培养专业技能打下必要的基础。本书就是为了适应高等工程教育的培养目标和发展的需要,积累作者多年从事物理教学经验,考虑理工类专业少学时大学物理课程的教学要求,参照教育部《非物理类理工类专业大学物理课程教学基本要求》,为适应高等学校理工类专业少学时大学物理课程数学的需要编写的。

本书针对工科学生的基础,特别是全面实行学分制的背景,侧重于物理学的基本知识、基本概念、基本原理和基本定律,突出物理学知识的完整性、逻辑性和准确性。为了便于学生掌握、理解和阅读,对书中内容进行分层次的叙述,对某些问题进行了方式多样、不拘一格的讨论和说明,每一章都精选了一些例题、思考题、选择题、填空题和计算题。通过这些基本问题的训练,使学生达到学好大学物理的目的。

本教材的特点如下:

(1)内容整体上既保持了物理基础学科知识的系统性与完整性,又考虑到学时特点,教材叙述简明扼要,难度适中,同时也注意培养学生的科学思想与物理学研究方法,以使学生受到启发,激发学生的求知欲望和创新精神。

(2)在讲述方法上,针对普通高等院校理工类专业学生特点,尽量做到讲清基本概念,阐明基本原理,运用基本方法,避免繁杂的理论推导,并且适当降低复杂的计算要求。

(3)在讲述内容的结构上考虑到与中学物理内容的衔接,同时考虑与理工类专业后续课程的衔接,注意强化物理原理和方法在工程技术中的应用,注意理论联系实际并增加高新技术物理等内容。

参加本教材编写工作的有华东交通大学理学院王洵、刘志敏、雷宇、邱万英、张建松、艾剑锋、刘志荣、任才贵、刘正方、朱莉华等。全书由王洵任主编并负责统稿工作,刘志敏、雷宇任副主编,郝虎在、黄克林主审。

由于编者水平所限,教材中不妥和疏漏之处在所难免,希望读者批评指正,以便改进。

编 者  
2017年5月

# 目 录

## 第一篇 力 学

第 1 章 质点运动学 .....	2
1.1 参考系 坐标系和质点 .....	2
1.2 位置矢量 位移 .....	4
1.3 速度与加速度 .....	7
1.4 直线运动 .....	12
1.5 抛体运动 .....	15
1.6 圆周运动 .....	18
1.7 相对运动 .....	23
习题 .....	25
第 2 章 质点动力学 .....	29
2.1 牛顿运动定律 .....	29
2.2 几种常见的力 .....	32
2.3 牛顿定律的应用 .....	34
2.4 冲量 动量 动量定理 .....	39
2.5 动量守恒定律 .....	43
2.6 功 动能 动能定理 .....	46
2.7 势能 机械能守恒定律 .....	50
2.8 角动量定理 角动量守恒定律 .....	57
习题 .....	60
第 3 章 刚体的定轴转动 .....	68
3.1 刚体定轴转动的角量描述 .....	68
3.2 转动惯量 定轴转动定律 .....	71
3.3 刚体定轴转动的角动量守恒定律 .....	78
习题 .....	79

## 第二篇 振动和波动

<b>第 4 章 机械振动</b> .....	84
4.1 简谐振动 .....	84
4.2 简谐振动的旋转矢量表示法 .....	91
4.3 同方向同频率简谐振动的合成 .....	93
习题 .....	95
<b>第 5 章 机械波</b> .....	99
5.1 机械波的产生和传播 .....	99
5.2 平面简谐波的波动方程 .....	102
5.3 波的能量 .....	107
5.4 惠更斯原理 .....	109
5.5 波的叠加原理 波的干涉 驻波 .....	110
习题 .....	117

## 第三篇 热学基础

<b>第 6 章 气体动理论</b> .....	122
6.1 平衡状态与理想气体状态方程 .....	122
6.2 麦克斯韦分子速率分布律 .....	126
6.3 压强与温度的微观解释 .....	131
6.4 能量按自由度均分定理 .....	135
习题 .....	140
<b>第 7 章 热力学基础</b> .....	143
7.1 热力学第一定律 .....	143
7.2 理想气体的热力学过程 .....	147
7.3 循环过程 .....	153
7.4 热力学第二定律 .....	159
习题 .....	163

## 第四篇 电 磁 学

<b>第 8 章 真空中的静电场</b> .....	169
8.1 电荷 库仑定律 .....	169
8.2 电场 电场强度 .....	173
8.3 电通量 真空中静电场的高斯定理 .....	180
8.4 静电场的环路定理 电势能 .....	189
8.5 电势 .....	191
8.6 电场强度与电势的关系 .....	195
习题 .....	198
<b>第 9 章 静电场中的导体和电介质</b> .....	202
9.1 静电场中的导体 .....	202
9.2 电容 电容器 .....	207
9.3 静电场中的电介质 .....	212
9.4 静电场的能量 .....	216
习题 .....	218
<b>第 10 章 稳恒电流的磁场</b> .....	222
10.1 稳恒电流与电动势 .....	222
10.2 磁场与磁感应强度 .....	225
10.3 磁场的高斯定理 .....	227
10.4 电流和运动电荷的磁场 .....	229
10.5 磁场的环路定理 .....	235
习题 .....	240
<b>第 11 章 磁场对电流的作用</b> .....	245
11.1 磁场对载流导线段的作用 .....	245
11.2 磁场对载流平面线圈的磁力矩 .....	248
11.3 磁场对运动电荷的作用 .....	251
11.4 磁介质 .....	257
习题 .....	261

<b>第 12 章 电磁感应和电磁场</b> .....	264
12.1 电磁感应的基本现象及其规律 .....	264
12.2 动生电动势与感生电动势 .....	269
12.3 自感与互感 .....	274
12.4 磁场能量 .....	279
12.5 麦克斯韦电磁场理论 .....	280
12.6 电磁波 .....	284
习题 .....	287

## 第五篇 波动光学

<b>第 13 章 光的干涉</b> .....	294
13.1 光源 光的相干性 光程 光程差 .....	294
13.2 杨氏双缝干涉实验 .....	299
13.3 薄膜干涉 .....	303
习题 .....	311
<b>第 14 章 光的衍射</b> .....	314
14.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理 .....	314
14.2 单缝夫琅禾费衍射 .....	315
14.3 衍射光栅 .....	318
习题 .....	323
<b>第 15 章 光的偏振</b> .....	326
15.1 自然光和偏振光 .....	326
15.2 起偏与检偏 马吕斯定律 .....	328
15.3 反射和折射时光的偏振 布儒斯特定律 .....	331
习题 .....	333

## 第六篇 近代与当代物理基础

<b>第 16 章 狭义相对论基础</b> .....	336
16.1 伽利略变换和经典力学的时空观 .....	336

16.2	狭义相对论基本原理和洛伦兹变换 .....	339
16.3	狭义相对论的时空观 .....	341
16.4	狭义相对论动力学基础 .....	345
	习题 .....	349
<b>第 17 章</b>	<b>波与粒子</b> .....	<b>352</b>
17.1	光电效应 .....	352
17.2	光的波粒二象性 .....	358
17.3	德布罗意波 实物粒子的波粒二象性 .....	358
17.4	不确定关系 .....	361
17.5	量子力学简介 .....	363
	习题 .....	371
<b>第 18 章</b>	<b>当代物理专题</b> .....	<b>374</b>
18.1	固体的能带结构 .....	374
18.2	半导体 .....	379
18.3	激光 .....	384
18.4	声波 .....	388
<b>附录 A</b>	<b>常用数学公式</b> .....	<b>399</b>
<b>附录 B</b>	<b>大学物理常用的物理常数表</b> .....	<b>401</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>402</b>

# 第一篇 力学

宇宙中一切物体都在运动着。物体的运动形式是多种多样的,其中最简单、最常见的一种运动形式是物体间或物体各部分之间相对位置的变化,这种运动称为机械运动。星体的运动、车辆、船只、飞机等的运动,水、空气的流动,各种机器的运转等,都是机械运动。力学是研究机械运动的规律及其应用的学科。力学中的基本概念和规律在物理学的各领域中起着重要的作用;其他自然科学和工程技术中也常用到力学的基本知识。

大学物理中的力学包括运动学和动力学两部分内容。运动学研究物体位置随时间变化的规律;而动力学则是研究物体之间的相互作用对物体运动的影响,即研究物体运动状态变化的原因。

本篇着重介绍有关质点运动的基本概念、牛顿定律和守恒定律(机械能守恒、动量守恒、角动量守恒)。

## 第 1 章

# 质点运动学

质点运动学的主要任务是描述作机械运动的物体在空间的位置随时间变化的关系,而不涉及运动产生和改变的原因。本章首先定义描述质点运动的物理量,如位置矢量、位移、速度和加速度等,并讨论这些物理量随时间变化的关系。然后讨论质点的直线运动、曲线运动和圆周运动的运动规律及其描述方法。

### 1.1 参考系 坐标系和质点

#### 1.1.1 运动本身的绝对性

宇宙间一切物体都在不停地运动中,不可能找到一个绝对静止的物体。大到太阳、地球等天体,小到分子、原子和各种基本粒子都处于永恒的运动之中。放在桌上的书对于桌面是静止的,但它却随地球一起绕太阳运动,太阳也在运动,整个太阳系绕着银河系中心运动,同时银河系也在运动,这就是运动本身的绝对性。

#### 1.1.2 运动描述的相对性

对于某一个具体的物体,如一个从匀速运行的列车的桌子上掉下的杯子,它是怎样运动的?这个问题可以有不同的答案,列车上的甲认为杯子是竖直向下的自由落体运动,而在站台上的乙却认为杯子是一个抛物线运动,列车上甲的参照物是车厢,而地面上乙的参照物是地面。因此,描述一个物体的运动时,必须选择另外一个或几个相互保持静止的物体作为参照物,选择的参照物不同,对同一个物体运动的描述也就不同,这就是运动描述的相对性。

#### 1.1.3 参考系

在物理学中,把描述一个物体运动所选择的参照物称为参考系。在后续章节中我们在物理定律中使用的一些物理量,必须是相对同一参考系的,所以在处理问题时,一定要明确描述物体运动所选择的参考系,不同参考系的物理量需要变换到同一参考系中才能求解有关问题。在运动学中,参考系的选择具有任意性,在具体问题中,选择什么参考系取决于所研究问题的性质。一般情况下,如果研究地面上物体的运动,往往以地球(地面)为参考系;如果研究

地球、月球的运动往往以太阳为参考系。

### 1.1.4 坐标系

为了定量地描述一个物体不同时刻相对于参考系的位置,需要在此参考系上建立一个固定的坐标系。坐标系建立后,物体相对于坐标系的运动,也就是物体相对于参考系的运动。运动物体的位置就由它在坐标系中的坐标值决定。坐标系是参考系的一种数学抽象,所以我们每提到坐标系时,指的也是与它固定在一起的参考系。

常用的坐标系有图 1-1 所示的直角坐标系 $(x, y, z)$ ,也可以使用图 1-2 所示的极坐标系 $(r, \theta, \varphi)$ 或图 1-3 所示的柱坐标系 $(r, \theta, z)$ 等。对二维平面运动,常用图 1-4 所示的二维直角坐标系 $(x, y)$ 或图 1-5 所示的二维极坐标系 $(r, \theta)$ 。究竟选用什么坐标系为好,应以研究问题能够最为简捷方便为准。

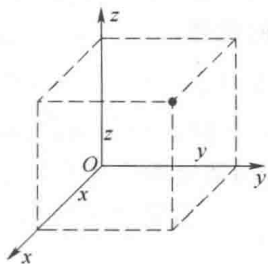


图 1-1 三维直角坐标系 $(x, y, z)$

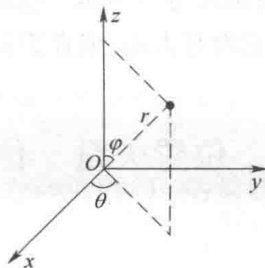


图 1-2 三维极坐标系 $(r, \theta, \varphi)$

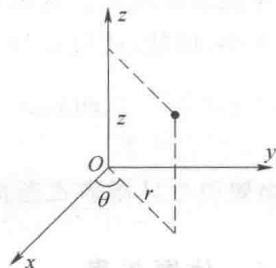


图 1-3 三维柱坐标系 $(r, \theta, z)$

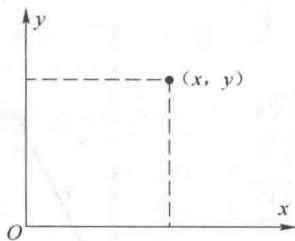


图 1-4 二维直角坐标系 $(x, y)$

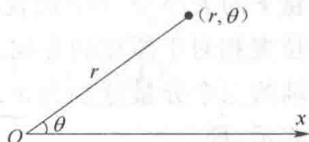


图 1-5 二维极坐标系 $(r, \theta)$

### 1.1.5 质点

任何物体都有一定的大小、形状和内部结构。通常情况下,物体运动时,内部各点的运动情况常常是不同的。因此要精确描写一般物体的运动并不是一件容易的事。为使问题简化,可以采用抽象的办法:如果物体的大小和形状在所研究的问题中不起作用,或所起的作用可以忽略不计,就可以近似地把此物体看作一个只有质量而没有大小和形状的理想物体,称为质点。

质点是一个理想化模型。质点仍然是一个物体，它具有质量，同时它已被抽象化为一个几何点，质点是实际物体在一定条件下的抽象。理想化模型的引入在物理学中是一种常见的科学分析方法，在以后的课程中还将引入一系列理想模型，例如理想气体、点电荷等。把物体抽象为质点的方法具有很大的实际意义和理论价值。如在天文学中把庞大的天体抽象为质点的方法已获得极大的成功。从理论上讲，我们可以把整个物体看成由无数个质点所组成的质点系，从分析研究这些最简单的质点入手，就可能把握整个物体的运动，所以质点运动是研究物体运动的基础。

物体抽象为质点首先要注意，同一个物体在一个问题中可抽象为质点，在另一个问题中则可能不能简化为质点。例如研究地球绕太阳公转时，由于地球至太阳的平均距离(约  $1.5 \times 10^8$  km)比地球的半径(约 6 370 km)大得多，地球上各点相对于太阳的运动可以看作是相同的，可以把地球当作质点，但研究地球自转时，地球上各点的运动情况就大不相同，地球就不能当作质点处理了。其次要注意区别质点与小物体。物体再小(原子核的线度约为  $10^{-15}$  m)也有大小、形状，而质点为一几何点，它没有大小，但在空间占有确切的位置。

## 1.2 位置矢量 位移

### 1.2.1 位置矢量

人们习惯于将空间任一点  $P$  的位置用一组坐标  $(x, y, z)$  来表示，即  $P(x, y, z)$ 。 $P$  点的位置也可以用从坐标原点  $O$  向  $P$  点引一条有方向的线段  $r$  来表示，如图 1-6 所示。 $r$  称为位置矢量，简称位矢。

位置矢量  $r$  的大小  $|r| = r$  代表质点到原点的距离，其方向标志质点的位置相对于原点的方向。在直角坐标系中，位置矢量  $r$  沿坐标轴的三个分量分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$ ，则位置矢量  $r$  可用它的 3 个分量表示，即

$$r = xi + yj + zk \quad (1-1)$$

位置矢量  $r$  的大小： $|r| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  (1-2)

位置矢量  $r$  的方向余弦为

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

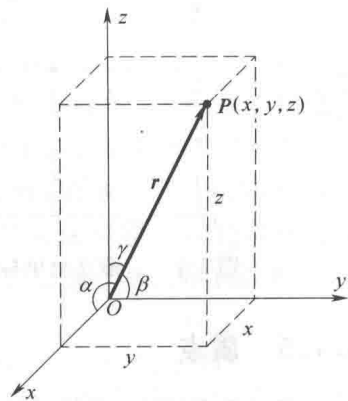


图 1-6 位置矢量

### 1.2.2 运动方程和轨迹方程

在质点运动的过程中，标志质点位置的位置矢量随时间改变，这时质点的位置矢量  $r$  是

时间  $t$  的函数,即

$$\mathbf{r}=\mathbf{r}(t) \quad (1-4)$$

这个函数描述了质点空间位置随时间变化的过程,称之为运动方程。

在三维直角坐标系中质点的位置坐标  $x, y, z$  也相应地随时间  $t$  在变化,即

$$\left. \begin{aligned} x &=x(t) \\ y &=y(t) \\ z &=z(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

将式(1-5)代入式(1-1),即得运动方程在直角坐标系中的分解式为

$$\mathbf{r}=x(t)\mathbf{i}+y(t)\mathbf{j}+z(t)\mathbf{k} \quad (1-6)$$

式(1-4)、式(1-5)、式(1-6)均为质点的运动方程,知道了质点的运动方程,就能确定任一时刻质点的位置,也就掌握了质点的全部运动情况。所以,分析、研究质点运动的规律都要围绕质点的运动方程来进行。

运动质点在空间所经过的路径称为轨迹。轨迹是位置矢量的矢端在空间的轨迹,在质点的运动方程(1-5)中消去时间  $t$  就可以得到质点的轨迹方程。轨迹为直线的运动称为直线运动,轨迹为曲线的运动称为曲线运动。

运动方程表明质点的位置  $\mathbf{r}$  或  $x, y, z$  与时间  $t$  的函数关系,而轨迹方程则只是位置坐标  $x, y, z$  之间的关系式。

### 1.2.3 位移和路程

如图 1-7 所示,  $t$  时刻质点位于  $A$  处,位置矢量  $\mathbf{r}_A$ ,经过  $\Delta t$  时间,质点到达  $B$  处,位置矢量  $\mathbf{r}_B$ 。在  $\Delta t$  时间间隔内位置矢量的增量称为位移矢量,简称位移,即

$$\Delta\mathbf{r}=\mathbf{r}_B-\mathbf{r}_A \quad (1-7)$$

在三维直角坐标系中表示为

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{r} &=\mathbf{r}_B-\mathbf{r}_A=(x_B\mathbf{i}+y_B\mathbf{j}+z_B\mathbf{k})-(x_A\mathbf{i}+y_A\mathbf{j}+z_A\mathbf{k}) \\ &=\Delta x\mathbf{i}+\Delta y\mathbf{j}+\Delta z\mathbf{k} \end{aligned} \quad (1-8)$$

$$\text{位移的大小为} \quad |\Delta\mathbf{r}|=\sqrt{(\Delta x)^2+(\Delta y)^2+(\Delta z)^2} \quad (1-9)$$

位移的方向:从  $A$  指向  $B$ 。这样位移  $\Delta\mathbf{r}$  除了表明质点在  $\Delta t$  时间间隔内由  $A$  运动到  $B$  的距离外,还表明了  $B$  相对于  $A$  的方位。

在国际单位制(SI)中位置矢量和位移的单位为米(m)。位移是矢量,位移的合成遵从平行四边形法则或三角形法则。如图 1-8 所示,质点由  $A$  点出发,经过  $B$  点而后再到达  $C$  点,最终质点的位移是由  $A$  指向  $C$  的有向线段。

质点运动的路径长度  $\Delta s$  称为路程。路程  $\Delta s$  是一个标量。而位移是既有大小又有方向的矢量。位移并不反映质点真实的运动路径的长度,只反映位置变化的实际效果。一般路程

$\Delta s$  与位移的大小  $|\Delta \mathbf{r}|$  之间没有确定的关系, 只有当  $\Delta t$  趋于零时或物体作定向直线运动时, 两者才相等。

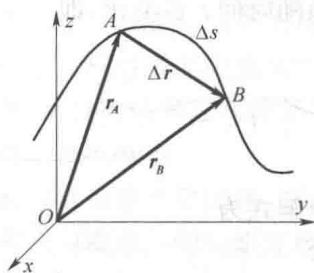


图 1-7 位移

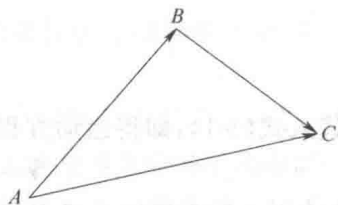


图 1-8 位移矢量的合成

**【例 1-1】** 一辆汽车向东行驶 5 km, 又向南行驶 4 km, 再向西行驶 2 km, 求汽车合位移的大小和方向。

**【解】** 取向东为  $x$  轴的正方向, 向北为  $y$  轴正方向, 出发点为坐标  $O$  点, 建立图 1-9 所示的二维直角坐标系, 则

$$\Delta \mathbf{r}_1 = \Delta x_1 \mathbf{i} + \Delta y_1 \mathbf{j} = 5\mathbf{i} (\text{km})$$

$$\Delta \mathbf{r}_2 = \Delta x_2 \mathbf{i} + \Delta y_2 \mathbf{j} = -4\mathbf{j} (\text{km})$$

$$\Delta \mathbf{r}_3 = \Delta x_3 \mathbf{i} + \Delta y_3 \mathbf{j} = -2\mathbf{i} (\text{km})$$

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta \mathbf{r}_1 + \Delta \mathbf{r}_2 + \Delta \mathbf{r}_3 = \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j}$$

$$= (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3) \mathbf{i} + (\Delta y_1 + \Delta y_2 + \Delta y_3) \mathbf{j}$$

$$= (5 + 0 - 2) \mathbf{i} + (0 - 4 + 0) \mathbf{j}$$

$$= 3\mathbf{i} - 4\mathbf{j} (\text{km})$$

合位移的大小为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = \sqrt{3^2 + (-4)^2} = 5 (\text{km})$$

合位移的方向, 由合位移与  $x$  轴的夹角  $\alpha$  决定, 其值为

$$\alpha = \arctan \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \arctan \left( \frac{-4}{3} \right) = -53.1^\circ$$

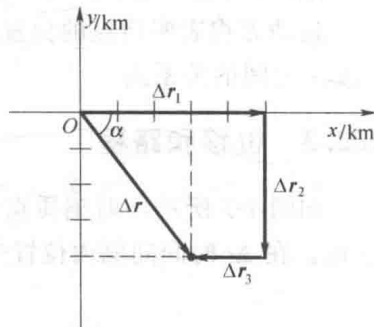


图 1-9 例 1-1 图

**【例 1-2】** 已知质点在平面直角坐标系  $Oxy$  中的运动方程为  $x = 2t$ ,  $y = 2 - t^2$ , 式中  $x, y$  以 m 计,  $t$  以 s 计。求:

(1) 质点的轨迹方程;

(2)  $t = 0$  s 和  $t = 2$  s 时质点的位置矢量;

(3)  $t = 0$  s 到  $t = 2$  s 质点的位移。

**【解】** (1) 由运动方程  $\begin{cases} x = 2t \\ y = 2 - t^2 \end{cases}$ , 消去  $t$  得轨迹方程为

$$y = 2 - \frac{1}{4}x^2$$

可知质点的轨迹为如图 1-10 所示的抛物线。

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

$$\text{当 } t=0 \text{ 时 } \boldsymbol{r}_0 = 2\boldsymbol{j} \text{ (m)}$$

$$\text{当 } t=2 \text{ 时 } \boldsymbol{r}_2 = 4\boldsymbol{i} - 2\boldsymbol{j} \text{ (m)}$$

$$(3) \Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_0 = (4\boldsymbol{i} - 2\boldsymbol{j}) - 2\boldsymbol{j} = 4\boldsymbol{i} - 4\boldsymbol{j} \text{ (m)}$$

$$\text{位移的大小 } |\Delta \boldsymbol{r}| = \sqrt{4^2 + (-4)^2} = 4\sqrt{2} \text{ (m)}$$

$$\text{位移的方向 } \theta = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) = \arctan\frac{-4}{4} = -45^\circ \text{ (与 } x \text{ 轴正}$$

向夹角)

**【例 1-3】** 质点在平面直角坐标系  $Oxy$  中的运动方程为  $x = 3\cos \pi t$ ,  $y = 3\sin \pi t$ , 单位为  $m$ , 试求:

- (1) 质点的轨迹方程;
- (2)  $t=1 \text{ s}$  时的位置矢量;
- (3)  $t=0 \text{ s}$  到  $t=1 \text{ s}$  的位移和路程。

**【解】** (1) 由运动方程  $\begin{cases} x = 3\cos \pi t \\ y = 3\sin \pi t \end{cases}$ , 消去  $t$  得轨迹方程

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

所以, 质点作以原点  $O$  为圆心, 半径为 3 的圆周运动, 如图 1-11 所示。

$$(2) t=1 \text{ s 时: } x = -3, y = 0$$

$$\boldsymbol{r}_1 = -3\boldsymbol{i} \text{ (m)}$$

$$(3) t=0 \text{ s 时: } \boldsymbol{r}_0 = 3\boldsymbol{i} \text{ (m)}$$

$$t=1 \text{ s 时: } \boldsymbol{r}_1 = -3\boldsymbol{i} \text{ (m)}$$

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_1 - \boldsymbol{r}_0 = -3\boldsymbol{i} - 3\boldsymbol{i} = -6\boldsymbol{i} \text{ (m)}$$

位移的大小  $|\Delta \boldsymbol{r}| = 6 \text{ m}$ ,  $\Delta \boldsymbol{r}$  的方向为  $x$  轴负方向。

$$\text{路程 } \Delta s = \frac{\text{圆周长}}{2} = \frac{2\pi R}{2} = 3\pi \text{ (m)}$$

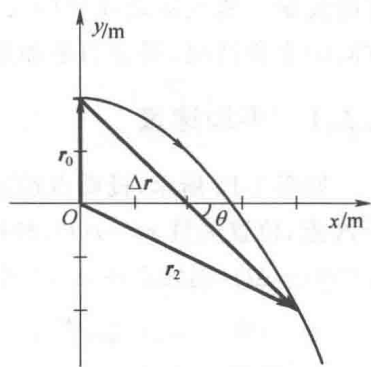


图 1-10 例 1-2 图

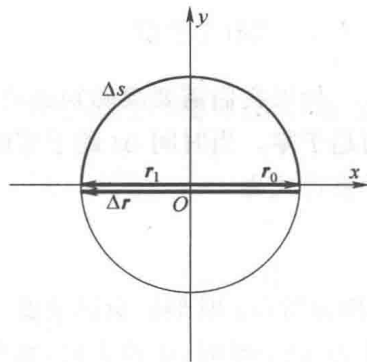


图 1-11 例 1-3 图

### 1.3 速度与加速度

位移只说明质点在某段时间内位置的变化, 为了描述质点运动的快慢和方向, 需要引入

速度矢量。质点运动速度的大小和方向也在不断改变。为了定量描述各个时刻速度大小和方向的变化情况,需要引进加速度矢量。

### 1.3.1 平均速度

如图 1-12 所示,设质点按运动方程  $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)$  沿其轨迹运动, $t$  时刻位于 A 点,位置矢量  $\boldsymbol{r}_A=\boldsymbol{r}(t)$ ,经过  $\Delta t$ ,在  $t+\Delta t$  时刻到达 B 点,位置矢量  $\boldsymbol{r}_B=\boldsymbol{r}(t+\Delta t)$ ,则质点在  $\Delta t$  时间内的平均速度为

$$\bar{\boldsymbol{v}}=\frac{\boldsymbol{r}_B(t+\Delta t)-\boldsymbol{r}_A(t)}{\Delta t}=\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \quad (1-10)$$

平均速度是矢量,其方向与  $\Delta \boldsymbol{r}$  的方向一致,它表示在  $\Delta t$  时间内,质点位置矢量  $\boldsymbol{r}$  的平均变化,它不反映物体运动各个时刻质点运动的真实情况,只是一种粗略的描述。

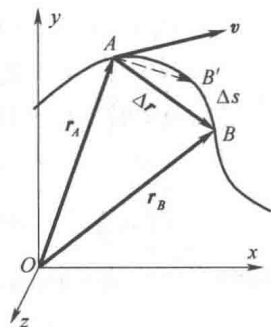


图 1-12 速度矢量

### 1.3.2 瞬时速度

如果我们需要准确知道质点在某一时刻  $t$  (或某一位置) 的运动情况,就应使  $\Delta t$  尽量减小而趋于零。当时间  $\Delta t$  趋于零时,平均速度的极限称为瞬时速度。瞬时速度(简称速度)的数学表达式为

$$\boldsymbol{v}=\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \quad (1-11)$$

$\boldsymbol{v}$  称为质点  $t$  时刻的瞬时速度,它是位置矢量  $\boldsymbol{r}$  对时间的变化率。速度是矢量,速度的方向就是  $\Delta t$  趋于零时  $\Delta \boldsymbol{r}$  的方向,如图 1-12 所示,位移  $\Delta \boldsymbol{r}$  沿着割线 AB 的方向,当  $\Delta t$  逐渐减小而趋于零时,B 点逐渐趋近于 A 点,相应地割线 AB 逐渐趋近于 A 点的切线。因此,质点在  $t$  时刻的速度方向就是沿着该时刻质点所在处运动轨迹的切线而指向运动的前方。

在国际单位制(SI 制)中,速度的单位是米/秒(m/s)。

在直角坐标系中,速度可用分量式表示,将式(1-1)代入式(1-11),则有

$$\boldsymbol{v}=\frac{d\boldsymbol{r}}{dt}=\frac{d}{dt}(x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k})=\frac{dx}{dt}\boldsymbol{i}+\frac{dy}{dt}\boldsymbol{j}+\frac{dz}{dt}\boldsymbol{k}=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j}+v_z\boldsymbol{k} \quad (1-12)$$

速度的三个坐标分量  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  分别为

$$v_x=\frac{dx}{dt}, \quad v_y=\frac{dy}{dt}, \quad v_z=\frac{dz}{dt} \quad (1-13)$$

速度的大小为

$$|\boldsymbol{v}|=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2} \quad (1-14)$$

速度是矢量,既有大小,又有方向,服从矢量的几何加减规律。速度是描述质点运动状态的物理量,对于不同的参考系,速度的大小、方向是不同的,速度具有相对性。