普通高等学校应用型本科“十三五”规划教材

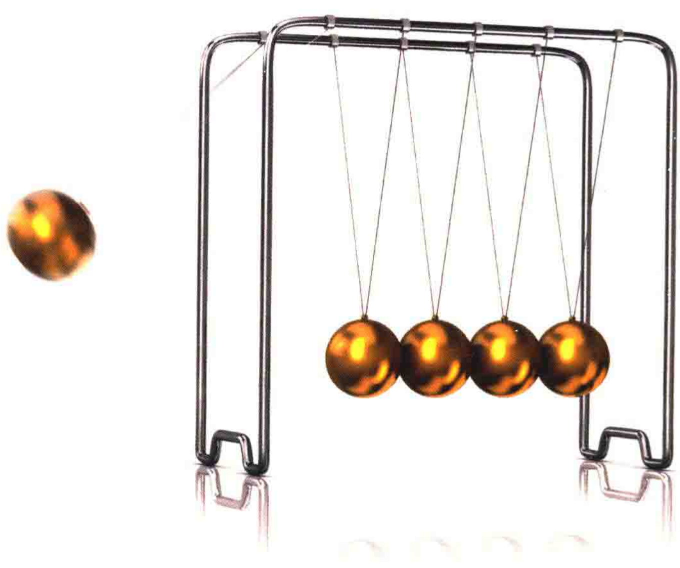
大学物理

上册

DAXUE WULI

郝虎在　主　编

张秀山　副主编



中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等学校应用型本科“十三五”规划教材

大学物理

上册

郝虎在 主 编
张秀山 副主编

中国铁道出版社
2018年·北 京

内 容 简 介

本书根据教育部《理工科类大学物理课程教学基本要求》，针对普通高等学校应用型本科学生的数学与物理基础，按照21世纪人才培养模式的需要和教学内容改革的要求编写而成。全书分为上下两册，上册包括力学、热学基础和电磁学三篇内容；下册包括机械振动与机械波、光学、近代物理学和能源与应用专题四篇内容。本册为上册。

本书适合作为普通高等学校应用型本科大学物理课程的教材，也可作为其他各类院校非物理类专业的大学物理课程的教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理．上册/郝虎在主编．—北京：中国铁道出版社，2018.2

普通高等学校应用型本科“十三五”规划教材

ISBN 978-7-113-15088-4

Ⅰ.①大… Ⅱ.①郝… 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331007号

书　　名：大学物理·上册
作　　者：郝虎在　主编

策　　划：李志国　李小军　　**读者热线：**(010) 63550836
责任编辑：徐盼欣
编辑助理：初　祎
封面设计：刘　颖
责任校对：张玉华
责任印制：郭向伟

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：虎彩印艺股份有限公司
版　　次：2018年2月第1版　2018年2月第1次印刷
开　　本：710 mm×1 000 mm　1/16　**印张：**19.75　**字数：**388千
书　　号：ISBN 978-7-113-15088-4
定　　价：45.00元

前　言

大学物理是普通高等学校理工科各专业的一门必修基础课，大学物理的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分，是科学工作者和工程技术人员必须具备的基本素质。大学物理的学习过程，是培养学生分析问题和解决问题能力以及探索精神和创新意识的过程。本书就是为了适应高等工程教育的培养目标和发展需要，根据教育部《理工科类大学物理课程教学基本要求》（2010版），按照21世纪人才培养模式的需要和教学内容改革的要求，依据编者多年从事大学物理教学的教案改编而成的。本书可以作为普通高等学校应用型本科大学物理课程（120～130学时）的教材，也可作为其他各类院校非物理类专业的大学物理课程的教材或教学参考书。本书在编写过程中主要注意了以下几个问题：

1. 考虑中学物理教学改革的实际，尤其部分选修内容的基础缺失，适当增加了对一些必要的物理基本理论的回顾与归纳，以便于查阅。

2. 针对普通高等学校应用型本科学生的数学与物理基础，为了加强对物理基本概念、基本理论的掌握，注重了物理模型的建立和数学描述，适当增加例题的类型与数量。

3. 对部分内容进行了适当取舍，增加了部分理论联系实际、能激发学生学习兴趣、与后续课程相关的内容、例题与习题。

4. 在章节安排、讲述方式上，尽量考虑与高等数学的教学进度相适应。

5. 在符合《理工科类大学物理课程教学基本要求》（2010版）的原则下，注重应用基本理论分析问题和解决问题，在内容讲述和习题的选择上尽量避免复杂的理论计算与过程推导。

全书分为上、下两册，上册包括力学、热学基础和电磁学三篇内容（共10章）；下册包括机械振动与机械波、光学、近代物理学和能源与应用专题四篇内容（共10章）。本册为上册。

参加本书编写的教师做了大量认真细致的工作，具体编写分工如下：刘斌编写第1～3章和第20章，李蓉编写第4～7章，于海宁编写第8～12章，徐攀攀编写第13章，薛映仙编写第14～16章，张秀山编写第18、19章，郝虎在编写第17章并负责全书统稿。

由于编者的知识有限，时间仓促，书中疏漏和不妥之处在所难免，诚恳希望读者提出宝贵意见和建议。

郝虎在

2017年11月于太原

目　　录

第一篇　力　　学

第二篇　热学基础

第三篇 电 磁 学

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动，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。力学是物理学的基础，力学中的基本概念和某些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。

本篇共三章：第一章为质点运动学，主要研究质点运动的描述；第二章为质点动力学，主要研究物体间的相互作用以及这些相互作用对物体运动的影响，着重介绍牛顿定律和动量、角动量、能量等概念及相应的守恒定律；第三章为刚体的定轴转动，主要介绍刚体定轴转动的运动学和动力学问题。

第1章　质点运动学

质点运动学的主要任务是研究物体的运动状态随时间变化的关系，而不涉及物体运动产生和改变的原因。本章首先定义描述质点运动状态的物理量，如位置矢量、位移、速度和加速度等，并讨论这些状态量之间的关系；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　质点　参考系与坐标系

一、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。因此要精确描述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，即质点是实际物体在一定条件下的抽象。引入理想化模型在物理学中是一种常见的、重要的科学分析方法，在以后的课程中还将引入一系列理想化模型，例如刚体、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。例如，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，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。

在应用质点的概念时，首先要注意，同一个物体在一个问题中可抽象为质点，在另一个问题中则不一定能简化为质点。例如，研究地球绕太阳公转时，由于地球至太阳的平均距离（约为 1.5×10^{8} km）比地球的半径（约为 6 370 km）大得多，地球上各点相对于太阳的运动可以近似看作相同的，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（如原子核的线度约为 10^{-15} m）也有大小和形状，而质点为一几何点，它只有质量，没有大小，但在空间占有确切的位置。

二、运动的绝对性与运动描述的相对性

宇宙间一切物体都在不停地运动，不可能找到一个绝对静止不动的物体。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，整个太阳系是在绕着银河系中心运动；同时银河系也在运动，这就是**运动的绝对性**。

对于某一个具体的物体，如一个从运行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做竖直向下的自由落体运动，而站台上的乙却认为杯子做抛物线运动，列车上的甲的参照物是车厢，而站台上的乙的参照物是地面。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可能不同，这就是**运动描述的相对性**。

三、参考系与坐标系

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。

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，如图 1-1 所示。坐标系建立后，简化为质点的物体相对于坐标系的运动，也就是质点相对于参考系的运动。运动物体的位置由质点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，所以当提到坐标系时，指的也是与它固定在一起的参考系。

常用的坐标系有图 1-2 所示的三维直角坐标系(x,y,z)，以及图 1-3 所示的三维球面坐标系(r,θ,φ)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,θ)。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。直线运动使用一维直线坐标系描述。

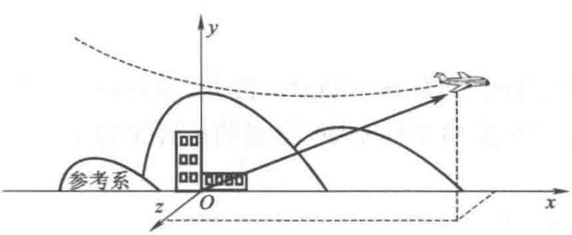


图 1-1　参考系与坐标系

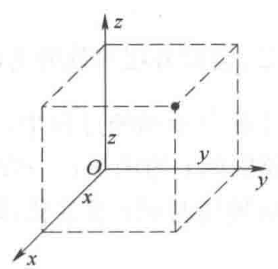


图 1-2　三维直角坐标系(x,y,z)

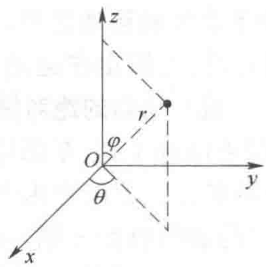


图 1-3　三维球面坐标系 (r,θ,φ)

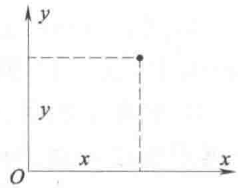


图 1-4　二维直角坐标系 (x,y)

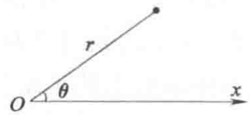


图 1-5　二维极坐标系 (r,θ)

§1-2　质点运动状态的描述

一、位置矢量

我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 点作的一条有方向的线段 $\boldsymbol{r}$ 来表示，如图 1-6 所示。矢量 $\boldsymbol{r}$ 称为**位置矢量**，简称**位矢**。

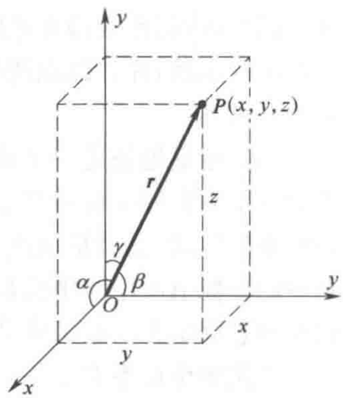


图 1-6　位置矢量

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

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

式中 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别为 x 轴、y 轴、z 轴的单位矢量。位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 的大小为

$$|\boldsymbol{r}|=r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$$

位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 的方向用位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 分别与 x 轴、y 轴和 z 轴的夹角 α、β 和 γ 的余弦表示：

$$\cos\alpha=\frac{x}{r},\qquad \cos\beta=\frac{y}{r},\qquad \cos\gamma=\frac{z}{r}$$

二、运动方程和轨迹方程

在质点运动的过程中，表示质点位置的位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 随时间改变，质点的位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 是时间 t 的函数 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)$。这时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

$$\begin{cases} x=x(t) \\ y=y(t) \\ z=z(t) \end{cases} \tag{1-2}$$

将式(1-2)代入式(1-1)，即得运动方程在直角坐标系中的分解式

$$\boldsymbol{r}=x(t)\boldsymbol{i}+y(t)\boldsymbol{j}+z(t)\boldsymbol{k} \tag{1-3}$$

式(1-2)和式(1-3)描述了质点的空间位置随时间变化的过程，称为**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。

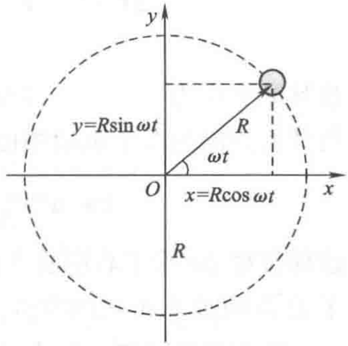


图 1-7　一质点做圆周运动的运动方程与轨迹方程

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，在质点的运动方程式(1-2)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。如图 1-7 所示，一质点的运动方程为

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{i}R\cos\omega t+\boldsymbol{j}R\sin\omega t$$

即

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

上式消去 t 便得到轨迹方程

$$x^2+y^2=R^2$$

即质点的运动轨迹为圆，质点做圆周运动。

运动方程表明质点的位置 $\boldsymbol{r}$ 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。

三、位移和路程

如图 1-8(a)所示，t 时刻质点位于 A 点，位置矢量为 $\boldsymbol{r}_A$，经过 Δt 时间，质点到达 B 点，位置矢量为 $\boldsymbol{r}_B$。在 Δt 时间间隔内位置矢量的增量称为**位移矢量**，简称**位移**。位移矢量 $\overrightarrow{AB}=\boldsymbol{r}_B-\boldsymbol{r}_A=\Delta\boldsymbol{r}$，即

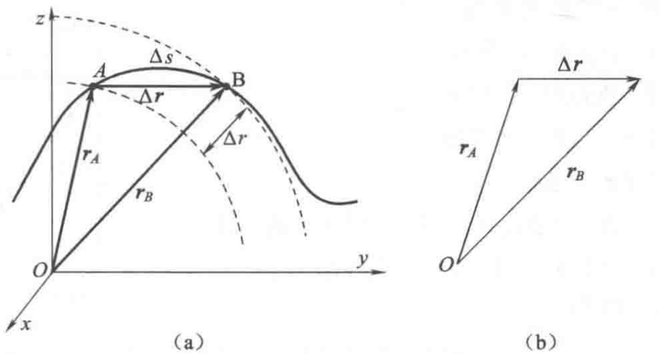


图 1-8　位置矢量与位移矢量

$$\Delta \boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_B-\boldsymbol{r}_A \tag{1-4}$$

在三维直角坐标系中表示为

$$\Delta \boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_B-\boldsymbol{r}_A=(x_B\boldsymbol{i}+y_B\boldsymbol{j}+z_B\boldsymbol{k})-(x_A\boldsymbol{i}+y_A\boldsymbol{j}+z_B\boldsymbol{k})$$
$$\Delta \boldsymbol{r}=\Delta x\boldsymbol{i}+\Delta y\boldsymbol{j}+\Delta z\boldsymbol{k}$$

位移的大小为　　$|\Delta \boldsymbol{r}|=\sqrt{(\Delta x)^2+(\Delta y)^2+(\Delta z)^2}$

位移的方向为图 1-8(a)中由 A 点指向 B 点，也可以用 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的方向余弦表示

$$\cos\alpha=\frac{\Delta x}{\Delta r}\qquad \cos\beta=\frac{\Delta y}{\Delta r}\qquad \cos\gamma=\frac{\Delta z}{\Delta r}$$

这样位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 除了表明质点在 Δt 时间间隔内由 A 点运动到 B 点的距离外，还表明了 B 点相对于 A 点的方位。

在国际单位制(SI)中，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(b)所示。

图 1-8(a)中，在 Δt 时间间隔内质点运动的路径长度 Δs 称为路程。路程 Δs 是一个标量，而位移是既有大小又有方向的矢量。在分析问题时，应该注意以下几点：

(1)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 Δs 与位移的大小 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 之间没有确定的关系，只有当 Δt 趋于零时两者才相等，即 $\Delta t\to 0$ 时，$|\Delta \boldsymbol{r}|=\Delta s$。

(2)位移的大小 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 不等于 Δr。$\Delta r=r(t+\Delta t)-r(t)$ 是 Δt 时间内质点相对于原点的径向长度的变化，所以，一般 $|\Delta \boldsymbol{r}|\neq\Delta r$，如图 1-8(a)所示。

(3)位置矢量和位移矢量在量值上都表示长度，常用的单位为米(m)、千米(km)和毫米(mm)。

【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，出发点为坐标原点 O，建立图 1-9 所示的二维直角坐标系，则

$$\Delta \boldsymbol{r}_1=\Delta x_1\boldsymbol{i}+\Delta y_1\boldsymbol{j}=5\boldsymbol{i}\ \text{km}$$
$$\Delta \boldsymbol{r}_2=\Delta x_2\boldsymbol{i}+\Delta y_2\boldsymbol{j}=-4\boldsymbol{j}\ \text{km}$$
$$\Delta \boldsymbol{r}_3=\Delta x_3\boldsymbol{i}+\Delta y_3\boldsymbol{j}=-2\boldsymbol{i}\ \text{km}$$
$$\begin{aligned}\Delta \boldsymbol{r}&=\Delta \boldsymbol{r}_1+\Delta \boldsymbol{r}_2+\Delta \boldsymbol{r}_3\\&=(\Delta x_1+\Delta x_2+\Delta x_3)\boldsymbol{i}+(\Delta y_1+\Delta y_2+\Delta y_3)\boldsymbol{j}\\&=[(5+0-2)\boldsymbol{i}+(0-4+0)\boldsymbol{j}]\ \text{km}\\&=(3\boldsymbol{i}-4\boldsymbol{j})\ \text{km}\end{aligned}$$

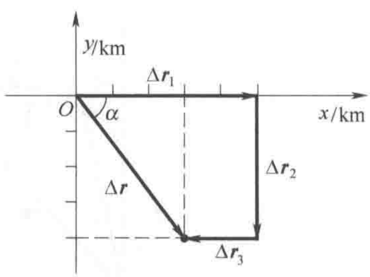


图 1-9　例 1-1 图

合位移的大小　　$|\Delta \boldsymbol{r}|=\sqrt{(\Delta x)^2+(\Delta y)^2}=\sqrt{3^2+(-4)^2}\ \text{km}=5\ \text{km}$

合位移的方向由合位移与 x 轴的夹角 α 决定

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

【例 1-2】 已知质点在平面直角坐标系 xOy 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。

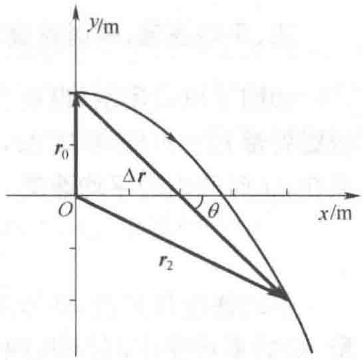


图 1-10　例 1-2 图

【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　　$y=2-\frac{1}{4}x^2$

可知质点的轨迹为图 1-10 所示的抛物线。

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

当 $t=0$ 时　$\boldsymbol{r}_0=2\boldsymbol{j}$；

当 $t=2$ 时　$\boldsymbol{r}_2=4\boldsymbol{i}-2\boldsymbol{j}$，如图 1-10 所示。

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

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

位移方向 $\theta=\arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)=\arctan\frac{-4}{4}=-45°$(与 x 轴正向夹角)，如图 1-10 所示。

【例 1-3】 质点在平面直角坐标系 xOy 中的运动方程为 $x=3\cos\pi t$，$y=3\sin\pi t$ (SI)，试求：

(1)质点的轨迹方程；

(2)$t=1$ s 时的位置矢量；

(3)$t=0$ s 到 $t=1$ s 的位移和路程。

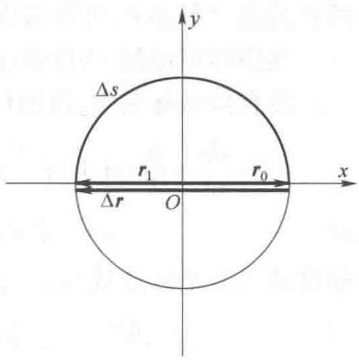


图 1-11　例 1-3 图

【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，质点做以原点 O 为圆心、半径为 3 m 的圆周运动，如图 1-11 所示。

(2)$t=1$ s 时：$x=-3$，$y=0$，所以

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

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

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

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

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

路程 $\Delta s=3\pi\ \mathrm{m}$

通过以上分析，可以发现建立运动方程的分量式和矢量式具有重要意义。有了描述质点运动的运动方程，就知道了任何时刻质点的运动情况，不但可以确定其位置，而且可以计算出质点的位移和路程。在质点的运动过程中，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。

四、平均速度、瞬时速度和速率

如图 1-8(a)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 Δt，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 Δt 时间内的**平均速度**

$$\bar{\boldsymbol{v}}=\frac{\boldsymbol{r}_B(t+\Delta t)-\boldsymbol{r}_A(t)}{\Delta \mathrm{t}}=\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \tag{1-5}$$

平均速度是矢量，其方向与 $\Delta\boldsymbol{r}$ 的方向一致，它表示在 Δt 时间内，质点位置矢量 $\Delta\boldsymbol{r}$ 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。

如果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 Δt 尽量减小而趋于零。当时间趋于零时平均速度的极限称为**瞬时速度**。瞬时速度(以下简称速度)的数学表达式

$$\boldsymbol{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \tag{1-6}$$

$\boldsymbol{v}$ 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 Δt 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 Δt 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)中，速度的单位是米 · 秒$^{-1}$($\mathrm{m\cdot s^{-1}}$)。

在直角坐标系中，速度可用分量式表示。将式(1-1)代入式(1-6)，则有

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k})=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}$$

即

$$\boldsymbol{v}=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j}+v_z\boldsymbol{k} \tag{1-7}$$

速度的三个坐标分量 v_x、v_y、v_z 分别为

$$v_x=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\qquad v_y=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\qquad v_z=\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} \tag{1-8}$$

速度的大小为 $$|\boldsymbol{v}|=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2} \tag{1-9}$$

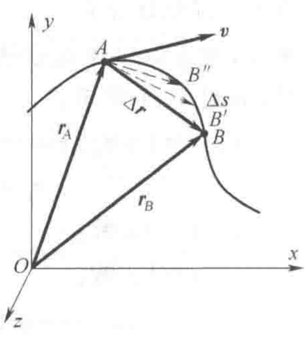


图 1-12 速度矢量

速度是矢量，既有大小，又有方向，服从矢量的运算规律。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，即速度具有相对性。

在描述质点的运动时，我们也常采用一个叫速率的物理量。如图 1-12 所示，在 Δt 时间内，质点所走过的路程为曲线 AB。曲线 AB 的长度为 Δs，那么，Δs 与 Δt 的比值就称为在时间 Δt 内质点的**平均速率**，即

$$v=\frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{1-10}$$

平均速率等于质点在单位时间内所行经的路程，而不考虑质点运动的方向，所以平均速率是标量。平均速率与平均速度是两个不同的物理量。例如，在一段时间内，一个质点绕一个闭合路径运动了一周，虽然质点的位移为零，平均速度也为零，而质点的平均速率是不为零的。

瞬时速度的定义式(1-6)同时给出了速度的大小和方向。速度的大小

$$|\boldsymbol{v}|=\left|\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}\right|=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t}$$

在 Δt 趋于零的极限条件下，曲线 AB 的长度 Δs 与线段 AB 的长度 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 可以认为相等，即 $\Delta t\to 0$ 时，$|\Delta \boldsymbol{r}|=\Delta s$，所以速度的大小

$$|\boldsymbol{v}|=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=v \tag{1-11}$$

即速度的大小 $|\boldsymbol{v}|=v$ 称为**瞬时速率**，简称**速率**。瞬时速率就是瞬时速度的大小，而不考虑方向。式(1-11)中的 $s=s(t)$ 是质点运动轨迹的弧长函数，所以速率也等于弧长随时间的变化率。速率直接反映了质点运动快慢程度。

在质点的运动过程中，质点运动的速度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。

五、平均加速度与瞬时加速度

速度是个矢量，它既有大小又有方向，当质点做一般曲线运动时，曲线上各点的切线方向在不断变化，即速度的方向在不断变化；同时质点运动的速率也可以改变，即速度的大小也在不断改变。为了定量描述各个时刻速度矢量的变化情况，我们引进加速度这个描述运动速度变化快慢程度的物理量。

如图 1-13 所示，设 t 时刻质点在 A 点，速度为 $\boldsymbol{v}(t)$，在 $t+\Delta t$ 时刻，质点到达 B 点，速度为 $\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}(t+\Delta t)$，在 Δt 时间内质点速度的大小和方向都发生了变化，根据矢量的三角形法则，作 $\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}(t+\Delta t)$ 和 $\boldsymbol{v}(t)$ 两矢量的差，即

$$\Delta \boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}(t+\Delta t)-\boldsymbol{v}(t)$$

矢量 $\Delta \boldsymbol{v}$ 是质点在 Δt 时间内速度的增量。

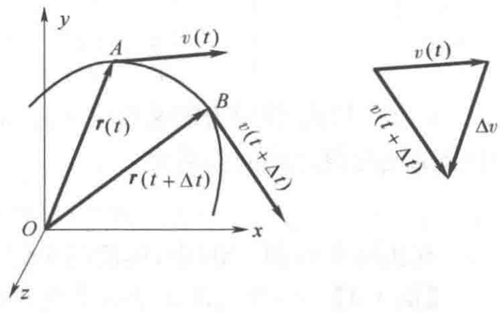


图 1-13 加速度矢量