高等学校教材

工科大学物理

高兴茹　陈健　姚淑娜
张丹海　张国忠　编

中国计量出版社

图书在版编目（CIP）数据

工科大学物理/高兴茹等编．—北京：中国计量出版社，2001．1
ISBN 7-5026-1391-9

Ⅰ．工… Ⅱ．高… Ⅲ．物理学-高等学校-教材 Ⅳ．04

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2000）第 55413 号

内 容 提 要

本书是依据国家教育部颁发的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》编写的工科大学物理教材。全书共分 7 篇 22 章，内容涵盖了力学、振动和波动、气体动理论和热力学基础、电磁学、波动光学、近代物理学基础及现代工程技术的物理基础等，既考虑了工科大学物理课程的特点，又适当地反映了现代科学技术的新成就。

本书主要作为工科大学本科非物理专业的物理课程教材。

中国计量出版社出版
北京和平里西街甲 2 号
邮政编码 100013
电话 (010)64275360
北京市迪鑫印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*
787 mm×1092 mm 16 开本 印张 22.5 字数 546 千字
2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月第 1 次印刷
*
印数 1—2 500 **定价：34.00 元**

前　言

大学物理是高等工业学校一门重要的必修基础课。它一方面在于为学生较系统地打好必要的物理基础，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、增强实践能力、提高人才素质的作用。学好大学物理课，不仅对学生在校的学习十分重要，而且对学生毕业后的工作和进一步学习新理论、新知识、新技术，以及可持续发展，都将发生深远的影响。

本书依据国家教育部（原国家教委）颁发的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》编写，主要作为工科大学本科非物理专业的物理课程教材。在编写过程中，参考了现行的物理课程教材，并结合编者多年的教学实践，力求做到“保证基础，内容精炼，层次分明，重点突出，重视应用，利于教学”。

在本书编写过程中，承蒙各有关部门和人员的协助，尤其是得到了编者所在学校的大力支持，在此深表感谢。

限于编者的水平和时间，难免有疏漏错误之处，恳请指正。

编者

2000年2月

目　　录

第一篇　力　　学

第二篇　振动和波动

第三篇　气体动理论和热力学基础

第四篇 电 磁 学

第五篇 波动光学

第六篇　近代物理学基础

第七篇　现代工程技术的物理基础

第一篇　力学

力学是研究物体机械运动的规律及其应用的一门学科。

自然界中一切物质都处于永恒的运动之中，物质的运动形式也是多种多样的，其中最简单而又最基本的运动是机械运动。所谓机械运动，是指一个物体相对另一个物体，或一个物体的某些部分相对于其他部分位置的变化。例如行星绕太阳的转动、宇宙飞船的飞行、机器的运转等都是机械运动。

力学对现代工程技术具有重大的实用价值。设计房屋、桥梁，制造飞机、轮船，发射人造卫星、宇宙火箭，都要以力学原理为依据。此外，在较高级、复杂的运动形式中都含有机械运动。所以学习力学的基本原理对于研究物理学的其他部分以及自然科学的其他学科也有重要意义。

通常把力学分为三部分：运动学、动力学和静力学。运动学研究物体位置随时间的变化规律，但不涉及变化发生的原因；动力学研究物体的运动和物体间相互作用的联系，阐明物体运动状态发生变化的原因；静力学研究物体在相互作用下的平衡问题，它可以看作是动力学的一部分。

本篇主要讨论质点运动学和质点动力学的基本概念和规律，刚体的定轴转动，以及经典力学的适用范围。

第一章　质点运动学

力学中，研究物体位置随时间变化规律的这部分内容叫运动学。

本章主要学习描述质点运动的基本物理量，即位置矢量、位移、速度、加速度等。在此基础上，讨论一般直线运动、曲线运动，并介绍相对运动的概念。

§1-1　参考系　质点

一、参考系

自然界中，所有的物体都在不停地运动着，绝对静止不动的物体是不存在的。如放在桌上的书相对桌面是静止的，但它却随地球一起绕太阳运动，这就是运动的绝对性。要描述一

个物体的运动，例如其位置或位置的变化，总要选取另一个物体作为参考，才能观察和研究此物体相对参考物体是如何运动的。被选作参考的物体称为参考系。选取不同的参考系，对同一物体运动的描述是不同的。例如在匀速行驶的车厢中，静坐的乘客相对于车厢是静止不动的，而相对于道路旁某一固定物体，乘客的位置却在不断的变化。这就是运动描述的相对性。因此在描述物体运动状态时，必须指明是对哪一个参考系而言。

参考系的选择是任意的，如何选择要根据问题的性质和研究方便来确定。例如研究物体在地面上的运动，最方便的是选择地球作为参考系。研究行星绕太阳的运动，则应选择太阳作为参考系。

为了定量地描述物体的位置及其变化，还需要在参考系上选择一个坐标系。一般最常用的是直角坐标系。此外，根据需要，也可以选用其他的坐标系，例如球坐标系或柱坐标系等。

二、质点

任何物体都有大小和形状。一般说来，物体运动时其各部分的位置变化是不同的。因此要精确描述物体各部分的运动状态，并不是一件容易的事情。根据问题的性质，在某种情况下，我们往往可以将物体的大小和形状忽略不计，而把物体当作一个有一定质量的点，这样抽象化后的理想物体模型，称为质点。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 1.5×10^8 km）比地球半径（约 6 370 km）大得多。因此，地球上各点相对太阳的运动可视为相同，就可把地球当作质点。物体作平动时，物体内各点具有相似的轨道、相同的速度和加速度，则任一点的运动都能代表整体的运动，因此可以把平动物体视为质点。

一个物体是否能看作质点，完全取决于问题的性质。如上所述的地球绕太阳公转的问题中，地球可当作一个质点，但在研究地球的自转时，如果仍然把地球看作一个质点，显然就毫无意义了。

质点运动是研究物体运动的基础。在不能把所研究的物体当作质点时，可把整个物体看成是由许多质点所组成，弄清这些质点的运动，就可以了解整个物体的运动。

在本书的力学内容中，除刚体的定轴转动一章外，都把物体当作质点来处理。

§1-2　位置矢量　运动方程　位移

一、位置矢量

在图 1-1 所示的直角坐标系中，在时刻 t 质点在点 P 的位置可用自坐标系原点 O 指向 P 点的有向线段 $\boldsymbol{r}$ 来表示，矢量 $\boldsymbol{r}$ 叫做位置矢量，简称位矢。从图 1-1 中可以看出，位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 在 X、Y、Z 轴上的投影（即 P 点的坐标）为 x、y、z。因此，位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 可表示为

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

式中，$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别为沿 X、Y 和 Z 轴正方向的单位矢量。位置矢量的大小为

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

位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 的方向余弦由下式确定：

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

式中，α、β、γ 分别是 $\boldsymbol{r}$ 与 X、Y 和 Z 轴之间的夹角。

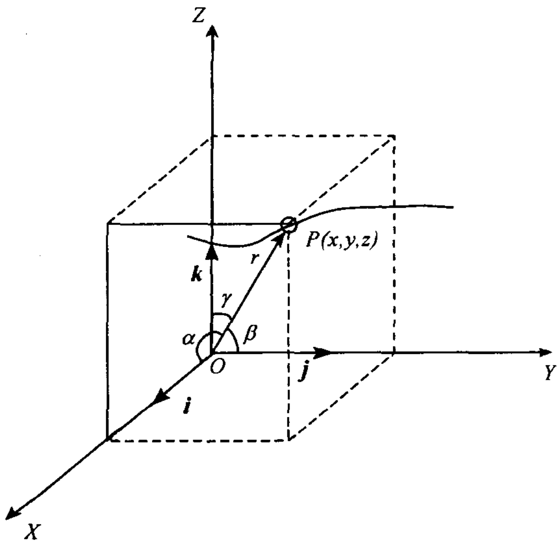


图 1-1　位置矢量

二、运动方程

质点运动时，位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 将随时间 t 而变化，因此 $\boldsymbol{r}$ 是时间的函数，即

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

位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 随时间 t 变化的函数式（1-2）称为质点的运动方程。我们从 $x = x$（t），$y = y$（t），$z = z$（t）中消去 t 后，就可得到质点运动的轨道方程。例如质点 P 从原点 O 开始沿 X 轴作平抛运动，选用图 1-1 坐标系，其运动方程为

$$x = v_0 t, y = -\frac{1}{2}gt^2$$

或

$$\boldsymbol{r} = v_0 t\boldsymbol{i} - \frac{1}{2}gt^2\boldsymbol{j}$$

由上式 x、y 中消去 t，可求得 P 点的轨道方程为

$$y = -\frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v_0}\right)^2$$

这是一条抛物线。

三、位移

一质点沿曲线由时刻 t 的点 A 运动到时刻 $t + \Delta t$ 的点 B（图 1-2），质点的位置矢量由 $\boldsymbol{r}_A$ 变化到 $\boldsymbol{r}_B$。很显然，在时间间隔 Δt 内，位置矢量的大小和方向都发生了变化。质点位置的变化可用由点 A 到点 B 的有向线段 $\boldsymbol{AB}$ 来表示，称为质点的位移。若把 $\boldsymbol{AB}$ 写成 $\Delta\boldsymbol{r}$，由图 1-2 可以看出，

$$\boldsymbol{r}_B = \boldsymbol{r}_A + \Delta\boldsymbol{r}$$

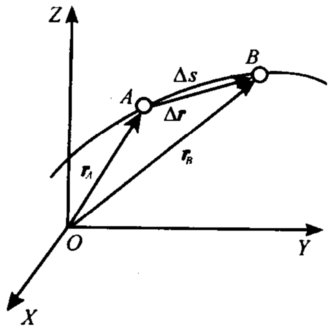


图 1-2 位移

因此，质点从点 A 到点 B 的位移为

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A \tag{1-3a}$$

上式说明，位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 等于在时间间隔 Δt 内，位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 的增量。

由式（1-1），可将 A、B 两点的位置矢量分别写成

$$\boldsymbol{r}_A = x_A\boldsymbol{i} + y_A\boldsymbol{j} + z_A\boldsymbol{k}$$

$$\boldsymbol{r}_B = x_B\boldsymbol{i} + y_B\boldsymbol{j} + z_B\boldsymbol{k}$$

于是，$\Delta \boldsymbol{r}$ 可写成

$$\begin{aligned}\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A &= (x_B - x_A)\boldsymbol{i} + (y_B - y_A)\boldsymbol{j} + (z_B - z_A)\boldsymbol{k} \\ &= \Delta x\boldsymbol{i} + \Delta y\boldsymbol{j} + \Delta z\boldsymbol{k}\end{aligned} \tag{1-3b}$$

上式表明，当质点在空间运动时，其位移等于在 X 轴、Y 轴和 Z 轴上的位移的矢量和。

应当注意，位移是描述质点位置变化的物理量，并非质点所经历的路程。在图 1-2 中，弧长 $\widehat{AB}$（记作 Δs）为质点所经历的路程，而位移则是 $\Delta \boldsymbol{r}$。当质点经一闭合路径回到原来的起始位置时，其位移为零，而路程不为零。所以，位移和路程是两个完全不同的概念。

§1-3 速度 加速度

一、速 度

速度是描述质点运动快慢和方向的物理量。在图 1-2 中，在时刻 t 到 $t+\Delta t$ 的这段时间 Δt 内，质点由点 A 运动到点 B，质点的位移为 $\Delta \boldsymbol{r}$。我们把 $\Delta \boldsymbol{r}$ 与 Δt 的比值称为质点在时间间隔 Δt 内的平均速度，即

$$\bar{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}$$

平均速度的方向与 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的方向相同，而其大小等于 Δt 内每单位时间的位移。

平均速度只反映了在一段时间内位移的平均变化。如果我们需要精确地知道质点在某一时刻 t（或某一位置）的运动情况，应使 Δt 尽量缩短而趋近于零。当 $\Delta t \to 0$ 时，平均速度的极限值称为质点在时刻 t 的瞬时速度（简称速度），用 $\boldsymbol{v}$ 表示，则有

$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \tag{1-4}$$

因此，速度是位置矢量对时间的一阶导数。

由（1-4）式可知，速度的方向就是 $\Delta t \to 0$ 时 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的极限方向。由图 1-3 可见，当 $\Delta t \to 0$ 时，点 B 逐渐趋近于点 A，$\Delta \boldsymbol{r}$ 则趋于和轨道相切，即与 A 点的切线重合。所以质点在某一点的速度方向就是沿该点轨道的切线方向，并指向质点前进的方向。

在直角坐标系中，速度可表示为

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

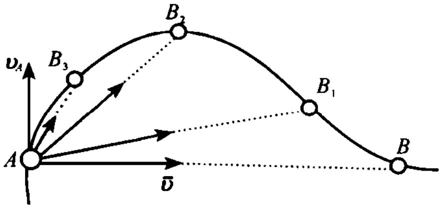


图 1-3　质点在轨道 A 点处的速度方向

$$= \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dz}{dt}\boldsymbol{k}$$
$$= v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k} \qquad (1\text{-}5)$$

式中 $v_x = \frac{dx}{dt}$、$v_y = \frac{dy}{dt}$、$v_z = \frac{dz}{dt}$ 分别是 $\boldsymbol{v}$ 在直角坐标系中的三个分量，因此速度的大小

$$v = |\boldsymbol{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

在图 1-2 中，质点在 Δt 内通过的路程为 Δs，比值$\frac{\Delta s}{\Delta t}$称为质点在 Δt 内的平均速率，即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

平均速率是一个标量，数值上等于质点在单位时间内所通过的路程，而不考虑运动的方向。当 $\Delta t \to 0$ 时，平均速率的极限值称为瞬时速率，简称速率，即

$$v = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$$

由图 1-2 可知，当 $\Delta t \to 0$ 时，$|\Delta \boldsymbol{r}|$与 Δs 可认为相等：$\lim\limits_{\Delta t \to 0}|\Delta \boldsymbol{r}| = \lim\limits_{\Delta t \to 0}\Delta s$，即$|d\boldsymbol{r}| = ds$，因此有$|\boldsymbol{v}| = v$，也就是说，在任一时刻，质点速度的大小与速率相等。

例题 1-1　一质点在 XOY 平面内的运动方程为$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j}$，其中 $x = 2t$，$y = \frac{1}{2}t^2 - 2$，式中各量皆为 SI 单位。(1) 计算在 $t = 2$ s 到 $t = 4$ s 这段时间内的平均速度；(2) 求 $t = 4$ s 时的速度和速率；(3) 求质点的轨道方程并作图。

解　(1) 由定义，在 $t = 2$ s 到 $t = 4$ s 内的平均速度为

$$\bar{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\boldsymbol{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t}\boldsymbol{j} = \frac{8-4}{4-2}\boldsymbol{i} + \frac{6-0}{4-2}\boldsymbol{j}$$
$$= (2\boldsymbol{i} + 3\boldsymbol{j})\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$$

(2) 由速度的分量式可得

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 2, v_y = \frac{dy}{dt} = t$$

当 $t = 4$ s 时，$v_x = 2\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$，$v_y = 4\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$。因此，$t = 4$ s 时质点的速度为

$$\boldsymbol{v} = (2\boldsymbol{i} + 4\boldsymbol{j})\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$$

速率$|\boldsymbol{v}| = v = \sqrt{2^2 + 4^2}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} = 4.47\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

(3) 由 $x = 2t$ 得 $t = \frac{x}{2}$，代入 $y = \frac{1}{2}t^2 - 2$ 可得轨道方程

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

由运动方程 $x = 2t$、$y = \frac{1}{2}t^2 - 2$ 可作 XOY 图（图 1-4）。

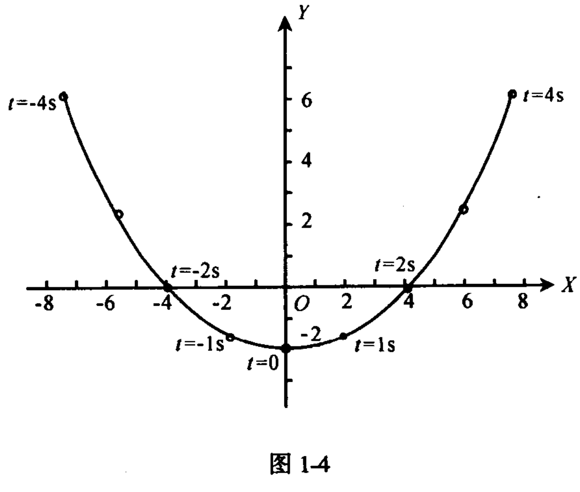


图 1-4

二、加速度

速度是个矢量，不论是其大小变化，还是方向变化，或二者同时变化，速度都发生了变

化。加速度就是描述速度随时间变化规律的物理量。

如图 1-5 所示，质点的运动轨道为一曲线。设在时刻 t，质点位于点 A，其速度为 $\boldsymbol{v}_A$，在时刻 $t+\Delta t$，质点位于点 B，其速度为 $\boldsymbol{v}_B$。由速度矢量图可以看出，在时间间隔 Δt 内，质点速度的增量为

$$\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A$$

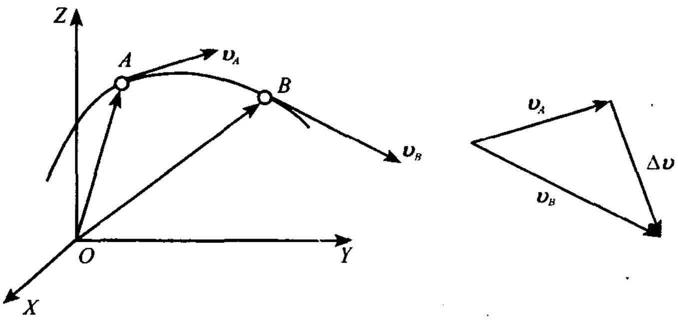


图 1-5　速度的增量

则在该时间 Δt 内质点的平均加速度定义为

$$\bar{\boldsymbol{a}} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$$

平均加速度只是反映在时间 Δt 内速度的平均变化率。当 $\Delta t \to 0$ 时，平均加速度的极限值叫作瞬时加速度（简称加速度），用 $\boldsymbol{a}$ 表示，则有

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 \boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} \tag{1-6}$$

故加速度等于速度对时间的一阶导数，或位置矢量对时间的二阶导数。在直角坐标系中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{a} &= \frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k} \\ &= \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{k} \\ &= a_x\boldsymbol{i} + a_y\boldsymbol{j} + a_z\boldsymbol{k} \end{aligned} \tag{1-7}$$

式中 $a_x = \frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}$，$a_y = \frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2}$，$a_z = \frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2}$，是加速度的三个分量。加速度的大小

$$a = |\boldsymbol{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

$\boldsymbol{a}$ 的方向为速度增量 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向。质点作曲线运动时，$\Delta \boldsymbol{v}$ 的方向与速度 $\boldsymbol{v}$ 的方向不在同一直线上，因此任一时刻质点 $\boldsymbol{a}$ 的方向与该时刻 $\boldsymbol{v}$ 的方向不在同一直线上，即 $\boldsymbol{a}$ 的方向不沿曲线的切线方向。如图 1-6 表示弹丸在飞行时各时刻其加速度 $\boldsymbol{a}$（即 g）的方向铅直向下。在弹丸上升过程中，速率减小，$\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 成

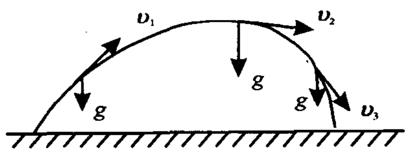


图 1-6　弹丸飞行时的加速度方向

钝角；下降过程中，速率增大，$\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 成锐角。然而，无论弹丸是处于上升还是下降过程，其加速度的方向总是指向曲线的凹侧。这一结论对任何曲线运动都是适用的。只有在直线运动中 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 同在一直线上，加速时 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 同向，减速时 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 反向。

例题 1-2 已知质点的运动方程为

$$\boldsymbol{r} = (-5.0t + 10.0t^2)\boldsymbol{i} + (10.0t - 15.0t^2)\boldsymbol{j}$$

式中坐标的单位为 m，时间的单位为 s。试求 $t = 2$ s 时质点的位置矢量、速度和加速度。

解 由质点运动方程可知，质点是在 XOY 平面内运动，运动方程在 X、Y 轴上的分量式为

$$x = -5.0t + 10.0t^2$$
$$y = 10.0t - 15.0t^2$$

质点的速度为

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = (-5.0 + 20.0t)\boldsymbol{i} + (10.0 - 30.0t)\boldsymbol{j}$$

它在 X、Y 轴上的分量为

$$v_x = -5.0 + 20.0t$$
$$v_y = 10.0 - 30.0t$$

质点的加速度为

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = 20.0\boldsymbol{i} - 30.0\boldsymbol{j}$$

它在 X、Y 轴上的分量为

$$a_x = 20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$
$$a_y = -30.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

在 $t = 2$ s 时，质点的坐标和位置矢量为

$$x = 30.0 \text{ m}, y = -40.0 \text{ m}$$
$$\boldsymbol{r} = 30.0\boldsymbol{i} - 40.0\boldsymbol{j}$$

速度为 $\boldsymbol{v} = 35.0\boldsymbol{i} - 50.0\boldsymbol{j}$

速度分量为 $v_x = 35.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, v_y = -50.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

速度大小 $|\boldsymbol{v}| = \sqrt{35^2 + (-50)^2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 61.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

速度与 x 轴夹角 $\alpha = \text{arctg}\dfrac{v_y}{v_x} = \text{arctg}\dfrac{-50}{35} = -55°$

加速度大小 $|\boldsymbol{a}| = \sqrt{20^2 + (-30)^2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 36.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

加速度与 x 轴夹角 $\beta = \text{arctg}\dfrac{a_y}{a_x} = \text{arctg}\dfrac{-30}{20} = -56°19'$

例题 1-3 在高出地面 25 m 的高楼平台上，以初速度 $v_0 = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 竖直上抛一物体。求：(1) 抛出 3 s 后物体的位置；(2) 从抛出到物体回到平台边缘所用的时间；(3) 物体落到地面时的时间和速度；(4) 分别画出加速度－时间曲线、速度－时间曲线和位移－时间曲线。(取 $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

解 略去空气阻力，物体作匀变速直线运动，加速度 g，铅直向下。选如图 1-7 所示的坐标，高楼平台一点为坐标原点，铅直向上为 Y 轴正方向。由题意知：$t = 0$ 时，$y_0 = 0$，$v_0 = +20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$，$a = -g = -10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

(1) 由 $y = v_0 t + \frac{1}{2}gt^2$ 可求得 $t = 3$ s 时的位置为

$$y = 20 \times 3 + \frac{1}{2} \times (-10) \times 3^2 = 15 \text{ m}$$

即 3 s 后物体在距地面 40 m 处。

(2) 物体回到平台边缘时，$y=0$，所以

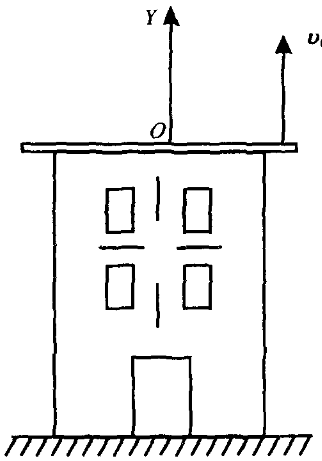


图 1-7

$$0 = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$

或 $$0 = 20t + \frac{1}{2}(-10)t^2$$

解得 $$t_1 = 4\ \text{s}$$

另一根 $t_2=0$ 舍去。故物体经最高点后，又回到平台位置所用的时间为 4 s。

(3) 物体落到地面时，$y=-25$ m。所以物体从抛出到落地所需的时间，由

$$y = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$

可得 $$-25 = 20t + \frac{1}{2}(-10)t^2$$

解方程,得 $$t_3 = 5\ \text{s}$$

另一根 $t_4=-1$ s，舍去。另由

$$v = v_0 + gt$$

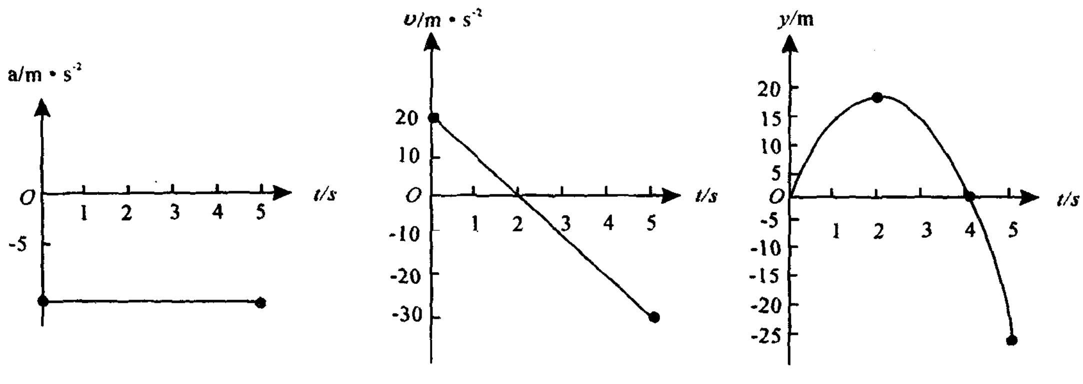
可得落地速度为

$$v = 20 - 10 \times 5 = -30\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

即物体落地时，其速度方向铅直向下，数值为 30 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$。

(4) 由 $v=v_0+gt$ 及 $g=v_0 t+\frac{1}{2}gt^2$ 可分别求出 $t=0$、1、2、3、4、5s 时物体的速度及位移，列表如下。物体的 $a-t$、$v-t$、$y-t$ 曲线如图 1-8 所示。

t/s	0	1	2	3	4	5
v/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	20	10	0	-10	-20	-30
y/m	0	15	20	15	0	-25



(a) a-t曲线　(b) v-t曲线　(c) y-t曲线

图 1-8

§1-4 圆周运动

圆周运动是一种常见的曲线运动。机器上的飞轮转动时，轮上各点（转轴中心除外）都在作半径不同的圆周运动。掌握了圆周运动的规律，再去讨论一般的曲线运动就方便得多了。圆周运动也是研究刚体绕定轴转动的基础。

一、匀速率圆周运动

质点作圆周运动时，如果在任意相等的时间内，通过相等长度的圆弧，即在每一时刻质点的速率都相等，这种运动称为匀速率圆周运动。作匀速率圆周运动的质点，虽然速度的大小不变，但速度的方向时刻都在变化，因此它是一种变速运动。

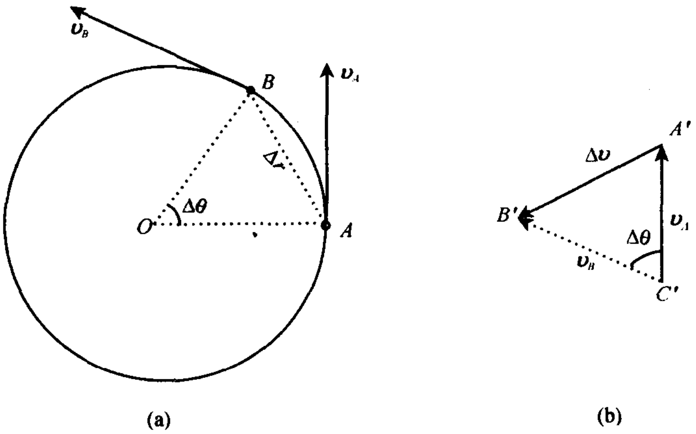


图 1-9　匀速圆周运动

如图 1-9 所示，一质点沿半径为 R 的圆周作匀速率圆周运动，在 Δt 时间内，质点由点 A 到达点 B。在 A、B 两点处，质点的速度分别为 $\boldsymbol{v}_A$、$\boldsymbol{v}_B$（应注意，$|\boldsymbol{v}_A| = |\boldsymbol{v}_B| = v$），因此速度增量 $\Delta\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A$（图 1-9b）。按定义，加速度为

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A}{\Delta t}$$

从图 1-9 中可以看出，三角形 OAB 和三角形 $O'A'B'$ 是两个相似的等腰三角形，它们的对应边成比例，即

$$\frac{|\Delta\boldsymbol{v}|}{v} = \frac{|\Delta\boldsymbol{r}|}{R}$$

两边各除以 Δt，得

$$\frac{|\Delta\boldsymbol{v}|}{\Delta t} = \frac{v}{R}\frac{|\Delta\boldsymbol{r}|}{\Delta t}$$

当 Δt 趋近于零时，B 点趋近于 A 点，$|\Delta\boldsymbol{r}|$ 趋近于弧长 ΔS，所以加速度的大小为