

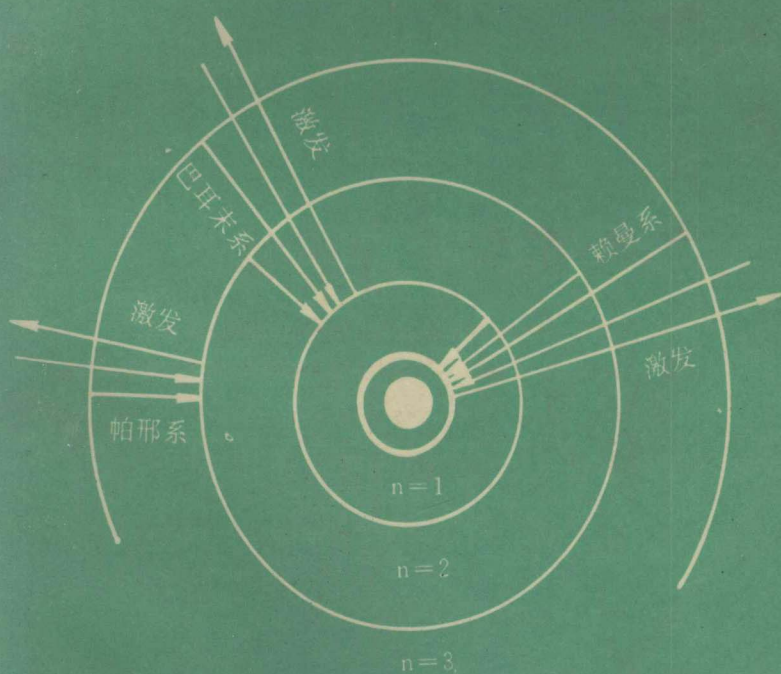
普通物理简明教程

● 主编 戴启润

● 副主编 周国运 王淑萍 熊永健 王栋臣

盛勇 李湘英 张献图

○ 高等学校试用教材
PU TONG WU LI
JIAN MING JIAO CHENG



西北大学出版社

普通物理简明教程

第二版

普通物理学教研室编

北京人民教育出版社

普通物理学简明教程(第二版)

普通物理学简明教程(第二版)

普通物理学简明教程(第二版)



北京人民教育出版社

高等学校试用教材

普通物理简明教程

主 编 戴启润
副主编 周国运 王淑萍 熊永健 王栋臣
 盛 勇 李湘英 张献图

西北大学出版社

普通物理简明教程

戴启润 主编

*

西北大学出版社出版发行

(西安市太白路)

新华书店经销 空军导弹学院印刷厂印刷

*

787×1092毫米 1/16开本 25.75印张 630千字

1996年6月第1版 1996年6月第1次印刷

印数：1—3060

ISBN7-5604-1098-7/O·74 定价：28.00元

前 言

普通物理学是理工科各专业最重要的一门基础课，已形成较完整的体系，相应的教材亦不乏上乘之作。在多年的教学实践中我们体会到，每种版本各有优劣，但一个共同的问题是内容庞杂、篇幅太大；过于传统，对近代物理学的各个分支介绍不够。为此，我们依据 1990 年国家教委颁布的最新大纲，以多年使用的讲义为蓝本，取各种版本之长，结合我们的教学经验与体会，编写了这本简明教程。

教材编写须遵循加强基础、强干减枝的原则。因此，我们在编写本教程时，特别强调内容精炼，普适性强；在注重科学性、启发性的同时，突出了应用性；同时力求做到重点突出、层次清楚，语言简洁、形象直观，例题充分、图文并茂。

全书共分五篇、二十章，内容包括力学、热学、电磁学、光学、近代物理诸方面。编写分工是：熊永健编写第一篇第一、二、三、四章；张献图编写第一篇第五章；王栋臣编写第二篇第一、二章；盛勇编写第三篇第一、二章；王淑萍编写第三篇第三、四、五章；周国运编写第四篇第一、二、三章；李湘英编写第三篇第六章、第五篇第一、二章；戴启润编写第五篇第三、四章。全书由戴启润负责统稿。谢根党参加了部分编写工作。

本书可满足以下三个层次的需要：(1)理科非物理专业本、专科教学；(2)工科各专业本、专科教学；(3)函授、成人教育、职业教育的理工科教学。此外，本书还可供理科物理类本、专科普通物理教学参考，也可供科研工作者及各类高校教师、学生参考。

本书在编写过程中得到了古杰一院长的大力支持，也得到潘隽老师的关照和帮助，在此一并表示感谢。

由于我们的水平所限，经验不足，加之时间仓促，缺点错误在所难免，恳请读者批评指正。

编者 1996.1

第一篇 力 学

第一章 质点运动学	(1)
§ 1.1 直线运动的速度和加速度	(1)
§ 1.2 平面运动	(7)
§ 1.3 抛体运动	(11)
§ 1.4 圆周运动	(12)
§ 1.5 运动描述的相对性	(15)
思考题	
习题	
第二章 质点动力学	(18)
§ 2.1 牛顿运动定律	(18)
§ 2.2 力学中常见的力	(19)
§ 2.3 牛顿定律应用举例	(21)
思考题	
习题	
第三章 力学中的守恒定律	(26)
§ 3.1 功和能	(26)
§ 3.2 机械能守恒定律	(30)
§ 3.3 冲量和动量	(33)
§ 3.4 动量守恒定律	(34)
§ 3.5 碰撞	(37)
§ 3.6 质点的角动量守恒定律	(39)
思考题	
习题	
第四章 刚体的转动	(44)
§ 4.1 刚体转动的描述	(44)
§ 4.2 转动惯量	(46)
§ 4.3 转动定律	(48)
§ 4.4 刚体绕定轴转动的动能定理	(50)
§ 4.5 刚体的角动量和角动量守恒定律	(52)
思考题	
习题	
第五章 机械振动和机械波	(55)
§ 5.1 谐振动	(55)

§ 5.2	谐振动的例子	(59)
§ 5.3	谐振动的合成	(62)
§ 5.4	阻尼振动	(66)
§ 5.5	受迫振动·共振	(67)
§ 5.6	机械波的产生和传播	(68)
§ 5.7	平面简谐波的表达式	(70)
§ 5.8	波动过程能量的传播	(73)
§ 5.9	波的干涉·驻波	(75)

思考题

习题

第二篇 气体分子运动论和热力学基础

第一章	气体分子运动论	(81)
§ 1.1	平衡态·状态参量	(81)
§ 1.2	温度·状态方程	(82)
§ 1.3	压强和温度的分子运动论解释	(85)
§ 1.4	麦克斯韦速率分布律	(89)
§ 1.5	玻耳兹曼分布律	(93)
§ 1.6	能量均分定理·理想气体的内能	(94)
§ 1.7	气体分子的平均自由程	(97)
§ 1.8	气体内的输运过程	(99)
§ 1.9	真实气体的范德瓦尔斯方程	(102)

思考题

习题

第二章	热力学基础	(107)
§ 2.1	准静态过程及其功	(107)
§ 2.2	热量·热力学第一定律	(108)
§ 2.3	热力学第一定律对理想气体的应用	(110)
§ 2.4	循环过程·卡诺循环	(116)
§ 2.5	热力学第二定律	(121)
§ 2.6	卡诺定理	(123)
§ 2.7	熵·熵增加原理	(124)
§ 2.8	热力学第二定律的统计意义	(127)

思考题

习题

第三篇 电磁学

第一章	真空中的静电场	(133)
§ 1.1	电荷	(134)
§ 1.2	库仑定律	(135)

§ 1.3	电场与电场强度	(138)
§ 1.4	电力线·电通量	(145)
§ 1.5	真空中静电场的高斯定理	(147)
§ 1.6	静电场的环路定律·电势能	(153)
§ 1.7	电势	(156)
§ 1.8	电场强度与电势的关系	(161)
思考题		
习题		
第二章	静电场中的导体和电介质	(167)
§ 2.1	静电场中的导体	(167)
§ 2.2	静电场中的电介质	(171)
§ 2.3	有电介质存在时的静电场和高斯定理	(173)
§ 2.4	导体的电容和电容器	(176)
§ 2.5	电场的能量	(179)
思考题		
习题		
第三章	稳恒电流	(185)
§ 3.1	电流与电流密度	(185)
§ 3.2	欧姆定律	(187)
§ 3.3	电流的功和功率·焦耳定律	(190)
§ 3.4	电源及其电动势	(192)
§ 3.5	含源电路欧姆定律	(193)
思考题		
习题		
第四章	稳恒磁场	(201)
§ 4.1	基本磁现象与安培假说	(201)
§ 4.2	磁感应强度·磁场中的高斯定理	(202)
§ 4.3	真空中电流的磁场	(204)
§ 4.4	安培环路定理	(209)
§ 4.5	磁场对载流导线的作用	(212)
§ 4.6	磁场对运动电荷的作用·带电粒子在电磁场中的运动	(217)
§ 4.7	物质的磁性	(222)
思考题		
习题		
第五章	电磁感应	(232)
§ 5.1	法拉第电磁感应定律	(232)
§ 5.2	动生电动势	(234)
§ 5.3	感生电动势·感生电场	(237)
§ 5.4	自感与互感	(239)

§ 5.5	涡电流	(243)
§ 5.6	磁场的能量	(244)

思考题

习题

第六章	电磁场理论的基本概念与电磁波	(249)
------------	-----------------------	-------

§ 6.1	位移电流	(249)
§ 6.2	电磁场理论的基本内容·麦克斯韦方程组的积分形式	(251)
§ 6.3	电磁波	(253)
§ 6.4	LC 振荡·电磁波的辐射	(255)

思考题

习题

第四篇 波动光学

第一章	光的干涉	(260)
------------	-------------	-------

§ 1.1	光的相干性	(260)
§ 1.2	分波面干涉	(263)
§ 1.3	薄膜干涉(一)——等倾干涉	(266)
§ 1.4	薄膜干涉(二)——等厚干涉	(269)
§ 1.5	干涉的应用	(272)

思考题

习题

第二章	光的衍射	(276)
------------	-------------	-------

§ 2.1	光的衍射现象·惠更斯-菲涅耳原理	(276)
§ 2.2	夫琅禾费单缝衍射	(277)
§ 2.3	光栅衍射	(281)
§ 2.4	夫琅禾费圆孔衍射·光学仪器的分辨率	(283)
§ 2.5	晶体对 X 射线的衍射	(284)

思考题

习题

第三章	光的偏振	(288)
------------	-------------	-------

§ 3.1	光的偏振性·偏振态	(288)
§ 3.2	偏振片的起偏和检偏·马吕斯定律	(289)
§ 3.3	反射和折射时光的偏振	(291)
§ 3.4	双折射及其偏振	(292)
§ 3.5	偏振光器件	(295)
§ 3.6	偏振光的干涉	(296)
§ 3.7	人为双折射·旋光现象	(297)

思考题

习题

第五篇 近代物理基础

第一章 狭义相对论基础	(301)
§ 1.1 狭义相对论的实验基础	(301)
§ 1.2 狭义相对论的基本原理	(305)
§ 1.3 狭义相对论的时空观	(310)
§ 1.4 相对论力学基础	(313)
习题	
第二章 光的量子性	(317)
§ 2.1 热辐射和基尔霍夫定律	(317)
§ 2.2 黑体辐射定律	(319)
§ 2.3 普朗克的能量子假说	(320)
§ 2.4 光电效应	(322)
§ 2.5 爱因斯坦的光子学说	(324)
§ 2.6 康普顿效应	(327)
思考题	
习题	
第三章 原子物理	(331)
§ 3.1 原子的核式结构模型	(331)
§ 3.2 原子光谱的实验规律	(334)
§ 3.3 玻尔的氢原子理论	(336)
§ 3.4 玻尔-索末菲理论	(341)
§ 3.5 碱金属原子的能级和光谱	(344)
思考题	
习题	
第四章 量子力学	(352)
§ 4.1 德布罗意假设及其实验验证	(352)
§ 4.2 测不准关系	(354)
§ 4.3 波函数及其统计解释	(356)
§ 4.4 薛定谔方程	(360)
§ 4.5 一维无限深势阱	(363)
§ 4.6 线性谐振子	(365)
§ 4.7 势垒贯穿	(370)
§ 4.8 氢原子	(374)
§ 4.9 电子自旋	(379)
§ 4.10 原子的电子壳层结构	(381)
§ 4.11 激光	(385)
思考题	
习题	

第一篇 力学

自然界中千姿百态的物质形态都处于永不停息的运动之中，运动是物质存在的形式和根本属性。运动的形式很多，如机械运动、分子热运动、电磁运动、化学运动和生物运动等。对各种运动形式的研究就形成了力学、热学、电磁学、化学、生物学等学科。

在物质的各种运动形式中，最普遍和最简单的运动形式是物体位置的变化，它包括物体间相对位置的变化及物体内各部分间相对位置的变化，这类运动形式称为机械运动。力学就是研究机械运动规律的科学。

机械运动是十分普遍的运动形式，如行星的运行、火箭的飞行、机器的运转、空气与水的流动、物体的形变等都是机械运动。另一方面，其它更高级的运动形式都包含着机械运动。所以，力学有十分广泛的应用领域，且它是研究其它学科的基础。

在本篇中所论述的力学内容称为牛顿力学或经典力学，它是牛顿三条运动定律为基础的。这三条运动定律是伟大的英国科学家牛顿在 17 世纪末总结出来的。经典力学描述宏观物体的低速运动是相当精确的。近代物理学的发展表明，高速运动的物体（速度接近光速）及微观粒子（如分子、原子）的运动规律不符合经典力学，它们必须分别用相对论和量子力学理论来描述，这些理论将在本书的近代物理部分讲述。

第一章 质点运动学

习惯上把力学分为运动学和动力学两部分。运动学描述运动，即说明物体如何运动；动力学解释运动，即说明物体为什么这样运动。本章引入描述质点运动的一些概念，并建立它们之间的关系。

§ 1.1 直线运动的速度和加速度

1. 质点

自然界中的物理过程往往是很复杂的，此时需对问题进行简化处理，忽略某些次要因素，建立理想化模型。质点就是一个简化模型，如研究地球绕太阳运行的轨道问题。太阳和地球的半径与它们之间的距离（即轨道半径）相比是微不足道的，地球的自转对轨道的影响也很小。在这种情况下，可忽略太阳和地球的大小以及地球的自转，而将它们看成两个点，这两个点分别具有太阳和地球的质量。这种把物体看成没有大小和形状、且具有物体全部质量的点，称为质点。物体能否简化为质点要看所研究的问题，而不能仅看大小。研究自转时，地球不能视为质点，一个星系甚至可以看成质点，而一只乒乓球在研究旋转时则不能看成质点。

质点模型不但可使问题简化，它也是研究复杂运动的基础。例如，研究地球的自转时，可以把地球分为许多足够小的部分，每小部分可视为质点，通过分析各质点的运动，就可以知道整个地球的自转情况。

2. 位移

质点作直线运动时，其运动情况可以用一根坐标轴来描述。设一质点沿 x 轴运动，它在某时刻的空间位置可用坐标 x 表示。如图 1-1-1，质点在 t_1 时刻位于 P 点，坐标为 x_1 ；在 t_2 时刻位于 Q 点，坐标为 x_2 。这段时间内质点的位置变化可用有向线段 PQ 表示， PQ 称为质点在这段时间内的位移。质点的位移定义为由质点的始位置到末位置的矢量。位移是矢量，其方向是从始位置指向末位置，大小等于始末位置间的距离。例如位移 PQ ，其方向是由 P 指向 Q，大小为 $|PQ| = |x_2 - x_1| = \Delta x$ 。

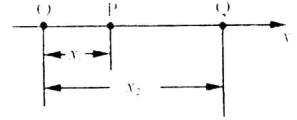


图 1-1-1 直线运动的位移

注意区分位移与路程两个概念。路程是质点所经过的实际距离，与运动过程有关；位移只与始末位置有关，而与运动过程无关。位移是矢量，有大小和方向，路程是标量，只有大小。当 $\Delta x > 0$ 时，位移沿 x 轴正向；当 $\Delta x < 0$ 时，位移沿 x 轴负向。所以在直线运动情况下，位移可以用坐标差 Δx 表示而不需用矢量形式， Δx 的符号就表示了位移的方向。

3. 平均速度·瞬时速度

平均速度定义为位移与时间间隔 ($\Delta t = t_2 - t_1$) 的比值，用 \bar{v} 表示。 \bar{v} 是矢量，其方向与位移的方向相同，大小为

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (1-1-1)$$

平均速度是一段时间内的平均值。为了详尽描述质点的运动，需要知道质点在某时刻或在其路径上的某一点处的速度，这个速度称为瞬时速度（简称速度）。瞬时速度可以用如下方法得到：当 Δt 取得越小，即 Q 点越接近 P 点时，所得到的平均速度就越接近于 P 点的瞬时速度。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，所得到的平均速度的极限就是 P 点的瞬时速度。用 v 表示瞬时速度，则 v 的大小为

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (1-1-2)$$

即 v 是 x 对 t 的一阶导数。 v 的方向与质点在该点的运动方向相同。瞬时速度比平均速度更精确地说明质点在各点处的运动快慢。在以后的讨论中，除非特别指明，讲到速度就指的是瞬时速度。

速度是矢量，但在直线运动下，速度只有两个方向，即沿 x 轴的正向或负向。当 $v > 0$ 时，质点向 x 轴正向运动；当 $v < 0$ 时，质点向 x 轴负向运动。所以 v 的代数符号能说明速度的方向，在直线运动情况下，可以不用速度的矢量表达式 \mathbf{v} ，而直接用代数形式 v 。

质点运动时，坐标随时间而变化，即 x 是 t 的函数，

$$x = x(t) \quad (1-1-3)$$

该式称为质点作直线运动的运动方程。由式(1-1-2)知道了运动方程后，将 x 对 t 求一阶导数就得质点的速度。

在国际单位制中，时间的单位是 s (秒)，长度的单位是 m(米)，速度的单位是 $m \cdot s^{-1}$ (米·秒⁻¹)。

例 1-1-1 一质点沿 ox 轴作直线运动，运动方程为 $x = 10 + 5t^2$ ，式中各量均采用国际单位制。试求：

- (1) 质点从 3s 到 6s 时间间隔内的位移；
- (2) 质点在该时间内的平均速度；
- (3) 质点在 3s 时的速度。

解 (1) 在 $t = 3s$ 时，质点的坐标为

$$x_1 = 10 + 5 \times 3^2 = 55(\text{m})$$

在 $t_2 = 6s$ 时，质点的坐标为

$$x_2 = 10 + 5 \times 6^2 = 190(\text{m})$$

质点的位移为

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 135(\text{m})$$

(2) 根据平均速度的定义

$$\bar{v} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{135}{3} = 45(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

(3) 质点的速度为

$$v = \frac{dx}{dt} = 10t$$

在 $t = 3s$ 时的速度为

$$v = 10 \times 3 = 30(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

4. 平均加速度 · 瞬时加速度

物体运动时，速度一般也是变化的，可引入加速度来描述速度随时间的变化。如图 1-1-2，质点在 P、Q 两点的速度分别为 v_1 和 v_2 ，质点在这段时间内的速度的增量为 $\Delta v = v_2 - v_1$ 。质点在 Δt 时间内的平均加速度定义为速度的增量与时间间隔的比值，用 \bar{a} 表示。 \bar{a} 的大小为

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} \quad (1-1-4)$$

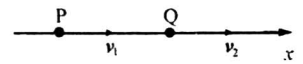


图 1-1-2 直线运动的速度

\bar{a} 的方向与 Δv 的方向相同。

同定义瞬时速度一样，可以定义质点在某时刻或某位置处的加速度，称为瞬时加速度（简称加速度）。加速度是平均加速度的极限，用 a 表示， a 的大小为

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (1-1-5)$$

由式(1-1-2)， $v = dx/dt$ ，所以

$$a = \frac{d}{dx} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (1-1-6)$$

即加速度等于速度对时间的一阶导数或等于坐标对时间的二阶导数。

当加速度与速度方向相同时，速度随时间而增加，质点作加速直线运动。当加速度与速度方向相反时，速度随时间而减少，质点作减速直线运动。当加速度恒定不变时，质点作匀变速直线运动。在国际单位制中，加速度的单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ (米 · 秒⁻²)。

例 1-1-2 一质点作直线运动, 运动方程为 $x = 20t - 5t^3$, 式中各量均采用国际单位制。

试求:

(1) $t_1 = 2\text{s}$ 到 $t_2 = 4\text{s}$ 这段时间内的平均加速度;

(2) 任意时刻的加速度的表达式;

(3) $t = 2\text{s}$ 时的加速度。

解 (1) 由 $x = 20t - 5t^3$ 可得质点任意时刻的速度为

$$v = \frac{dx}{dt} = 20 - 15t^2 \quad (\text{a})$$

在 $t_1 = 2\text{s}$ 时, 质点的速度为

$$v_1 = 20 - 15 \times 2^2 = -40(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

在 $t_2 = 4\text{s}$ 时, 质点的速度为

$$v_2 = 20 - 15 \times 4^2 = -220(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

这段时间内质点的平均加速度为

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{-220 - (-40)}{4 - 2} = -90(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

(2) 由式(a)可得加速度的表达式

$$a = \frac{dv}{dt} = -30t \quad (\text{b})$$

当 $t = 2\text{s}$ 时

$$a = -30 \times 2 = -60(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

5. 匀变速直线运动

当质点作匀变速直线运动时, 它的加速度是恒定的, 大小和方向都不变。这是一种很普遍的运动形式, 如汽车的发动与刹车, 物体的自由下落等过程。

当质点作匀变速直线运动时, 它的速度是均匀变化的, 所以质点在任意时间间隔内的平均加速度 \bar{a} 就等于加速度 a 。在式(1-1-4)中, 用 a 替换 \bar{a} , 则

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

令 $t_1 = 0$, t_2 为任意时刻 t , $v_1 = v_0$ 为 $t = 0$ 时的速度, v 为 t 时刻的速度, 上式为

$$a = \frac{v - v_0}{t}$$

即

$$v = v_0 + at \quad (1-1-7)$$

这就是匀变速直线运动的速度公式。

质点的位移可以从平均速度得到。在式(1-1-1)中, 令 $t_1 = 0$, $x_1 = x_0$, 则

$$x = x_0 + \bar{v}t$$

在匀变速直线运动中, 速度是从 v_0 均匀地变到 v 的, 所以平均速度为 $\bar{v} = (v + v_0) / 2$, 代入上式得

$$x = x_0 + \frac{1}{2}(v + v_0)t$$

由式(1-1-7), $v = v_0 + at$, 代入上式得

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1-1-8)$$

把式(1-1-7)与(1-1-8)联立, 消去 t 后得

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0) \quad (1-1-9)$$

式(1-1-7)、(1-1-8)和(1-1-9)是匀变速直线运动的一般方程。当质点静止地由原点出发时, $x_0 = v_0 = 0$, 有

$$v = at \quad (1-1-10a)$$

$$x = \frac{1}{2} at^2 \quad (1-1-10b)$$

$$v^2 = 2ax \quad (1-1-10c)$$

加速度为零是匀变速直线运动的一个特例, 此时质点的速度保持不变, 作匀速直线运动, 运动方程为

$$v = \text{恒量}, \quad x = x_0 + vt \quad (1-1-11)$$

例 1-1-3 小球自 14.7m 的高度, 沿一建筑物的边缘以 $9.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的初速度向上抛出(图 1-1-3), 达到最高点后自由落下, 试求:

- (1) 球体所达到的最大高度和经过的时间;
- (2) 球体再回到原出发位置时的速度和所需的时间;
- (3) 小球落地时的速度。

解 小球有向下的加速度 g , g 是由重力产生的, 称为重力加速度。 g 随离地的高度而变化, 在高度变化不太大的情况下, g 的变化很小, 可以看成是恒量。忽略空气阻力, 将 g 视为恒量, 这种竖直方向上的理想化的运动称为自由落体运动。在地面附近, g 取的值为 $9.8\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

如图, 取竖直向上方向为 y 轴正向, 把原点取在小球抛出点。重力加速度取负值, 初始条件为: 当 $t = 0$ 时, $y_0 = 0$, $v_0 = 9.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。小球的运动方程如下:

$$y = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (a)$$

$$v = v_0 - g t \quad (b)$$

$$v^2 = v_0^2 - 2g y \quad (c)$$

(1) 小球到达最高点时, 速度为零。将 $v = 0$ 代入式(c), 可得小球到达的最大高度为

$$y = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{9.8^2}{2 \times 9.8} = 4.9(\text{m})$$

在式(b)中, 令 $v = 0$, 解得

$$t = \frac{v_0}{g} = \frac{9.8}{9.8} = 1(\text{s})$$

即经过 1s, 小球达到最大高度。

(2) 当小球回到抛出点时, 其坐标为零。在式(c)中, 令 $y = 0$, 得

$$v = \pm v_0 = \pm 9.8(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$$

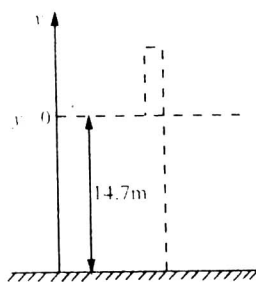


图 1-1-3

小球回到抛出点时向下运动，所以速度应为 $v = -9.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

将 $v = -9.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 代入式(b)中，解得小球回到抛出点所经历的时间为

$$t = \frac{v_0 - v}{g} = \frac{9.8 - (-9.8)}{9.8} = 2(\text{s})$$

(3) 小球落到地面时，其坐标为 $y = -14.7\text{m}$ ，将此值代入式(c)可得

$$v = \pm\sqrt{v_0^2 - 2gy} = \pm\sqrt{9.8^2 - 2 \times 9.8 \times 14.7} = \pm 19.6(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$$

负号表示向下运动，是所求的答案。

为了加深理解，读者可选取下列几种坐标重复本题的计算：(a) y 轴向上，原点取在地面；(b) y 轴向下，原点分别取在抛出点和地面。

6. 变加速直线运动

质点作变加速直线运动时，其加速度随时间而变化，要从加速度求出速度和坐标，必须利用积分。

若知道加速度的变化规律 $a = a(t)$ ，由 $a = dv/dt$ 得

$$dv = a dt$$

上式两边进行定积分，得

$$v - v_0 = \int_{v_0}^v dv = \int_{t_0}^t a dt$$

定积分的上、下限表示，质点在 t_0 时刻的速度为 v_0 ，在 t 时刻的速度为 v 。通常取 $t_0 = 0$ ，则

$$v = v_0 + \int_0^t a dt \quad (1-1-12)$$

得到质点的速度后，由 $v = dx/dt$ ，得

$$dx = v dt$$

对上式定积分得

$$x - x_0 = \int_{x_0}^x dx = \int_{t_0}^t v dt$$

定积分的上、下限分别表示质点在 t_0 时刻的坐标为 x_0 ，在 t 时刻的坐标为 x 。取 $t_0 = 0$ ，则

$$x = x_0 + \int_0^t v dt \quad (1-1-13)$$

因此，知道了加速度 $a(t)$ 及初始条件 (x_0, v_0) 后，质点在任意时刻的速度及坐标可由式(1-1-12)和(1-1-13)积分得到。

例 1-1-4 试用积分方法推导匀变速直线运动的运动方程。

解 选取初始条件为当 $t_0 = 0$ 时， $x_0 = 0$ ， $v = v_0$ 。在式(1-1-12)和(1-1-13)中， a 是常数，有

$$v = v_0 + \int_0^t a dt = v_0 + at \quad (a)$$

$$x = x_0 + \int_0^t (v_0 + at) dt = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (b)$$

根据 $a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v \frac{dv}{dx}$ ，有 $v dv = a dx$

两边同时积分得

$$v^2 - v_0^2 = 2ax \quad (c)$$

§ 1.2 平面运动

我们已经知道如何描述物体沿一直线上的运动，本节要介绍的是运动叠加原理。这一原理说明，质点在一平面上的运动可当作两个相互独立的直线运动来处理。

1. 运动叠加原理

先看一个实验。图 1-1-4 是一演示实验的示意图，该装置使 A、B 两球同时开始运动，其中 A 球作自由落体运动，B 球作抛体运动。利用闪光照像发现，B 球与 A 球在铅直方向上每秒钟内下降的距离相等。对 B 球来说，不管它在水平方向如何运动，重力使它在铅直方向上仍按自由落体的规律下落。这一现象说明物体在水平和竖直方向上的运动是相互独立的，称为运动独立性原理。这一结论也可理解为物体的运动可以看成几个各自独立进行的运动叠加而成，称为运动的叠加性原理。

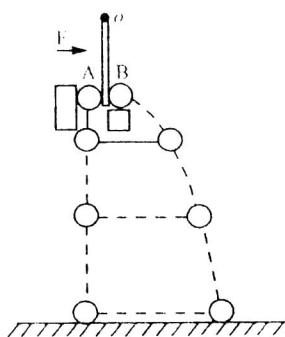


图 1-1-4

平面运动是二维运动，通常将它分解为两个相互垂直方向上的直线运动。例如上面的实验中，B 球作复杂的抛物线运动。后面将看到，这个运动可分解为两个很简单的直线运动——水平方向的匀速直线运动和铅直方向的自由落体运动。质点在三维空间的曲线运动，可以分解为三个相互垂直方向上的直线运动。

运动的合成与分解的特性和矢量的合成与分解的特性是一致的，所以运动学的几个主要的量（位移、速度和加速度）都是矢量。

2. 平面运动的位矢和坐标

质点在平面上运动时，需用平面直角坐标系来描述。如图 1-1-5，设有一质点在 oxy 平面上，沿一路径从 P 点运动到 Q 点。质点在 P 点的位置可用由原点指向 P 点的矢量 \mathbf{r} 表示， \mathbf{r} 叫做位置矢量，简称位矢。质点在 P 点的位置也可用该点的坐标 (x, y) 表示。位矢与坐标的关系如下

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} \quad (1-1-14)$$

\mathbf{i} 、 \mathbf{j} 分别是 x 轴和 y 轴的单位矢量。上式表明坐标是位矢在坐标轴上的投影。

质点运动时，位矢和坐标随时间连续变化，即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-1-15)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-1-16)$$

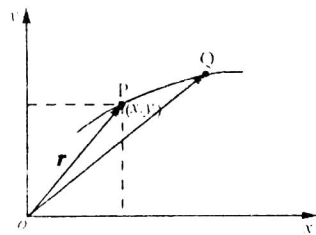


图 1-1-5 平面运动的位矢和坐标

式(1-1-15)或(1-1-16)称为质点的运动方程。

质点运动所经历的路径，称为质点运动的轨迹或轨道。式(1-1-16)是轨道的参数方程，消除参数 t 可得轨道方程。

3. 平面运动的位移和速度

质点沿图 1-1-6 中的曲线运动，在 t 时刻处于 P 点，在 $t + \Delta t$ 时刻运动到 Q 点。质点