大学基础物理学习与解题指导

力学

苏云荪　崔开海　唐建国　编

上海科学技术出版社

大学基础物理学习与解题指导

力　学

苏云荪　崔开海　唐建国　编

上海科学技术出版社

内容提要

本书为力学篇，全书共十章，根据丛书的统一格式，每章有四个部分组成。第一部分介绍目的和要求。第二部分是内容提要，提纲挈领地阐述有关物理概念、定理、公式和结论。第三部分是例题，也是四个组成部分的主体部分。本书提供241道典型例题，介绍如何根据第二部分的提要性内容解算物理习题，以巩固深化物理概念和进一步理解物理定律，并培养解题的能力、技巧和方法。第四部分是习题(均附答案)，本书共收集266道习题，给读者自行练习和自我检查提供相应的习题资料。

本书适用面较广，可供理、工科大学生以及有相同水平的自学者阅读，尤其适用于理科物理专业或相近专业的大学生，同时也可供有关教师参考。

大学基础物理学习与解题指导

力　学

[illegible]云荪　崔开海　唐建国　编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行　江苏泗阳印刷厂印刷

开本 787×1092　1/32　印张 12.75　字数 281,000

1987年12月第1版　1987年12月第1次印刷

印数：1—5,900

ISBN7-5323-0571-6/ 0·53

统一书号：13119·1432　　定价：2.65元

大学基础物理学习与解题指导

1. 力 学

苏云荪 崔开海 唐建国 编 （华东师大、上海大学）

2. 电 学

张民生 吴庭竺 张梦心 编 （上海师范大学）

3. 光 学

王筱生 包 仁 朱涵如 编 凌德洪 校（苏州大学）

4. 热学与分子物理学

方小敏 沈启舜 陆汉忠 编 贾起民 校（复旦大学）

5. 原子物理学

陆汉忠 陈建新 编 （复旦大学）

序　言

大学基础物理是一门概念性很强的课程，除此之外，习题训练也是这门课程的一个重要方面。本书是一套丛书的力学部分，这套丛书主要是为了后者的目的服务的。

既然重点是解题指导，所以在物理基本内容的阐述和分析方面，就不可能象一般教材那么仔细。但是如果配合教材学习或复习，或许可以起到总结的作用。另一方面，在例题所涉及的方面和对这些例题的解算方法和技巧，则似应不能低于一般教材中的相应要求，甚至应该更为详尽。从这两方面说，它与教材是起着相辅相成作用的。

本书的系统与现行普通物理教材的理论系统基本相同，但在个别问题上，与教材的要求并不完全相同，例如，对振动问题中的Q值和固体弹性中弯曲和扭转的讨论方面，比一般教材要求稍高，而一般教材中的某些介绍性内容，例如声学中的音调和音品，或者虽然概念重要，但对运算要求不高的内容，例如惠更斯原理，则比一般教材的要求稍低，有的甚至没有讲到。除了与编者的主观看法有关外，这恐怕也是由本书的性质决定的。

编写本书的分工情况如下：苏云荪编写各章的目的要求和内容提要，并提供了一定数量的例题和习题，崔开海和唐建国分别编写第一章至第五章和第六章至第十章的例题和习题，在此基础上，编者之间对各章内容进行综合研究，最后由

苏云荪负责审定。虽经上述种种努力，但由于编者水平所限，错误不妥之处在所难免，恳请读者给予批评指正。

编写本书时除参考了某些国外的教科书外，还参考了以下几本通用教材：

1. 赵景员、王淑贤：力学
2. 漆安慎、杜婵英：力学基础
3. 程守洙、江之永：普通物理学
4. 马文蔚、柯景凤：物理学

本书中有个别例题是从以上几本教材中移植过来或重新改写的，编者在此对有关作者谨表谢意。

编　者

1986年8月

目　　录

第一章 点的运动学

本章目的

1. 掌握位矢、位移、速度和加速度概念。

2. 熟悉速度和加速度的几种常见分量形式。

3. 练习直线运动、圆周运动和抛物运动等几种常见运动学问题的解法。

4. 掌握相对运动概念以及相应的速度合成和加速度合成公式。

内容提要

I. 引言

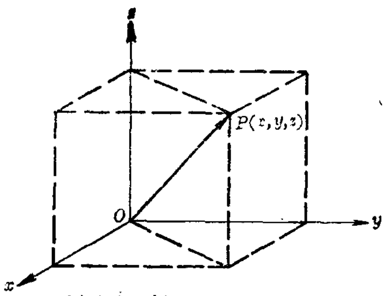
机械运动 物体之间或物体内部各部分之间相对位置发生变化的过程。它是最简单和最普遍的一种运动形式。

力学 研究系统在力作用下运动规律的学科，但也常指研究机械运动规律及其应用的学科，这时又称为牛顿力学或经典力学。

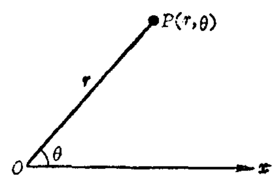
运动学、静力学和动力学 经典力学的三个分支。运动学只从几何角度描写系统的运动而不究其发生的原因；静力学讨论物体在外力作用下维持平衡的条件；动力学讨论物体在外力作用下表现的运动规律。

参照系 又称参考系，是为了确定物体的位置和描写其运动而选作基准的另一物体或相对静止的物体系。牛顿力学认为，时间的流逝不因参照系的不同选择而有不同。

坐标和坐标系 在一定的参照系中，为了用数量来描写空间一点的位置而按规定方法选取的一组有次序的数，称为坐标。在某一问题中所规定的坐标取法称为该问题的坐标系。常用的坐标有直角坐标 (x, y, z) 和平面极坐标(r, θ)，它们的规定方法如图 1-1 所示。



(a) 直角坐标



(b) 极坐标

图 1-1

II. 位矢、位移、速度和加速度

位矢 从直角坐标系原点 O 引向动点 P 的矢量 $\overrightarrow{OP}$ 称为 P 点对 O 点的位矢或矢径，常用 $\boldsymbol{r}$ 表示(图 1-1(*a*))：

$$\boldsymbol{r}=\overrightarrow{OP} \tag{1-1}$$

位移和路程 在一指定的坐标系中，B 点的位矢 $\boldsymbol{r}_B$ 减去 A 点的位矢 $\boldsymbol{r}_A$，即 $\boldsymbol{r}_B-\boldsymbol{r}_A$，称为 B 点相对于 A 点的位移，通常记为 $\Delta\boldsymbol{r}$(图 1-2)：

$$\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_B-\boldsymbol{r}_A \tag{1-2}$$

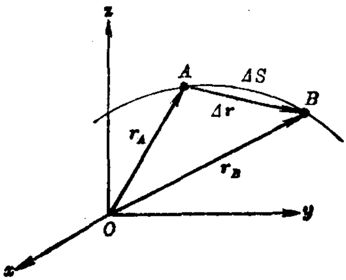


图 1-2

如果动点在时刻 t 从 A 点经过时间 Δt 运动到 B 点，则上述 $\Delta \boldsymbol{r}$ 称为动点从时刻 t 到时刻 $t+\Delta t$ 所经历的位移。

当 $\Delta t \to 0$ 时，位移的大小(或绝对值)称为这段无穷小时间中经过的路程。在有限的一段时间中经过的路程是指，把这段有限时间分割成许多无穷小时间间隔，然后把这许多无穷小时间中的路程相加所得的结果。

平均速度 如动点从时刻 t 到时刻 $t_1=t+\Delta t$ 所经历的位移是 $\Delta \boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t_1)-\boldsymbol{r}(t)$，则把 $\Delta \boldsymbol{r}$ 与 Δt 之比称为该动点在这段时间 Δt 中的平均速度，通常记为 $\bar{\boldsymbol{v}}$：

$$\bar{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\boldsymbol{r}(t_1)-\boldsymbol{r}(t)}{t_1-t}。\tag{1-3}$$

瞬时速度 t_1 无限趋近 t 时的平均速度称为在时刻 t 的瞬时速度，也简称为速度，记为 $\boldsymbol{v}$ 或 $\boldsymbol{v}(t)$：

$$\boldsymbol{v}=\lim_{t_1\to t}\frac{\boldsymbol{r}(t_1)-\boldsymbol{r}(t)}{t_1-t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}。\tag{1-4}$$

表示瞬时速度的极限值又记为 $d\boldsymbol{r}/dt$。如果把 $d\boldsymbol{r}$ 和 dt 分别理解为 $\Delta \boldsymbol{r}$ 和 Δt 的极限，于是又可写为

$$d\boldsymbol{r}=\boldsymbol{v}dt。\tag{1-5}$$

瞬时速度的大小称为速率。

平均加速度 动点速度的增量 $\Delta \boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}(t_1)-\boldsymbol{v}(t)$ 与获得这增量的时间 $\Delta t=t_1-t$ 之比称为该动点在这段时间中的平均加速度，记为 $\bar{\boldsymbol{a}}$：

$$\bar{\boldsymbol{a}}=\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}=\frac{\boldsymbol{v}(t_1)-\boldsymbol{v}(t)}{t_1-t}。\tag{1-6}$$

瞬时加速度 t_1 无限趋近 t 时的平均加速度称为在时刻 t 的瞬时加速度，也简称为加速度，记为 $\boldsymbol{a}$ 或 $\boldsymbol{a}(t)$：

$$\boldsymbol{a}=\lim_{t_1\to t}\frac{\boldsymbol{v}(t_1)-\boldsymbol{v}(t)}{t_1-t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}。\tag{1-7}$$

如用 $d\boldsymbol{v}$ 和 dt 分别表示 $\Delta \boldsymbol{v}$ 和 Δt 的极限，则

$$d\boldsymbol{v}=\boldsymbol{a}dt。\tag{1-8}$$

III. 分量表示

以 dy/dx 表示函数 $y=f(x)$ 随自变量 x 的变化率（或 y 对 x 的导数），也就是

$$\frac{dy}{dx}=\lim_{\Delta x\to 0}\frac{f(x+\Delta x)-f(x)}{\Delta x}=\lim_{\Delta x\to 0}\frac{\Delta y}{\Delta x}。\tag{1-9}$$

这时可以把位矢 $\boldsymbol{r}$、速度 $\boldsymbol{v}$ 和加速度 $\boldsymbol{a}$ 写成分量形式。

直角分量式 以 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别表示直角坐标系 $Oxyz$ 沿 Ox、Oy 和 Oz 轴方向的单位矢量，(x, y, z) 表示动点的直角坐标，$\boldsymbol{v}$ 和 $\boldsymbol{a}$ 表示动点相对于该坐标系的速度和加速度，则

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k},\tag{1-10}$$

$$\boldsymbol{v}=\frac{dx}{dt}\boldsymbol{i}+\frac{dy}{dt}\boldsymbol{j}+\frac{dz}{dt}\boldsymbol{k},\tag{1-11}$$

$$\boldsymbol{a}=\frac{dv_x}{dt}\boldsymbol{i}+\frac{dv_y}{dt}\boldsymbol{j}+\frac{dv_z}{dt}\boldsymbol{k}。\tag{1-12}$$

极坐标分量式 以 $\boldsymbol{e}_r$ 表示位矢方向的单位矢量，以 $\boldsymbol{e}_\theta$ 表示把 $\boldsymbol{e}_r$ 向 θ 增加的转向转过 $90°$ 所得到的单位矢量，对于

绕着极点在圆轨道上运动的动点来说，位矢、速度和加速度的分量表示式分别是(图1-3)

$$\boldsymbol{r}=r\,\boldsymbol{e}_r, \tag{1-13}$$

$$\boldsymbol{v}=r\,\omega\boldsymbol{e}_\theta, \tag{1-14}$$

$$\boldsymbol{a}=-r\omega^2\boldsymbol{e}_r+r\frac{d\omega}{dt}\boldsymbol{e}_\theta, \tag{1-15}$$

其中 $r=|\boldsymbol{r}|$ 是圆轨道半径，$\omega=d\theta/dt$，ω 称为动点绕极点运动的角速度，$d\omega/dt$ 称为动点绕极点运动的角加速度。在圆周运动中，$-\boldsymbol{e}_r$ 是指向圆心的单位矢量，$\boldsymbol{e}_\theta$ 是沿着圆轨道切线的单位矢量，所以把

$$a_n=r\omega^2 \tag{1-16}$$

$$a_\tau=r\frac{d\omega}{dt} \tag{1-17}$$

分别称为法向(或向心)加速度和切向加速度。

自然坐标分量式 以 $\boldsymbol{e}_\tau$ 表示沿动点轨迹（平面曲线）切向的单位矢量，$\boldsymbol{e}_n$ 表示沿动点轨迹法向(指向凹侧)的单位矢量(图1-4)，则动点的速度是

$$\boldsymbol{v}=v\boldsymbol{e}_\tau; \tag{1-18}$$

加速度是

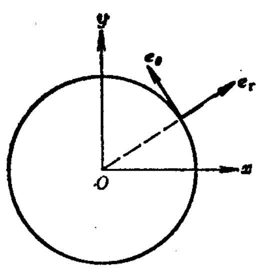


图 1-3

图 1-4

$$\boldsymbol{a} = \frac{dv}{dt}\boldsymbol{e}_\tau + \frac{v^2}{\rho}\boldsymbol{e}_n, \tag{1-19}$$

其中 $a_\tau = dv/dt$, $a_n = v^2/\rho$ 分别是加速度的切向分量和法向分量,ρ 是曲线上动点所在处的曲率半径。

IV. 轨迹方程

动点在运动时，其坐标随着时间 t 而变化。如果从各坐标随时间 t 变化的关系式中消去时间 t，可得出各坐标之间的直接关系式，这个关系式是动点轨道的方程，称轨迹方程。坐标随时间 t 变化的函数表示式本身则是轨迹的参数方程。

V. 由速度分量求位移分量和由加速度分量求速度分量

如果已知速度的直角分量 $v_x(t)$，则从时刻 t_1 到时刻 t_2 的位移分量

$$x(t_2) - x(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} v_x(t)dt。 \tag{1-20}$$

在数学中，上式右边称为 $v_x(t)$在时间 $[t_1, t_2]$ 中的定积分，也就是把这段时间分割成许多无穷小时间间隔 dt，并把这些无穷小时间间隔中经过的位移 $dx = v_x(t)dt$ 累加的结果。定积分的计算是高等数学中的一个课题（称为积分法），其原则思想是，任意找一个函数 $F(t)$，使其导数等于 $v_x(t)$，于是这个定积分的结果就是

$$\int_{t_1}^{t_2} v_x(t)dt = \left[F(t)\right]_{t_1}^{t_2} \quad。 \tag{1-21}$$

这个方程的右边表示 $F(t_2) - F(t_1)$。

类似地，由加速度分量求速度分量的公式是

$$v_x(t_2) - v_x(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} a_x(t)dt, \tag{1-22}$$

其中

$$\int_{t_1}^{t_2} a_x(t)dt = [G(t)]_{t_1}^{t_2}, \tag{1-23}$$

且 $dG/dt = a_x(t)$。等等。

如果 t_2 指任意时刻 t，t_1 指初时刻 t_0，则(1-20)和(1-22)两式分别成为由速度求运动规律和由加速度求速度的 x 分量表示式。

VI. 几种简单运动的运动学公式

匀变速直线运动 设动点沿 x 轴运动，加速度、速度和位矢的分量分别是 a、v 和 x，则

$$v = v_0 + at, \tag{1-24}$$

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2, \tag{1-25}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0), \tag{1-26}$$

其中 v_0 和 x_0 是 $t=0$ 时刻的 v 值和 x 值。

圆周运动 以 v 表示速度(切向)，a_τ 和 a_n 分别表示加速度的切向分量和法向分量，ω 和 β 分别表示角速度和角加速度，R 表示圆周半径，则

$$v = R\omega, \tag{1-27}$$

$$a_\tau = R\beta, \tag{1-28}$$

$$a_n = R\,\omega^2 = \frac{v^2}{R}。 \tag{1-29}$$

当角加速度为常数，并用 θ 表示转过的角度时，则

$$\omega = \omega_0 + \beta t, \tag{1-30}$$

$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2}\beta t^2, \tag{1-31}$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\beta(\theta - \theta_0), \tag{1-32}$$

其中 ω_0 和 θ_0 分别是 $t=0$ 时的 ω 值和 θ 值。

斜抛运动 水平方向(x轴方向)作匀速 ($a_x=0$) 运动，竖直向下方向(y 轴反方向)以加速度 $-a_y=g=9.8$ 米/秒^{2}作匀加速运动的运动称为抛物运动。抛物运动是在地面附近被抛出的物体在不计空气阻力时所进行的运动。以 v_0 表示 $t=0$ 时的速率，α 表示初速 $\boldsymbol{v}_0$ 与 x 轴的夹角(仰角为正，倾角为负)，则抛物运动的速度分量式是

$$v_x=v_0\cos\alpha, \tag{1-33}$$

$$v_y=v_0\sin\alpha-gt。 \tag{1-34}$$

设 $t=0$ 时 $x=y=0$，则抛物运动的运动规律是

$$x=v_0t\cos\alpha, \tag{1-35}$$

$$y=v_0t\sin\alpha-\frac{1}{2}gt^2。 \tag{1-36}$$

轨迹方程是

$$y=x\,\mathrm{tg}\,\alpha-\frac{g}{2v_0^2\cos^2\alpha}x^2。 \tag{1-37}$$

水平射程(斜上抛)是

$$L=\frac{v_0^2}{g}\sin 2\alpha。 \tag{1-38}$$

抛高(斜上抛)是

$$H=\frac{v_0^2}{2g}\sin^2\alpha。 \tag{1-39}$$

VII. 相对运动

绝对速度和绝对加速度 动点相对于定系的速度和加速度。常表作 $\boldsymbol{v}$ 和 $\boldsymbol{a}$。

相对速度和相对加速度 动点相对于动系的速度和加速度。常表作 $\boldsymbol{v}'$ 和 $\boldsymbol{a}'$。

牵连速度和牵连加速度 动系上与动点瞬时重合的那一点在定系中的速度和加速度。常表作 $\boldsymbol{v}_e$ 和 $\boldsymbol{a}_e$。

当动系在定系中平动(运动时坐标轴方向不变)时，有

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_e+\boldsymbol{v}'\text{(速度合成公式)}, \tag{1-40}$$

$$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}_e+\boldsymbol{a}'\text{(加速度合成公式)}。 \tag{1-41}$$

这时 $\boldsymbol{v}_e$ 和 $\boldsymbol{a}_e$ 也是动系的坐标原点在定系中的速度和加速度。

解 题 示 例

【例1-1】 一动点沿 x 轴的运动规律是 $x=t^2-6t-2$，其中 x 以米计，t 以秒计。(1)求动点的速度和加速度；(2)求前6秒内动点的位移、路程、平均速度、平均速率和平均加速度；(3)作出动点的 $x-t$、$v-t$ 和 $a-t$ 图象。

解：(1) $$\boldsymbol{v}=\frac{dx}{dt}\boldsymbol{i}=(2t-6)\boldsymbol{i}\text{ 米/秒},$$

$$\boldsymbol{a}=\frac{dv}{dt}\boldsymbol{i}=2\boldsymbol{i}\text{ 米/秒}^2。$$

(2) $\Delta\boldsymbol{r}=\Delta x\boldsymbol{i}=[x(6)-x(0)]\boldsymbol{i}=0$。

Δx 也可以通过下面的积分得出：

$$\Delta x=\int_0^6 vdt=\int_0^6(2t-6)dt=[t^2-6t]_0^6=0。$$

路程 Δs 是速率的时间积分，而速率是

$$|\boldsymbol{v}|=\begin{cases}6-2t,\ 0\leqslant t\leqslant 3;\\ 2t-6,\ 3\leqslant t。\end{cases}$$

$$\therefore\quad \Delta s=\int_0^6|\boldsymbol{v}|dt=\int_0^3(6-2t)dt+\int_3^6(2t-6)dt$$
$$=18\text{ 米}。$$