何跃娟 陈国庆 吴亚敏 张薇 编著

大学物理教程学习指导

清华大学出版社

何跃娟 陈国庆 吴亚敏 张薇 编著

大学物理教程
学习指导

清华大学出版社
北 京

内容简介

本书与陈国庆、何跃娟等主编的《大学物理教程》配套。本书各章节顺序和主教材对应，共分9章，每一章均包括“基本要求”、“主要内容及例题”、“难点分析”及供学生课后练习的“练一练”，最后还附有自测卷。根据教育部高等学校教学指导委员会最新颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》的精神，提出了教学基本要求，给出了主要内容及例题，并对每一章的学习难点进行分析，全书联系教学实际，注重实用性。

本书可作为高等学校理工科非物理类专业60～90学时大学物理辅助教学用书，也可供其他读者学习物理使用。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理教程学习指导/何跃娟等编著. --北京：清华大学出版社，2013，1
ISBN 978-7-302-30793-8

Ⅰ. ①大… Ⅱ. ①何… Ⅲ. ①物理学—高等学校—教学参考资料 Ⅳ. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第287021号

责任编辑：邹开颜　赵从棉
封面设计：常雪影
责任校对：王淑云
责任印制：沈　露

出版发行：清华大学出版社
网　　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
地　　址：北京清华大学学研大厦A座　**邮　　编**：100084
社 总 机：010-62770175　**邮　　购**：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 装 者：三河市李旗庄少明印装厂
经　　销：全国新华书店
开　　本：165mm×225mm　**印　　张**：11.25　**字　　数**：193千字
版　　次：2013年1月第1版　**印　　次**：2013年1月第1次印刷
印　　数：1～3000
定　　价：22.00元

产品编号：048162-01

前言

本书是与陈国庆、何跃娟等主编的《大学物理教程》配套的辅助教材，适用于高等学校本科各专业学生 60～90 学时的大学物理课程的教辅用书。

大学物理是高等学校理工科各专业的一门重要的基础课，它对学生科学素质的提高、综合能力的培养、思维能力的训练等诸方面都起着重要的作用。近年来，高等学校中物理课程的设置也呈多样化，有些专业的大学物理的课时较少，为了使学生在较少学时的情况下能较深刻地理解物理概念，抓住每章的重点、难点，提高分析问题和解决问题的能力，把握学习的主动性，我们结合多年的教学实践经验，根据教育部高等学校教学指导委员会最新颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》，编写了《大学物理教程学习指导》，作为《大学物理教程》教材的辅助配套用书。

本书作为教材的配套用书，紧贴教学实际，注重教学实用性，全书和《大学物理教程》配套共分 9 章，每一章均包括“基本要求”、“主要内容及例题”、“难点分析”及供学生课后练习的“练一练”。例题在求解前都有分析，有的例题后还增加了“注意点”和“拓展”，以便于学生更好地领会和掌握。每一章后面的“练一练”是考虑课时的分配，合理安排了题量，并附有答案。本书最后还配有自测卷两份，供学生学完后自我检测。自测卷还附有详细的解答及评分标准，供学生自测成绩。书中带星号(*)部分供学有余力的学生选学。

本书由江南大学理学院物理系组织编写，具体分工为：第 1 章和第 8 章由张薇编写，第 2、3、4 章由何跃娟编写，第 5、6、7 章由吴亚敏编

写，第9章由陈国庆编写。全书由何跃娟、吴亚敏进行最后统稿。物理系的其他老师都参与了前期的讨论，提出了很好的建议，编者在此表示衷心的感谢。同时，感谢江南大学教务处领导和理学院领导的大力支持，感谢清华大学出版社邹开颜编辑对本书的出版作出的努力。

本书中少数插图及习题参考了一些大学物理教材，在此对相关作者表示感谢！

由于编者水平有限，书中定有不妥甚至错误之处，敬请批评指正。

编　者

2012年9月于无锡江南大学

目录

第1章 质点力学 时间 空间

一、基本要求

1. 通过质点概念的建立，理解理想模型法的意义。

2. 熟练掌握描述质点运动的四个物理量——位置矢量、位移、速度、加速度。

3. 理解运动方程的物理意义及作用，能熟练处理质点运动学两类问题：①已知质点运动方程确定质点的位置、位移、速度和加速度；②已知质点运动的加速度和初始条件，求其速度和运动方程。

4. 掌握曲线运动的自然坐标表示法。能熟练计算质点在平面内运动时的速度和加速度，及质点作圆周运动时的角速度、角加速度、切向加速度和法向加速度。

5. 了解惯性参照系及非惯性参照系的定义，了解牛顿运动定律的适用范围。正确理解力的概念。

6. 掌握几种常见的力(重力、弹性力和摩擦力)及力的分析方法。熟练掌握应用牛顿运动定律分析问题的基本思路和方法，能利用微积分求解一维变力作用下的质点动力学问题。

7. 掌握动量和冲量的概念，会计算一维变力的冲量。

8. 掌握动量定理和动量守恒定律，并能熟练应用。

9. 掌握功、功率和动能的概念，能计算直线运动情况下变力的功。

10. 掌握保守力做功的特点、势能的概念及物理意义，会计算引力势能、重力势能和弹力势能。

11. 掌握动能定理、功能原理和机械能守恒定律及其适用条件，并能熟练应用。

二、主要内容及例题

(一) 描述质点运动的四个物理量

1. 位置矢量 $\boldsymbol{r}$

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

物体运动时,位置矢量随时间而改变,即 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)=x(t)\boldsymbol{i}+y(t)\boldsymbol{j}+z(t)\boldsymbol{k}$,此式称为运动函数或运动方程,其分量式为

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

从中消去时间参数 t,可得质点运动轨迹方程。

2. 位移 $\Delta\boldsymbol{r}$

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

一般情况下,$|\Delta\boldsymbol{r}|\neq\Delta r$,如图 1-1 所示。

路程和位移不同,路程用 Δs 表示,一般 $\Delta s\geqslant|\Delta\boldsymbol{r}|$。

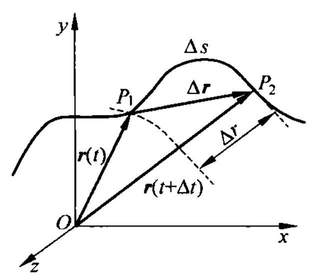

图 1-1

3. 速度 $\boldsymbol{v}$

平均速度

$$\bar{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t} \tag{1-4a}$$

瞬时速度(简称速度)

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

速度的大小即速率。瞬时速率(简称速率)

$$v=|\boldsymbol{v}|=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} \tag{1-5}$$

4. 加速度 $\boldsymbol{a}$

平均加速度

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

瞬时加速度(简称加速度)

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

例 1-1 已知一质点的运动方程 $\boldsymbol{r}=at^2\boldsymbol{i}+bt^2\boldsymbol{j}$(其中 a、b 为常数),则该质点作何运动?式中 r 的单位是 m,t 是单位是 s。

分析:质点运动的速度、加速度可通过对运动方程求导分别得出,而质点的轨迹方程为 $y=f(x)$,可由运动方程的两个分量式:$x=x(t)$,$y=y(t)$,从中消去时间 t 得到。

解答:因为速度 $\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=2at\boldsymbol{i}+2bt\boldsymbol{j}$,与时间有关,可初步断定质点作变速运动;而加速度 $\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=2a\boldsymbol{i}+2b\boldsymbol{j}$,与时间无关,故质点作匀变速运动。

由质点的运动方程可得相应的分量式

$$\begin{cases}x=at^2\\ y=bt^2\end{cases}$$

从上两式中消去时间 t 得轨迹方程 $y=\frac{b}{a}x$,这表明质点在 Oxy 平面上运动的轨迹是直线。

综合以上分析可知,该质点作匀变速直线运动。

注意:在分析质点作怎样的运动时,要从质点速度、加速度的特征及轨迹方程等几方面综合考虑再作判断。

例 1-2 质点作曲线运动,$\boldsymbol{r}$ 表示位置矢量,$\boldsymbol{v}$ 表示速度,$\boldsymbol{a}$ 表示加速度,s 表示路程,a_t 表示切向加速度,下列表达式:(1)$\mathrm{d}v/\mathrm{d}t=a$,(2)$\mathrm{d}r/\mathrm{d}t=v$,(3)$\mathrm{d}s/\mathrm{d}t=v$,(4)$|\mathrm{d}\boldsymbol{v}/\mathrm{d}t|=a_t$,哪个是对的?

分析:$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$表示切向加速度 a_t,它表示速度大小随时间的变化率,是加速度矢量沿速度方向的一个分量,起改变速度大小的作用;$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}$表示质量到坐标原点的距离随时间的变化率,在极坐标系中称为径向速率;$\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$在自然坐标系中表示质点的速率 v;$\left|\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}\right|$表示加速度的大小而不是切向加速度。

解答：以上 4 个式子中只有第(3)个是对的。

(二) 质点运动学的两类问题

1. 已知 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)$，求质点的位置、位移、速度和加速度——求导。

2. 已知 $\boldsymbol{a}(t)$和初始条件 $\boldsymbol{r}_0$ 和 $\boldsymbol{v}_0$，求其速度和运动方程——积分。

例 1-3 (1) 如图 1-2 所示，对于在 Oxy 平面内以原点 O 为圆心作匀速圆周运动的质点，试用半径 r、角速度 ω 和单位矢量 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$ 表示其 t 时刻的位置矢量。已知在 $t=0$ 时，$y=0$，$x=r$，角速度 ω 如图所示；(2) 由(1)导出速度 $\boldsymbol{v}$ 与加速度 $\boldsymbol{a}$ 的矢量表达式；(3) 试证加速度指向圆心。

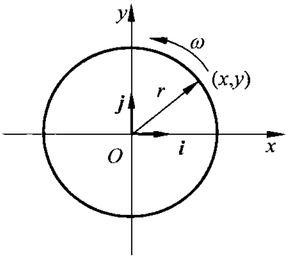

图 1-2

分析：该题属于运动学的第一类问题。首先应由题中已知条件写出质点运动方程，再由此求出描述质点运动的各个物理量。在确定运动方程时，用 $x=r\cos\omega t$，$y=r\sin\omega t$ 来表示圆周运动比较方便。

解答：(1) $\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}=r\cos\omega t\,\boldsymbol{i}+r\sin\omega t\,\boldsymbol{j}$

(2) $\boldsymbol{v}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=-r\omega\sin\omega t\,\boldsymbol{i}+r\omega\cos\omega t\,\boldsymbol{j}$

$$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=-r\omega^2\cos\omega t\,\boldsymbol{i}-r\omega^2\sin\omega t\,\boldsymbol{j}$$

(3) $\boldsymbol{a}=-\omega^2(r\cos\omega t\,\boldsymbol{i}+r\sin\omega t\,\boldsymbol{j})=-\omega^2\boldsymbol{r}$

这说明 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{r}$ 方向相反，即 $\boldsymbol{a}$ 指向圆心。

注意：描述质点运动的几个物理量(位矢、速度、加速度)都是矢量性，解题时应注意 r 与 $\boldsymbol{r}$、v 与 $\boldsymbol{v}$、a 与 $\boldsymbol{a}$ 的区别。

例 1-4 一质点沿 x 轴运动，其加速度大小为 $a=4t$，当 $t=0$ 时，$v_0=5\mathrm{m/s}$，$x_0=5\mathrm{m}$。求：(1)质点速度随时间的变化关系；(2) 质点的运动方程。

分析：该题属于运动学的第二类问题，即已知加速度求质点的速度和运动方程。由加速度定义有

$$a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=4t \quad (\text{一维运动可用标量式})$$

对上式分离变量，再由初始条件积分，可得质点速度和运动方程。

解答：(1) 因为

$$a = \frac{dv}{dt} = 4t$$

分离变量得

$$dv = 4t dt$$

由初始条件积分：

$$\int_{v_0}^{v} dv = \int_{0}^{t} 4t dt$$

解得

$$v = v_0 + 2t^2 = 5 + 2t^2 (m/s)$$

（2）由速度定义

$$v = \frac{dx}{dt} = 5 + 2t^2$$

分离变量得

$$dx = (5 + 2t^2) dt$$

由初始条件积分：

$$\int_{5}^{x} dx = \int_{0}^{t} (5 + 2t^2) dt$$

解得

$$x = 5 + 5t + \frac{2}{3}t^3 (m)$$

注意：由 $a=\frac{dv}{dt}$ 和 $v=\frac{dx}{dt}$，可得 $dv=adt$ 和 $dx=vdt$。如 $a=a(t)$ 或 $v=v(t)$，则可两边直接积分求出速度、运动方程；如 a 或 v 不是时间 t 的显函数，则应经过一些数学处理再积分求解。

例 1-5　一物体悬挂在弹簧上作竖直振动，其加速度为 $a=-ky$，式中 k 为常量，y 是以平衡位置为原点所测得的坐标。假定振动的物体在坐标 y_0 处的速度为 v_0，试求速度 v 与坐标 y 的函数关系式。

分析：该题属于运动学的第二类问题。与上题不同之处在于，本题给出的是加速度和位置的关系，因此要经变量代换、分离变量等数学处理，再积分求出结果。

解答：因为

$$a = \frac{dv}{dt} = -ky$$

作变量代换：

$$a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=v\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}$$

得

$$-ky=v\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}$$

分离变量可得

$$-ky\mathrm{d}y=v\mathrm{d}v$$

对上式积分，并代入初始条件 $y=y_0$，$v=v_0$，有

$$-\int_{y_0}^{y}ky\mathrm{d}y=\int_{v_0}^{v}v\mathrm{d}v$$

解得

$$v^2=v_0^2+k(y_0^2-y^2)$$

例 1-6 某物体作直线运动，其运动规律为 $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t=-kv^2t$，式中 k 为大于零的常量。已知当 $t=0$ 时，初速度为 v_0，求速度 v 与时间 t 的函数关系式。

分析：本题属于运动学的第二类问题。由于已知 $\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-kv^2t$，故分离变量后再由初始条件积分，即可求出结果。

解答：因为

$$a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-kv^2t$$

分离变量得

$$\frac{\mathrm{d}v}{v^2}=-kt\mathrm{d}t$$

由初始条件积分：

$$\int_{v_0}^{v}\frac{\mathrm{d}v}{v^2}=\int_0^t-kt\mathrm{d}t$$

解得速度 v 与时间 t 的函数关系式为

$$\frac{1}{v}=\frac{kt^2}{2}+\frac{1}{v_0}$$

（三）曲线运动的自然坐标表示　圆周运动

1. 自然坐标系中质点运动方程、速度、加速度

运动方程

$$s = s(t) \tag{1-7}$$

速度

$$\boldsymbol{v} = v\boldsymbol{e}_t \tag{1-8}$$

速率

$$v = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$$

切向加速度

$$\boldsymbol{a}_t = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{e}_t = \frac{\mathrm{d}^2 s}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{e}_t \tag{1-9a}$$

法向加速度

$$\boldsymbol{a}_n = \frac{v^2}{\rho}\boldsymbol{e}_n \tag{1-9b}$$

加速度

$$\boldsymbol{a} = a_t\boldsymbol{e}_t + a_n\boldsymbol{e}_n = \boldsymbol{a}_t + \boldsymbol{a}_n = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{e}_t + \frac{v^2}{\rho}\boldsymbol{e}_n \tag{1-9c}$$

式中，ρ 为轨道曲率半径，如图 1-3 所示。

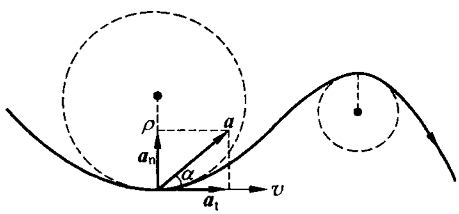

图 1-3

对圆周运动有

切向加速度大小

$$a_t = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

法向加速度大小

$$a_n = \frac{v^2}{R} \quad (R\text{ 为圆周半径})$$

加速度大小

$$a = |\boldsymbol{a}| = \sqrt{a_n^2 + a_t^2} = \sqrt{\left(\frac{v^2}{R}\right)^2 + \left(\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\right)^2}$$

加速度方向

$$\tan\alpha = \frac{a_n}{a_t} \quad (\alpha \text{ 为 } a \text{ 与 } v \text{ 所成的角})$$

2. 圆周运动的角量表示　线量和角量的关系

角位置为 θ；角位移为 $\Delta\theta$。

角速度

$$\omega = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \tag{1-10}$$

角加速度

$$\beta = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \tag{1-11}$$

运动方程

$$\theta = \theta(t) \quad \text{或} \quad s = s(t) \tag{1-12}$$

线量和角量的关系

$$v = R\omega, \quad a_t = R\beta, \quad a_n = R\omega^2, \quad \Delta s = R \cdot \Delta\theta \tag{1-13}$$

例 1-7　一质点作半径 $R=0.1\text{m}$ 的圆周运动，其角坐标 $\theta=2+4t^3(\text{rad})$。(1)求 $t=2\text{s}$ 时，质点的法向加速度和切向加速度；(2)当 t 为多少时，法向加速度和切向加速度的数值相等？

分析：此题已知质点的运动方程 $\theta=\theta(t)$，由 $\omega=\frac{d\theta}{dt}$ 和 $\beta=\frac{d\omega}{dt}=\frac{d^2\theta}{dt^2}$ 可求出角速度 ω 和角加速度 β，再利用线量和角量的关系，即可求得 a_t、a_n。

解答：(1) 质点的角速度为

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = 12t^2$$

角加速度为

$$\beta = \frac{d\omega}{dt} = 24t$$

所以任意 t 时刻质点的 a_t 和 a_n 分别为

$$a_t = R\beta = 24Rt$$

$$a_n = R\omega^2 = 144Rt^4$$

当 $t=2\text{s}$ 时，切向加速度 $a_t=4.8\text{m/s}^2$；法向加速度 $a_n=2.3\times10^2\text{m/s}^2$。

(2) 当 $a_n=a_t$ 时，即 $144Rt^4=24Rt$，此时 $t^3=\frac{1}{6}$，解得 $t\approx0.55\text{s}$。

注意点：熟练掌握线量和角量的关系式，并灵活运用。

例 1-8 飞轮作加速转动时，轮边缘上一点的运动方程为 $s=0.1t^3$ (SI)。已知飞轮半径为 2m。当此点的速率 $v=30\text{m/s}$ 时，其加速度大小为多少？

分析：已经飞轮边缘上一点作圆周运动的运动方程为 $s=0.1t^3$。可由 $v=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$求出其速率，而后由 $a_t=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$和 $a_n=\frac{v^2}{R}$求出其切向加速度和法向加速度，最后依 $a=\sqrt{a_n^2+a_t^2}$求出加速度大小。

解答：质点在 t 时刻的速率为

$$v=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=0.3t^2$$

当 $v=30\text{m/s}$ 时，$t=10\text{s}$。此刻

$$a_t=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=0.6t=6(\text{m/s}^2)$$

$$a_n=\frac{v^2}{R}=0.045t^4=450(\text{m/s}^2)$$

所以，该点的加速度大小为

$$a=\sqrt{a_t^2+a_n^2}=\sqrt{6^2+450^2}\approx 450.04(\text{m/s}^2)$$

（四）牛顿运动定律

第一定律：引出了惯性和力的概念以及惯性参照系的定义。如果牛顿第一定律在某个参考系中适用，则这个参考系称为惯性参考系，简称惯性系。

第二定律：

$$\boldsymbol{F}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{P}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(m\boldsymbol{v})}{\mathrm{d}t} \tag{1-14a}$$

当质点在作低速($v\ll c$)运动，其质量可看作是常量时，上式可写为

$$\boldsymbol{F}=m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=m\boldsymbol{a} \tag{1-14b}$$

式中 $\boldsymbol{F}$ 为合外力，$\boldsymbol{a}$ 的方向与 $\boldsymbol{F}$ 的方向一致。$\boldsymbol{F}$ 与 $\boldsymbol{a}$ 的关系为瞬时关系，即当合外力撤去或为零时，加速度也就立即消失。

在直角坐标系中，它在 Ox、Oy、Oz 三个方向上的投影形式为

$$F_x=m\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}=ma_x \tag{1-15a}$$

$$F_y=m\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}=ma_y \tag{1-15b}$$