大学物理学习指导

（第二版）

何跃娟　陈国庆　主编

苏州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学习指导/何跃娟,陈国庆主编. —2 版
. —苏州:苏州大学出版社,2011.1
ISBN 978-7-81137-628-9

Ⅰ.①大… Ⅱ.①何…②陈… 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(2011)第 004110 号

大学物理学习指导(第二版)

何跃娟　陈国庆　主编

责任编辑　周建兰

苏州大学出版社出版发行
(地址:苏州市十梓街 1 号　邮编:215006)
宜兴市盛世文化印刷有限公司印装
(地址:宜兴市万石镇南漕河滨路 58 号　邮编:214217)

开本 787 mm×1 092 mm　1/16　印张 12　字数 299 千
2011 年 1 月第 1 版　2011 年 1 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-81137-628-9　定价:21.00 元

苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换
苏州大学出版社营销部　电话:0512-65225020
苏州大学出版社网址　http://www.sudapress.com

前　言　Preface

大学物理是高等学校理工科各专业的一门重要的基础课，它对于学生科学素质的提高、综合能力的培养、创新意识的形成、探索精神的增强和思维能力的训练等诸方面都起着重要的作用.对于刚进入大学的学生来说，由于大学物理的难度较大，教学进度较快，在学习过程中往往会遇到一些困难，或一时难以适应.为了使学生在学习过程中更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，进而提高教学效率和质量，我们结合多年的教学实践经验，根据教育部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《大学物理学习指导》(第二版).

本书作为大学物理课程的教辅用书，紧贴教学实际，注重教学实用性.全书共分十五章，每一章均包括基本要求、主要内容及例题、习题.本书根据第一版的多年使用情况，对内容作了全面更新、补充、修改和调整，如把例题和主要内容结合在一起，重要的例题都有点评，以便学生更好地领会和掌握.习题中的选择题和填空题可用做学生课后自我练习，附有答案；计算题部分结合教学要求，并充分考虑实际课时安排，每次课后都有 2～3 题作业，以利于学生进一步理解概念，掌握重点、难点.同时，考虑到大学物理课程大多分两学期进行教学，本书提供了三份模拟试卷，供学生分期进行自我检测.书中带星号(＊)的题目供学有余力的学生选做.

本书由江南大学理学院物理系组织编写.参与本书编写的人员有：张微(第一、二章)、苏宙平(第三章)、何跃娟(第四章)、贾利群和卞宝安(第五、六章)、吴亚敏和田燕宁(第七、八章)、彭青和王志萍(第九、十章)、周锡生(第十一、十二章)、陈国庆和刘慧娟(第十三章)、殷莹(第十四章)、朱云(第十五章).全书由何跃娟、陈国庆、贾利群进行统稿和审定.

本书中少数插图和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，书中定有不当或错误之处，敬请读者不吝指正.

编　者

2011 年 1 月于无锡

目录 Contents

第一章　质点运动学
一、基本要求 ……（1）
二、主要内容及例题 ……（1）
三、习题 ……（3）
第二章　牛顿运动定律
一、基本要求 ……（7）
二、主要内容及例题 ……（7）
三、习题 ……（9）
第三章　动量守恒定律和能量守恒定律
一、基本要求 ……（13）
二、主要内容及例题 ……（13）
三、习题 ……（17）
第四章　刚体的定轴转动
一、基本要求 ……（23）
二、主要内容及例题 ……（23）
三、习题 ……（28）
第五章　静电场
一、基本要求 ……（34）
二、主要内容及例题 ……（34）
三、习题 ……（38）
第六章　静电场中的导体与电介质
一、基本要求 ……（46）
二、主要内容及例题 ……（46）
三、习题 ……（50）
第七章　恒定磁场
一、基本要求 ……（56）
二、主要内容及例题 ……（56）
三、习题 ……（60）
第八章　电磁感应
一、基本要求 ……（69）
二、主要内容及例题 ……（69）

三、习题 …… (75)
第九章　振动
一、基本要求 …… (84)
二、主要内容及例题 …… (84)
三、习题 …… (87)
第十章　波动
一、基本要求 …… (91)
二、主要内容及例题 …… (91)
三、习题 …… (94)
第十一章　光学
一、基本要求 …… (99)
二、主要内容及例题 …… (99)
三、习题 …… (107)
第十二章　气体动理论
一、基本要求 …… (117)
二、主要内容及例题 …… (117)
三、习题 …… (120)
第十三章　热力学基础
一、基本要求 …… (123)
二、主要内容及例题 …… (123)
三、习题 …… (128)
第十四章　相对论
一、基本要求 …… (135)
二、主要内容及例题 …… (135)
三、习题 …… (140)
第十五章　量子物理
一、基本要求 …… (143)
二、主要内容及例题 …… (143)
三、习题 …… (149)

模拟试卷一 …… (155)
模拟试卷二 …… (161)
模拟试卷三 …… (167)
参考答案 …… (171)

第一章

质点运动学

一、基本要求

1. 熟练掌握描述质点运动及运动变化的四个物理量——位置矢量、位移、速度和加速度. 理解这些物理量的矢量性、瞬时性和相对性.

2. 理解运动方程的物理意义及作用，能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.

3. 熟练掌握曲线运动的自然坐标表示法. 能计算质点在平面内运动时的速度和加速度，以及质点做圆周运动时的角速度、角加速度、切向加速度和法向加速度.

4. 了解伽利略速度变换式.

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 $\boldsymbol{r}$.

物体运动时，位置矢量随时间而改变. 在直角坐标系中，$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)=x(t)\boldsymbol{i}+y(t)\boldsymbol{j}+z(t)\boldsymbol{k}$，此式称为质点的运动方程，其分量式为

$$x=x(t)$$
$$y=y(t)$$
$$z=z(t)$$

从中消去时间参数 t，可得质点运动的轨迹方程.

2. 位移 $\Delta\boldsymbol{r}$.

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

一般地，$|\Delta\boldsymbol{r}|\neq\Delta r$.

路程和位移不同，路程用 Δs 表示.

3. 速度 v.

平均速度 $v=\dfrac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}$；瞬时速度(简称速度) $v=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$.

速度的大小即速率. 瞬时速率(简称速率) $v=|v|=\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$.

4. 加速度 $\boldsymbol{a}$.

平均加速度 $\boldsymbol{a}=\dfrac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$;瞬时加速度(简称加速度)$\boldsymbol{a}=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2}$.

(二) 质点运动学两类问题

1. 已知 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)$,求质点的位置矢量、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v_0,求其速度和运动方程——积分.

(三) 曲线运动的自然坐标表述、圆周运动

1. 切向加速度和法向加速度.

$$\boldsymbol{a}_t=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{e}_t=\frac{\mathrm{d}^2 s}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{e}_t,\quad \boldsymbol{a}_n=\frac{v^2}{\rho}\boldsymbol{e}_n$$

$$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}_t+\boldsymbol{a}_n=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{e}_t+\frac{v^2}{\rho}\boldsymbol{e}_n$$

对圆周运动,有

$$a_t=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t},\quad a_n=\frac{v^2}{R}$$

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

2. 圆周运动的角量表示、线量和角量的关系.

角量:θ,$\quad\omega=\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$,$\quad\alpha=\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}$.

线量和角量的关系:$v=R\omega$,$a_t=R\alpha$,$a_n=R\omega^2$.

【例 1-1】 已知一质点的运动方程为 $\boldsymbol{r}=at^2\boldsymbol{r}+bt^2\boldsymbol{j}$(其中 a、b 为常数),则该质点做何运动?式中 r 的单位为 m,t 的单位为 s.

解:因为$v=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=2at\boldsymbol{i}+2bt\boldsymbol{j}$,与时间有关,故质点做变速运动;而 $\boldsymbol{a}=\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=2a\boldsymbol{i}+2b\boldsymbol{j}$,与时间无关,故质点做匀变速运动.

由质点的运动方程,可得相应的分量式:

$$x=at^2 \tag{1}$$

$$y=bt^2 \tag{2}$$

从上两式中消去时间 t,可得轨迹方程:$y=\dfrac{b}{a}x$,这表明质点在 xOy 平面上运动的轨迹是直线,故该质点做匀变速直线运动.

【例 1-2】 如图 1-1 所示.

(1) 对于在 xOy 平面内以原点 O 为圆心做匀速圆周运动的质点,试用半径 r、角速度 ω 和单位矢量 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$ 表示其在 t 时刻的位置矢量.已知在 $t=0$ 时,$y=0$,$x=r$,角速度 ω 如图 1-1 所示;

(2) 由(1)导出速度v 与加速度 $\boldsymbol{a}$ 的矢量表示式;

(3) 试证加速度指向圆心.

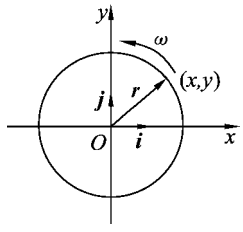


图 1-1

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

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

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

(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.

【例 1-3】 一物体悬挂在弹簧上做竖直振动，其加速度 $a=-ky$，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.

解：本题已知加速度和位置的关系，而要求速度与坐标的关系.

因此要做变量代换：

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

又 $a=-ky$，故 $-ky=\dfrac{v\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}$. 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 1-4】 一质点做半径 $R=0.1$ m 的圆周运动，其角坐标 $\theta=2+4t^3$ rad.

(1) 求 $t=2$ 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？

解：(1) 质点的角速度为

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

角加速度为

$$\alpha=\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=24t$$

所以任意时刻 t 质点的 a_t 和 a_n 分别为

$$a_t=R\alpha=24Rt$$

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

当 $t=2$ s 时，切向加速度 $a_t=4.8\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$，法向加速度 $a_n\approx2.3\times10^2\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$.

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

三、习　题

(一) 选择题

1. 某质点做直线运动时的运动方程为 $x=3t-5t^3+6$ (SI 制)，则该质点做　　(　　)

(A) 匀加速直线运动，加速度沿 x 轴正方向

(B) 匀加速直线运动，加速度沿 x 轴负方向

(C) 变加速直线运动，加速度沿 x 轴正方向

(D) 变加速直线运动,加速度沿 x 轴负方向

2. 一质点做直线运动,某时刻的瞬时速度 $v=2\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$,瞬时加速度 $a=-2\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$,则 1 s 后质点的速度 ( )

(A) 等于零 (B) 等于 $-2\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$

(C) 等于 $2\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ (D) 不能确定

3. 如图 1-2 所示,湖中有一小船,有人用绳绕过岸上一定高度处的定滑轮拉湖中的船向岸边运动. 设该人以匀速率 v_0 收绳,设绳不伸长且湖水静止,则小船的运动是 ( )

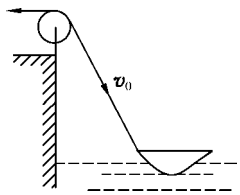


图 1-2

(A) 匀加速运动 (B) 匀减速运动

(C) 变加速运动 (D) 变减速运动

(E) 匀速直线运动

4. 一运动质点在某瞬时位于矢径 $\boldsymbol{r}(x,y)$ 的端点处,其速度大小为 ( )

(A) $\dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}$ (B) $\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$

(C) $\dfrac{\mathrm{d}|\boldsymbol{r}|}{\mathrm{d}t}$ (D) $\sqrt{\left(\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)^2+\left(\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right)^2}$

5. 以下五种运动形式中,$\boldsymbol{a}$ 保持不变的运动是 ( )

(A) 单摆的运动 (B) 匀速率圆周运动

(C) 行星的椭圆轨道运动 (D) 抛体运动

(E) 圆锥摆运动

6. 质点做曲线运动,$\boldsymbol{r}$ 表示位置矢量,v 表示速度,$\boldsymbol{a}$ 表示加速度,s 表示路程,a_t 表示切向加速度的大小,下列表达式中:

(1) $\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=a$; (2) $\dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=v$; (3) $\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=v$; (4) $\left|\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\right|=a_t$. ( )

(A) 只有(1)、(4)是对的 (B) 只有(2)、(4)是对的

(C) 只有(2)是对的 (D) 只有(3)是对的

7. 下列说法正确的是 ( )

(A) 一质点在某时刻的瞬时速度是 $2\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$,说明它在此后 1 s 内一定要经过 2 m 的路程

(B) 斜向上抛的物体,在最高点处的速度最小,加速度最大

(C) 物体做曲线运动时,有可能在某时刻的法向加速度为零

(D) 物体的加速度越大,则速度越大

8. 某物体的运动规律为 $\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-kv^2t$,式中 k 为大于零的常量. 当 $t=0$ 时,初速度为 v_0,则速度 v 与时间 t 的函数关系是 ( )

(A) $v=\dfrac{1}{2}kt^2+v_0$ (B) $v=-\dfrac{1}{2}kt^2+v_0$

(C) $\dfrac{1}{v}=\dfrac{kt^2}{2}+\dfrac{1}{v_0}$ (D) $\dfrac{1}{v}=-\dfrac{kt^2}{2}+\dfrac{1}{v_0}$

9. 质点沿半径为 R 的圆周做匀速率运动,每间隔时间 T 转一圈,在 $2T$ 时间间隔中,其

平均速度大小与平均速率大小分别为　　(　　)

(A) $\frac{2\pi R}{T}$，$\frac{2\pi R}{T}$　　(B) 0，$\frac{2\pi R}{T}$

(C) 0，0　　(D) $\frac{2\pi R}{T}$，0

10. 下列说法正确的是　　(　　)

(A) 加速度恒定不变时，物体运动方向也不变

(B) 平均速率等于平均速度的大小

(C) 不管加速度如何，平均速率表达式总可以写成(v_1、v_2 分别为初、末速率)$\bar{v}=\frac{v_1+v_2}{2}$

(D) 运动物体速率不变时，速度可以变化

11. 在相对地面静止的坐标系内，A、B 两船都以 2 m·s^{-1} 速率匀速行驶，A 船沿 x 轴正向，B 船沿 y 轴正向. 今在 A 船上设置与静止坐标系方向相同的坐标系(x、y 方向单位矢量用 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$ 表示)，那么在 A 船上的坐标系中，B 船的速度(以 m·s^{-1} 为单位)为　　(　　)

(A) $2\boldsymbol{i}+2\boldsymbol{j}$　　(B) $-2\boldsymbol{i}+2\boldsymbol{j}$

(C) $-2\boldsymbol{i}-2\boldsymbol{j}$　　(D) $2\boldsymbol{i}-2\boldsymbol{j}$

12. 一飞机相对空气的速度大小为 200 km·h^{-1}，风速为 56 km·h^{-1}，方向从西向东. 地面雷达站测得飞机的速度大小为 192 km·h^{-1}，其方向是　　(　　)

(A) 南偏西 16.3°　　(B) 北偏东 16.3°

(C) 向正南或向正北　　(D) 西偏北 16.3°

(E) 东偏南 16.3°

(二) 填空题

1. 在表达式 $v=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}$ 中，位置矢量是_____，位移矢量是_____.

2. 一质点在 xOy 平面内运动，其运动方程为 $x=2t$ 和 $y=19-2t^2$(SI 制)，则在第 2 s 内质点的平均速度大小 $\bar{v}=$_____，2 s 末的瞬时速度大小 $v_2=$_____；该质点的轨迹方程为_____.

3. 一质点沿直线运动，其运动方程为 $x=6t-t^2$(SI 制)，则 t 在 0～4 s 的时间间隔内质点的位移大小为_____，质点走过的路程为_____.

4. 一质点沿 x 轴方向运动，其加速度随时间的变化关系为 $a=3+2t$(SI 制)，如果初始时质点的速率 v_0 为 5 m·s^{-1}，则当 $t=3$ s 时，质点的速度为_____.

5. 如图 1-3 所示，一质点从 O 点出发以匀速率 1 cm·s^{-1} 做顺时针转向的圆周运动，圆的半径为 1 m. 当它走过 2/3 圆周时，走过的路程是_____，这段时间内的平均速度大小为_____，方向为_____.

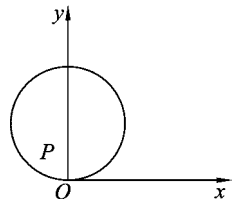


图 1-3

6. 质点在重力场中做斜上抛运动，初速度的大小为 v_0，与水平方向成 α 角. 则质点到达抛出点的同一高度时的切向加速度为_____，法向加速度为_____，该时刻质点所在处轨迹的曲率半径为_____(忽略空气阻力).

7. 灯距地面高度为 h_1，一个人身高为 h_2，在灯下以匀速率 v 沿水平直线行走，如图 1-4

所示.他的头顶在地上的影子 M 点沿地面移动的速度大小为 $v_M=$ _____.

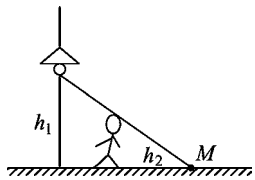


图 1-4

8. 一船以速度 v_0 在静水湖中匀速直线航行,一乘客以初速度 v_1 在船中竖直向上抛出一石子,则站在岸上的观察者看石子运动的轨迹是_____.取抛出点为原点,x 轴沿 v_0 方向,y 轴沿竖直向上方向,石子的轨迹方程是_____.

9. 一质点做半径为 0.1 m 的圆周运动,其角位置的运动方程为 $\theta=\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}t^2$(SI 制),则其切向加速度为 $a_t=$_____.

10. 飞轮做加速运动时,轮边缘上一点的运动方程为 $s=0.1t^3$(SI 制).飞轮半径为 2 m.当此点的速率 $v=30\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,其切向加速度为_____,法向加速度为_____.

(三)计算及证明题

1. 有一质点沿 x 轴做直线运动,t 时刻的坐标为 $x=4.5t^2-2t^3$(SI 制).试求:

(1)第 2 s 内的平均速度;

(2)第 2 s 末的瞬时速度;

(3)第 2 s 内的路程.

2. 一质点沿 x 轴运动,其加速度 a 与位置坐标 x 的关系为

$$a=2+6x^2 \quad \text{(SI 制)}$$

如果质点在原点处的速度为零,试求其在任意位置处的速度.

3. 一质点从静止开始做直线运动,开始时加速度为 a_0,此后加速度随时间均匀增加,经过时间 τ 后,加速度为 $2a_0$,经过时间 2τ 后,加速度为 $3a_0$……求经过时间 $n\tau$ 后,该质点的速度和走过的距离.

4. 质点 M 在水平面内的运动轨迹如图 1-5 所示,OA 段为直线,AB、BC 段分别为不同半径的两个 $\frac{1}{4}$ 圆周.设 $t=0$ 时,M 在 O 点,已知质点的运动方程为

$$s=30t+5t^2 \quad \text{(SI 制)}$$

求 $t=2$ s 时刻,质点 M 的切向加速度和法向加速度.

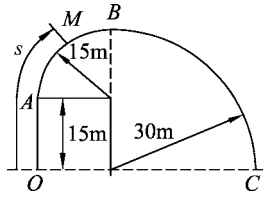


图 1-5

5. 一质点沿半径为 R 的圆周运动,质点所经过的弧长与时间的关系为 $s=bt-\frac{1}{2}ct^2$,其中 b、c 是大于零的常量.求从 $t=0$ 开始到质点的切向加速度与法向加速度大小相等时所经历的时间.

6. 一艘正在沿直线行驶的电艇,在发动机关闭后,其加速度方向与速度方向相反,大小与速度的平方成正比,即 $\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-kv^2$,式中 k 为常量.试证明:电艇在关闭发动机后又行驶了 x 距离时的速度为 $v=v_0\mathrm{e}^{-kx}$,其中 v_0 是发动机关闭时的速度.

7. 如图 1-6 所示,质点 P 在水平面内沿一半径 $R=2$ m 的圆轨道转动.转动的角速度 ω 与时间 t 的函数关系为 $\omega=kt^2$(k 为常量).已知 $t=2$ s 时质点 P 的速度为 $32\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.试求 $t=1$ s 时质点 P 的速度与加速度的大小.

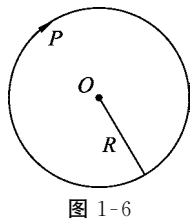


图 1-6

第二章

牛顿运动定律

一、基本要求

1. 了解几种常见的力：重力、弹性力和摩擦力，掌握力的分析方法.

2. 熟练掌握利用牛顿运动定律分析问题的基本思路和研究方法，能应用微积分知识、牛顿运动定律求解一维变力作用下的简单动力学问题.

3. 了解惯性参照系及非惯性参照系的定义，正确理解力的概念.

二、主要内容及例题

（一）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照系中适用，则这个参照系成为惯性参照系，简称惯性系.

第二定律：

$$\boldsymbol{F}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(m\boldsymbol{v})}{\mathrm{d}t}$$

当质点低速（$v\ll c$）运动时，其质量可看做常量时，上式可写为

$$\boldsymbol{F}=m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=m\boldsymbol{a}$$

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，即当合外力一旦撤去或为零时，加速度也就立即消失.

在直角坐标系中，它在 Ox、Oy、Oz 三个方向上的投影式为

$$F_x=m\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}=ma_x$$

$$F_y=m\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}=ma_y$$

$$F_z=m\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}=ma_z$$

在自然坐标系中，它在切线和法线方向的投影式为

$$F_t=ma_t=m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

$$F_n=ma_n=m\frac{v^2}{\rho}$$

第三定律:

$$\boldsymbol{F}_{12}=-\boldsymbol{F}_{21}$$

必须明确:牛顿运动定律只适用于质点或可视为质点的物体,且研究对象的质量不会随着运动而明显变化.

(二) 力学中常见的几种力

1. 万有引力(含重力):

$$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$$

2. 弹性力包含以下几类:

压力:物体间相互挤压而引起的弹性力,它垂直于接触面作用.

张力:绳子两端受到力的作用被拉紧后,由于发生拉伸形变所引起的张力.

弹簧的弹力:弹簧被拉伸或压缩时产生的弹性力 $F=-kx$.

3. 摩擦力:包括滑动摩擦力 $f=\mu N$ 和静摩擦力 $f_{\max}=\mu_0 N$.

(三) 应用牛顿运动定律解题思路

力学中常见的动力学问题:已知作用于质点的力,求质点的运动.在这类问题中,已知的作用力可能是恒力,也可能是变力.当物体受的力为变力时,应利用微积分知识解题.

说明:牛顿运动定律只适用于质点,若涉及两个或两个以上质点的运动时,应采用"隔离体法"对各个物体进行受力分析,而后逐个分别运用牛顿第二定律.在用"隔离体法"解题时,大致可按下列步骤进行:

a. 根据题意和需求,有目的地选一个或几个物体作为研究对象;

b. 选定可以作为惯性系的参照系,并建立合适的坐标系;

c. 用"隔离体法"分析各物体的受力情况,画受力图,并标示出其运动情况;

d. 按牛顿第二定律列出质点运动方程(矢量式),或写出它沿各坐标轴的分量式;

e. 解出所需结果,必要时对所求结果进行讨论.

【例 2-1】 质量为 m 的雨滴下降时,因受空气阻力作用,在落地前的瞬间做匀速运动,其速率 $v_0=5.0\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$.设空气阻力的大小与雨滴速率的平方成正比.问:当雨滴下降速率 $v=4.0\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 时,其加速度 a 多大?

解:取雨滴为研究对象,画出其受力分析图,如图 2-1 所示.其受空气阻力 $f=-kv^2$.



图 2-1

当雨滴做匀速运动时 $mg=kv_0^{\ 2}$ ①

当雨滴做加速运动时 $mg-kv^2=ma$ ②

由②得 $a=\dfrac{mg-kv^2}{m}$ ③

由①得 $k=\dfrac{mg}{v_0^{\ 2}}$ ④

将④代入③,得

$$a=g\left[1-\left(\frac{v}{v_0}\right)^2\right]\approx 3.53\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}.$$

【例 2-2】 已知一质量为 m 的质点在 x 轴上运动,质点只受到指向原点的引力的作用,

引力大小与质点离原点的距离 x 的平方成反比，即 $f=-\frac{k}{x^2}$，k 是比例常数. 设质点在 $x=A$ 时的速度为零，求质点在 $x=\frac{A}{4}$ 处的速度的大小.

解：根据牛顿第二定律，有

$$f=-\frac{k}{x^2}=m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

利用变量代换，得

$$-\frac{k}{x^2}=m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}\cdot\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=mv\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}$$

再分离变量后，有

$$v\mathrm{d}v=-k\frac{\mathrm{d}x}{mx^2},\quad \int_0^v v\mathrm{d}v=-\int_A^{\frac{A}{4}}\frac{k}{mx^2}\mathrm{d}x$$

$$\frac{1}{2}v^2=\frac{k}{m}\left(\frac{4}{A}-\frac{1}{A}\right)=\frac{3}{mA}k$$

所以

$$v=\sqrt{\frac{6k}{mA}}$$

【例 2-3】 如图 2-2 所示，在光滑的水平面上设置一竖直的圆筒，半径为 R，一小球紧靠圆筒内壁运动，摩擦因数为 μ，在 $t=0$ 时，球的速率为 v_0，求任一时刻球的速率和运动路程.

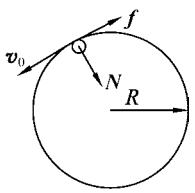


图 2-2

解：选小球为研究对象，画其水平面上受力分析图.

利用自然坐标系，列方程.

法向：

$$N=m\frac{v^2}{R}$$

切向：

$$-f=m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

因 $f=\mu N$，所以有

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

对上式分离变量后积分：

$$-\int_{v_0}^{v}\frac{1}{v^2}\mathrm{d}v=\int_0^t\frac{\mu}{R}\mathrm{d}t$$

得

$$v=\frac{v_0R}{R+v_0\mu t}$$

利用 $v=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$，求得小球在时间 t 内经过的路程为

$$s=\int_0^t v\mathrm{d}t=v_0R\int_0^t\frac{\mathrm{d}t}{R+v_0\mu t}=\frac{R}{\mu}\ln\left(1+\frac{v_0\mu t}{R}\right)$$

三、习　题

（一）选择题

1. 用水平压力 F 把一个物体压着靠在粗糙的竖直墙面上保持静止. 当 F 逐渐增大时，物体所受的静摩擦力 f　　（　　）

(A) 恒为零

(B) 不为零,但保持不变

(C) 随 F 成正比地增大

(D) 开始随 F 增大,达到某一最大值后就保持不变

2. 如图 2-3 所示,一只质量为 m 的猴,原来抓住一根用绳吊在天花板上的质量为 M 的直杆,悬线突然断开,小猴则沿杆子竖直向上爬以保持它离地面的高度不变,此时直杆下落的加速度为 (　　)

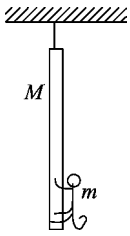


图 2-3

(A) g　　(B) $\frac{m}{M}g$

(C) $\frac{M+m}{M}g$　　(D) $\frac{M+m}{M-m}g$

(E) $\frac{M-m}{M}g$

3. 如图 2-4 所示,物体 A、B 质量相同,B 在光滑水平桌面上.滑轮与绳的质量以及空气阻力均不计,滑轮与其轴之间的摩擦也不计.系统无初速地释放,则物体 A 下落的加速度是 (　　)

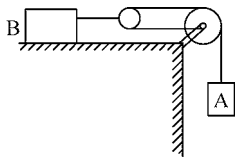


图 2-4

(A) g　　(B) $\frac{4}{5}g$

(C) $\frac{g}{2}$　　(D) $\frac{g}{3}$

4. 如图 2-5 所示,假设物体沿着竖直面上圆弧形轨道下滑,轨道是光滑的.物体在从 A 至 C 的下滑过程中,下列说法正确的是(　　)

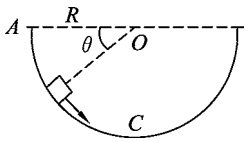


图 2-5

(A) 它的加速度大小不变,方向永远指向圆心

(B) 它的速率均匀增加

(C) 它的合外力大小变化,方向永远指向圆心

(D) 它的合外力大小不变

(E) 轨道支持力的大小不断增加

5. 如图 2-6 所示,竖立的圆筒形转笼,半径为 R,绕中心轴 OO' 转动,物块 A 紧靠在圆筒的内壁上,物块与圆筒间的摩擦因数为 μ.要使物块 A 不下落,圆筒转动的角速度 ω 至少应为 (　　)

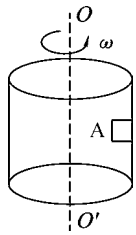


图 2-6

(A) $\sqrt{\frac{\mu g}{R}}$　　(B) $\sqrt{\mu g}$

(C) $\sqrt{\frac{g}{\mu R}}$　　(D) $\sqrt{\frac{g}{R}}$

6. 一个圆锥摆的摆线长为 l,摆线与竖直方向的夹角恒为 θ,如图 2-7 所示.则摆锤转动的周期为 (　　)

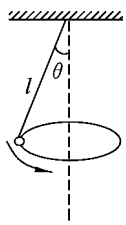


图 2-7

(A) $\sqrt{\frac{l}{g}}$　　(B) $\sqrt{\frac{l\cos\theta}{g}}$

(C) $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$　　(D) $2\pi\sqrt{\frac{l\cos\theta}{g}}$

7. 在做匀速转动的水平转台上,与转轴相距 R 处有一体积很小的工件

A，如图 2-8 所示. 设工件与转台间的静摩擦因数为 μ_s，若使工件在转台上无滑动，则转台的角速度 ω 应满足　　(　　)

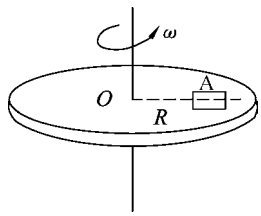


图 2-8

(A) $\omega\leqslant\sqrt{\dfrac{\mu_s g}{R}}$　　(B) $\omega\leqslant\sqrt{\dfrac{3\mu_s g}{2R}}$

(C) $\omega\leqslant\sqrt{\dfrac{3\mu_s g}{R}}$　　(D) $\omega\leqslant 2\sqrt{\dfrac{\mu_s g}{R}}$

8. 如图 2-9 所示，用一斜向上的力 $\boldsymbol{F}$(与水平面成 30°角)，将一重为 G 的木块压靠在竖直壁面上，如果不论用怎样大的力 F，都不能使木块向上滑动，则说明木块与壁面间的静摩擦因数 μ_s　　(　　)

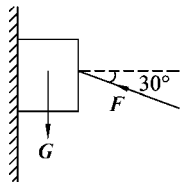


图 2-9

(A) $\geqslant\dfrac{1}{2}$　　(B) $\geqslant\dfrac{1}{\sqrt{3}}$

(C) $\geqslant\sqrt{3}$　　(D) $\geqslant 2\sqrt{3}$

(二) 填空题

1. 如图 2-10 所示，分别画出下面两种情况下物体 A 的受力图.

(1) 物体 A 放在木板 B 上，被一起抛出做斜上抛运动，A 始终位于 B 的上面，不计空气阻力；

(2) 物体 A 的形状是一楔形棱柱体，横截面为直角三角形，放在桌面 C 上. 把物体 B 轻轻地放在 A 的斜面上，A、B 系统静止. 设 A、B 间和 A、C 间的摩擦因数皆不为零.



图 2-10

2. 如图 2-11 所示，沿水平方向的外力 $\boldsymbol{F}$ 将物体 A 压在竖直墙上，由于物体与墙之间有摩擦力，此时物体保持静止，并设其所受静摩擦力为 f_0. 若外力增至 $2\boldsymbol{F}$，则此时物体所受静摩擦力为_____.

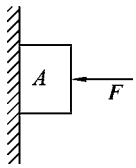


图 2-11

3. 质量为 m 的小球，用轻绳 AB、BC 连接，如图 2-12 所示，其中 AB 水平. 剪断绳 AB 前后的瞬间，绳 BC 中的张力比 $T:T'=$_____.

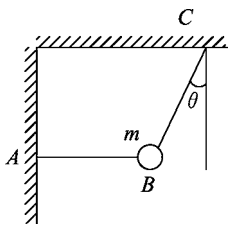


图 2-12

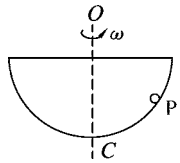


图 2-13

4. 如图 2-13 所示，一光滑的内表面半径为 10 cm 的半球形碗，以匀角速度 ω 绕其对称轴 OC 旋转. 已知放在碗内表面上的一个小球 P 相对于碗静止，其位置高于碗底 4 cm，则由此可推知碗旋转的角速度约为_____.

5. 一圆锥摆摆长为 l、摆锤质量为 m,在水平面上做匀速圆周运动,如图 2-14 所示,摆线与铅垂线的夹角为 θ,则

(1) 摆线的张力 $T=$_____;

(2) 摆锤的速率 $v=$_____.

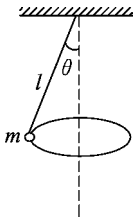


图 2-14

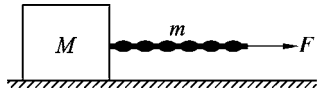


图 2-15

6. 如图 2-15 所示,一物体质量为 M,置于光滑水平地板上. 今用一水平力 $\boldsymbol{F}$ 通过一质量为 m 的绳拉动物体前进,则物体的加速度 $a=$_____,绳作用于物体上的力 $T=$_____.

(三) 计算及证明题

1. 如图 2-16 所示,质量为 m 的摆球 A 悬挂在车架上. 求在下述各种情况下,摆线与竖直方向的夹角 α 和线中的张力 T.

(1) 小车沿水平方向做匀速运动;

(2) 小车沿水平方向做加速度为 a 的运动.

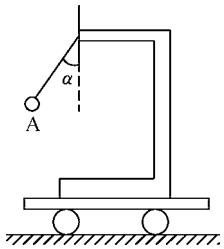


图 2-16

2. 质量为 m 的子弹以速率 v_0 水平射入沙土中,设子弹所受阻力与速度反向,大小与速度成正比,比例系数为 k,忽略子弹的重力. 求:

(1) 子弹射入沙土后速度随时间变化的函数式;

(2) 子弹进入沙土的最大深度.

3. 如图 2-17 所示,在光滑的水平面上固定一半径为 R 的圆形环围屏,质量为 m 的滑块沿环形内壁转动,滑块与壁间的摩擦因数为 μ.

(1) 当滑块速度为 v 时,求它与壁间的摩擦力及滑块的切向加速度;

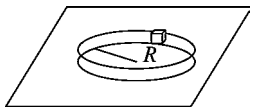


图 2-17

(2) 求滑块的速率由 v 变为 $\frac{v}{3}$ 所需的时间.

4. 如图 2-18 所示,质量分别为 m_1 和 m_2 的两只球,用弹簧连在一起,且用长为 L_1 的线拴在轴 O 上,m_1 与 m_2 均以角速度 ω 绕轴在水平光滑面上做匀速圆周运动. 当两球之间的距离为 L_2 时,将线烧断. 试求线被烧断的瞬间两球的加速度 a_1 和 a_2. (设弹簧和线的质量忽略不计)

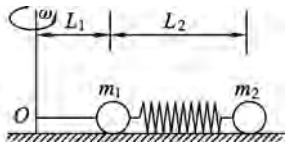


图 2-18

5. 一辆质量 $m=4$ kg 的雪橇,沿着与水平面夹角 $\theta=36.9°$ 的斜坡向下滑动,所受空气阻力与速度成正比,比例系数 k 未知. 今测得雪橇运动的 v-t 关系如图 2-19 曲线所示,$t=0$ 时,$v_0=5\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$,且曲线在该点的切线通过坐标为(4,14.8)的 B 点,随着时间 t 的增加,v 趋近于 $10\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$,求阻力系数 k 及雪橇与斜坡间的动摩擦因数 μ. ($\sin 36.9°=0.6$,$\cos 36.9°=0.8$)

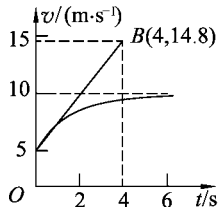


图 2-19

*6. 如图 2-20 所示,一条长为 l、质量均匀分布的细链条 AB,挂在半径可忽略的光滑钉子 C 上,开始时处于静止状态,BC 段长为 $L\left(\frac{1}{2}l<L<\frac{3}{2}l\right)$,释放后链条将做加速运动. 试求:当 $BC=\frac{2}{3}l$ 时,链条的加速度和运动速度的大小.

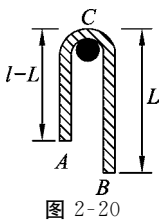


图 2-20