

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

高级中学课本 物理 三年級 (试用本)

  
e-BOOK  
内部资料 非卖品

## 前 言

本教材是供高三年级分科时选修理科的学生使用。

本教材是根据《全日制高级中学物理学科课程标准》（草案）编写的。它是在必修课教材基础上按力学、电磁学等体系展开，旨在进一步加深和补充已学的内容，使学生对中学物理的知识体系有一个比较系统的、全面的认识。编写时，我们充分注意到和必修课中所学内容的衔接，并加强观察实验能力、思维能力和运用物理知识解决简单实际问题能力的培养，也为学生今后进入理工科大学学习准备必要的基础。

本教材强调人文因素和科学方法的教育，在体例上采取和必修课教材相同的方式。对学习过程中易混淆的概念，辟出“问题探讨”专栏，用师生对话的形式展开讨论。为扩展知识面，还安排了“花纹框”的内容以及章末的“阅读材料”，供有兴趣的学生自学。标有“\*”的节次是选学内容。

同学们在学习本教材时，应有意识地复习必修课中学过的知识。教材各章都配有一定数量的练习，要在理解概念的基础上认真做好练习题。章末复习题的形式比较多样，具有综合应用知识的功能，可以帮助同学们检查掌握知识的程度，要求能独立完成复习题。对教材中规定的学生实验要做好预习，逐步学会根据实验日的和原理，选择恰当的器材，制定合理的步骤，记录和处理实验数据，并得出结论。对教材中选编的家庭实验，应努力创造条件完成。

编者

## 运动的合成

### 1. 渡轮过江

### 2. 水火箭

### 3. 飞机投弹

当你乘船垂直横渡江面时，你有没有注意到船头不是指向对岸码头，而是偏向上游的（本章导图 1）；在飞机上拍摄的军事资料片中常可看到轰炸机在飞行投弹时，它陆续投下的炸弹都在一条竖直线上（本章导图 3），那么，这些炸弹是不是都会落在地面的同一目标？再请回忆一下，我们在体育课上练习投掷铅球时，应该以怎样的投掷角度，投出的铅球可以远一些？上述这些物体的运动，要比必修课中学过的运动复杂。这一章，我们将研究这些运动。

## 一、直线运动

### 匀速直线运动

在相等的时间里，物体的位移都相等的直线运动，叫做匀速直线运动。匀速直线运动又简称为匀速运动。

做匀速直线运动的物体任意时刻的瞬时速度都相等，都等于它的初速度。任意时间（或任意位移）内的平均速度也都等于它的初速度。

匀速直线运动是加速度等于零的运动，即它的速度不随时间变化。所以，匀速直线运动的位移  $s$  跟所用时间  $t$  成正比：

$$s=vt。$$

匀速直线运动的速度图象是一条平行于时间轴的直线，如图 1-1 所示；匀速直线运动的位移图象是一条过坐标轴原点的倾斜直线，如图 1-2

所示。直线的斜率  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$  等于匀速直线运动速度的大小。

图 1-1

图 1-2

### 匀变速直线运动

在相等的时间里，速度的变化相等的直线运动，叫做匀变速直线运动。

匀变速直线运动是加速度为恒量的运动。

#### 匀变速直线运动的规律

瞬时速度随时间而改变： $v_t = v_0 + at$ ；

位移随时间而改变： $s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ ；

瞬时速度随位移而改变： $v_t^2 = v_0^2 + 2as$ ；

平均速度： $\bar{v} = \frac{v_0 + v_t}{2}$ ，位移： $s = \bar{v} t = \frac{v_0 + v_t}{2} t_0$ 。

匀变速直线运动的速度图象是一条倾斜的直线。图 1-3 (a) 中的直线通过坐标轴原点，表示初速度为零，直线向上倾斜，表明速度随时间均匀增大，是匀加速直线运动，直线的斜率  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$  等于匀加速直线运动加速度的大小。图 1-3 (b) 中的直线不通过坐标轴原点，表示初速度不等于零。图 1-3 (c) 中的直线向下倾斜，表明速度随时间均匀减小，是匀减速直线运动。

图 1-3

### 物体做直线运动的条件

物体在不受外力，或所受合外力方向跟物体的速度方向在一直线上时，物体将做直线运动。如果不受外力或所受合外力为零，物体做匀速直线运动；如果所受合外力不变，物体做匀变速直线运动。

S：在匀变速直线运动中，物体的位移是不是一定跟时间平方成正比？

T：不一定。对于初速度为零的匀变速直线运动，由公式  $s = \frac{1}{2}at^2$  可知，物体的位移跟时间平方成正比。而对于初速度不为零的匀变速直线运动，由公式  $s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$  可知，位移虽随时间的增加而增大，但不是跟时间的平方成正比。应该注意，任何物理规律都有它的适用条件。

### 练习一

#### 1. 选择题（以下各小题只有一个正确答案）

- (1) 用加速度可以描述运动物体 [     ]  
 (A) 运动的快慢。                      (B) 速度变化的大小。  
 (C) 速度变化的大小和方向。 (D) 速度变化的快慢。
- (2) 下列有关加速度的说法中，正确的是 [     ]  
 (A) 加速度越大，物体运动的速度也越大。  
 (B) 高速运动的物体一定有加速度。  
 (C) 加速度为零，速度不一定为零。  
 (D) 速度为零，加速度一定为零。

2. 图 1-4 所示是几种不同直线运动的速度图象。试在以下各小题的空格中填写出与其相对应的运动图象的序号。

图 1-4

(1) 汽车从静止出发做匀加速直线运动，经一定时间后做匀减速直线运动，直至停止，\_\_\_\_\_。

(2) 汽车做匀减速运动停站后过一段时间又出发做匀加速运动，\_\_\_\_\_。

(3) 小球滚上斜面后又反向滚回，\_\_\_\_\_。

(4) 小球从静止下落到地面后又反向跳起，\_\_\_\_\_。

3. 从离地面 78.4 米高的大楼窗口自由落下一物体，求这个物体(1)

在空中运动的时间；(2)落地时的速度；(3)落下后第3秒内的位移；(4)如把整个高度均分为四段，求经过每段的时间之比。

4. 一辆汽车紧急制动时的加速度大小是  $6 \text{ 米/秒}^2$ ，如果要求它制动后在 27 米内必须停下，它的行驶速度不能超过多少千米/小时？

5. 卡车在长 140 米的斜坡上匀加速下行，加速度是  $0.2 \text{ 米/秒}^2$ ，通过这段斜坡的时间是 20 秒。卡车在这段斜坡顶端和底端的速度分别是多大？

6. 物体由静止开始朝一个方向做直线运动，先匀加速运动了 4 秒，又匀速运动了 10 秒，最后匀减速运动 6 秒而停止，它运动的总位移是 150 米，求在运动过程中，物体的最大速度。

## 二、运动的合成

我们只要留意观察就可以发现，在没有风的时候，雨滴是竖直下落的，在有二、运动的合成风的时候，雨滴就斜向下落了。即使没有风的时候，在前进的列车上的乘客，看到的雨滴也是斜向下的。在研究这类问题时，如果能把所研究的运动看成是两个或几个比较简单的运动所组成的复合运动，问题往往就比较容易解决。

### 分运动 合运动

我们先来观察挂在行车上的货物的运动(图 1-5)。如果行车上的小车 M 通过卷扬机使钢索匀速向上提起货物的同时，还沿水平方向向左匀速运动，我们看到货物是沿斜向上升的。这时我们可以说货物同时参与两个运动，一个是货物竖直向上的运动，另一个是货物水平向左的运动。我们把这两个运动都叫做分运动，而把货物实际沿斜向上升的运动叫做这两个分运动的合运动。

图 1-5

图 1-6

轮船渡河的运动也可以看成是两个运动的合运动(图 1-6)。我们可以这样考虑，假定河水不流动，轮船在静水中将沿 OA 方向航行，经过一段时间  $t$ ，轮船从 O 点运动到 A 点。假定轮船不开动而河水流动，轮船将被河水冲向下游，在  $t$  时间内，轮船从 O 点运动到 B 点。现在轮船在流动的河水中航行，在  $t$  这段时间内它同时参与上述两个运动，轮船将从 O 点运动到 C 点。我们把轮船从 O 点到 C 点的运动，叫做上述两个运动的合运动。

### 思考

有风的时候，雨滴斜向下落的运动可以看成是哪两个运动的合运动？

### 运动的合成

从已知的分运动来求合运动，叫做运动的合成。运动的合成包括位移的合成、速度的合成和加速度的合成。我们先讨论两个互成角度的匀速直线运动的位移的合成和速度的合成。

已知分运动在一段时间内发生的位移，求合运动的位移，这就是位

移的合成。由于位移是矢量，所以位移的合成应遵循平行四边形定则，即合位移是以两个分位移为邻边，作出的平行四边形的对角线。例如图 1-6 中，轮船的合位移 OC 就是以两个分位移 OA、OB 为邻边，作出的平行四边形的对角线。

图 1-7

这个结论还可以用实验来验证。将直尺放在黑板上不动，用粉笔沿尺的边缘匀速划线，画出一条直线 OA[图 1-7(a)]。如果让粉笔靠着尺，尺推粉笔匀速向上移动，粉笔将随尺移动画出向上直线 OB[图 1-7(b)]。如果在推尺匀速向上移动的同时，粉笔又在沿尺的边缘匀速划线，则粉笔画出的将是倾斜的直线 OC[图 1-7(c)]。可以看出，OC 就是以 OA、OB 为邻边作出的平行四边形的对角线。

图 1-8

已知分运动的速度，求合运动的速度，这就是速度的合成。由于速度也是矢量，所以速度的合成也遵循平行四边形定则。在图 1-8 中，如果轮船在静水中的速度  $v_1$  是 2 米/秒，河水流速  $v_2$  是 1.5 米/秒，用作图法可得船头正对河岸时轮船的实际航速  $v$  等于 2.5 米/秒，且量得  $v$  的方向偏向下游跟河岸成  $53^\circ$  角。

S：如果小船在河中沿垂直于河岸的方向向对岸划行，那么当小船划速一定时，河水流动速度越大，小船实际通过的位移也越大，到达对岸所需的时间也越长，对吗？

T：当小船划速一定时，水速越大，在一定时间内小船被水冲向下游的位移越大，小船实际通过的位移（合位移）也越大，这是对的。小船在渡河时同时参与两个运动。小船垂直于河岸的划速是一定的，河宽也是一定的，所以不论水速多大，这一分运动的时间是不变的。因为分运动和合运动的时间总是相同的，所以小船到达对岸所需的时间也不变。事实上，当水速增大，小船的合位移增大的同时，它的合速度也成比例地增大了。

如果小船顺流而下或逆流而上，也就是说两个分运动在同一直线上时，它们的合运动也在同一直线上。对同一直线上的矢量运算，可以用带有正负号的数值把矢量的大小和方向都表示出来。先沿着矢量所在的直线选定一个正方向，凡是方向跟正方向相同的矢量都取正值，凡是方向跟正方向相反的矢量都取负值。这样，矢量运算就可以简化为代数运算。

例如，初速度不等于零的匀变速直线运动，可以看成是速度为  $v_0$  的匀速运动 ( $s=v_0t$ ,  $v_t=v_0$ ) 和初速度等于零的匀加速直线运动

( $s=\frac{1}{2}at^2$ ,  $v_t=at$ ) 的合运动，这两个分运动在同一直线上。如果选  $v_0$  的方向为正方向，由位移的合成和速度的合成，可分别得出匀加速直线运动的公式 ( $s=v_0t+\frac{1}{2}at^2$ ,  $v_t=v_0+at$ ) 和匀减速直线运动的公式

$$(s = v_0 t - \frac{1}{2} a t^2, v_t = v_0 - a t)。$$

知道了分运动的性质，就可确定合运动的性质。

在小船垂直河岸方向划行时，如果小船是匀速划行的，河水也是匀速流动的，由于两个分速度都是恒定的，则合速度也是恒定的。所以合运动也是匀速直线运动（图 1-9）。

图 1-9

图 1-10

如果小船划行是加速的，河水流动是匀速的，那么，合运动就不是直线运动而是曲线运动了（图 1-10）。

图 1-11

### 运动的分解

在解决实际问题时，我们有时需要把一个已知的运动进行分解。例如，飞机以一定的速度  $v$  与水平方向成  $\theta$  角斜向上飞行（图 1-11），如果需要知道飞机以多大的速度上升，或以多大的速度前进，我们可以把飞机斜向上的运动分解为水平方向和竖直方向两个分运动来研究。

运动的分解和运动的合成是互逆的，也遵循平行四边形定则。如图 1-11 所示，飞机斜向上飞行的速度  $v$  可以分解成水平方向的分速度  $v_x$  和竖直方向的分速度  $v_y$ ：

$$v_x = v \cos \theta ;$$

$$v_y = v \sin \theta 。$$

可以这样说，这架飞机是以  $v_x$  的速度前进，以  $v_y$  的速度上升。

### [例题]

渡船以 2 米/秒的速度横渡 80 米宽的河流。试问：

（1）如果船头指向垂直于河岸的方向航行，结果渡船在下游 60 米处靠岸，船的实际位移和渡河的时间分别是多大？

（2）如果要使渡船垂直横渡河流，在船的速度大小保持不变的情况下，船头应指向什么方向？船渡河的时间是多少？

解：渡船的运动可以看成是船在静水中的运动和船被河水冲向下游的运动的合运动。

（1）已知两个分运动的位移  $s_1=80$  米， $s_2=60$  米，用作图法（图 1-12）可求出船的实际位移，即合位移  $s = 100$  米，合位移方向偏向下游，跟河岸的夹角  $\theta = 53^\circ$ 。

由于分运动和合运动的时间都相同，所以渡河时间

$$t = \frac{s_1}{v_1} = \frac{80}{2} \text{秒} = 40 \text{秒}。$$

当然，我们也可用计算法求出合位移的大小和方向。

图 1-12

图 1-13

(2) 要使船垂直横渡河流, 船的合速度  $v$  的方向必须垂直于河岸。由于水流的速度  $v_2$  是指向下游的, 那么船头的方向, 即船在静水中的速度  $v_1$  的方向应偏向上游某一角度 (图 1-13), 为了求出  $v_2$ , 应先求出水流速度  $v_2$ ,

$$v_2 = \frac{s_2}{t} = \frac{60}{40} \text{ 米/秒} = 1.5 \text{ 米/秒},$$

$$\text{则} \quad \cos\phi' = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1.5}{2} = 0.75, \quad \phi' = 41.4^\circ。$$

可见, 船头应偏向上游跟河岸成  $41.4^\circ$  角。

由于合运动的位移就是河宽, 所以只要求出合运动的速度  $v$ , 就可以求出渡河时间  $t$ 。

$$v = \sqrt{v_1^2 - v_2^2} = \sqrt{2^2 - 1.5^2} \text{ 米/秒} = 1.32 \text{ 米/秒}$$

$$t = \frac{s}{v} = \frac{80}{1.32} \text{ 秒} = 60.6 \text{ 秒}。$$

船渡河的时间是 60.6 秒。

想一想, 为什么渡河的时间不是  $t = \frac{s_2}{v_2} = \frac{60}{1.5} \text{ 秒} = 40 \text{ 秒}$ ?

### 运动的独立性

物体在某一方向上的运动, 不会因它在其他方向上的运动而有所改变, 这就是运动的独立性。小船以一定方向航行, 不论水流速度大小如何, 不会影响小船在该方向上运动的速度、位移和时间。我们在学习波的叠加时, 发现两列波在彼此相遇并互相穿过后, 波的形状和传播的情形都和相遇前一样。也就是说, 它们都保持自己的运动状态不变, 这就是因为运动具有独立性的缘故。正由于运动的独立性, 复杂的运动才可以看成是由两个或几个简单的分运动的合运动。

### 练习二

1. 以 5 米/秒的速度匀速竖直降落的跳伞员, 由于受到水平风速 4 米/秒的影响, 求他着地时的速度。
2. 热气球在无风时竖直上升的速度是 4 米/秒, 在有水平方向的风吹动时, 沿跟地面成  $53^\circ$  角斜向上升, 求风速的大小。
3. 飞机离开跑道上升时的速度是 80 米/秒, 仰角为  $30^\circ$ , 要经过多长时间才能达到 2 千米的高度? 这时飞机前进的距离多大?
4. 百货公司自动扶梯在 15 秒内可把顾客送上楼, 如果扶梯不动, 顾客自己走上去需 30 秒, 那么顾客沿着开动的扶梯走上去需要几秒钟?
5. 小船预定要用 10 分钟的时间垂直横渡 600 米宽的河流, 已知小船是以 2 米/秒的速度斜向上游划行的, 求小船划行的方向和河水流速的大小。
6. 河宽 300 米, 河水流速 1 米/秒。已知船在静水中的速度是 3 米/



秒，如果船要以最短时间或要以最小位移过河，船的航向分别应跟河岸成多大角度？过河的时间分别是多少？

### 三、竖直上抛运动

地球上的任何物体都受到重力的作用，我们有时可以看到物体只在重力作用下的运动。譬如，自由落体运动就是物体只在重力作用下的最简单的运动。如果不计空气阻力，把一个物体以一定的速度抛出，物体只受重力作用，这个物体将怎样运动呢？如果物体是沿竖直方向抛出的，物体运动的轨迹是直线；如果物体是沿水平方向或斜向抛出，物体的运动轨迹是一条曲线。可见，物体同样只受重力作用，由于它们的初始状态不同，物体运动的情况也就不同。这一节我们先来研究竖直上抛运动。

乒乓球运动员在高抛发球时，我们看到球先沿着竖直方向上升，到达一定高度后再沿竖直方向回落。像这样将物体用一定的初速度沿竖直方向向上抛出，这时物体所做的运动就是竖直上抛运动。竖直上抛运动可以看成是这样两个分运动的合运动：一个是物体由于惯性而保持竖直向上的匀速直线运动，它的速度就是竖直上抛时的初速度；另一个是物体只受重力作用沿竖直方向向下的自由落体运动。这两个分运动在一条直线上，且方向相反。如果设上抛的初速度  $v_0$  方向为正方向，则合运动的位移

$$s = s_1 = s_2 = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2。$$

上式是竖直上抛运动的位移公式。式中如果  $s$  为正值，表示它跟  $v_0$  方向相同，经时间  $t$  物体的位置应在抛出点的上方；如果  $s$  为负值，表示它跟  $v_0$  方向相反，经时间  $t$  物体的位置应在抛出点的下方。

这个合运动的速度

$$v = v_1 - v_2 = v_0 - g t。$$

上式是竖直上抛运动的速度公式。式中如果  $v$  为正值，表示它跟  $v_0$  方向相同，该时刻物体正在上升；如果  $v$  为负值，表示它跟  $v_0$  方向相反，该时刻物体已经回落。

可以看出，竖直上抛运动实际上也就是初速度为  $v_0$ ，加速度为  $g$  的匀减速直线运动。

下面，我们讨论竖直上抛运动的几个具体问题。

1. 物体上升到最大高度的时间

设物体从抛出经过时间  $t_1$  上升到最高点，这时物体的瞬时速度为零，由速度公式可得

$$v_0 - g t_1 = 0，$$

物体上升到最大高度的时间

$$t_1 = \frac{v_0}{g}。$$

2. 物体上升的最大高度

物体上升的最大高度H就是 $t_1 = \frac{v_0}{g}$ 时的高度，代入位移公式

$$H = v_0 t_1 - \frac{1}{2} g t_1^2 ,$$

可得 
$$H = \frac{v_0^2}{2g} .$$

可见，物体上升到最大高度的时间以及能够上升的最大高度都决定于抛出时的初速度  $v_0$  的大小。

### 3. 物体从抛出到落回原来位置的时间

物体落回到原来位置时，位移  $s$  为零，代入位移公式

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

可得 
$$t = \frac{2v_0}{g} .$$

由物体上升到最大高度的时间 $t_1 = \frac{v_0}{g}$ 可知，物体从抛出到达最高点跟它从最高点落回到原来位置的时间是相等的。

### 4. 物体落回到原来位置时的速度

物体从抛出到落回原来位置的时间 $t = \frac{2v_0}{g}$ ，代入速度公式可得

$$v = v_0 - g t = v_0 - g \frac{2v_0}{g} = -v_0 .$$

可见，物体落回到原来位置时的速度跟抛出时的初速度大小相等、方向相反。

### 思考

做竖直上抛运动的物体，在什么时间范围内  $v_t$  和  $v_0$  方向相同？在什么时间范围内  $v_t$  和  $v_0$  方向相反？在什么时间范围内  $v_t$  和  $g$  方向相同？在什么时间范围内  $v_t$  和  $g$  方向相反？

### [例题]

在离地面 12 米高的阳台外侧以 5 米/秒的初速度竖直向上抛出一粒石子，求经过 2 秒后石子离地面的高度以及从抛出到落地所需的时间。

解：由竖直上抛运动的位移公式可得

$$s = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 = 5 \times 2 \text{米} - \frac{1}{2} \times 9.8 \times 2^2 \text{米} = -9.6 \text{米} .$$

位移是负值，表示物体位于抛出点下方，即经过 2 秒后，石子落到阳台下方 9.6 米处，离地面高度是

$$12 \text{米} - 9.6 \text{米} = 2.4 \text{米} .$$

石子落地点在抛出点下方 12 米，即位移为 -12 米，根据位移公式可得

$$s = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2,$$

$$-12 = 5t - \frac{1}{2} \times 9.8 \times t^2,$$

$$49t^2 - 5t - 12 = 0,$$

解得  $t = 2.16$  秒和  $t = -1.14$  秒（舍去）。

石子从抛出到落地时间是 2.16 秒。

S：做竖直上抛运动的物体落回原来位置时的速度跟抛出时的速度大小相等、方向相反。那么，在上升过程中经过任一位置时的速度，跟回落过程中再经过这个位置时的速度是不是也总是大小相等、方向相反的呢？

T：是的，这可以用公式来证明。设上升到某一位置时位移为  $h$ ，则回落到这个位置时的位移也是  $h$ 。由匀减速运动任一位置时的瞬时速度公式  $v_t^2 = v_0^2 - 2gh$ ，可求得在这位置时的速度  $v = \pm \sqrt{v_0^2 - 2gh}$ 。 $v$  为正值表示上升到这一位置时的速度， $v$  为负值表示回落到这一位置时的速度，它们总是大小相等、方向相反。其实，竖直上抛运动上升过程中的任一位置都可以看成是一个新的抛出点，所以落回到这一位置时的速度，总是跟从这个位置抛出时的速度大小相等、方向相反的。

### 练习三

1. 如果已知竖直上抛运动的初速度，要求物体到达某一位置所经过的时间，会不会可能有两个解？如果有，你能说出这两个解的意义吗？

2. 本章导图 2 是一枚自制的水“火箭”，它是利用一次喷出高压水时所获得的初速度而上升的。如果在离地 45 米高处竖直向上发射水“火箭”，它的初速度是 40 米/秒，求：（1）它在头 2 秒内上升的高度；（2）它在第 2 秒内上升的高度；（3）它在第 2 秒末的速度；（4）它上升到最大高度时的速度；（5）它能上升的最大高度；（6）它上升到最大高度所用的时间；（7）它到达离射出点 75 米高处所用的时间；（8）它到达离射出点 75 米高处时的速度；（9）它从射出到落地所经过的时间。（ $g$  取 10 米/秒<sup>2</sup>）

3. 竖直向上射出的信号弹，经过 10 秒落回原处。求射出时的初速度和能够上升的最大高度。（ $g$  取 10 米/秒<sup>2</sup>）

4. 在月球表面以 5 米/秒的速度竖直上抛一粒石子，经 6 秒落回原处，求月球表面的重力加速度。

5. 为了把一个物体竖直向上抛到 4.9 米的高处，这个物体至少要具有多大的初速度？6. 在离地面某一高处，以 10 米/秒的初速度竖直向上抛出的物体经 5 秒落到地面，求抛出点离地面的高度。（ $g$  取 10 米/秒<sup>2</sup>）

7. 将物体用一定的初速度沿竖直方向向下抛出的运动叫做竖直下抛运动。竖直下抛运动可以看成是哪两个分运动的合运动？写出竖直下抛运动的位移公式和速度公式。

### 四、平抛运动

### 物体做曲线运动的条件

我们在学习匀速圆周运动时已经知道，质点在某一点（或某一时刻）的速度方向就是圆周的这一点的切线方向。也就是说，在曲线运动中，运动质点在某一点的瞬时速度的方向，就是曲线上这一点的切线的方向。

由于曲线上各点的切线方向不同，所以曲线运动的速度方向是时刻改变的。我们知道速度是矢量，只要速度方向发生改变，即使速度大小不变，物体运动的速度也是变化的。所以曲线运动是一种变速运动。

曲线运动既然是变速运动，就必定存在加速度，而加速度是由合外力产生的，所以做曲线运动的物体总要受到外力的作用。我们知道，如果物体所受合外力跟速度的方向在同一直线上时，物体就做变速直线运动。如果物体所受的合外力跟速度的方向不在同一直线上时，物体就做曲线运动。所以，物体做曲线运动的条件是物体所受合外力的方向跟它的速度方向不在同一直线上。

我们知道，运动物体的加速度方向总跟它所受的合外力方向是一致的，所以做曲线运动的物体，它的加速度的方向跟它的速度方向也不在同一直线上。

图 1-14

### 平抛运动

把桌边的小球沿水平方向打出，观察小球离开桌面后的运动，可以看到小球在向前运动的同时还向下落，它的轨迹是一条曲线（图 1-14）。我们把物体以一定的初速度沿水平方向抛出的运动叫做平抛运动。如从水平飞行的飞机上落下的炸弹的运动，以及沿水平方向射出的子弹的运动都是平抛运动。

我们可以用图 1-15 所示的装置来研究平抛运动。在水平光滑导轨 MN 上放一辆小车，车上固定一根竖直的光滑钢丝，一个有孔的金属球套在这根钢丝上可以自由滑动。开始时，小车静止在 A 点，小球被铁片 K 托住。给小车一个初速度  $v_0$ ，小车沿水平方向做匀速直线运动。小球脱离 K 后沿着钢丝在竖直方向做自由落体运动，但因为钢丝还要随着小车一起沿水平方向做匀速直线运动，所以小球的运动轨迹是跟图 1-14 中小球运动相类似的一条曲线。

图 1-15

由此可知，平抛运动可以看成是这样两个分运动的合运动：一个是物体由于惯性而保持沿水平方向的匀速直线运动，它的速度就是平抛运动的初速度；另一个是只受重力作用沿竖直方向向下的自由落体运动。这两个运动不在一条直线上，一个是水平方向上的匀速直线运动，另一个是竖直方向上的匀变速直线运动，所以它们的合运动不是直线运动而是曲线运动。由小球所受合外力（重力）跟小球运动的速度方向始终不在一直线上，也可知小球的运动是曲线运动。

课本彩图 6 直观显示了小球的平抛运动（绿球）是水平方向上的匀速直线运动（蓝球）和竖直方向上的自由落体运动（红球）的合运动。

### 平抛运动的规律

由于平抛运动是水平方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动的合运动，所以我们可以根据这两种运动的规律分别得出物体在任一时刻的位置坐标  $x$  和  $y$ ：

$$x = v_0 t ;$$
$$y = \frac{1}{2} g t^2 .$$

上式中  $x$  是离抛出点的水平距离， $y$  是下落高度， $t$  是运动的时间。

根据坐标  $x$  和  $y$  就能确定任何时刻平抛物体的位置，用平滑曲线把这些位置的点连起来就可以得到平抛运动的轨迹。例如，一个物体以初速度  $v_0=10$  米/秒做平抛运动，表格中表示了它的几个位置的坐标，图 1-16 是根据这些坐标画出的轨迹。

t (秒)	x (米)	y (米)
0	0	0
1	10	4.9
2	20	19.6
3	30	44.1
4	40	78.4

平抛物体在各个时刻的瞬时速度可以看成是由水平分速度和竖直分速度合成的，其水平分速度  $v_x$  始终等于抛出时的初速度  $v_0$ ；竖直分速度  $v_y$  随时间不断增大，因此，它的合速度  $v$  的大小和方向都不断变化。如图 1-17 所示，物体抛出后经时间  $t$ ：

图 1-16

图 1-17

水平分速度  $v_x = v_0 ;$   
竖直分速度  $v_y = g t ;$   
合速度的大小  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} ;$   
合速度的方向  $\text{tg} \theta = \frac{v_y}{v_x} .$

式中  $\theta$  为合速度跟水平方向的夹角。

### 平抛运动的轨迹

由平抛运动的公式  $x = v_0 t$  和  $y = \frac{1}{2} g t^2$ ，消去  $t$ ，即可得  $y = \frac{g}{2v_0^2} x^2$ ，这就是平抛运动的轨迹方程。式中  $v_0$ 、 $g$  都是恒量，令  $p = \frac{v_0^2}{g}$ ，则  $x^2 = 2py$ ，

这就是抛物线方程，从焦点 $F(0, \frac{P}{2})$ ，准线 $y = -\frac{P}{2}$ ，可以看出，平抛运动的轨迹是以顶点为原点的抛物线。

### 思考

1. 如果平抛运动的初速度是 15 米/秒，试在图 1-16 的坐标中标出它在 4 秒末的位置。

2. 从一定高度水平抛出的物体，它在空中飞行的时间是由什么决定的？水平距离又是由什么决定的？

### [例题]

如图 1-18 所示，水平匀速移动的传送带将矿砂送入小车内。已知传送带离小车高度  $h$  为 1.8 米，传送带移动速度  $v_0$  为 2 米/秒，那么小车应放在什么位置？矿砂落入小车时的速度多大？是什么方向？（不计空气阻力， $g$  取 10 米/秒<sup>2</sup>）

解：矿砂离开传送带后做平抛运动，它的初速度就是传送带的移动速度  $v_0$ 。由下落高度  $h$  可求出时间  $t$ ，再由  $v_0$  和  $t$  可求出水平距离  $s$ 。

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}},$$

$$s = v_0 t = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}} = 2 \sqrt{\frac{2 \times 1.8}{10}} \text{ 米} = 1.2 \text{ 米}。$$

小车应放在离传送带末端水平距离为 1.2 米处。

矿砂落入小车时的速度  $v$  可由水平分速度  $v_x$  和竖直分速度  $v_y$  求得。

$$v_y = gt = g \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 1.8} \text{ 米/秒} = 6 \text{ 米/秒}，$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{2^2 + 6^2} \text{ 米/秒} = 6.32 \text{ 米/秒}。$$

$$\text{tg } \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{6}{2} = 3, \quad \theta = 71.6^\circ。$$

矿砂落入小车时的速度大小为 6.32 米/秒，跟水平方向成 71.6° 角。

S：平抛运动的瞬时速度大小和方向都时刻在改变，那么它是一种什么性质的运动呢？

T：做平抛运动的物体只受重力作用，重力加速度是不变的，因此平抛运动是一种匀变速运动。通过分析平抛运动中速度的变化情况，同样可以得出这个结论。图 1-19 中的  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ 、 $v_4$ ……是物体在抛出  $t$ 、 $2t$ 、 $3t$ 、 $4t$ ……末的瞬时速度。可以看出，每隔  $t$  时间，速度的变化  $\Delta v$  都是相等的，其大小等于  $gt$ ，方向总是竖直向下的。既然在任何相等的时间里速度的变化都相等，这种运动就是匀变速运动。并且由于物体运动轨迹是曲线，所以平抛运动是一种匀变速曲线运动。

图 1-19

### 练习四

1. 如图 1-20 所示, 小球从 A 点开始做平抛运动, 已知小球在抛出  $2t$  时刻的位置是在 P 点, 试在图上标出它在  $t$  和  $3t$  时刻的位置。

图 1-20

2. 解放军战士在山坡顶演习时, 在同一位置 O 沿水平方向分别发射出 A、B、C 三发不同型号的炮弹, 它们的轨迹如图 1-21 所示, 其中 A、B 落在地面上, C 落在另一斜坡上, 试比较它们的初速度大小和它们在空中飞行的时间。

图 1-21

图 1-22

3. 在用弹簧枪打靶的游戏中, 如果枪管水平对准靶心, 在子弹射出枪口的同时, 靶恰好自由坠落 (图 1-22), 子弹还能击中靶心吗? 为什么?

4. 水平飞行的轰炸机投弹时, 炸弹是每隔一定时间一颗颗落下的, 这些炸弹为什么能保持在一条竖直线上呢? 这些炸弹都会落在地面上同一点吗? 为什么?

5. 空投救灾物资的飞机在 490 米高空中以 40 米/秒的速度水平飞行。为了使物资落在指定地点, 应该在飞机离指定地点多远处让它落下? 并求物资落地时速度的大小和方向。

6. 有一水平泻出的瀑布, 落差是 19.6 米, 落地点离岩壁 10 米, 求瀑布的水平初速度。

## 五、斜抛运动

### 斜抛运动

把一个小球沿斜向上方向抛出, 可以看到小球先沿曲线上升, 到达最高点后沿曲线下降, 它的轨迹如图 1-23 所示。将物体用一定的初速度沿斜向抛出, 物体所做的运动叫做斜抛运动。掷出的铅球, 向斜上方射出的炮弹, 礼花喷出焰火的每一个燃烧颗粒 (课本彩图 2) 都是斜抛运动。

图 1-23

图 1-24

如果把斜向上抛运动的初速度  $v_0$  分解为水平方向的分速度  $v_x$  和竖直方向的分速度  $v_y$  (如图 1-24), 就可以把它看成是这样两个分运动的合运动: 一个是水平方向的匀速直线运动, 速度等于  $v_x$ ; 另一个是竖直方向的竖直上抛运动, 初速度等于  $v_y$ 。分别应用匀速直线运动和竖直上抛运动的规律, 就可确定斜抛物体在任一时刻的位置坐标和速度。

### 射高和射程

在斜抛运动中，轨迹最高点的高度叫做射高（图 1-23 中 A 点的高度），物体被抛出的地点到落地点之间的水平距离叫做射程（图 1-23 中 OB 的距离）。那么，斜抛运动的射程和射高跟哪些因素有关呢？

用图 1-25 所示的装置来做实验，可以看到在喷水嘴方向不变（即抛射角不变）时，随着喷出的水流速度减小，它的射程减小，射高也随着降低。

图 1-25

图 1-26

如果在喷水过程中保持喷出的水流速度大小不变，改变喷水嘴和水平方向的夹角。可以看到，在抛射角小的时候，射程随抛射角的增大而增大，当抛射角达到  $45^\circ$  时，射程最大；继续增大抛射角，射程反而减小。但射高却一直随抛射角的增大而增大的（图 1-26）。

**思考**

1. 做斜抛运动的物体，当它到达最高点时，它的速度是不是为零？
2. 能不能把斜向上抛运动看成是沿抛出方向的匀速直线运动和竖直向下的自由落体运动的合运动？

斜抛运动的射高和射程

把斜抛运动的初速度  $v_0$  分解为水平初速度  $v_x$  和竖直分速度  $v_y$ （图 1-24），设抛射角为  $\theta$ ，则

$$v_x = v_0 \cos \theta, \quad v_y = v_0 \sin \theta。$$

斜抛运动的射高  $Y$  是由它的竖直分速度  $v_y$  决定的。求出以初速度为  $v_y$  的竖直上抛运动的最大高度，就得到射高

$$Y = \frac{v_y^2}{2g} = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{2g}。$$

斜抛运动的射程  $X$  是由水平分速度  $v_x$  和飞行时间  $T$  决定的。求出以初速度为  $v_y$  的竖直上抛运动从抛出到落地点的时间就得到飞行时间。若抛出点和落地点在同一水平面上，则

$$T = \frac{2v_y}{g} = \frac{2v_0 \sin \theta}{g}$$

于是射程

$$X = v_x T = v_0 \cos \theta \cdot \frac{2v_0 \sin \theta}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}。$$

由上式可见，当抛射角是  $45^\circ$  时，射程最大。

**阅读材料**

**巴塞罗那奥运会圣火的点燃**

在巴塞罗那举行的第 25 届奥运会开幕式上，西班牙射箭运动员将圣火用箭射到圣火台上，点燃了奥运火炬。事前，有人曾经担心万一这支箭射歪了怎么办。甚至有人提出建议，到时不管圣火射不射中，只要箭到，便开启煤气阀门另行点火，以保证圣火台上燃起火炬。



我们知道，这支“火箭”的运动是斜抛运动。我们也已经知道斜抛运动的射高、射程跟初速度和抛射角的关系式，设圣火台离地面的高度是  $h$ ，射箭运动员离圣火台的水平距离是  $s$ ，箭射出时的初速度是  $v_0$ ，那么抛射角要多大才能把箭正好射到圣火台呢？

设抛射角为  $\theta$ ，把  $v_0$  分解为竖直分速度  $v_0 \sin \theta$  和水平分速度  $v_0 \cos \theta$ ，在竖直方向上，箭做竖直上抛运动，则上升高度

$$h = v_0 \sin \theta t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (1)$$

在水平方向上，箭做匀速直线运动，则水平距离

$$s = v_0 \cos \theta t \quad (2)$$

已知  $h$ 、 $s$  和  $v_0$ ，那么由 (1) 和 (2) 式即可求出  $\theta$ 。

以上的计算方法只适用于不计空气阻力的理想情况。实际上，物体做斜抛运动时，它受到的空气阻力和风的影响是不可忽略的。空气的阻力使物体斜抛时的速度减小，射高和射程也都比理想情况要小，且轨道的下降部分比较陡（图 1-27），因而不再是抛物线。抛图 1—27 体在静止空气中飞行的曲线叫做弹道曲线，弹道曲线的性质与抛体的形状有很大关系。例如，前部为锥形的圆柱形炮弹，初速度为 550 米/秒、抛射角为  $20^\circ$  时，在理想情况下计算出来的射程可达 19.5 千米，但实际射程却只有 8.1 千米。1918 年，德军用长射程炮轰击巴黎时，炮弹的抛射角为  $65^\circ$ 、初速度为 1600 米/秒，这样的炮弹可以上升到空气非常稀薄的同温层中飞行，同温层对炮弹的阻力非常小，炮弹的射程可以达到 120 千米。

图 1-27

计算物体在空气中飞行时，不但要考虑空气阻力，还必须考虑风的影响。这就必须要用到运动合成的知识。据说，西班牙射箭运动员，为了正确无误点燃圣火，由专家指导和气象部门的配合，在各种不同风向、风力情况下，进行了数千次的练习。从中取得了大量的实验数据，力争在任何情况下百发百中，万无一失。果然，在开幕式上，观众都看到了这精彩的一箭，“火箭”准确地射向了圣火台，点燃了奥运火炬。

### 本章学习要求

1. 理解分运动和合运动。
2. 理解运动的合成和分解。
3. 会用平行四边形定则求合位移、分位移、合速度和分速度。
4. 理解竖直上抛运动。
5. 理解平抛运动。
6. 知道斜抛运动。
7. 会用实验方法描出平抛运动的轨迹和研究平抛运动的性质。

### 复习题

1. 选择题 (以下各小题中只有一个正确答案)

(1) 一个人以不变速度向对岸游去, 游到河道中央时, 水流速度增大, 则人渡河的时间 [ ]

- (A) 增大。 - (B) 减小。  
(C) 不变。 (D) 无法判断。

图 1-28

(2) 如图 1-28 所示, 小船自 A 点渡河。第一次: 船实际航线偏向上游沿 AB 方向航行到达对岸 B 点; 第二次: 船实际航线偏向下游沿 AC 方向航行到达对岸 C 点。AB 和 AC 跟河岸垂线 AD 的夹角相等。如果两次航行时, 船在静水中的速度大小和水流速度都不变, 船到达对岸的时间分别为  $t_1$  和  $t_2$ , 则 [ ]

- (A)  $t_1 > t_2$ 。 (B)  $t_1 < t_2$ 。  
(C)  $t_1 = t_2$ 。 (D) 无法判断。

(3) 月球表面的重力加速度是地球表面重力加速度的  $1/6$ , 在地球表面和月球表面竖直向上抛出的小球, 如果它们上升的最大高度相等, 那么月球表面抛出的小球在空中运动的时间是地球表面的 [ ]

- (A)  $1/36$ 。 (B)  $1/\sqrt{6}$ 。  
(C)  $\sqrt{6}$ 倍。 (D) 6倍。

(4) 下列速度图象中, 表示竖直上抛运动的是 [ ]

图 1-29

(5) 离地面  $h$  高处有三个小球, 其中 A 球自由下落, B 球以初速度  $V_0$  水平抛出, C 球以初速度  $v_0$  竖直向上抛出。设它们落地时间依次为  $t_A$ 、 $t_B$ 、 $t_C$ , 则三者的关系是 [ ]

- (A)  $t_A < t_B < t_C$ 。 (B)  $t_A = t_B < t_C$ 。  
(C)  $t_A < t_B = t_C$ 。 (D)  $t_A = t_B = t_C$ 。

2. 选择题 (以下各小题中有两个或两个以上正确答案)

(1) 关于运动的合成, 下列说法中正确的是 [ ]

- (A) 合运动的速度一定比每一个分运动的速度大。  
(B) 合运动的速度有可能跟分运动的速度大小相等。  
(C) 两个匀速直线运动的合运动一定也是匀速直线运动。  
(D) 两个直线运动的合运动一定也是直线运动。

(2) 从同一高度以不同的速度同时水平抛出两颗质量不同的石子, 下列说法中正确的是 [ ]

- (A) 初速度大的先着地。 (B) 质量大的先着地。  
(C) 两颗石子同时着地。 (D) 初速度大的水平距离大。

(3) 消防队员手持水枪灭火, 水枪跟水平面有一仰角。关于水枪射出水流的射高和射程, 下列说法中正确的是 [ ]

- (A) 初速度大小相同时, 仰角越大, 射程也越大。  
(B) 初速度大小相同时, 仰角越大, 射高越大。  
(C) 仰角相同时, 初速度越大, 射高一定越大。

(D) 仰角相同时，初速度越大，射程不一定越大。

3. 跳伞运动员在无风的情况下自高为  $h$  的跳伞塔上竖直匀速下落所需时间为  $t$ ，在水平方向的风影响下，运动员沿斜向降落，落地点偏移距离为  $s$ ，求风速和运动员着地时的速度。

4. 飞艇进行空中测量时，它的航线要严格控制从西向东，如果飞艇的航速大小是 25 米/秒，从南面吹来的风速是 7 米/秒，则飞艇应向什么方向飞行？如果所测量的地区长 960 米，需飞行多少时间才能测量完毕？

5. 船渡河时，如果船头保持跟河岸垂直的航向前进，则 2 分钟到达对岸下游 120 米处，如果船头偏向上游并跟河岸成  $60^\circ$  角，则恰好到达正对岸，求河宽。

6. 在离地面 220 米高处以 100 米/秒的速度竖直向上射出一颗信号弹，求：(1) 信号弹上升的最大高度；(2) 信号弹离射出点距离为 180 米处的速度；(3) 信号弹从射出到落回地面上的时间。(  $g$  取 10 米/秒<sup>2</sup>)

7. 竖直上抛的物体先后两次经过高为  $h$  处的 P 点所用时间为  $t$ ，求物体抛出时的初速度。

8. 气球从地面静止出发向上做匀加速运动，加速度是 2 米/秒<sup>2</sup>，5 秒后从气球上落下一物体。求这物体落到地面上的时间和速度的大小。

9. 在悬崖顶上同时水平抛出 A、B 两球，初速度分别是 10 米/秒和 15 米/秒。如果 A 球在离悬崖水平距离 20 米处落地，求：(1) B 球落地点离悬崖的水平距离；(2) 悬崖的高度；(3) 两球落地时的速度。(  $g$  取 10 米/秒<sup>2</sup>)

10. 如图 1 - 30 所示，从倾角为  $\theta$  的斜坡上 A 处以水平速度  $V_0$  抛出的一个小球，落到斜坡上另一点 B 处，求 AB 间的距离。

## 牛顿运动定律

### 1. 汽车驾驶台前挂的玩具

### 2. 太空服

### 3. 机车拉车厢行驶

在必修课中我们已经学习过牛顿运动定律，并讨论了有关应用中的一些简单实例。这一章中我们将进一步讨论一些较为复杂的现象。譬如在汽车驾驶台前，司机常喜欢挂一些小玩具，如一个精致的娃娃（本章导图1）。当汽车匀速行驶时，这个悬挂着的娃娃相对于车厢是静止的，而当汽车减速、加速和转弯时，为什么娃娃就会前后、左右摇摆起来；在发射航天飞机的火箭加速升空时，为什么宇航员必须平躺着；而当航天飞机在环绕地球正常飞行时，为什么宇航员都是漂浮着的。以上这些现象都可在以前学过的牛顿运动定律的基础上通过进一步学习得到解释。

## 一、物体受力情况分析

在吊装大桥钢梁或大型设备的时候（图2-1），需要正确分析和确定大桥钢梁或大型设备的受力情况，只有这样，才能准确、安全地进行安装。在研究物体的平衡或运动状态的变化时，正确分析物体的受力情况是解决实际问题的关键。

我们知道力是物体间的相互作用，力不能脱离物体而存在。力学中常见的力有重力、弹力和摩擦力。电学中常见的电磁力有电荷在电场中受到的电场力，电流在磁场中受到的磁场力等等。

图 2-1

**重力** 地球跟地球上的物体间存在万有引力。这种因地球的吸引而使物体受到的力叫做重力。重力的方向总是竖直向下的，重力的大小  $G=mg$ 。

**弹力** 直接接触的物体间发生弹性形变而产生的力叫做弹力。与支持面接触的物体所受的弹力方向总垂直于支持面，且指向该物体；悬绳对物体的弹力的方向总是沿绳指向绳收缩的方向。弹力的大小跟组成物体的材料性质和物体发生弹性形变的程度有关。

**摩擦力** 物体接触面间产生的阻碍物体相对运动趋势的力叫做静摩擦力。静摩擦力的方向总跟接触面相切，并且跟物体相对运动趋势的方向相反。两物体接触面之间的静摩擦力大小是随着要使它们发生相对运动的外力的大小而变化的，在一定的压力下静摩擦力存在一个最大值，叫做最大静摩擦力。

当一个物体在另一个物体表面上滑动时，两个物体接触面间产生的阻碍它们相对滑动的力叫做滑动摩擦力。滑动摩擦力的方向跟物体相对滑动的方向相反，滑动摩擦力  $f$  跟两接触面间的压力  $N$  成正比，即

$$f = \mu N。$$

式中  $\mu$  是滑动摩擦系数，它的大小决定于两个接触面的材料性质和粗糙程度。

[例题 1]

如图 2 - 2 所示，一个系留气球，在水平方向的风力作用下斜向飘在空中保持平衡，它受到哪些力的作用？

图 2-2

图 2-3

解：气球受重力  $G$ ，方向竖直向下。气球跟空气和绳接触，空气对气球有浮力  $Q$  的作用，方向向上；绳对气球有拉力  $T$  的作用，方向沿绳斜向下。气球还受到水平方向风力  $F$  的作用。它的受力情况如图 2 - 3 所示。

[例题 2]

用绳沿平行于斜面的方向拉着木箱使它沿斜面向上运动时（图 2 - 4），木箱受到哪些力的作用？

图 2-4

图 2-5

解：木箱除了受到重力  $G$ 、绳的拉力  $T$  的作用外，还由于木箱跟斜面接触，紧压斜面，使斜面发生形变，斜面对木箱产生弹力（支持力） $N$ ，方向垂直斜面指向木箱。同时，木箱在斜面上滑动，斜面对木箱产生滑动摩擦力  $f$ ，方向跟木箱运动方向相反。木箱的受力图如图 2 - 5 所示。

[例题 3]

光滑的半球形碗边上搁一筷子（图 2 - 6），筷子受到哪些力的作用？

图 2-6

图 2-7

解：筷子受重力  $G$ ，作用在筷子的重心  $C$ ，方向竖直向下。筷子跟碗边  $A$  点和内壁  $B$  点接触，在  $A$  点筷受支持力  $N_1$ ，方向跟筷垂直；在  $B$  点筷受支持力  $N_2$ ，方向跟过  $B$  点的切面垂直，即沿半球形碗的半径方向。由于碗壁是光滑的，不考虑摩擦力。受力图如图 2 - 7 所示。

[例题 4]

如图 2 - 8 所示，水平地面上有一木箱，在木箱上放一本书，用绳沿水平方向拉木箱加速前进时，如果木箱跟书始终保持相对静止，书和木箱各受到哪些力的作用？

图 2-8

图 2-9

解：先分析书受到的力。在竖直方向书受重力  $G_1$  和木箱的支持力  $Q_1$ 。书对木箱虽然相对静止，但木箱加速前进时，书相对于木箱有向后运动

的趋势，因而书还受到木箱的静摩擦力  $f$  的作用，方向向前。也可以这样来分析，既然书随着木箱一起在水平方向做加速运动，那么在水平方向必然有产生这个加速度的力，这个力便是木箱对书的静摩擦力  $f$ ，方向向前，书的受力图如图 2 - 9 所示。

图 2-10

再分析木箱受到的力，木箱除了受到重力  $G_2$  外，还跟书、绳、地面接触，它在竖直方向还受到向下的书的压力  $Q_1'$ （大小等于  $Q_1$ ）和向上的地面的支持力  $N$ 。在水平方向受到绳的拉力  $T$  和滑动摩擦力  $f_1$ ，由于木箱相对于书有向前运动的趋势，所以还受到书的静摩擦力  $f$  的作用，它的大小等于  $f$ ，方向向后。木箱的受力图如图 2 - 10 所示。

在这两个物体所受的力中，要注意区别作用力、反作用力和平衡力。例如，书对木箱的压力  $Q_1'$  和木箱对书的支持力  $Q_1$  是一对作用力、反作用力，书对木箱的静摩擦力  $f$  和木箱对书的静摩擦力  $f$  也是一对作用力和反作用力。书所受的重力  $G_1$  和支持力  $Q_1$  是一对平衡力。

从上述几个例题的分析中可以知道，分析物体的受力情况，首先要明确被研究的对象，把它从周围物体中隔离出来。然后分析这个被隔离物体的周围有哪些物体对它施加力的作用，各是什么性质的力，力的方向是怎样的，把它们一一画在受力图中，这种分析物体受力的方法叫做隔离法。

用隔离法分析物体的受力情况时，要注意被隔离的物体是受力体，而周围对它作用力的物体都是施力体。不要把施力体上受到的力错加在受力体上，在受力体上不要凭空画出找不到施力体的力，当然也不要遗漏所受到的任何一个力。

为了使问题简化，有时可以忽略某些次要因素，这是一种常用的科学研究方法，如物体运动速度不大且横截面积较小时可以略去空气阻力。随着学习的深入和经验的积累，希望同学们能根据具体情况自己判断哪些次要因素可以忽略。

#### 思考

用头顶足球的瞬间，足球受到哪些力的作用？顶出的球在空中运动时，受到哪些力的作用？

S：上面例题 2 中，能不能说木箱受五个力的作用：绳的拉力  $T$ ，斜面对木箱的支持力  $N$  和滑动摩擦力  $f$ ，下滑力  $F_1$  和压力  $F_2$ ，如图 2 - 11 所示？

图 2-11

T：不能。图 2-11 中的  $F_1$  和  $F_2$  是木箱所受重力  $G$  的两个分力，下滑力是以效果命名的力，而压力应作用在斜面上，受力体是斜面。在分析物体受力情况时，每个力必须是周围某一个施力体对这个物体的作用，而不能根据作用效果用几个力来替代。当然，在受力分析的基础上，为了便于计算，有时需要把某些力按作用效果分解后画在力图上。

#### 练习五

以下各题均要求作出物体的受力图，写出各个力的名称、符号和它们的施力体。

1. 一个在粗糙水平面上滑动的滑块，速度越来越小最后停下来。在停止运动前，滑块受到哪些力的作用？

2. 沿着粗糙斜面下滑的木块受到哪些力的作用？

3. 用绳沿着水平方向拉玩具在光滑桌面上前进，玩具受到哪些力的作用？如果绳沿水平方向拉玩具使玩具在光滑桌面上做匀速圆周运动，玩具受到哪些力的作用？

4. 如图 2 - 12 所示，搁置在光滑的长方形槽内的木料受到哪些力的作用？

图 2-12

图 2-13

5. 靠在光滑墙上的静止木棒（图 2 - 13），受到哪些力的作用？

6. 向上运动的电梯受到哪些力的作用？站在向上运动的电梯里的人受到哪些力的作用？

7. 平板车上有一袋水泥，用绳沿着水平方向拉平板车在粗糙地面上加速前进，在这过程中，这袋水泥始终跟平板车保持相对静止。水泥袋和平板车分别受到哪些力的作用？如果平板车匀速前进或减速前进呢？

8. 用丝线吊住两个带同种电荷的绝缘小球 A 和 B（图 2 - 14），小球 A 和 B 分别受到哪些力的作用？

图 2-14

图 2-15

9. 如图 2 - 15 所示，用两根弹簧吊着的具有一定质量的通电导体 AB，在磁场中（磁场方向、电流方向如图中所示）受到哪些力的作用？

## 二、牛顿运动定律

力学所研究的是力和运动的关系。远在 2000 多年前，人们已经提出了这个问题。直到 17 世纪，伽利略才利用理想实验，进行分析推理，正确地得出了力不是维持物体运动的原因而是改变物体运动状态的原因的结论。牛顿在伽利略等人的基础上，系统地总结出三条运动定律。这三条定律构成了经典力学的基础。

**牛顿第一定律** 任何物体都保持静止状态或匀速直线运动状态，直到外力迫使它改变这种状态为止。物体具有的保持原来的静止状态或匀速直线运动状态的性质叫做惯性。所以牛顿第一定律又叫做惯性定律。牛顿第一定律还告诉我们，力是改变物体运动状态即产生加速度的原因。

**牛顿第二定律** 在大量实验事实的基础上，得出物体的加速度跟物体所受的作用力成正比，跟物体质量成反比的结论，这就是牛顿第二定

律。如果质量  $m$  用千克做单位，加速度  $a$  用米/秒<sup>2</sup>做单位，力  $F$  用牛顿做单位，牛顿第二定律的  $a = \frac{F}{m}$ ，或  $F = ma$ 。如果物体受到几个力共同作用时，牛顿第二定律可推广为物体的加速度跟物体所受合外力成正比，跟物体的质量成反比，加速度的方向跟合外力的方向相同，写成公式就是  $a = \frac{F_{\text{合}}}{m}$  或  $F_{\text{合}} = ma$ 。

牛顿第二定律告诉我们，在相同外力的作用下，质量大的物体产生的加速度小，表示它的运动状态难改变，惯性大；在相同外力作用下，质量小的物体产生的加速度大，表示它的运动状态容易改变，惯性小。因此，质量是物体惯性大小的量度。

**牛顿第三定律** 大量事实证明，物体之间的作用总是相互的。两个物体之间的作用力和反作用力总是大小相等，方向相反，作用在一条直线上。这就是牛顿第三定律。作用力和反作用力分别作用在两个不同的物体上，它们同时存在、同时消失，而且是同种性质的力。

[例题 1]

放在水平地面上的木箱重 30 牛，如果用手施加 6 牛水平方向向左的力推木箱，木箱静止不动，这时木箱受到哪些力的作用？这些力各多大？它们的反作用力分别是哪些力？有哪些力是平衡力？

解：木箱受重力  $G$ ，大小为 30 牛，方向竖直向下；手对木箱的推力  $F$ ，大小为 6 牛，方向向左；木箱跟地面接触，使地面发生形变产生弹力（支持力） $N$ ，大小为 30 牛，方向垂直地面指向木箱；木箱虽静止，但在推力作用下有向左运动趋势，因而木箱还受向右的静摩擦力  $f$  的作用，大小为 6 牛，它的受力图如图 2 - 16 所示。

图 2-16

木箱所受重力的反作用力是木箱对地球的引力；地面对木箱的支持力的反作用力是木箱对地面的压力；手对木箱的推力的反作用力是木箱对手的推力；地面对木箱的静摩擦力的反作用力是木箱对地面的静摩擦力。

木箱所受四个力中有两对平衡力：木箱所受重力  $G$  和支持力  $N$ ；木箱所受推力  $F$  和静摩擦力  $f$ 。

[例题 2]

上题中，如果水平方向的推力改变为 15 牛，使木箱向前运动，设木箱与地面间的滑动摩擦系数是 0.4，求木箱的加速度。

解：木箱运动时受重力  $G$ 、推力  $F$ 、支持力  $N$  和滑动摩擦力  $f$  四个力的作用。木箱的加速度是这四个力的合力产生的。

木箱的质量

$$m = \frac{G}{g} = \frac{30}{9.8} \text{ 千克} = 3.06 \text{ 千克},$$

滑动摩擦力

$$f = \mu N = 0.4 \times 30 \text{ 牛} = 12 \text{ 牛}.$$

由牛顿第二定律可得

$$F_{\text{合}} = ma,$$



由于木箱仅在水平方向运动，因此

$$F - f = ma,$$

木箱的加速度

$$a = \frac{F - f}{m} = \frac{15 - 12}{3.06} \text{ 米 / 秒}^2 = 0.98 \text{ 米 / 秒}^2。$$

### 练习六

1. 如图 2 - 17 所示，一个人背靠墙在光滑地板上去推一个很重的柜子，人会不会移动，为什么？柜子会不会移动，为什么？

2. 用 10 米 / 秒的初速度把一物体竖直向上抛出，设运动中物体所受空气阻力是重力的 0.2 倍，物体能上升多高？

图 2-17

3. 一架雪橇从静止开始沿雪坡匀加速滑下，在 10 秒内滑下 65 米。已知雪橇的质量是 50 千克，雪坡的倾角是  $10^\circ$ ，求下滑过程中雪橇受到的阻力。

4. 质量为 2000 千克的汽车以 10 米 / 秒的速度在水平道路上行驶，现驶入一个半径是 20 米的弯道，若汽车行驶速率不变，它在转弯时所需的向心力是由什么力提供的？这个力应多大？

### 三、牛顿第二定律的应用

应用牛顿第二定律时，必须认识加速度和力的矢量性和瞬时性。加速度的方向跟合外力的方向始终相同，合外力的方向发生变化时，加速度的方向也相应发生变化，加速度的大小跟合外力的大小始终满足  $a = \frac{F_{\text{合}}}{m}$  的关系。对质量一定的物体来说，合外力大小不变时，加速度大小也不变；合外力大小变化时，加速度的大小也发生相应变化。

对质量一定的物体来说，合外力决定物体的加速度而跟物体有无速度以及速度的大小都无直接关系，而物体速度的变化不但和合外力有关还决定于合外力作用的时间。

#### 思考

1. 试判断物体在做以下几种运动的过程中，速度  $v$ 、加速度  $a$  和合外力  $F$  的方向（在横线上填向上或向下）。

(1) 加速上升： $v$  \_\_\_\_\_， $a$  \_\_\_\_\_， $F$  \_\_\_\_\_。

(2) 减速上升： $v$  \_\_\_\_\_， $a$  \_\_\_\_\_， $F$  \_\_\_\_\_。

(3) 加速下降： $v$  \_\_\_\_\_， $a$  \_\_\_\_\_， $F$  \_\_\_\_\_。

(4) 减速下降： $v$  \_\_\_\_\_， $a$  \_\_\_\_\_， $F$  \_\_\_\_\_。

2. 设  $F$  是物体所受大小不变的合外力， $v$  是物体运动的速度，在下列几种情况下，物体的速度大小和方向怎样变化？物体做什么运动？

(1)  $F$  的方向跟  $v$  的方向相反，且在一直线上。

(2)  $F$  的方向跟  $v$  的方向始终垂直。

(3)  $F$  的方向跟  $v$  的方向成锐角。

(4)  $F$  的方向跟  $v$  的方向成钝角。

S: 汽车在平直道路上行驶时, 如果逐渐减小油门, 那么汽车的速度也一定逐渐减小, 对吗?

T: 不对。物体所受的合外力决定物体的加速度, 而物体速度如何变化是由物体原来的速度和加速度决定的。汽车在平直道路上行驶时, 逐渐减小油门, 只是牵引力逐渐减小。只要牵引力仍大于运动中的阻力, 那么虽然合外力逐渐变小, 但方向不变, 因此汽车加速度的方向不变, 仍和速度方向相同, 所以尽管加速度逐渐减小, 但速度仍在逐渐增大。只有当牵引力减小到小于阻力时, 合外力方向跟速度方向相反, 速度才会逐渐减小。

[例题 1]

电梯的质量是 2 吨, 运动中所受阻力大小始终是 1200 牛。当电梯分别以  $1.5 \text{ 米/秒}^2$  大小的加速度匀加速上升和匀减速下降时, 钢索对电梯的拉力各为多大?

解: 电梯无论上升还是下降, 它都受重力、钢索拉力和阻力这三个力的作用。重力  $G$  方向向下; 钢索的拉力  $T$  方向向上; 阻力  $f$  方向跟运动方向相反, 上升时向下, 下降时向上。

当电梯匀加速上升时, 速度方向向上, 加速度方向向上, 合外力方向也向上(图 2-18)。以合力的方向为正方向, 根据牛顿第二定律可得

$$\begin{aligned} T - f - mg &= ma, \\ T &= f + mg + ma \\ &= 1200 \text{ 牛} + 2000 \times 9.8 \text{ 牛} + 2000 \times 1.5 \text{ 牛} \\ &= 23800 \text{ 牛}。 \end{aligned}$$

电梯匀加速上升时, 钢索对电梯的拉力是 23800 牛。

图 2-18

图 2-19

当电梯匀减速下降时, 速度方向向下, 加速度方向向上, 合外力方向也向上(图 2-19)。以合力的方向为正方向, 根据牛顿第二定律可得

$$\begin{aligned} T + f - mg &= ma \\ T &= mg - f + ma \\ &= 2000 \times 9.8 \text{ 牛} - 1200 \text{ 牛} + 2000 \times 1.5 \text{ 牛} \\ &= 21400 \text{ 牛}。 \end{aligned}$$

电梯匀减速下降时, 钢索对电梯的拉力是 21400 牛。

想想看, 在这两种情况下, 加速度的大小和方向都相同, 为什么第二种情况的钢索拉力小于第一种情况的拉力。

[例题 2]

汽车驾驶台前挂着一个玩具娃娃。汽车行驶时, 如果悬挂娃娃的细线稳定在向后偏离竖直方向  $15^\circ$  角的位置上(图 2-20), 这时汽车的加速度多大? 细线对娃娃的拉力是娃娃所受重力的几倍?

图 2-20

图 2-21

解：玩具娃娃受重力  $G$  和线的拉力  $T$  [图 2-21 (a)]。这两个力并不在一直线上，它们的合力  $F$  将使娃娃产生向前的加速度，从而跟随汽车做加速运动。由于娃娃跟汽车处于相对静止，这说明娃娃的加速度  $a$  跟汽车的加速度相等。根据  $G$ 、 $T$  和合力  $F$  的关系 [图 2-21 (b)]，可得

$$\operatorname{tg}15^{\circ} = \frac{F}{G} = \frac{ma}{mg} = \frac{a}{g},$$

$$a = g \operatorname{tg}15^{\circ} = 9.8 \times 0.268 \text{米/秒}^2 = 2.63 \text{米/秒}^2。$$

又因 
$$\cos15^{\circ} = \frac{G}{T}, T = \frac{G}{\cos15^{\circ}} = 1.04G。$$

汽车的加速度是  $2.63 \text{米/秒}^2$ ，细线对娃娃的拉力是娃娃所受重力的  $1.04$  倍。

想想看，若汽车的加速度增大，细线跟竖直方向的夹角将怎样变化？若汽车制动减速时，细线跟竖直方向的夹角又将怎样变化？

[例题 3]

工人用绳索拉铸件，从静止开始在水平面上前进。如果铸件的质量是  $20$  千克，铸件与地面间的滑动摩擦系数是  $0.25$ ，工人用  $60$  牛的力拉动铸件，绳跟水平方向成  $37^{\circ}$  角并保持不变 (图 2-22)。经  $4$  秒钟后松手，问松手后铸件还能前进多远。(  $g$  取  $10 \text{米/秒}^2$ ， $\cos37^{\circ}=0.8$ ， $\sin37^{\circ}=0.6$ )

图 2-22

图 2-23

解：由题意可知铸件的运动先后有两个过程，第一个过程是从静止开始运动到松手前，第二个过程是从松手后到停止。

在第一个过程中，铸件受重力  $G$ 、拉力  $T$ 、地面支持力  $N$  和滑动摩擦力  $f$  的作用 (图 2-23)。铸件在这些不变的力的作用下从静止开始做匀加速运动。

把拉力  $T$  分解为平行于地面的分力  $T_1$  和垂直于地面的分力  $T_2$  (图 2-24)，

$$T_1 = T \cos 37^{\circ}, T_2 = T \sin 37^{\circ},$$

铸件沿水平方向做匀加速运动，加速度  $a$  方向向前，由牛顿第二定律可得

$$T \cos 37^{\circ} - f = ma \tag{1}$$

铸件在竖直方向上的合外力为零

$$T \sin 37^{\circ} + N - mg = 0 \tag{2}$$

又因  $f = \mu N$ ，将 (2) 式代入 (1) 式，得

$$T\cos 37^\circ - \mu (mg - T\sin 37^\circ) = ma,$$

$$a = \frac{T\cos 37^\circ - \mu (mg - T\sin 37^\circ)}{m}$$

$$= \frac{60 \times 0.8 - 0.25(20 \times 10 - 60 \times 0.6)}{20} \text{米/秒}^2$$

$$= 0.35 \text{米/秒}^2。$$

图 2-24

图 2-25

在第二个过程中，松手后绳的拉力为零，铸件受重力  $G$ 、地面支持力  $N$  和滑动摩擦力  $f$  的作用（图 2 - 25）。铸件在这些不变的力的作用下做匀减速运动，它的初速度  $v_0$  即为第一个过程的末速度  $at$ ，

$$v_0 = at = 0.35 \times 4 \text{米/秒} = 1.4 \text{米/秒}。$$

铸件做匀减速运动的加速度  $a$  由滑动摩擦力产生，方向与初速度  $v_0$  方向相反，由牛顿第二定律可得

$$f = ma。$$

又因  $f = \mu N = \mu mg$ ，所以

$$a' = \mu g = 0.25 \times 10 \text{米/秒}^2 = 2.5 \text{米/秒}^2。$$

设铸件前进  $s$  后停止，由运动学公式可得

$$v_t^2 = v_0^2 - 2a's = 0$$

$$s = \frac{v_0^2}{2a'} = \frac{1.4^2}{2 \times 2.5} \text{米} = 0.392 \text{米}。$$

工人松手后，铸件还能前进 0.392 米。

#### [例题 4]

水平放置的传送带上有一质量为 30 千克的行李箱，传送带运动时，行李箱始终跟传送带保持相对静止。求下列情况下，传送带对行李箱的静摩擦力的大小和方向：（1）传送带以 1 米/秒<sup>2</sup>的加速度运动时；（2）传送带以 -1 米/秒<sup>2</sup>的加速度运动时；（3）传送带以 1 米/秒的速度匀速运动时。

解：（1）传送带加速运动时，行李箱受重力  $G$ 、支持力  $N$  和静摩擦力  $f$  的作用。由于传送带加速时，行李箱相对于传送带有向后运动的趋势，所以行李箱受到的静摩擦力  $f$  的方向向前（图 2 - 26）。正是这个静摩擦力，使行李箱产生跟传送带相同的加速度，从而保持相对静止。由牛顿第二定律可得

$$f = ma = 30 \times 1 \text{牛} = 30 \text{牛}，$$

$f$  的方向向前。

图 2-26

图 2-27

（2）由于传送带减速运动时，行李箱相对于传送带有向前运动的趋势，所以行李箱受到的静摩擦力  $f$  的方向向后（图 2 - 27），由牛顿第

二定律可得

$$f = ma' = 30 \times \text{牛} = 30 \text{ 牛},$$

方向向后。

(3) 传送带匀速运动时, 行李箱相对于传送带没有相对运动趋势, 所以静摩擦力等于零。

[例题 5]

如图 2-28 所示, 质量为 2 吨的汽车以 6 米/秒不变的速率在坡路上行驶。如果坡底 A 处和坡顶 B 处的曲率半径都是 36 米, 试求汽车经过坡底 A 处和坡顶 B 处时对路面的压力。

解: 汽车在坡路上运动可以看成是在竖直平面内的一段圆弧上的运动。坡底处的圆心位置在坡底正上方, 坡顶处的圆心位置在坡顶正下方。

图 2-28

图 2-29

汽车经过坡底 A 处时沿圆半径方向, 即沿法向方向受到重力 G 和支持力  $N_1$  的作用, 这两个力的合力就是汽车做圆周运动经 A 处时所需的向心力, 它的方向向上 (图 2-29), 所以

$$\begin{aligned} F_{\text{向}} &= ma_{\text{向}}, \\ N_1 - mg &= m \frac{v^2}{r}, \\ N_1 &= mg + m \frac{v^2}{r} \\ &= 2000 \times 9.8 \text{ 牛} + 2000 \times \frac{6^2}{36} \text{ 牛} \\ &= 2.16 \times 10^4 \text{ 牛}. \end{aligned}$$

汽车对路面的压力是路面对汽车的支持力  $N_1$  的反作用力, 它的大小也是  $2.16 \times 10^4$  牛, 方向向下。

汽车经过坡顶 B 处时沿法向方向受到重力 G 和支持力  $N_2$  的作用, 这两个力的合力就是汽车做圆周运动经 B 处时所需的向心力, 它的方向向下 (图 2-30), 所以

$$\begin{aligned} F_{\text{向}} &= ma_{\text{向}}, \\ mg - N_2 &= m \frac{v^2}{r}, \\ N_2 &= mg - m \frac{v^2}{r} \\ &= 2000 \times 9.8 \text{ 牛} + 2000 \times \frac{6^2}{36} \text{ 牛} \\ &= 1.76 \times 10^4 \text{ 牛}. \end{aligned}$$

图 2-30

汽车对路面的压力是路面对汽车的支持力  $N_2$  的反作用力，它的大小也是  $1.76 \times 10^4$  牛，方向向下。

讨论：从上述两种情况下支持力  $N$  的表达式可知，汽车在坡底处对路面的压力总是大于它的重力，汽车的运动速度越大，压力也越大。汽车在坡顶处对路面的压力总是小于它的重力，汽车的运动速度越大，压力越小。当汽车的速度达到某一值时，对坡顶的压力可为零，这个速度可由下式求得：

$$\text{当 } N_2 = 0 \text{ 时, } \quad mg = m \frac{v^2}{r},$$

$$v = \sqrt{gr}.$$

可以设想一下，汽车速度大于  $\sqrt{gr}$  时将会怎样呢？这时计算出来的压力小于零，这当然是不可能的。实际上，这时汽车已脱离坡顶飞出了。

### 连接体运动

拖轮牵引驳船，机车拉车厢（本章导图 3）的运动都是连接体运动。在连接体运动中，如果需要知道各个运动物体间的相互作用力，就需要把各个物体从连接体中隔离出来，单独分析它们各自所受的外力和运动情况，应用牛顿第二和第三定律进行计算，下面讨论一个实例。

图 2-31

一辆卡车拉着一辆拖车在水平道路上自静止开始运动的一段过程中（图 2-31），卡车的牵引力是 13500 牛，质量是 5 吨，拖车的质量是 2.5 吨，运动中所受阻力是车重的 0.02 倍，求它们的加速度和连接卡车和拖车间的挂钩的拉力。（ $g$  取 10 米/秒<sup>2</sup>）

解：把卡车和拖车隔离开来，分别分析它们的受力情况。卡车受重力  $G_1$ ，支持力  $N_1$ ，牵引力  $F$ ，阻力  $f_1$  和挂钩向后的拉力  $T$  这五个力的作用（图 2-32）。拖车受重力  $G_2$ ，支持力  $N_2$ ，阻力  $f_2$  和挂钩向前的拉力  $T$  这四个力的作用（图 2-33）。由牛顿第三定律可知，挂钩对卡车的向后拉力跟挂钩对拖车的向前拉力大小是相等的。由于卡车和拖车一起运动，它们的加速度  $a$  是相同的。又因为卡车和拖车在竖直方向的合力为零，所以只需在水平方向根据牛顿第二定律，分别对卡车和拖车列出方程：

图 2-32

图 2-33

对于卡车：

$$F - T - f_1 = m_1 a \quad (1)$$

对于拖车：

$$T - f_2 = m_2 a \quad (2)$$

两式相加，可得

$$F - f_1 - f_2 = (m_1 + m_2) a \quad (3)$$

又因  $f_1=km_1g, f_2=km_2g。$

$$a = \frac{F - km_1g - km_2g}{m_1 + m_2}$$

$$= \frac{13500 - 0.02 \times 5 \times 10^4 - 0.02 \times 2.5 \times 10^4}{5000 + 2500} \text{米/秒}^2$$

$$= 1.6 \text{米/秒}^2。$$

$$T = f_2 + m_2a$$

$$= 0.02 \times 2.5 \times 10^4 \text{牛} + 2500 \times 1.6 \text{牛}$$

$$= 4500 \text{牛}。$$

卡车和拖车的加速度是 1.6 米/秒<sup>2</sup>，连接卡车和拖车间的挂钩的拉力是 4500 牛。如果我们只要求出它们的加速度，也可以把卡车和拖车看成一个整体，整体所受的外力是 F、 $f_1$  和  $f_2$ ，整体的质量是  $m_1 + m_2$ ，用牛顿第二定律即可列出方程，这个方程就是上面的 (3) 式。要注意，这时挂钩对卡车和对拖车的拉力 T，对于整体来说都不是外力。

### 思考

1. 汽车在做什么运动时，才可能使一木块紧贴在车厢后壁上而不会掉下来 (图 2—34)。

图 2-34

2. 受 1 水平外力 F 作用而匀速前进的物体，当 F 逐渐减小到零的过程中，物体的加速度和速度是怎样变化的？

### 练习七

1. 试根据下表中物体做直线运动的情况，写出它的速度方向、加速度方向和合外力方向。

运动情况	速度方向	加速度方向	合外力方向
物体向左做加速运动			
物体向左做减速运动			
物体向右做加速运动			
物体向右做减速运动			

2. 汽车从静止出发沿水平公路做直线运动，设所受阻力始终不变。从  $t_0$  时刻到  $t_1$  时刻，牵引力不变，且大于阻力；从  $t_1$  时刻开始，牵引力均匀减小，到  $t_2$  时刻牵引力减为零；到  $t_3$  时刻汽车停止。试分析汽车从出发到停止运动所经历的运动过程。

3. 如图 2 - 35 所示，用跟水平方向成  $\alpha$  角的力 F 推物体沿竖直导轨向上做匀加速运动。如果物体的质量为 m，物体和导轨间的滑动摩擦系数为  $\mu$ ，求物体的加速度。

图 2-35

4. 总质量为  $M$  的热气球, 在空中以加速度  $a$  竖直下降。现要它以同样大小的加速度竖直上升, 应抛掉多大质量的砂袋? 设气球所受浮力始终不变, 空气阻力是气球所受重力的  $k$  倍。

5. 皮带传动装置跟地面成  $12^\circ$  角, 质量为 10 千克的货物静止在皮带上跟皮带一起以  $0.5$  米/秒<sup>2</sup> 的加速度向上运动。求货物受到的静摩擦力的大小和方向。

6. 质量为 100 克的物体以 30 米/秒的初速度竖直向上抛出, 经 2.5 秒达到最高点, 求物体所受的平均阻力和物体落回原处时的速度。(  $g$  取  $10$  米/秒<sup>2</sup> )

7. 如图 2 - 36 所示, 工人沿长 3 米、倾角  $30^\circ$  的跳板将质量是 200 千克的货物卸下。为了不使加速度过大, 工人用跟斜面成  $15^\circ$  角斜向上的力 300 牛拉住货物。货物跟跳板间的滑动摩擦系数是 0.4, 求工人用这一不变的力把货物沿斜面卸到地上的时间。

图 2-36

8. 一节质量为 2 吨的车厢从长 200 米、高 5 米的斜坡顶端由静止开始下滑, 到达坡底后继续在水平面上滑行。若整个运动中受到的阻力都是车重的 0.02 倍, 求车在水平面上能滑行的最大距离。(  $g$  取  $10$  米/秒<sup>2</sup> )

9. 甲、乙两辆摩托车以相同的速度在一段平直的高速公路上并列匀速行驶, 从某一地点开始, 甲车关闭发动机, 乙车加大油门匀加速前进, 4 秒后两车相距 20 米, 已知两车运动中所受阻力都是车重的 0.05 倍, 乙车的质量是 100 千克, 求: (1) 甲、乙两车的加速度; (2) 乙车在加速时的牵引力。(  $g$  取  $10$  米/秒<sup>2</sup> )

10. 列车刚从车站开出的一段时间内可看成在做匀加速运动。在列车车厢内利用一根线、一个小球和一把刻度尺, 怎样测出列车在这段时间内的加速度?

11. 质量为 60 千克的飞行员在竖直平面内作半径为 1000 米的环形特技表演, 他在圆弧的最高点时速度是 120 米/秒, 呈倒悬状态; 在圆弧的最低点时速度是 200 米/秒, 呈正坐状态, 求飞行员在最高点和最低点时对座椅的压力的方向和大小。

12. 一个质量是 1 千克的小球, 系在长 0.4 米的细绳一端, 以绳的另一端为圆心在竖直平面内做圆周运动, 小球在最高点时的速度至少多大才能保持在竖直平面内做圆周运动? 如果小球经过最高点时的速度是 4 米/秒, 这时小球对绳子的拉力是多大? 什么方向?(  $g$  取  $10$  米/秒<sup>2</sup> )

#### \* 四、超重和失重

敦煌壁画中的“飞天”形象和“嫦娥奔月”的神话传说都反映了我们祖先对太空飞翔的向往。随着人造卫星和宇宙飞船的发射成功, 人类实现了遨游太空的梦想。当你乘坐飞船进入太空后, 就可以领略到“飞天”的感受了。你能“上不着天, 下不着地”地在舱内飘荡, 这就是失重状态下的奇异生活。至于人对超重的感受就不那么美妙了。例如, 升降机开始上升或下降中制动时, 人都会有一种不大好受的感觉。那究竟什么是超重和失重呢?



我们知道，物体所受重力可以用弹簧秤来测量，下面我们先来做一个实验。

用手提一个弹簧秤，秤上挂有一个质量为  $m$  的钩码。钩码静止时，弹簧秤的读数就等于钩码所受的重力[图 2 - 37 (a) ]。

用手提着这个弹簧秤使钩码加速上升时，可以看到弹簧秤的读数大于钩码所受的重力[图 2 - 37 (b) ]。

用手提着这个弹簧秤使钩码加速下降时，可以看到弹簧秤的读数小于钩码所受的重力[图 2 - 37 (c) ]。

如果放手让弹簧秤连同钩码一起自由下落，可以看到这时弹簧秤的读数为零[图 2 - 37 (d) ]。

上述实验结果可以用牛顿第二定律结合牛顿第三定律来解释。

以钩码为研究对象，它受重力  $G$  和弹簧的拉力  $T$  两个力的作用。

图 2-37

当钩码静止时， $G$  和  $T$  的合力为零，这时  $T = G$ [图 2 - 38 (a) ]。弹簧秤指示的读数是钩码对弹簧秤的拉力，它是  $T$  的反作用力，大小也等于  $G$ 。

图 2-38

当钩码和弹簧秤一起加速上升时，加速度方向向上，合外力方向也向上[图 2 - 38 (b) ]，由牛顿第二定律可得

$$T - G = ma,$$

$$T = G + ma。$$

这时弹簧秤指示的读数也就大于钩码所受的重力。

当钩码和弹簧秤一起加速下降时，加速度方向向下，合外力方向也向下[图 2 - 38 (c) ]。由牛顿第二定律可得

$$G - T = ma,$$

$$T = G - ma。$$

这时弹簧秤指示的读数也就小于钩码所受的重力。

当钩码和弹簧秤同时自由下落时，钩码下落的加速度是  $g$ ，则  $T = G - mg = 0$ ，所以弹簧秤读数也为零[图 2 - 38 (d) ]。

同样，如果人站在升降机里的体重计上，当升降机以加速度  $a$  上升时，人对体重计的压力大小也等于  $G + ma$ ，体重计的读数大于人所受的重力。当升降机以加速度  $a$  下降时，体重计的读数等于  $G - ma$ ，小于人所受的重力。

像这样，当物体存在向上加速度时，它对支持物的压力（或对悬线的拉力）大于它所受重力的现象就是超重。当物体存在向下加速度时，它对支持物的压力（或对悬线的拉力）小于它所受重力的现象就是失重。物体对支持物的压力（或对悬线的拉力）等于零时就是完全失重状态。

在宇宙飞船加速上升过程以及返回地面时减速下降过程中，都有一个向上的加速度，都会出现超重现象。这个加速度可以达到重力加速度的 10 倍，宇航员受到很大的挤压作用，动弹不得，甚至想举起手来也很困难。他们只有穿上特制的宇航服并采取平卧姿势来减小压强，减轻脑部失血（或充血）的影响。当然，人对超重的承受能力是有限度的，过

大的超重有生命危险。

在宇宙飞船绕地球运行过程中，飞船及其中的物体所需的向心力就是地球对它们的引力，向心加速度就等于重力加速度，所以飞船内的物体都处于失重状态。

#### 思考

1. 在宇宙飞船沿直线飞向月球的途中，当飞船经过月、地连线上某一区域时会出现完全失重现象。这时发生的失重现象跟飞船环绕地球飞行时的失重现象有什么不同？

2. 在称体重时，身体为什么要保持静止？当你站在台秤上突然蹲下去时，台秤的读数将如何变化？

#### 练习八

1. 在绕地球飞行的宇宙飞船内：(1) 飞行员对地板的压力多大？(2) 从软罐内挤出的液态饮料成什么形状？(3) 单摆的振动周期跟它在地面上的振动周期是否相同？(4) 弹簧振子的振动周期跟它在地面上的振动周期是否相同？

2. 质量是 50 千克的人站在升降机里，当升降机做下列运动时，人对升降机地板的压力分别是多大？(1) 以  $1 \text{ 米/秒}^2$  的加速度加速上升；(2) 以  $1 \text{ 米/秒}$  的速度匀速上升；(3) 以  $1 \text{ 米/秒}^2$  的加速度减速上升；(4) 以  $1 \text{ 米/秒}^2$  的加速度加速下降；(5) 以  $1 \text{ 米/秒}$  的速度匀速下降；(6) 以  $1 \text{ 米/秒}^2$  的加速度减速下降。

3. 一气球由地面从静止开始竖直上升，气球下系一吊篮，站在吊篮里的人把一个弹簧秤固定在吊篮里，弹簧秤下挂一个 1 千克的钩码。他观察并记录了弹簧秤的读数  $T$ ，描绘出的图象如图 2 - 39 所示。试作出相对应的气球上升运动的速度图象。

图 2-39

图 2-40

4. 把一个盛水的小桶拴在长  $l$  的绳子一端，用手握住绳的另一端，使小桶在竖直平面内做圆周运动，当转得较快时，小桶经过最高点位置桶口向下时（图 2 - 40），水为什么不会从桶中流出？这时的速度至少多大？如果实际速度比这个速度大很多，有可能发生什么现象？

#### 阅读材料

##### 正交分解法

我们知道两个以上共点力的合成可以用逐步合成的方法，依次用平行四边形定则求出，但用这种方法比较繁复。如果先把每个力沿两个互相垂直的方向分解，然后再求它们的合力就简便得多。把一个力沿两个互相垂直的方向进行分解的方法叫做正交分解法。

图 2-41

下面，我们用正交分解法来求几个力的合力。图 2 - 41 中同一平面上的三个力  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  都作用于  $O$  点，它们跟水平方向的夹角分别是 、

和  $\alpha$ 。选择水平方向为 x 轴，以向右为正方向；竖直方向为 y 轴，以向上为正方向。把  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  都分解为沿 x 轴和沿 y 轴的分力，那么

$$\begin{aligned} F_{1x} &= F_1 \cos \alpha, & F_{1y} &= F_1 \sin \alpha; \\ F_{2x} &= -F_2 \cos \alpha, & F_{2y} &= F_2 \sin \alpha; \\ F_{3x} &= F_3 \cos \alpha, & F_{3y} &= F_3 \sin \alpha. \end{aligned}$$

在 x 轴方向上的合力

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} = F_1 \cos \alpha - F_2 \cos \alpha + F_3 \cos \alpha,$$

在 y 轴方向上的合力

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} = F_1 \sin \alpha + F_2 \sin \alpha - F_3 \sin \alpha.$$

知道了  $F_x$  和  $F_y$ ，就可求出合力  $F$  的大小和方向，

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}, \quad \tan \alpha = \frac{F_y}{F_x}.$$

式中  $\alpha$  是合力  $F$  跟 x 轴的夹角。

在应用牛顿定律解动力学问题时，正交分解法是一个比较方便的方法。例如，质量是  $m$  的人站在自动扶梯上，扶梯与水平面的倾角是  $\alpha$ （图 2-42）。如果人随同扶梯起动时以加速度  $a$  一起运动，如何求人受到的静摩擦力和扶梯对人的支持力呢？

人除了受重力  $G$ 、支持力  $N$  外，由于人相对于扶梯有向后运动的趋势，所以还受扶梯对人的静摩擦力  $f$ ，方向水平向前（图 2-43）。

由于加速度方向和合力的方向是斜向上的，所以选择合力方向为 x 轴的正方向，垂直这个方向为 y 轴，斜向上为正方向。把重力  $G$ 、支持力  $N$  和静摩擦力  $f$  都分解为沿 x 轴和沿 y 轴的分力（图 2-44），则

$$\begin{aligned} G_x &= -G \sin \alpha, & G_y &= -G \cos \alpha; \\ N_x &= N \sin \alpha, & N_y &= N \cos \alpha; \\ f_x &= f \cos \alpha, & f_y &= -f \sin \alpha. \end{aligned}$$

图 2-42

图 2-43

图 2-44

x 轴方向上的合力

$$\begin{aligned} F_x &= f_x + G_x + N_x \\ &= f \cos \alpha - mg \sin \alpha + N \sin \alpha, \end{aligned}$$

y 轴方向上的合力

$$\begin{aligned} F_y &= f_y + G_y + N_y \\ &= -f \sin \alpha - mg \cos \alpha + N \cos \alpha. \end{aligned}$$

由于沿 y 轴方向不存在加速度，所以  $F_y = 0$ ，

$$-f \sin \alpha - mg \cos \alpha + N \cos \alpha = 0 \quad (1)$$

由于沿 x 轴方向存在加速度  $a$ ，所以  $F_x = ma$ ，

$$f \cos \alpha - mg \sin \alpha + N \sin \alpha = ma \quad (2)$$

从(1)式中求出N,代入(2)式,简化即可得人所受静摩擦力的大小

$$f = ma \cos \theta, \text{方向水平向前};$$

扶梯对人的支持力

$$N = m(g + a \sin \theta)。$$

正交分解法不但适用于力,也适用于其他矢量,所以上例也可选择水平方向为x轴,竖直方向为y轴,把原来沿斜向上的加速度a分解为水平方向的加速度 $a_x$ 和竖直方向的加速度 $a_y$ ,则

$$a_x = a \cos \theta, a_y = a \sin \theta$$

x轴方向上的合力 $F_x = f$ ,产生加速度 $a_x$ ,可得人所受静摩擦力的大小

$$f = ma \cos \theta。$$

y轴方向上的合力 $F_y = N - mg$ ,产生加速度 $a_y$ ,可得

$$N - mg = ma \sin \theta,$$

则扶梯对人的支持力

$$N = m(g + a \sin \theta)。$$

又例如,有一个光滑的圆锥体固定在水平的桌面上,其轴线沿竖直方向,母线与轴线之间的夹角 $\theta = 30^\circ$ (图2-45)。一条长l的绳,一端固定在圆锥体的顶点O处,另一端拴着一个质量为m的小物体以速率v绕圆锥体的轴线做水平匀速圆周运动。

(1) 当 $v = \sqrt{\frac{1}{6}gl}$ 时,绳对物体的拉力多大?

(2) 当 $v = \sqrt{\frac{3}{2}gl}$ 时,绳对物体的拉力又多大?

光滑圆锥体上的物体在水平面内做匀速圆周运动有两种可能:一是物体在运动过程中与锥体表面始终接触[图2-46(a)];另一是物体在运动过程中与锥体表面不接触[图2-46(b)]。

图2-46

当物体与锥体表面接触时,物体重力G、支持力N和拉力T的作用,这三个力不在一直线上。由于物体在水平面内做匀速圆周运动,圆心在轴线上某一点,合力(向心力)沿水平方向,所以选择水平方向为x轴,竖直方向为y轴,把N和T分解为水平方向和竖直方向的分力 $N_x$ 、 $N_y$ 和 $T_x$ 、 $T_y$ (图2-47)。

$$T_x = T \sin \theta, T_y = T \cos \theta;$$

$$N_x = -N \cos \theta, N_y = N \sin \theta。$$

y轴上的合力为零,

$$T_y + N_y - G = 0$$

$$T \cos \theta + N \sin \theta - mg = 0$$

(1)

x轴上的合力就是向心力,圆半径为 $l \sin \theta$ ,

$$T_x + N_x = ma_{\text{向}}$$

$$T \sin \theta - N \cos \theta = \frac{mv^2}{l \sin \theta} \quad (2)$$

解(1)和(2)式,得

$$N = mg \sin \theta - \frac{mv^2 \cos \theta}{l \sin \theta}。$$

上式中,  $g$ 、 $l$ 、 $m$  都不变,所以  $N$  随  $v$  的增大而减小,当  $v$  增大到一定值时,  $N=0$ 。设这个值为  $v'$ , 则由上式可得

$$v' = \sqrt{\frac{gl \sin^2 \theta}{\cos \theta}} = \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{6}} gl。$$

当  $v=v'$  时,  $N=0$ ;  $v < v'$  时,  $N > 0$ , 物体与锥面接触;  $v > v'$  时,  $N < 0$ , 物体脱离锥面即跟锥面不接触。

(1) 当  $v = \sqrt{\frac{1}{6}} gl$  时,  $v < v'$ , 物体与锥面接触, 在上面的(1)和(2)式中, 消去  $N$  可得

$$\begin{aligned} T &= mg \cos \theta + \frac{mv^2}{l} \\ &= mg \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{m \cdot \frac{1}{6} gl}{l} = 1.03mg。 \end{aligned}$$

绳对物体的拉力是  $1.03mg$ 。

(2) 当  $v = \sqrt{\frac{3}{2}} gl$  时,  $v > v'$ , 物体与锥面不接触, 系物体的线与轴线之间的夹角不再是  $\theta$ , 设为  $\phi$ 。这时物体只受重力  $G$  和绳的拉力  $T$  的作用[图 2-46(b)]。把  $T$  分解为沿水平方向( $x$ 轴)和沿竖直方向( $y$ 轴)的分力,

$$T_x = T \sin \phi, T_y = T \cos \phi。$$

$y$ 轴上的合力为零,

$$T \cos \phi - mg = 0 \quad (3)$$

$x$ 轴上的合力就是向心力,

$$T \sin \phi = \frac{mv^2}{l \sin \phi}。 \quad (4)$$

解(3)和(4)式,可得

$$T = 2mg \text{ 或 } T = -\frac{1}{2} mg (\text{舍去})。$$

绳对物体的拉力是  $2mg$ 。

## 本章学习要求

1. 掌握物体受力分析的方法。
2. 掌握牛顿运动定律。

## 复习题

### 1. 选择题 (以下各小题中只有一个正确答案)

(1) 在水平转盘上放一木块, 转盘匀速转动时, 木块与转盘保持相对静止, 木块受到的力是 [ ]

- (A) 重力和弹力。
- (B) 重力、弹力和指向圆心的静摩擦力。
- (C) 重力、弹力和沿切线方向的静摩擦力。
- (D) 重力、弹力、指向圆心的静摩擦力和向心力。

(2) 一辆洒水车在平直道路上匀速行驶, 设洒水车的牵引力不变, 所受阻力跟车重成正比, 开始洒水后, 洒水车 [ ]

- (A) 继续做匀速运动。
- (B) 做匀加速运动。
- (C) 做匀减速运动。
- (D) 做变加速运动。

(3) 做直线运动的物体速度在不断地减小, 但减小得越来越慢, 则下面叙述中正确的是 [ ]

- (A) 合外力大小不变为常量且与初速度方向一致。
- (B) 合外力大小不变为常量且与初速度方向相反。
- (C) 合外力与初速度方向相反且越来越大。
- (D) 合外力与初速度方向相反且越来越小。

(4) 如图 2 - 48 所示, A 球用线悬挂着, 下面通过一根轻质弹簧与 B 球相连。在 A、B 两球都平衡时, 剪断悬线, 在这瞬间, 两球的加速度  $a_A$ 、 $a_B$  的大小关系是 [ ]

- (A)  $a_A > a_B$ 。
- (B)  $a_A < a_B$ 。
- (C)  $a_A = a_B$ 。
- (D) 以上三种情况都有可能。

图 2-48

(5) 物体从高度都是  $h$ , 倾角分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  的三个光滑斜面顶端, 由静止开始下滑到底端所用时间是 [ ]

- (A) 倾角为  $30^\circ$  时最少。
- (B) 倾角为  $45^\circ$  时最少。
- (C) 倾角为  $60^\circ$  时最少。
- (D) 都一样。

图 2-49

(6) 有一种大型游戏器械, 它是一个圆筒型大容器, 筒壁竖直, 游客进入容器后靠筒壁站立 (图 2 - 49)。当圆筒开始转动后, 待转速加快到一定程度时, 突然地板坍塌, 游客发现自己没有落下去, 这是因为 [ ]

- (A) 游客所受重力全部作为向心力
- (B) 游客受到与筒壁的压力作用。
- (C) 游客受到的静摩擦力等于重力。
- (D) 游客随着转速的增大有沿壁向上滑动的趋势。

### 2. 选择题 (以下各小题中有两个或两个以上正确答案)

(1) 一个物体在两个相互平衡的力  $F_1$  和  $F_2$  的作用下做匀速直线运动, 如果  $F_1$  逐渐减小到零, 则在这过程中 [ ]

- (A) 物体的加速度逐渐减小，但速度一定逐渐增大。
- (B) 物体的加速度逐渐增大，但速度可能增大也可能减小。
- (C) 物体一定做直线运动。
- (D) 物体可能做直线运动，也可能做曲线运动。

(2) 一质点受到两个互成锐角的力  $F_1$ 、 $F_2$  的作用由静止开始运动。

在运动中，两力方向不变，但其中的  $F_2$  突然增大为  $F_2 + F$  此后质点的运动情况是 [ ]

- (A) 在相同时间内速度的变化一定相同。
- (B) 速度方向一定时刻变化。
- (C) 一定做匀变速曲线运动。
- (D) 可能做直线运动，也可能做曲线运动。

(3) 物体由静止开始运动，它受到的合外力方向不变，大小随时间变化的图象如图 2 - 50 所示，则在  $0 \sim t_0$  这段时间内 [ ]

- (A) 物体做变加速运动，加速度逐渐变小。
- (B) 物体的加速度逐渐变小，速度也逐渐变小。
- (C)  $t_0$  时刻物体速度为零。
- (D)  $t_0$  时刻物体加速度为零，速度最大。

图 2-50

3. 向上运动的电梯的速度图象如图 2 - 51 所示，电梯内有一人手里提着一个质量是 5 千克的密码箱。作出手对密码箱的拉力随时间变化的图象。

图 2-51

4. 在水平地面上有一物体，当用跟水平方向成  $37^\circ$  角的力 60 牛拉它前进时，加速度是  $3.2 \text{ 米/秒}^2$ ；当用跟水平方向成  $37^\circ$  角的力 60 牛推它前进时，加速度是  $1.4 \text{ 米/秒}^2$ 。当用 60 牛的力水平拉这物体时，加速度是多大？（ $g$  取  $10 \text{ 米/秒}^2$ ）

5. A、B 两物体的质量分别是 3 千克和 2 千克。A 原来静止，B 原来有一向右的初速度  $v_0 = 10 \text{ 米/秒}$ ，A、B 分别受恒力  $F_A$ 、 $F_B$  的作用，它们的大小都是 6 牛，方向跟  $v_0$  在一直线上。如果 A、B 从同一地点出发，那么经过多少时间后它们的位移相等？

6. 图 2 - 52 为一种测定加速度的装置。在小车 C 上装置一个半径为 R 的光滑圆槽 A，槽内放一个质量为 m 的小球 B。小车静止或做匀速直线运动时，小球 B 在圆槽底部保持平衡，圆槽边缘的刻度可以显示小车加速时小球 B 偏移的角度。试写出加速度跟小球 B 偏移角度的关系式。

图 2-52

7. 总质量为 M 的列车沿水平直轨匀速前进，质量为 m 的末节车厢于中途脱钩。当司机发觉时，列车已前进了距离 l，于是立刻关闭发动机，设运动中所受阻力始终是车重的 k 倍，试证明当列车和车厢都停止运动

时，两车相距  $\frac{ml}{M - m}$ 。

8. 斜面倾角为  $37^\circ$ ，物体从斜面顶端由静止滑下，经 1 秒到达底端时速度为 2 米 / 秒。如果将这个斜面的一端抬高，使倾角增大到  $53^\circ$ ，则上述物体再由顶端静止滑下到底端所需的时间为多少？

9. 行车上钢丝绳长 3 米，用它来吊运质量是 1500 千克的铸件（图 2 - 53），行车原以 2 米 / 秒的速度前进，当行车突然停止时，铸件将怎样运动？这时钢丝绳所受拉力多大？

图 2-53

10. 长为  $l$  的细绳一端系一质量为  $m$  的小球，以另一端为中心，使小球沿着一个光滑水平圆盘边缘做圆周运动。当速度增大到某一值时，绳断裂，小球飞离圆盘落地。已知盘离地高度为  $h$ ，小球落地点距脱离圆盘边缘处的水平距离为  $d$ ，求绳所能承受的最大拉力。



## 转 动

### 1. “大转盘”吊篮

### 2. 齿轮传动

### 3. 自卸载重

在必修课中，我们学习了质点做简单的直线运动和周期运动的规律，这一章中我们将进一步研究物体做机械运动的基本形式。物体做机械运动的形式多种多样，有的简单，有的复杂，其中最基本的形式是平动和转动。人站在开动的自动扶梯上的运动是平动，把抽屉从桌内拉出，抽屉的运动是平动。电风扇的叶片、钟表里齿轮的运动都是转动。车床工作时，工件在转动而车刀在平动（图 3 - 1）。铣床工作时，工件在平动而铣刀在转动。自行车在平直道路上前进时，车轮对轴是在转动而轴对地却在平动。

图 3-1

图 3-2

任何复杂的运动，都可以看作是平动和转动组成的。本章将研究平动和转动各有什么特点？力对物体的转动作用效果决定于哪些因素？有固定转动轴的物体的平衡需要什么条件？

## 一、物体的平动和转动

### 物体的平动

物体平动的特点是物体上各点的运动情况是相同的。自动扶梯上载着的人的运动是平动，这时人身上各点的运动情况都是相同的。同样，把抽屉从桌内拉出时，抽屉上各点的运动情况也都是相同的。因此，我们在研究物体的平动时，只要研究这个物体任何一点的运动，就能了解它整体的运动，而不必考虑物体的大小和形状。也就是说在研究物体的平动时，可以把物体当作质点来处理。我们应该掌握这种研究问题的方法。

### 物体的转动

我们已经知道，转动物体上的各点都在做圆周运动，这些圆的圆心在同一直线上，这条直线叫做转动轴。转动体上离轴距离不同的点，它们的线速度不同而角速度都相同。如图 3 - 3 所示，电风扇叶片转过某一个角度时，叶片上离转动轴距离不同的质点 1、2、3，在同一时间内它们通过的弧长  $A_1B_1$ 、 $A_2B_2$ 、 $A_3B_3$  不同，离转动轴距离越远的点，通过的圆弧越长。但是分别连接质点 1、2、3 和圆心 O 的半径，这些半径转过的角度却是相等的。

图 3-3

既然转动体上各点做圆周运动的角速度都相同，那么，任何一点做

圆周运动的角速度都可以表示整个物体转动的角速度。因此，可用角速度来表示物体转动的快慢。此外，在生产上，还常用转速来表示物体转动的快慢。物体在单位时间内转动的次数叫做转速，用符号  $n$  表示。角速度  $\omega$  和转速  $n$  的关系是

$$\omega = 2\pi n。$$

角速度（或转速）恒定不变的转动叫做匀速转动，例如电动机和发电机在正常工作时转子的转动就是匀速转动。角速度（或转速）随时间变化的转动叫做变速转动，例如电风扇在刚接通电源时叶片越转越快，切断电源时叶片越转越慢的转动就是变速转动。

S：游乐场里的大转盘上悬挂着吊篮，吊篮的运动（本章导图 1）是转动吗？

T：判断物体平动还是转动要根据这两种运动的特点，前者各点的运动情况都相同，后者各点的线速度不同而角速度相同。悬挂在大转盘上的吊篮在运动中各点的运动情况都是相同的，因此吊篮的运动是平动而不是转动。转盘本身的运动才是转动。可见，物体平动时的轨迹不一定是直线，也可以是曲线。

### 思考

如图 3 - 4 所示，有一个矩形线圈  $abcd$  在匀强磁场中匀速转动。下面几种说法中正确的是 [ ]

- (A) 线圈绕  $OO'$  转动。
- (B)  $c$  点绕  $OO'$  转动。
- (C)  $c$  点做匀速圆周运动。
- (D) 线圈做匀速圆周运动。

图 3-4

### 练习九

1. 小孩从滑梯上滑下；放手让石块落下；竖直立在桌上的书由于受到震动而倒下；直升飞机在空中停留时螺旋桨的运动。以上这些物体的运动中，哪些是平动？哪些是转动？

2. 电风扇在正常工作时，叶片每分钟转 1200 次，求叶片上离轴 10 厘米和 20 厘米处的质点 1 和质点 2 的线速度和角速度。

3. 地球绕地轴自转的角速度多大？

## 二、力矩

### 有固定转动轴物体的转动

门、窗、电风扇的叶片等都能够绕着一个固定的转动轴转动。用不同方向的力可以使物体按不同方向转动。力越大，力使物体转动的作用也越大。此外，生活经验告诉我们，在离轴较远的地方推门，用比较小的力能把门推开，而在离轴较近的地方推门，就要用比较大的力才能推开。用手直接拧螺帽不能把它拧紧，用扳头拧就容易拧紧，而且扳头的柄越长，越容易拧紧。可见，力使物体转动的效果不仅跟力的大小、方

向有关，还跟力的作用线与转动轴之间的距离有关。

### 力矩

力的作用线到转动轴之间的垂直距离叫做力臂。图 3 - 5 中 AB 是一根可以绕 O 轴转动的杠杆，力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  作用在杠杆上，并跟杆在同一平面里，它们的力臂分别是  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$ 。

力和力臂的乘积，叫做力对转动轴的力矩（moment of force），用 M 表示力矩，则

$$M = FL。$$

力矩的单位是由力和力臂的单位决定的。在我国法定计量单位中，力矩的单位是牛顿·米，符号是 N·m。

图 3-5

力对物体的转动作用决定于力矩。力矩越大，转动作用也越大。推门时，如果力作用在门轴上，这时力虽然不等于零，但力臂等于零，因而力矩等于零，力对物体不产生转动作用，门也就不能被推开。

推门和拉门，拧紧和拧松螺帽，物体转动的方向是相反的。一般规定，使物体沿逆时针方向转动的力矩是正的，使物体沿顺时针方向转动的力矩是负的。图 3 - 5 中， $F_1$  的力矩是正的， $F_2$  和  $F_3$  的力矩都是负的。这几个力共同对杆的转动作用决定于这几个力矩的代数和。

### 思考

如果在图 3 - 5 中的杠杆上某一点 A，加一个能使杆转动的力 F，那么 F 的力臂能不能小于、等于或大于轴到力的作用点的距离 OA？

### 练习十

1. 图 3 - 6 是一根杠杆，转动轴 O 垂直纸面。力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  和  $F_4$  都和杆在同一平面内，它们依次作用在杆上 A、B、C 和 D 点。试分别画出这些力的力臂，说明哪些力矩是正的，哪些力矩是负的。

图 3-6

2. 自行车车轮的直径是 0.7 米，如果轮缘和刹车橡皮间的摩擦力是 20 牛，求摩擦力的力矩。

3. 如图 3 - 7 所示，加在自行车踏板上 A 点向下的力 F 是 15 牛，A 点到转动轴 O 的距离是 17.5 厘米，求踏脚柄跟水平方向成  $30^\circ$  角时，这个力的力矩。如果蹬力的大小和方向都不变，什么情况下这个力的力矩最大？

4. 如图 3 - 8 所示，把木条一端的孔套在水平轴 O 上，木条重 G，重心在中点 C，离轴的距离  $OC = l$ 。把木条从平衡位置转过  $\theta$  角到图中虚线所示位置，这时重力对轴 O 的力矩多大？这一力矩将使木条向什么方向转动？当木条从这一位置向平衡位置转动过程中，重力的力矩如何变化？

图 3-7

图 3-8

### 三、有固定转动轴的物体的平衡

有固定转动轴的物体处于匀速转动或保持静止的状态，叫做平衡状态。有固定转动轴的物体在什么条件下才能处于平衡状态呢？如果有几个力同时作用在有固定转动轴的物体上，物体的转动作用将决定于这些力的力矩的代数和。实验表明，力矩的代数和等于零，物体将保持静止或匀速转动。我们从“研究有固定转动轴的物体的平衡条件”的实验中也得出了相同的结论。所以，有固定转动轴的物体的平衡条件是力矩的代数和等于零，即

$$M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_n = 0,$$

$$M_{\text{合}} = 0。$$

[例题 1]

如图 3 - 9 所示，OA 是一根均匀横梁，重 50 牛、长 1 米，横梁的一端有一光滑铰链 O 固定在竖直墙上，横梁的另一端 A 用绳拉住固定在墙上 B 点。使横梁在水平位置，并在横梁的 A 端挂一个 100 牛的重物，求绳 BA 对横梁 OA 的拉力。

图 3-9

解：本题研究对象是横梁 OA，可以把它看成是一个处于平衡状态的有固定转动轴的物体。

先分析作用在横梁 OA 上各个力对轴 O 的力矩（图 3 - 10）：重力 G，作用在它的重心 C，因为横梁是均匀的，重心在梁的中点，力臂为 OC，力矩  $M_1 = G \times OC$ ，是负值；挂重物的绳对横梁的拉力 F，作用在 A 点，力臂为 OA，力矩  $M_2 = F \times OA$ ，是负值；绳 BA 对横梁的拉力 T，作用在 A 点，力臂为 OD，力矩  $M_3 = T \times OD = T \times OA \sin 30^\circ$ ，是正值。

根据有固定转动轴的物体的平衡条件，

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0,$$

$$- G \times OC - F \times OA + T \times OA \sin 30^\circ = 0。$$

可得  $T = \frac{G \times OC + F \times OA}{OA \sin 30^\circ} = \frac{50 \times 0.5 + 100 \times 1.0}{1.0 \times 0.5}$  牛 = 250 牛。

绳 BA 对横梁 OA 的拉力是 250 牛。

[例题 2]

如图 3 - 11 所示，均匀杆 OA 重 G，上端安装在光滑铰链 O 上，下端搁在水平放置的木板 A 处，这时杆与竖直方向的夹角为  $\theta$ 。木板与杆间的滑动摩擦系数为  $\mu$ ，地面光滑。如要将木板沿水平方向向右拉出，至少要对它用多大的水平方向的力？

图 3-11

解：将木板拉出时，木板做平动，而杆是有固定转动轴的物体，它处于平衡状态。

先研究木板，由木板受力情况可知，水平拉力  $F$  至少等于杆对板的滑动摩擦力  $f$ ， $f$  方向向左[图 3 - 12(a)]，这个力的反作用力就是板对杆的滑动摩擦力  $f'$ 。

图 3-12

再研究杆，列出作用在杆上的各个力对轴  $O$  的力矩[图 3 - 12(b)]。设杆长为  $l$ ，板对杆的支持力为  $N$ ，由平衡条件可得

$$N \times l \sin a + f' \times l \cos a - G \times \frac{l}{2} \sin a = 0。$$

又因  $f = \mu N$ ，代入上式消去  $N$ ，

$$\frac{f'}{\mu} l \sin a + f' \times l \cos a - G \times \frac{l}{2} \sin a = 0，$$

$$\text{解得 } f' = \frac{\mu G \sin a}{2(\sin a + \mu \cos a)}。$$

$$\text{所以沿水平方向所用的最小力 } F = f = f' = \frac{\mu G \sin a}{2(\sin a + \mu \cos a)}。$$

### 思考

棒  $AB$  是由两种粗细均匀不同材料的金属棒  $AO$ 、 $OB$  焊接成的。如在  $O$  处用绳悬挂起来，棒恰能平衡，如图 3 - 13 所示。则  $AO$ 、 $OB$  两段棒所受重力是否相等？为什么？

图 3-13

S：在例题 1 中，能不能用以前学过的共点力的分解的方法把  $F$  分解为沿绳的方向的拉力（它的大小就是绳  $BA$  对横梁的拉力）和沿横梁方向的压力，这样解不是更方便吗？

T：当横梁所受重力不计时，你这样解是可以的。但当要考虑横梁所受的重力时，你这样解就不对了。这是因为当横梁所受重力不计时，横梁受到绳子拉力  $T$ 、重物通过悬绳产生的拉力  $F$  和铰链对它的压力的作用。这三个力平衡且交于  $A$  点，因此可以看成是共点力的平衡问题，所以可用共点力的分解方法来处理。但如果要考虑横梁所受的重力，那么横梁受四个力的作用，这些力的作用线将不交于  $A$  点，因而不能简单地用共点力的分解来处理了。在这种情况下，一般应把横梁作为有固定转动轴的物体，通过力矩的平衡来求出拉力  $T$ 。

### 练习十一

1. 图 3 - 14 中， $OA$  是可绕固定转动轴  $O$  转动的均匀直棒、长为  $l$ 、重为  $G$ ， $F$  是作用在棒另一端  $A$  的作用力。如果棒都处于平衡状态，求  $F$ 。

图 3-14

2. 图 3 - 15 是汽车制动器的踏板的示意图， $O$  是转动轴， $B$  端连接制动器。如果司机踩紧踏板的力  $F$  为 20 牛。那么，制动器所受的阻力  $F$  是多大？

图 3-15

图 3-16

3. 图 3 - 16 的力矩盘中，每个钩码的质量都是  $m$ ，当力矩盘静止时，弹簧秤读数是多大？

图 3-17

4. 铁路道口处的栏木长 7.8 米，重 2100 牛、重心在离左端 1.2 米处，转动轴安装在离右端 6.3 米处。求在放下栏木时加在左端上的最小力。

5. 如图 3 - 17 所示，均匀杆 OA 长 1.2 米，重 20 牛，一端连在光滑铰链 O 上，另一端 A 悬挂一个重 30 牛的灯，在离 A 点 0.3 米的 B 处，用水平绳 CB 拉住，这时杆与竖直方向成  $37^\circ$  角。求绳 CB 对杆的拉力。

图 3-18

6. 一根粗细不均匀的木棒 AB 长 2 米，若在距木棒 A 端 0.8 米处固定一个转动轴，木棒恰好平衡。如果把这个转动轴固定在距 B 端 0.8 米处，就需在 B 端挂一个 20 牛的重物才能保持平衡。求木棒所受重力的大小及其重心的位置。

7. 图 3 - 18 是一把杆秤，秤纽和挂钩的距离 OB 是 6.0 厘米，秤砣重 6 牛，杆秤重 2.4 牛。不称物体时，把秤砣挂在 A 点，杆秤平衡，A 点就是刻度的起点。设  $OA = 1.6$  厘米，求杆秤重心的位置。如果在称某一物体时，秤砣移到 D 点杆秤平衡， $AD = 24$  厘米，求所称物体的重力。

### 阅读材料

#### 机械传动装置

发动机的转动轴带着工作机的轴一起转动，也就是转动必须由发动机传递到工作机上来。这种转动的传递可以用各种不同的方式来实现。常见的三种机械传动方式是皮带传动、摩擦传动和齿轮传动。

在皮带传动里，发动机和工作机的轴上各装一个皮带轮，轮上紧套着一圈（或并列的几圈）皮带（图 3 - 19）。发动机轴上的皮带轮 A 叫做主动轮，工作机轴上的皮带轮 B 叫做从动轮。主动轮转动时，依靠摩擦作用，使皮带运动，皮带的运动又带动从动轮转动。在转动时，一般不允许皮带打滑，这时两个皮带轮边缘上的线速度相同。因此，如果两个皮带轮的直径不同，它们的角速度或转速也就不同，且角速度或转速跟两皮带轮的直径成反比：

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{d_1}{d_2}。$$

比值  $\frac{n_2}{n_1}$  叫做传动速度比。从上式可知，工作机轴上的皮带轮的直径越小，它的轴的转速就越大。

图 3-19

实际上常用的传动速度比一般不大于 5。这是因为传动速度比越大，

从动轮的直径就越小，它跟皮带接触的圆弧就越短，带动它的摩擦力也就越小。

图 3 - 19 的两皮带轮转动方向相同，图 3-20 的两皮带轮转动方向相反。

图 3-20

图 3-21

在摩擦传动中，两个轮互相紧压着（图 3 - 21）。当主动轮向一个方向转动时，由于两轮之间的摩擦作用，从动轮也发生转动，它的转动方向跟主动轮相反。

在皮带传动和摩擦传动中，摩擦力是动力，必须设法使它增大，因此要用摩擦系数比较大的材料如皮革、橡胶、填充石棉的铜丝等包在轮缘上，还要增大压力。

如果所传递的功率是  $P$ ，那么由  $P = fv$  和  $v = \pi dn$ ，可求出作用在轮缘上的摩擦力

$$f = \frac{P}{\pi dn},$$

作用在轮缘上使轮转动的摩擦力矩

$$m = f \frac{d}{2}。$$

一般说来，摩擦传动只能在功率不大（15 千瓦以下）的情况下使用，如果所传递的功率较大，两轮就会发生滑动。为了提高所传递的功率，必须保证两轮不发生滑动，因此在两轮的轮缘上做出许多齿，使一个轮的每个齿能够嵌入另一个轮的两齿之间。这样，在转动时就不断地互相啮合，不会发生滑动。这种轮叫做齿轮。齿轮传动时，两齿轮的齿距必须相等。这样，两轮的转速就和它们的齿数成反比。

齿轮传动装置在生产技术上应用非常广泛，它可以传递几万千瓦的功率。当主动轮和从动轮所在的两轴互相平行时，采用圆柱形齿轮（本章导图 2 中 A 和 B）；当两轴成  $90^\circ$  时，采用截锥形齿轮（本章导图 2 中 C 和 E）。利用齿轮、齿条传动，还可以把转动改变成平动，或把平动改变为转动（本章导图 2 中 D）。此外，我们还常见到用链条来传动的，这实际上也是齿轮传动的一种变形。

各种机床、汽车、拖拉机等用来调节速度用的变速箱，一般都是用齿轮来传动的。

### 本章学习要求

1. 知道平动及其特点。
2. 知道转动及其特点，知道转动物体的转动轴。
3. 理解力矩。
4. 知道有固定转动轴物体的平衡状态。
5. 理解有固定转动轴物体的平衡条件。
6. 会用实验方法研究有固定转动轴物体的平衡条件。

## 复习题

### 1. 选择题 (以下各小题中只有一个正确答案)

(1) 飞轮转动时, 轮上离轴远的质点 A 和离轴近的质点 B, 它们的线速度  $v$ 、角速度  $\omega$  和向心加速度  $a$  相比较 [ ]

(A)  $v_A = v_B, \omega_A = \omega_B, a_A > a_B$ 。

(B)  $v_A > v_B, \omega_A = \omega_B, a_A > a_B$ 。

(C)  $v_A > v_B, \omega_A = \omega_B, a_A < a_B$ 。

(D)  $v_A > v_B, \omega_A > \omega_B, a_A > a_B$ 。

(2) 在图 3-22 中, 可绕 O 点转动的同样均匀棒与水平方向的夹角都相同, 且都处于平衡状态, 其中作用在棒端的力 F 最小的图示是

[ ]

(A) (a)。 (B) (b)。

(C) (c)。 (D) (d)。

图 3-22

图 3-23

(3) 杆的一端 O 连接在光滑的铰链上, 另一端 A 分别用三种施力方式使杆和竖直方向成  $\theta$  角而平衡, 如图 3-23 所示。第一次  $F_1$  沿竖直方向, 第二次  $F_2$  沿与杆垂直方向, 第三次  $F_3$  沿水平方向。比较这三次力 F 和对 O 的力矩大小是 [ ]

(A) 力  $F_3$  最大,  $F_3$  的力矩也最大。

(B) 力  $F_3$  最小, 三个力矩一样大。

(C) 力  $F_2$  最小, 三个力矩一样大。

(D) 力  $F_2$  最小,  $F_2$  的力矩最大。

## 复习题

### 2. 选择题 (以下各小题中有两个或两个以上正确答案)

(1) 质点在做匀速圆周运动的过程中, 恒定不变的量是 [ ]

(A) 线速度。 (B) 角速度。

(C) 周期。 (D) 向心加速度。

(2) 图 3-24 中, OA 是具有一定质量的均匀直棒, O 是固定转动轴, F 是作用在 A 端的力, 则棒有可能处于平衡状态的是 [ ]

图 3-24

3. 齿轮边缘有许多间距相等的齿, 当主动轮转动时, 由于两个齿轮互相啮合, 带动从动轮转动 (本章导图 2), 设主动轮的齿数和从动轮的齿数之比是 1:3, 主动轮的转速是 4500 转/分时, 从动轮的转速是多大?

4. 图 3-25 是自卸载重车倒黄砂时的示意图。设翻斗的转动轴在末



端，顶起翻斗的力作用在离翻斗前端  $1/3$  处。翻斗和黄砂总重  $G$ ，重心在中点，那么开始顶起时，力  $F$  多大？随着翻斗逐渐上升，黄砂逐渐滑落，顶力  $F$  的大小如何变化？

图 3-25

图 3-26

5. 如图 3 - 26 所示，三根都和水平成  $30^\circ$  的平行钢索把一块重  $G$  的均匀钢梁 AB 拉住并保持水平，设  $AC = CD = DB$ ，并假定三根钢索所受的拉力  $T$  都相等，求  $T$  的大小。

6. 一根粗细不均匀的木棒 AB 长 1 米，重 50 牛。如果在它的中点用绳吊起，必须在离 B 端 0.2 米处挂一个 30 牛的重物，木棒才能平衡。如果在 A 端再挂一个 6 牛的重物，那么要使棒平衡，应将 30 牛的重物移到什么位置上？

图 2-27

图 3-28

7. 如图 3 - 27 所示，均匀木棒长  $l$ 、重  $G$ ，一端用光滑铰链固定着，另一端搁在平板车上，棒与车间的滑动摩擦系数为  $\mu$ 。保持棒与水平方向的夹角不变，当平板车静止、向右运动和向左运动时，棒对平板车的压力分别是多大？

8. 如图 3 - 28 所示，光滑均匀木板 AB 长 5 米，重 50 牛。离板右端 2 米处有固定转动轴 O，离板左端 1 米处有支柱 C，在轴架和支柱的支持下，木板呈水平状态。现有重 20 牛的物块 D，从左端以 2.5 米/秒的速度在板上沿 ACB 直线向右做匀速运动。

(1) 在初始时刻，支柱 C 所受的压力是多大？

(2) 当支柱 C 所受压力是板和物块总重一半时，物块 D 在何处？

(3) 经多少时间木板会翻转？

## 动能定理 机械能守恒定律

### 1. 水力发电厂

### 2. 撑杆跳高

### 3. 游乐场里的大回环

水力发电是利用从一定高度落下的水流推动水轮机使它转动，再由水轮机带动发电机发电。因此，在设计水电站时，必须考虑保持多大的水位差和流量才能保证水流有足够的动能推动水轮机的叶片。在研制防弹钢板时，人们必须知道子弹射穿一定厚度的钢板后动能减小了多少。以上这类问题虽然用牛顿定律结合运动学公式可以解决，但应用功和能的关系来处理，会显得更方便。人们对自然规律的认识是逐步发展的，并且不断提出新的见解和引入新的概念，从而对客观世界产生了新的认识，建立了一些新的解决实际问题的途径。能量的概念就是这样提出和发展起来的。在必修课中，我们初步学习了功是能的转化的量度，以及动能、势能和机械能守恒定律，这一章中我们将进一步从功和能的关系来定量讨论力和运动的问题。

## 一、功和能

### 功

在必修课中我们已经学过一个物体受到力的作用，并且在力的方向上发生了位移，物理学中就说这个力对物体做了功。设力的大小为  $F$ ，位移的大小为  $s$ ，力  $F$  的方向跟位移  $s$  的方向间的夹角为  $\alpha$ ，那么在这过程中，力  $F$  对这个物体所做的功

$$W = Fscos\alpha。$$

上式中，当  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$  时， $cos\alpha > 0$ ， $W > 0$ ，表示力对物体做正

功；当  $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$  时， $cos\alpha < 0$ ， $W < 0$ ，表示力对物体做负功；当

$\alpha = \frac{\pi}{2}$  时， $cos\alpha = 0$ ， $W = 0$ ，表示力没有对物体做功。

功的单位是焦耳，简称焦，符号是 J。功是标量，当物体在几个力共同作用下发生一定位移时，这几个力对物体做的总功等于各个力分别对物体所做的功的代数和。

### 能

能有各种不同的形式，如机械能、内能、电能、核能等。从功和能的关系来看，做功的过程就是能量转化的过程，功是能量转化的量度。

物体由于运动而具有的能叫做动能。设质量为  $m$  的物体，以速度  $v$  运动，这个物体的动能为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2。$$

由相互作用的物体的相对位置决定的能叫做势能。受重力作用的物

体，由于被举高而具有的势能叫做重力势能，质量为  $m$  的物体，被举到离地面高度为  $h$  处，具有的重力势能为

$$E_p = mgh。$$

物体由于发生弹性形变，物体内部各部分之间的相对位置发生变化而具有的势能叫做弹性势能（本章导图 2）。

物体的动能、重力势能和弹性势能统称为机械能，动能和重力势能、弹性势能可以发生相互转化。

[例题]

质量为 2 吨的汽车，发动机牵引力是 1500 牛，沿坡度为 0.05 的斜坡从坡底由静止出发，加速行驶了 50 米。设运动过程中汽车所受阻力是车重的 0.02 倍， $g$  取 10 米/秒<sup>2</sup>。求：（1）汽车所受各个力做的功和总功；（2）汽车增加的动能；（3）汽车增加的重力势能。

图 4-1

解：（1）在汽车加速驶上斜坡的过程中，汽车受重力  $G$ ，支持力  $N$ ，牵引力  $F$  和阻力  $f$  的作用（图 4-1）。坡度  $\tan \theta$  可认为近似等于  $\sin \theta$ 。

牵引力  $F$  做正功

$$W_1 = Fs = 1500 \times 50 \text{ 焦} = 7.5 \times 10^4 \text{ 焦}。$$

阻力  $f$  做负功

$$\begin{aligned} W_2 &= fs \cos 180^\circ = -fs = -0.02 \times 2 \times 10^3 \times 10 \times 50 \text{ 焦} \\ &= -2 \times 10^4 \text{ 焦}。 \end{aligned}$$

重力  $G$  做负功

$$\begin{aligned} W_3 &= Gs \cos \theta = Gs \cos(90^\circ + \theta) = -Gs \sin \theta \\ &= -2 \times 10^3 \times 10 \times 50 \times 0.05 \text{ 焦} = -5 \times 10^4 \text{ 焦}。 \end{aligned}$$

支持力  $N$  不做功。

汽车所受各个力做的总功

$$\begin{aligned} W &= W_1 + W_2 + W_3 \\ &= 7.5 \times 10^4 \text{ 焦} - 2 \times 10^4 \text{ 焦} - 5 \times 10^4 \text{ 焦} = 5 \times 10^3 \text{ 焦}。 \end{aligned}$$

（2）设汽车在行驶 50 米过程中的加速度为  $a$ ，由牛顿第二定律可得

$$F - f - mgs \sin \theta = ma，$$

$$a = \frac{F - f - mgs \sin \theta}{m}$$

$$= \frac{1500 - 0.02 \times 2 \times 10^3 \times 10 - 2 \times 10^3 \times 10 \times 0.05}{2 \times 10^3} \text{ 米/秒}^2$$

$$= 0.05 \text{ 米/秒}^2。$$

汽车在行驶了 50 米时的速度

$$v = \sqrt{2as} = \sqrt{2 \times 0.05 \times 50} \text{ 米/秒} = 2.24 \text{ 米/秒}。$$

汽车增加的动能

$$\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} = \frac{1}{2}mv^2 - 0 = \frac{1}{2} \times 2 \times 10^3 \times (2.24)^2 \text{ 焦} = 5 \times 10^3。$$

（3）汽车行驶了 50 米时上升的高度

$$h = s \sin \theta = 50 \times 0.05 \text{ 米} = 2.5 \text{ 米}。$$

汽车增加的重力势能

$$E_p = E_{p2} - E_{p1} = mgh - 0 = 2 \times 10^3 \times 10 \times 2.5 \text{ 焦} = 5 \times 10^4 \text{ 焦}。$$

## 练习十二

以下各题中  $g$  取  $10 \text{ 米/秒}^2$ 。

1. 如图 4-2 所示, 圆锥摆的摆球在水平面内做匀速圆周运动。关于摆球所受各力做功情况是 [ ]

- (A) 只有重力对摆球做功。
- (B) 只有绳的拉力对摆球做功。
- (C) 重力和拉力都对摆球做功。
- (D) 重力和拉力都没有对摆球做功。

图 4-2

图 4-3

2. 如图 4-3 所示, 人拉木箱从静止出发在水平面上前进。木箱重  $200 \text{ 牛}$ , 拉力大小为  $50 \text{ 牛}$ , 方向跟水平成  $37^\circ$  角, 木箱跟地面间的滑动摩擦系数为  $0.2$ 。求拉动  $10 \text{ 秒}$  后, (1) 木箱所受各个力在这段时间内做的功和总功; (2) 木箱增加的动能。

3. 以  $40 \text{ 米/秒}$  的速度竖直向上抛出一质量是  $100 \text{ 克}$  的小球。(1)  $2 \text{ 秒}$  末和  $3 \text{ 秒}$  末小球具有的机械能分别为多大? (2) 在这过程中小球的动能改变了多少? 重力势能改变了多少?

4. 质量是  $2 \text{ 千克}$  的物体受到  $24 \text{ 牛}$  竖直向上的拉力, 由静止开始运动  $5 \text{ 秒}$  的过程中, (1) 拉力对物体做的功多大? (2) 物体克服重力做的功多大? (3) 物体的机械能改变了多少?

## 二、动能定理

子弹一经击发, 在枪膛内就受到火药燃烧后产生的高压气体的巨大推力, 但是, 这个力是变化的, 我们无法直接用公式  $W=Fs$  来计算气体推力对子弹做的功。如果能知道推力对子弹所做的功跟子弹动能变化的关系, 就能很方便地解决这个问题了。那么, 外力对物体做的功跟物体动能的变化有什么关系呢?

图 4-4

如图 4-4 所示, 设一个质量为  $m$  的物体原来的速度是  $v_1$ , 在受到跟运动方向相同的恒力  $F$  作用下, 经过一段位移  $s$ , 速度增大到  $v_2$ , 在这个过程中, 外力对物体做正功  $W=Fs$ , 根据牛顿第二定律公式  $F=ma$  和运动学公式  $v_2^2 = v_1^2 + 2as$ , 得

$$W = Fs = ma \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2,$$

即 
$$W_{\text{动}} = E_{k2} - E_{k1}。$$

可见, 动力对物体所做的功, 等于物体动能的增加。

上面导出的关系式是在外力方向与物体运动方向相同时的情形。在外力方向与物体运动方向相反时，外力做负功，用同样的方法可以推导出

$$W_{\text{阻}} = E_{K1} - E_{K2}。$$

可见，物体克服阻力所做的功，等于物体动能的减少。

如果物体同时受到几个力的作用，那么外力所做的功是指外力所做的总功，就是各个力所做的功的代数和。这就是说，外力对物体所做的总功等于物体动能的变化，这个结论叫做动能定理，用公式表示是

$$W = E_{K2} - E_{K1}。$$

### [例题 1]

飞机的质量为  $6.0 \times 10^3$  千克，受到发动机推力为  $2.0 \times 10^4$  牛，脱离跑道时的起飞速度为 80 米/秒，从静止出发到起飞过程中所受的平均阻力约为机重的 0.02 倍，求飞机起飞时在跑道上滑行的距离。

解：飞机受推力  $F$ 、阻力  $f$ 、重力  $G$  和支持力  $N$  的作用。在这几个力共同作用下，飞机从静止出发，在跑道上滑行一段位移  $s$  后达到起飞速度  $v_0$  在这过程中，重力  $G$  和支持力  $N$  不做功，推力  $F$  做正功，阻力

$f$  做负功；飞机的初动能  $E_{K1}$  为零，末动能  $E_{K2} = \frac{1}{2}mv^2$ 。根据动能定理，得

$$Fs - fs = \frac{1}{2}mv^2，$$

$$s = \frac{mv^2}{2(F-f)} = \frac{6.0 \times 10^3 \times 80^2}{2(2.0 \times 10^4 - 0.02 \times 6.0 \times 10^3 \times 9.8)} \text{米} = 1020 \text{米}。$$

飞机起飞时在跑道上滑行的距离为 1020 米。

本题也可用牛顿第二定律和运动学公式来解，请同学们自己做一个，并跟上述解法相比较，哪种解法方便些？

### [例题 2]

质量为  $m$  的物体在水平地面上以某一速度滑行，物体与地面间的滑动摩擦系数为  $\mu$ ，如果物体先在向前的推力  $F_1$  的作用下发生位移  $s_1$ ；接着推力大小变为  $F_2$ ，使物体发生位移  $s_2$ ；最后，撤去推力，物体经位移  $s_3$  后停止。求物体的初速度。

解：本题如用牛顿第二定律和运动学公式来解，要分三个阶段，且必须分别求每个阶段中的加速度和末速度，计算较繁琐。现在，我们用动能定理来解比较简捷。它不必考虑运动的过程，只要考虑整个过程始末状态，物体的动能变化以及整个过程中各个推力和摩擦力做的总功，即可列出方程。设物体的初速度为  $v_0$ ，则

$$F_1s_1 + F_2s_2 - \mu mgs_1 - \mu mgs_2 - \mu mgs_3 = 0 - \frac{1}{2}mv_0^2，$$

物体的初速度

$$v_0 = \sqrt{\frac{2\mu mg(s_1 + s_2 + s_3) - 2F_1s_1 - 2F_2s_2}{m}}。$$

### [例题 3]

质量为 5 吨的卡车，驶上一个斜坡，坡路长 100 米，坡顶和坡底的

高度差是 10 米。卡车上坡前的速度是 10 米/秒，到达坡顶时的速度是 5 米/秒，卡车受到的平均阻力是车重的 0.05 倍，求卡车的牵引力。（g 取 10 米/秒<sup>2</sup>）

解：卡车受牵引力 F、阻力 f、重力 G 和支持力 N，其中支持力 N 不做功，牵引力 F 做正功，阻力 f 和重力 G 都做负功。卡车的初动能

$E_{k1} = \frac{1}{2}mv_1^2$ ，末动能  $E_{k2} = \frac{1}{2}mv_2^2$ 。根据动能定理，得

$$Fs - kmgs - mgh = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2,$$

$$F = kmg + mg\frac{h}{s} + \frac{m}{2s}(v_2^2 - v_1^2)$$

$$= 0.05 \times 5 \times 10^3 \times 10 \text{ 牛}$$

$$+ 5 \times 10^3 \times 10 \times \frac{10}{100} \text{ 牛} + \frac{5 \times 10^3}{2 \times 100} (5^2 - 10^2) \text{ 牛}$$

$$= 5.6 \times 10^3 \text{ 牛}.$$

卡车的牵引力是  $5.6 \times 10^3$  牛。

从以上这些例题可以看出，应用动能定理解题时，先要分析物体的受力情况，列出各个力所做的功（力跟位移方向的夹角小于 90° 的是正值，大于 90° 的是负值，等于 90° 的不做功），以及物体在初、末状态时的动能，然后根据动能定理列出方程求解。

动能定理是力学中的一条重要规律，能解决力学中的很多实际问题。由于动能定理不涉及物体运动过程中的加速度和时间，特别是像例题 2 那样过程比较复杂的问题。因此用动能定理来解题往往比较方便。对于变力做功的问题，虽然不能直接用功的公式来计算，但可从动能变化中求出。例如，本节开始所提的枪膛内气体推力对子弹所做的功的问题，

根据动能定理可知，应等于  $\frac{1}{2}mv^2$ ，只要知道子弹的质量 m 和子弹出膛时的速度 v，就可知气体推力对子弹所做的功。

### 思考

一辆汽车，在合外力不变的情况下，速度从 v 增加到 2v，再从 2v 增加到 3v。这两过程中，合外力对汽车所做的功是否相同？

S：对上述思考题，我用两种不同方法来分析，结果却是矛盾的。从动能定理来分析：前一过程  $W_1 = \frac{1}{2}m(4v^2 - v^2) = \frac{3}{2}mv^2$ ；后一过程  $W_2 = \frac{1}{2}m(9v^2 - 4v^2) = \frac{5}{2}mv^2$ 。显然  $W_2 > W_1$ 。但从牛顿定律和运动学公式来分析：两过程中，合外力 F 相同，加速度 a 也相同；a 相同，速度从 v 增加到 2v 和从 2v 增加到 3v 所用的时间 t 相同；t 相同，s 也相同。既然 F 和 s 都相同，则合外力所做的功 W 相同。我的分析错在哪里呢？

T：这两过程中，F、a、和 t 的确都相同，但在用位移公式时，你没有考虑到两者的初速度是不同的。后一过程的初速度大于前一过程的初

速度，所以后一过程的位移也大于前一过程的位移，因而  $W_2 > W_1$ 。由此可见，你的错误在于对中间过程的细节考虑不周，而应用动能定理就可以避免这种错误了。

### 练习十三

1. 质量为  $1 \times 10^4$  千克的电车正以 15 米/秒的速度在水平路上行驶，设运动中所受阻力是车重的 0.05 倍，问可在距站多远处关掉电门，滑行到站。

2. 用 3 牛的水平推力作用在质量 100 克的玩具小车上，使它在光滑的桌面上从静止出发前进了 0.2 米的距离。然后这个水平推力减小为 2 牛，待小车再前进 0.1 米后，撤去推力，小车又前进 0.1 米到达桌子边缘，求小车到达桌子边缘时的速度。

3. 一架战斗机的质量是  $1.5 \times 10^4$  千克，发动机的推力是  $1.1 \times 10^5$  牛，起飞速度是 88 米/秒，跑道滑行距离 670 米。求在这过程飞机所受的平均阻力。

4. 如图 4-5 所示，质量为  $m$  的物体由静止出发从倾角为  $30^\circ$  的光滑斜面上的 A 点下滑到斜面底端 B 点，再在粗糙水平面上滑行到 C 点停止。已知物体和水平面间的滑动摩擦系数为  $\mu$ ，AB 的长度是  $s_1$ ，求物体到达 B 点时的速度  $v$  和 BC 的长度  $s_2$ 。

图 4-5

5. 质量是 20 克的子弹以 500 米/秒的速度水平射穿一块厚度是 25 毫米的固定木板后速度减为 300 米/秒。子弹在木板中运动时受到的平均阻力多大？子弹穿出木板后，能否再射穿另一块完全相同的固定木板？

6. 质量为 2 千克的物体，静止在倾角为  $30^\circ$ 、长 1 米的斜面的底端，物体与斜面间的摩擦系数为 0.5。现用平行于斜面的力 30 牛把物体沿斜面推到顶端，求物体到达顶端时的速度。

7. 质量为 4 千克的铅球从离砂坑面 1.8 米高处自由落下，铅球落入砂坑并陷入 10 厘米深处。求砂对铅球的平均阻力。

8. 用手竖直向上抛出一个质量为 0.1 千克的石块，石块经 1 秒后落回抛出点，设抛球过程中，手向上移动 0.1 米石块离开手，求手对球的平均作用力。

9. 质量为 40 千克的跳水运动员从 10 米高的跳台上跳下，运动员入水时的速度大小为 15 米/秒，求运动员跳起时做的功。

### 三、重力做功和重力势能的变化

#### 重力做功的特点

设一个质量为  $m$  的物体，从高度为  $h_1$  的 A 处自由下落到高度为  $h_2$  的 B 处，再沿水平方向移到 C 处（图 4-6）。由于物体从 B 处水平移到 C 处重力不做功，所以在整个过程中重力做的功是

$$W_G = mgh_1 - mgh_2。$$

图 4-6

如果让这个物体沿着斜面从 A 滑到 C，设斜面长为 l，则重力所做的功是

$$W_G = mgl \cos(90^\circ - \theta) = mgl \sin \theta = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2。$$

这表明，物体沿斜面移动一段较长的路径跟它竖直下降同样高度移动一段较短的路径，重力所做的功是相同的。

图 4-7

理论证明，这个物体沿任一路径从 A 移动到 C（图 4-7），重力所做的功都是

$$W_G = mgh_1 - mgh_2。$$

这就是说，重力对物体所做的功只跟起点和终点的位置有关，而跟物体运动的路径无关。

### 重力做功和重力势能的变化

我们知道，一个物体从高处落下，重力做功的过程中，物体的重力势能减少。反过来，把一个物体举高，克服重力做功的过程中，物体的重力势能增加。那么，重力做功和重力势能的变化有什么关系呢？

图 4-8

设质量为 m 的物体从高度为  $h_1$  的 A 处降落到高度为  $h_2$  的 B 处（图 4-8），重力势能的减少是

$$E_{PA} - E_{PB} = mgh_1 - mgh_2$$

在这过程中，重力对物体做的功是

$$W_G = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2。$$

所以，重力对物体做功，物体的重力势能就会减少，减少的重力势能等于重力对物体所做的功。

如果物体从图 4-8 中的 B 处上升到 A 处，则重力势能的增加是

$$E_{PA} - E_{PB} = mgh_1 - mgh_2。$$

在这过程中，克服重力做的功是

$$W_G = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2。$$

所以，克服重力做功，物体的重力势能就会增加，增加的重力势能等于克服重力所做的功。

弹性势能和弹力做功的关系，类似于重力势能和重力做功的关系。弹力对物体做功，物体的弹性势能就会减少，减少的弹性势能等于弹力对物体所做的功。克服弹力做功，物体的弹性势能就会增加，增加的弹性势能等于克服弹力所做的功。

### 重力势能的相对性

物体在某两个位置间重力势能的变化等于重力所做的功，它是被这两个位置间的高度差所决定的。而物体在某处重力势能的值却是相对的，这是由于高度 h 是相对的。我们说物体具有重力势能 mgh，这总是相对于某一个水平面来说的，这个水平面的高度取作零，重力势能就等于零，这个水平面叫做参考平面。通常选择地面作为参考平面。实际上，



选择哪一个参考平面可根据研究问题的方便而定。选择不同的参考平面，物体重力势能的值不同，但物体在某两个位置间的重力势能的变化，即两个位置上物体重力势能之差，却跟选择哪一个参考平面无关。

### 势能

重力做功跟路径无关的这个特点是能够引入重力势能的条件。如果重力做功没有这个特点，而是与路径有关，那么把物体由地面分别沿不同路径举到高度为  $h$  处，克服重力所做的功将是不同的。这样，位于高度  $h$  处的物体的重力势能的价值就不能确定，从而也就没有意义了。可见，正由于重力做功与路径无关，重力势能的变化才有确定的值，在物理学中才能够引入重力势能这个概念。

有些力做功也具有像重力做功那样的特点，如电场力对电荷做的功也只跟起点和终点的位置有关，而跟电荷运动的路径无关。所以，我们说电荷在电场中具有电势能。有些力做功不具有这样的特点，例如摩擦力做功就与路径有关。物体沿不同路径从一个位置移到另一个位置，克服摩擦力做的功一般是不相等的。因此，在物理学中就不存在“摩擦势能”这个概念。

#### 思考

1. 在 4 米高的房间内有一张高 1 米的桌子，桌上放一个质量为 1 千克的物体。有人说物体的重力势能是 10 焦，有人说是零，也有人说是 30 焦。究竟谁的说法是对的？

2. 在图 4 - 9 中，甲、乙两人用不同的方法上楼。若两人的质量相同，相对于地面上的高度也相同，那么他们克服重力所做的功是否一定相同？

图 4-9

图 4-10

#### 练习十四

1. 有几个光滑斜面，它们的高度  $h$  相同而倾角不同（图 4 - 10），让质量为  $m$  的滑块沿斜面顶端滑行到底端。（1）根据功的公式来计算三个斜面上重力对物体所做的功，并证明这个功跟斜面的倾角无关。（2）物体到达底端时重力势能改变了多少？（3）根据动能定理，计算物体到达斜面底端时的速度，这个速度跟斜面的倾角有没有关系？

2. 蒸气锤打桩时，质量为 1000 千克的锤头从 20 米高处落到离地 18.5 米高的桩面上。在这过程中，重力对锤头做了多少功？重力势能发生了多大的变化？

3. 乒乓球从离桌面 1 米高处自由下落，落至桌面后又跳起 0.9 米。如果乒乓球的质量是 2.43 克，求整个过程中重力做的功。

图 4-11

4. 要把一根重 200 牛、长 0.8 米的均匀铁杆从地面竖立起来(图 4 - 11) , 外力要克服重力做多大的功?

#### 四、机械能守恒定律

在必修课中我们已经讨论过自由落体运动以及单摆振动过程中, 物体的重力势能和动能之间的相互转化和守恒。重力对物体做功时, 重力势能转化成动能, 物体克服重力做功时, 动能转化成重力势能。在弹簧振子振动过程中, 我们也已经讨论过振子的弹性势能跟动能之间的相互转化。弹力对物体做功时, 弹性势能转化成动能, 物体克服弹力做功时, 动能转化成弹性势能。可见, 不同形式的机械能之间的相互转化是通过重力(或弹力)做功来实现的。重力(或弹力)做功的过程, 也就是机械能从一种形式转化成另一种形式的过程。我们还进一步研究过这个转化过程中的数量关系, 从而得出了机械能守恒定律。

在只有重力或弹力做功的情况下, 物体的动能和势能可以相互转化, 而机械能的总量保持不变。这个结论叫做机械能守恒定律。

##### 思考

在下面列举的各种实例中, 除第(1)小题外都不计空气阻力, 哪些过程中机械能是守恒的? 为什么?

- (1) 跳伞运动员在空中匀速下降。
- (2) 抛出的铅球。
- (3) 荡秋千的人越荡越高。
- (4) 细绳一端拴一个小球, 另一端固定, 先水平拉直绳, 然后放手。
- (5) 拉着一个物体沿着光滑斜面上升。
- (6) 在竖直平面内放置的光滑圆环上做圆周运动的小球。

##### [例题 1]

如图 4 - 12 所示, AB 部分是光滑斜面, BC 部分是光滑曲面。A 离地高  $h_1$ , B 离地高  $h_2$ 。物体从 A 静止开始下滑, 求它下滑到 B 处和 C 处时的速度的大小。

解: 用牛顿第二定律和运动学公式可以求出物体下滑到 B 处时的速度, 可是无法求出物体下滑到 C 处时的速度。因为物体在曲面上滑行时, 所受的合外力大小和方向都是时刻变化的。由于斜面和曲面都是光滑的, 没有摩擦, 曲面对物体的支持力方向虽然时刻在变化, 但始终与物体的运动方向垂直, 对物体不做功。所以, 物体在下滑过程中只有重力做功, 机械能是守恒的, 可以应用机械能守恒定律来解。

设物体的质量为  $m$ , 在初始状态 A 处:  $E_{PA} = mgh_1$ ;  $E_{KA} = 0$ 。

在 B 处:  $E_{PB} = mgh_2$ ;  $E_{KB} = \frac{1}{2}mv_B^2$ 。

在 C 处:  $E_{PC} = 0$ ;  $E_{KC} = \frac{1}{2}mv_C^2$ 。

由机械能守恒定律  $E_B = E_A$ ,

$$mgh_2 + \frac{1}{2}mv_B^2 = mgh_1。$$

物体下滑到 B 处时速度的大小

$$v_B = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}。$$

又根据

$$E_C = E_A ,$$

$$\frac{1}{2}mv_C^2 = mgh_1。$$

物体下滑到 C 处时速度的大小

$$v_C = \sqrt{2gh_1}。$$

[例题 2]

把一块质量是 0.5 千克的石块，从 20 米高的山崖上以 10 米/秒的速度水平抛出。求石块落地时速度的大小。（不计空气阻力）

解：石块做平抛运动，在这过程中，只有重力做功，机械能是守恒的。

初状态：

$$E_{p1} = mgh , E_{k1} = \frac{1}{2}mv_1^2。$$

末状态：

$$E_{p2} = 0 , E_{k2} = \frac{1}{2}mv_2^2。$$

由

$$E_2 = E_1 ,$$

$$\frac{1}{2}mv_2^2 = mgh + \frac{1}{2}mv_1^2。$$

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + 2gh} = \sqrt{10^2 + 2 \times 9.8 \times 20} \text{米/秒} = 22.2 \text{米/秒}。$$

石块落地时的速度大小是 22.2 米/秒。

本题也可用平抛运动的公式来解。如果石块不是水平抛出而是以同样大小的初速度跟水平方向成任意角度抛出，那么由机械能守恒定律仍可求出速度的大小是 22.2 米/秒。但用抛体公式来解，就复杂得多了。需要指出的是：根据机械能守恒定律求得的只是速度的大小，而速度的方向则要根据初速度的大小、方向和竖直方向末速度的大小，用速度合成的方法才能确定。

[例题 3]

图 4 - 13 是游乐场里大回环（本章导图 3）的示意图。小车由斜轨上 A 点从静止开始下滑。要使小车滑到圆轨顶端 B 时能继续沿圆轨运动，A 点的最小高度是多少？设圆轨的半径是 R，摩擦阻力不计。

解：小车在轨道上运动时受重力和轨道支持力的作用。支持力始终跟小车运动方向垂直，不做功。所以只有重力做功，小车的机械能守恒。

小车在 A 处时的机械能：

$$E_A = mgh ,$$

小车在 B 处时的机械能：

$$E_B = \frac{1}{2}mv^2 + mg2R。$$

由

$$E_B = E_A ,$$

$$\frac{1}{2}mv^2 + mg2R = mgh,$$

$$h = \frac{v^2}{2g} + 2R \quad (1)。$$

图 4-13

上式表示小车滑下时的高度  $h$  和滑行到 B 处时的速度  $v$  的关系。要求出小车开始滑下时的最小高度，还须知道小车滑行到 B 处能继续沿圆轨运动的最小速度，由于这一圆轨是在竖直平面里，小车经 B 处时所需的向心力就是重力  $G$ ，即

$$mg = \frac{mv^2}{R},$$

$$v^2 = Rg, \quad (2)$$

把 (2) 式代入 (1) 式，可求得 A 点的最小高度为  $h = \frac{5}{2}R$ 。

[例题 4]

如图 4-14 所示，跨过定滑轮的绳子的一端连结一个质量为  $m$  的物体 A，另一端连结一个质量为  $2m$  的物体 B，它们在同一高度上，撤去挡板 P，B 物从静止开始下落高度  $h$  时，A、B 两物体的速度各是多大？

图 4-14

解：本题研究对象是物体 A 和 B。B 物下落时，A 物将上升，假定绳子的质量不计，也不伸长，那么 B 物下落  $h$  时，A 物上升  $h$ ，且两物体的速度大小相等。把 A、B 看成是连在一起的一组物体，对这组物体来说，运动中所受的外力只有重力做功，所以机械能守恒。

如以 B 物原来位置的重力势能为零。

初状态：A、B 的机械能都是零， $E_1 = 0$ 。

末状态：B 下落  $h$  时重力势能为  $-2mgh$ ，A 上升  $h$  时重力势能为  $mgh$ ；

设这时它们速度的大小都是  $v$ ，则 A 的动能为  $\frac{1}{2}mv^2$ ，B 的动能为  $\frac{1}{2}2mv^2$ 。

$$E_2 = E_A + E_B = mgh + \frac{1}{2}mv^2 - 2mgh + \frac{1}{2}2mv^2 = -mgh + \frac{3}{2}mv^2。$$

由  $E_2 = E_1$ ，

$$-mgh + \frac{3}{2}mv^2 = 0。$$

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{3}}。$$

当 B 物下落  $h$  时，A、B 两物体的速度大小都是  $\sqrt{\frac{2gh}{3}}$ 。

从以上几个例题可以看出，应用机械能守恒定律解题，只需要分析物体运动的初状态和末状态，而不必考虑中间过程，这可以简化解题步骤。当然，有的问题只用机械能守恒定律还不能完全解决，如例题 3 就是一个例子。

判断一个力学问题能不能用机械能守恒定律，首先要分析物体的受力和这些力做功的情况。如果只有重力（或弹力）做功，就可以用机械能守恒定律。如果还有其他力做功，则不能用机械能守恒定律，但可以用动能定理。

S：我用动能定理解例题1，可同样列出 $mgh_1 = \frac{1}{2} m v_c^2$ ，解得 $v_c = \sqrt{2gh_1}$ 。那么，动能定理跟机械能守恒定律有什么区别和联系呢？

T：动能定理是描述任何一个力作用在物体上的合外力，使物体在合外力的方向上经过一段位移后，物体动能必然发生变化。而且物体动能的变化等于合外力在这过程中对物体所做的功。机械能守恒定律是描述物体只有重力（或弹力）做功时，物体的动能和重力势能（或弹性势能）必然发生相互转化，而且在转化过程中，机械能的总量保持不变。所以说，两者的物理意义和适用范围有所不同。在上述例题1中，用这两种方法都能列出 $mgh_1 = \frac{1}{2} m v_c^2$ ，但方程的意义是不同的。用动能定理列出的方程中， $mgh_1$ 表示重力做的功，而用机械能守恒定律列出的方程中， $mgh_1$ 表示重力势能的变化。当然，由于重力做的功等于重力势能的变化，它们数值上是相同的。也就是说，在只有重力做功时，两者是一致的。所以一般来说，凡是能够用机械能守恒定律来解的问题，用动能定理也可以解。但是能够用动能定理来解的问题，就不一定能用机械能守恒定律来解了。

### 练习十五

1. 有人说：“自由下落的物体，在下落过程中物体动能的增加等于重力势能的减少与重力对物体所做的功之和。”这种说法对吗？为什么？

2. 一个摆长是  $l$  的单摆，振动时的最大偏角是  $\theta$ 。求单摆经过最低点时的速度。

3. 有一种地下铁道，车辆进站时要上坡，出站时要下坡（图 4-15），这有什么好处？如果站台高 4 米，车辆到达 A 点时的速度是 36 千米/小时，此后关闭电门，不考虑阻力，车辆到达 B 点时的速度多大？（ $g$  取 10 米/秒<sup>2</sup>）

图 4-15

4. 滑雪运动员从高 25 米的雪坡上以 5 米/秒的初速度滑下，如果不计阻力，他滑到坡底时的速度多大？（ $g$  取 10 米/秒<sup>2</sup>）

5. 要使一球着地后回跳的高度超过原高 5 米，必须以多大速度下抛？（不计空气阻力和球与地碰击时的能量损失， $g$  取 10 米/秒<sup>2</sup>）

图 4-16

6. 质量为 50 克的小球系在细绳的一端，绳的另一端固定在 O 点，绳长 50 厘米。现将绳拉直到水平位置 OA，使小球在 A 处从静止开始运动（图 4-16）。求小球经过 B 处时的速度和经过 C 处时小球对绳的拉力。

( $g$  取  $10 \text{ 米/秒}^2$ )

图 4-17

图 4-18

7. 用长  $0.7 \text{ 米}$  的细绳拴一个小球, 绳的另一端固定, 把绳竖直放置并使小球在最低点时以  $8 \text{ 米/秒}$  的速度运动。那么, 它能不能在竖直平面内做圆周运动? 为什么? ( $g$  取  $10 \text{ 米/秒}^2$ )

8. 如图 4-17 所示, 小球从高  $h$  的光滑斜面上滚下, 经过粗糙的水平面  $AB$  后再滚上另一光滑斜面, 到达  $h/3$  高时速度为零。试证明小球最后恰好静止在  $AB$  的中点  $C$  处。

9. 如图 4-18 所示, 倾角为  $\theta$  的光滑斜面上有两个质量均为  $m$  的小球, 中间有一长  $l$  的轻质杆相连, 下面的球离斜面底端的高度为  $h$ 。两球从静止开始滑下斜面后进入光滑平面, 求两球在光滑平面上运动时的速度。

### 阅读材料

#### 机械能的利用

大型游乐场中各种惊险的游艺机大都是利用机械能转变的原理。除了本章导图 3 所示的大回环外, 还有一种高架滑四、机械能守恒定律车。如图 4-19 所示, 一辆载有数人的小车, 从高架上缓慢起动, 没有任何动力。开始时速度很小, 随着轨道下降、转弯, 小车速度越来越大, 使人感到随时有冲出轨道的危险, 当小车到达最低位置时速度达到最大。然后轨道逐渐回升, 小车速率减小, 到达图 4-19 中的  $A$  处时, 通过一个加速装置, 小车速率增大, 然后, 随着轨道的上升, 小车又以很小的速率回到原来出发的高架站台上。

图 4-19

一辆没有任何动力的滑车为什么每次总是如此准确地完成这一险而不危的动作呢? 原来正是机械能转变在支配着它的运动。由于运动中要受到阻力, 所以小车从出发到回到原处所损失的能量由  $A$  处的加速装置来补偿 (补偿的能量为  $mgh$ ,  $h$  是  $A$  处到小车出发处的竖直高度)。

图 4-20

图 4-20 所示的杂技节目——跳板, 质量很小的小演员乙站在跳板的一端, 质量很大的演员甲从不高的支架上跳下落在跳板的另一端。这时, 乙将弹起相当高, 恰好落坐在另一名演员肩上扛的高椅上。这里也是利用机械能转变, 这是以质量“换取”高度。

这类事例在工农业生产上也有相当大的实用价值。大家都知道缓慢流动的河水一般不能用来浇灌高坡上的田地。能不能把水送得更高些呢? 那只有把大量水的动能转变为一小部分水的势能才能办到。

我国古代《天工开物》一书上记载着一种农田提水工具名叫筒车(图 4-21)。它是一个用木制成的直径近  $20 \text{ 米}$  的巨轮, 轮边装上许多略微倾斜的竹筒以及挡水板, 轮的下部置于激流之中。书中写道: “激轮使转, 挽水入筒, 一一倾于视内, 流入亩中, 昼夜无息, 百亩无忧”。这

就是把大量水的动能转化为少量水的势能。《天工开物》的作者把筒车记载在龙骨水车之前，而水车发明于东汉末年，筒车的发明当早于水车。直到今天，在甘肃、宁夏一带仍然使用着筒车。

图 4-21

图 4-22

图 4-22 所示是能将河水引至数十米高处的一台水锤泵的原理图，其中 1 是进水管，2 是压水阀，3 是缓冲筒，4 是出水管。这个泵的关键部件是一个压水阀，它相当于一个可以不断开关的阀门。快速流动的水突然把阀门冲击关闭时使水产生几个大气压的静压强，像一个水做成的锤子将水压入缓冲筒，进而被送到数十米高处，压强减小时阀门又自动开启，水流将再一次把阀门关上。这样一次又一次地不断冲击，便能实现动能向势能的转变。

### 本章学习要求

1. 理解动能定理。
2. 理解重力做功跟物体重力势能变化的关系。
3. 知道弹力做功跟物体弹性势能变化的关系。
4. 掌握机械能守恒定律。

### 复习题

#### 1. 选择题（以下各小题中只有一个正确答案）

(1) 当物体克服重力做功时，物体的重力势能和动能可能发生的变化情况是 [ ]

- (A) 重力势能一定增加，动能一定减少。
- (B) 重力势能一定减少，动能一定增加。
- (C) 重力势能一定增加，动能不一定减少。
- (D) 重力势能不一定增加，动能一定减少。

(2) 在高  $H$  的平台上，一质量为  $m$  的物体以初速度  $v_0$  飞出（图 4-23），不计空气阻力，当它到达离地面高  $h$  的 A 点时，物体的动能为 [ ]

- (A)  $\frac{1}{2}mv_0^2 + mgH$ 。
- (B)  $\frac{1}{2}mv_0^2 + mgh$ 。
- (C)  $mgH - mgh$ 。
- (D)  $\frac{1}{2}mv_0^2 + mg(H - h)$ 。

图 4-23

(3) 从同一地点竖直向上抛出两个质量不等的物体 A、B，它们的动能相等，如果  $m_A > m_B$ ，并设 A、B 所能达到的最大高度分别是  $h_A$  和  $h_B$ ，它们的最大重力势能分别是  $E_{PA}$  和  $E_{PB}$ ，则 [ ]

- (A)  $h_A > h_B$ ， $E_{PA} = E_{PB}$ 。
- (B)  $h_A < h_B$ ， $E_{PA} = E_{PB}$ 。
- (C)  $h_A = h_B$ ， $E_{PA} > E_{PB}$ 。
- (D)  $h_A = h_B$ ， $E_{PA} < E_{PB}$ 。

(4) A、B 两物体质量之比  $m_A : m_B = 2 : 1$ ，速度之比  $v_A : v_B = 1 : 2$ ，在水平面上运动时受到相同大小的阻力而逐渐减速最后停止，则它们停止前经过的位移之比  $s_A : s_B$  为 [ ]

- (A) 1 : 1。
- (B) 1 : 2。
- (C) 2 : 1
- (D) 4 : 1。

(5) 汽车以不变的速率驶过凸形山坡 (图 4 - 24)，下面说法中正确的是 [ ]

- (A) 汽车的机械能守恒。
- (B) 合外力对汽车所做的功为零。
- (C) 汽车所受合力为零。
- (D) 汽车的牵引力所做的功为零。

图 4-24

2. 选择题 (以下各小题中有两个或两个以上正确答案)

(1) 物体在下列运动过程中，若不计空气阻力，机械能守恒的是 [ ]

- (A) 电梯匀速上升。
- (B) 弹簧振子做简谐振动。
- (C) 水平抛出的石子。
- (D) 单摆振动。

(2) 关于机械能守恒，下面说法中正确的是 [ ]

- (A) 做匀速运动的物体机械能一定守恒。
- (B) 物体所受的合外力为零时，合外力做的总功一定为零，物体的机械能不一定守恒。

(C) 物体所受的合外力不等于零时，它的机械能可能守恒。

(D) 只要有重力做功，物体的动能和重力势能必然相互转化，机械能一定守恒。

(3) 质量为  $m$  的滑块，沿着高  $h$ 、长  $l$  的粗糙斜面匀速下滑，滑块从顶端下滑到底端的过程中，下面说法正确的是 [ ]

- (A) 重力对滑块做的功等于  $mgh$ 。
- (B) 滑块克服阻力做的功等于  $mgh$ 。
- (C) 滑块的动能减少了  $mgh$ 。
- (D) 滑块的机械能减少了  $mgh$ 。

(4) 静止在光滑水平面上的物体，在力  $F$  的作用下，从 A 点移到 B 点，下面说法正确的是 [ ]

- (A)  $F$  越大，它所做的功一定越多。
- (B) 时间越短，则  $F$  所做的功一定越多。
- (C) 如果物体到达 B 点时的速度增大为原来的 2 倍，则力  $F$  做的功



也增大为原来的 2 倍。

(D) 如果物体从 A 到 B 的时间增大为原来的 2 倍, 则力 F 做的功要减少一半。

(5) 用手竖直向上以速度  $v_0$  抛出一个质量为  $m$  的物体, 物体上升的最大高度是  $H$ , 则人对物体做的功是 [ ]

(A)  $\frac{1}{2}mv_0^2$

(B)  $mgH$

(C)  $\frac{1}{2}mv_0^2 + mgH$

(D)  $\frac{1}{2}mv_0^2 - mgH$

3. 两艘质量均为  $m$  的静止小船 A 和 B 用绳连着并相隔一定距离。若一人站在 A 船上通过绳以恒力  $F$  作用于 B 船, 人的质量和水对船的阻力均不计, 则在 B 船开始运动  $t$  秒内人做了多少功?

4. 一颗子弹以 700 米/秒的速度打穿第一块固定的木板后, 速度减为 500 米/秒, 如果让它继续打穿第二块同样的固定木板, 它的速度将变为多大? 它能否再打穿第三块同样的固定木板。

5. 一辆摩托车, 质量为  $m$ , 从斜坡底由静止开始上坡, 行至斜坡长的  $\frac{1}{3}$  处, 关闭发动机恰能冲到坡顶, 已知斜坡长为  $l$ , 倾角为  $\theta$ , 车所受阻力是车重的  $k$  倍。求上坡过程中摩托车牵引力所做的功和关闭发动机时的速度。

图 4-25

6. 如图 4-25 所示, 用卷扬机通过定滑轮将重物从地面上位置 A (绳与水平方向的夹角为  $30^\circ$ ) 水平移到位置 B (绳与水平方向的夹角为  $45^\circ$ )。已知卷扬机拉绳子的恒力  $F$  为 2000 牛, 物体的质量  $m$  为 500 千克, 滑轮高度  $h$  为 4 米, 物体在 A 位置时静止, 在 B 位置时速度  $v$  为 3 米/秒, 求物体从 A 移到 B 的过程中克服摩擦力做的功 (设绳的总长不变, 绳的质量、滑轮的质量和滑轮的摩擦均不计)。

7. 一瀑布高 10 米, 每秒下落的水为 50 吨。下落的 4. 动能定理机械能守恒定律水冲击水轮机带动发电机转动。如果水轮机的效率为 75%, 发电机的效率为 80%, 发电机的输出功率多大?

8. 在平直轨道上, 机车牵引一质量为 5000 千克的车厢以 36 千米/小时的速度匀速行驶, 这时机车牵引车厢的功率为 15 千瓦。如果车厢跟机车脱开, 车厢将滑行多长的距离才停止?

9. 车床的功率是 7.8 千瓦, 切削直径为 200 毫米的工件时, 工件每分钟转 1600 次, 求切削速度和车刀所克服的阻力。

10. 一半径为  $R$  的光滑半球形碗的边沿上, 有一质量为  $m$  的小滑块, 从静止沿碗的内壁滑下 (图 4-26)。求滑块滑到碗底时对碗的压力。

图 4-26

图 4-27

11. 如图 4-27 所示, 不计质量、长为  $l$  的细棒, 一端用光滑铰链固定, 在细棒的中点, 固定一个质量为  $4m$  的小球 A, 在细棒的另一端固定一个质量为  $m$  的小球 B。棒可绕固定水平轴  $O$  在竖直平面内转动。现将

棒拉到水平位置，释放后，求小球 A、B 到达最低位置时的速度以及这时铰链上受到的力。

## 动量定理 动量守恒定律

### 1. 跳高

### 2. 渡轮船边上绑的轮胎

### 3. 太空行走

人们观察周围运动着的物体，如流星、飞行的子弹、滚动的球、转动的轮子等，看到它们最终都会停止运动，于是便产生了疑问，宇宙间的运动是否在减少。但是，长期来对天体运动的观测，并没有发现宇宙运动有减少的迹象。法国物理学家笛卡儿首先提出了用物体的质量和速率的乘积作为运动量的量度。后来，牛顿把笛卡儿定义的运动量修改为质量和速度的乘积，这就是现在我们叫做动量的物理量，这一章我们要学习动量、动量定理和动量守恒定律。

## 一、动量 冲量

### 动量

我们知道，行驶速度相同的列车和汽车，列车造成的撞车事故要比汽车造成的撞车事故严重得多。我们还有这样的经验，面对相同速度滚来的一个小橡皮球和一个铅球，你很容易用脚把小橡皮球踢回去，却很难把滚来的铅球踢回去。这就是说，考虑一个运动物体的作用效果时，只考虑物体运动的速度是不够的，还必须同时考虑物体的质量。物体的质量和速度的乘积越大，这个运动物体的作用效果就越大。在物理学中，我们把运动物体的质量和速度的乘积叫做动量（mo-mentum），用符号  $p$  表示，即

$$p=mv。$$

相同速度的列车和汽车，列车的质量比汽车大得多，所以它的动量也大得多，作用效果也大，撞车时它造成的事故越严重。

动量是矢量，它的方向跟速度的方向相同。动量的单位是千克·米/秒，符号是  $\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}$ 。

### 冲量

骑自行车时，如果一开始就用力蹬，很快就可以达到一定的速度。如果蹬的力小一些，就要经过较长的时间才能达到同样的速度。可见，要使原来静止的物体获得某一速度，或者要改变一个运动物体的速度，既可以用较大的力作用较短的时间来完成，也可以用较小的力作用较长的时间来完成。在物理学中，把力和力的作用时间的乘积叫做冲量（impulse），冲量用  $Ft$  表示。

冲量是矢量，它的方向由力的方向决定，如果在这段时间内力的方向不变，冲量的方向就是力的方向。

冲量的单位是牛顿·秒，简称牛·秒，符号是  $\text{N} \cdot \text{s}$ 。由于  $1 \text{ 牛} = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}^2$ ，所以  $1 \text{ 牛} \cdot \text{秒} = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}$ 。这就是说，冲量和动量虽然用不同的单位，但这两个单位实际上是等同的。

### 思考

1. 以相同大小的速度分别向竖直方向和水平方向抛出两个质量相等

的物体。抛出时，两个物体的动量是否相同？动能是否相同？为什么？

2. 第一次用 10 牛的力在 0.5 秒内向前推动一个物体，第二次用 5 牛的力在 1 秒内向后推动这个物体，两次给物体的冲量是否相同？为什么？

S：速度和动量都是表示物体运动状态的量，它们有什么区别呢？

T：速度和动量都是表示物体运动状态的量，而且有着密切的联系，但它们的含义是不同的。速度表示物体运动的快慢和方向，但不能告诉我们这一运动的作用效果，即要作用多大的力经多少时间才能使以这个速度运动的物体停下来。而动量不是告诉我们物体运动的快慢，它表明了这一运动的作用效果。可以说，速度是一个运动学的量，用来描述物体的运动情况；动量是一个动力学的量，用来定量地表示物体的运动。

## 练习十六

1. 图 5 - 1 (a) 和 (b) 中， $P_1$  表示一个物体原来的动量， $P_2$  表示这个物体后来的动量。用作图法表示这个物体动量的改变。

图 5-1

2. 质量是 50 千克，以 1 米 / 秒的速度步行的人和质量是 0.02 千克，以 800 米 / 秒速度飞行的子弹相比较，哪个动量大？哪个动能大？

3. 关于冲量，下面的说法是否正确？为什么？

(1) 作用在两个物体上的力的大小不同，但两个物体所受的冲量可能是相同的。

(2) 作用在物体上的力很大，物体所受的冲量也一定很大。

4. 以 20 米 / 秒的速度竖直向上抛出一质量为 0.1 千克的石块，空气阻力不计， $g$  取 10 米 / 秒<sup>2</sup>，求：(1) 从抛出到达到最高点的过程中，石块动量改变了多少；重力对石块的冲量多大；(2) 从抛出到落回原处的过程中，石块动量改变了多少；重力对石块的冲量是多大。

## 二、动量定理

我们知道，跳高运动员越过横竿后，要落在海绵垫子上才比较安全（本章导图 1），如果直接跳落到硬地上容易摔伤。搬运玻璃器皿等易碎物品时，在器皿间要放些纸屑、瓦楞纸或泡沫塑料等软衬，就可以减少运输途中的损坏。

一个物体受到力的作用，经过一段时间速度要发生变化，它的动量也随着变化。那么，物体所受合外力的冲量跟它的动量变化有什么关系呢？

设质量为  $m$  的物体原来的速度是  $v_1$ ，受到恒定合外力  $F$  的作用，经过时间  $t$ ，速度变为  $v_2$ ，由牛顿第二定律和运动学公式  $F=ma$ 、 $v_2=v_1+at$ ，可得

$$Ft=m(v_2-v_1)=mv_2-mv_1。$$

式中  $mv_1$  是物体受到作用前的动量  $P_1$ ， $Mv_2$  是作用后的动量  $P_2$ ，所以

上式也可写成

$$Ft = P_2 - P_1。$$

这就是说，物体所受合外力的冲量等于它的动量的变化，这个结论叫做动量定理。

由动量定理可以知道，如果一个物体的动量的变化是一定的，那么它受力作用的时间越短，这个力就一定越大，力作用的时间越长，这个力就可以越小。上节所述的用不同的蹬力和不同的时间使自行车达到一定速度的例子，就是这个道理。

图 5-2

以上结论，我们还可以用下列实验来证实。把一条细线的上端固定，下端挂一个重物，如图 5 - 2 (a) 所示。把重物提到一定高度后释放[图 5 - 2 (b)]，重物下落时有可能把细线拉断[图 5 - 2 (c)]。但如果在细线上端连结一小段弹簧，再从同样高度释放重物，细线就不会被拉断了[图 5 - 2 (d)]。这是什么原因呢？重物下落到把线拉直时速度最大，这时线开始对重物有拉力的作用。在线被拉直，重物从运动到停止运动的过程中，重物动量发生变化所用的时间很短，所以线对重物的拉力较大，如果超过了线所能承受的最大拉力，线就被拉断。如果在线的上端连结一小段弹簧后，则在线被拉直时，由于弹簧可以伸长，延缓了重物从运动到停止运动的过程，动量发生这个变化的时间较长，所以线对重物的拉力较小，线就不会被拉断。

图 5-3

生活中类似的现象很多，本节开始所举的一些事例都是这个道理。

使物体发生动量变化的力可以是恒力，也可以是变力。如果是变力，动量定理公式中的  $F$  就是指变力在这段作用时间内的平均值。

#### 思考

1. 渡轮的船帮上挂放着若干汽车轮胎（本章导图 2），这起什么作用？

2. 如图 5 - 3 所示，有一铁片以同一速度  $v$  射向一块塑料板，在下列三种情况下，哪种情况板所受的冲量最大？为什么？（1）铁片尖端向前，穿透塑料板；（2）铁片尖端在后，嵌入塑料板；（3）铁片尖端向下，从塑料板上反弹回来。

S：如果物体受力作用时从静止开始运动，或者从运动到停止，那么由动量定理公式可得  $Ft = mv$ 。这是否表明冲量就等于动量？

T：不对。冲量不是等于动量而是等于动量的变化。上式中的  $mv$  不是表示动量而是表示动量的变化，只是由于初动量（或未动量）等于零，所以动量的变化在数值上跟初动量（或未动量）相等而已。另外，冲量是表示力作用一段时间的过程，而动量是表示某一瞬时物体运动的状态，两者是不能等同的。

#### [例题 1]

质量为 0.7 千克的足球在草地上以 4 米 / 秒的速度运动。10 号球员顺着球运动方向一脚踢去，使球以 12 米 / 秒的速度向前运动。紧接着另一位 5 号球员又一脚把球以 8 米 / 秒的速度沿原来直线反向踢回。设两

球员踢球时跟球接触的时间都是 0.1 秒，求在这两次踢球过程中，足球动量的变化和受到的平均作用力的大小。

解：球员踢球时，球受到冲量的作用，动量发生变化，所以这个问题可用动量定理来解。由于动量是矢量，所以用动量定理解题时，要注意初动量和末动量的方向。对同一直线上的矢量运算，可以用带有正负号的数值把矢量的大小和方向都表示出来。先沿着矢量所在的直线选定一个正方向，凡是方向跟正方向相同的矢量都取正值，凡是方向跟正方向相反的矢量都取负值。这样，矢量运算就可以简化为代数运算。

设球原来运动方向为正，10号球员踢球时，则

$$v_1=4 \text{ 米 / 秒}, v_2=12 \text{ 米 / 秒}。$$

足球动量变化的大小

$$\begin{aligned}\Delta p &= p_2 - p_1 = mv_2 - mv_1 \\ &= 0.7 \times 12 \text{ 千克} \cdot \text{米 / 秒} - 0.7 \times 4 \text{ 千克} \cdot \text{米 / 秒} \\ &= 5.6 \text{ 千克} \cdot \text{米 / 秒}。 \end{aligned}$$

由动量定理，可得

$$Ft = \Delta p,$$

足球受到的平均作用力

$$F = \frac{\Delta p}{t} = \frac{5.6}{0.1} \text{ 牛} = 56 \text{ 牛}。$$

正值表示 F 的方向跟球原来运动方向相同。

如仍设球原来运动的方向为正，5号球员踢球时，则  $v_1' = 12 \text{ 米 / 秒}$ ，

$$v_2' = -8 \text{ 米 / 秒}。$$

足球动量变化的大小

$$\begin{aligned}\Delta p' &= p_2' - p_1' = mv_2' - mv_1' \\ &= -0.7 \times 8 \text{ 千克} \cdot \text{米 / 秒} - 0.7 \times 12 \text{ 千克} \cdot \text{米 / 秒} \\ &= -14 \text{ 千克} \cdot \text{米 / 秒}， \end{aligned}$$

负值表示动量变化的方向跟球原来运动方向相反。

由动量定理，可得

$$Ft = \Delta p'，$$

足球受到的平均作用力

$$F' = \frac{\Delta p'}{t} = \frac{-14}{0.1} \text{ 牛} = -140 \text{ 牛}，$$

负值表示力的方向跟球原来运动方向相反。

### [ 例题 2 ]

一个质量为 60 千克的人从高处跳下，以 7 米 / 秒的速度着地，跟地面接触 0.02 秒后停下来，地面对他的作用力多大？如果他着地时弯曲双腿，用了 1 秒才停下来，地面对他的作用力又多大？

图 5-4

解：分析人着地时的受力情况：重力 G 方向向下，地面对人的作用力 N 方向向上（图 5 - 4），人着地时的速度  $v_1=7 \text{ 米 / 秒}$ ，着地后的速度  $v_2=0$ ，这一过程的作用时间  $t=0.02 \text{ 秒}$ 。如以向上的方向为正，由动量定理，得

$$(N - mg)t = 0 - (-mv_1) = mv_1,$$

$$N = \frac{mv_1}{t} + mg = \frac{60 \times 7}{1} \text{ 牛} + 60 \times 9.8 \text{ 牛} = 1008 \text{ 牛}。$$

地面对人的作用力是 21588 牛。

如果人着地过程的作用时间  $t' = 1$  秒，则

$$(N' - mg)t' = 0 - (-mv_1) = mv_1,$$

$$N' = \frac{mv_1}{t'} + mg = \frac{60 \times 7}{1} \text{ 牛} + 60 \times 9.8 \text{ 牛} = 1008 \text{ 牛}。$$

地面对人的作用力是 1008 牛。

可见，人从高处跳下时，要尽可能延缓着地的时间才能减小人所受地面的作用力。

动量定理和动能定理都是反映物体受力后运动状态发生变化，且都是由牛顿第二定律和运动学公式推导出来的，它们究竟有什么不同？在什么情况下该用动量定理，在什么情况下又该用动能定理呢？

动量定理描述的是力的冲量过程，其效果是改变了物体的动量。由于冲量和动量都是矢量，所以动量定理的表达式是矢量式。动能定理描述的是力的做功过程，其效果是改变了物体的动能。由于功和能都是标量，所以动能定理的表达式不是矢量式。这两条定理是从不同角度来描述物体受力后运动状态发生的改变。一般来说，在具体应用时，如果涉及到力作用一段时间或物体动量变化的问题，用动量定理来解比较方便。如果涉及到力使物体产生一段位移或物体动能变化的问题，用动能定理来解比较方便。不论动量定理还是动能定理，在运用时都只要考虑物体的初、末状态而不必涉及中间过程的细节。这是运用这两条定理解题的优越所在。

## 练习十七

1. 质量是 2000 千克的汽车以 10 米 / 秒的速度行驶，要使它紧急刹车而停下，必须给它多大的冲量？如果要使它在 2 秒内停下，必须对它施加多大的制动力？

2. 质量是 0.5 千克的小车在光滑水平地面上以 2 米 / 秒的速度运动。如果对它施加 4 牛的水平推力，1 秒后再撤去这个力，这时小车速度变为多大？接着，小车以这一个速度撞到竖直的墙上后以原速率反弹回来。如果小车跟墙的作用时间是 0.02 秒，求小车对墙的作用力。

3. 在光滑水平地面上有一静止的滑块，质量是 0.2 千克。先用 0.6 牛水平方向的力持续作用了 2 秒，随即把力减小为 0.4 牛，方向不变，再持续作用 1 秒，最后把力减小为 0.2 牛，方向不变，再持续作用 0.5 秒。求滑块的末速度。

4. 用质量是 5 千克的铁锤把道钉打进铁轨的枕木里，打击时铁锤的速度是 5 米 / 秒。如果打击的作用时间是 0.01 秒，求打击时的平均作用力。

5. 质量是 0.5 千克的物体从离地面 5 米高处自由下落，第一次落在硬地上，作用时间是 0.01 秒，第二次落在软地上，作用时间是 0.5 秒。求物体在这两次落地时受到地面的作用力分别是多大。（ $g$  取 10 米 / 秒

2)

6. 质量是 300 克的垒球以 20 米 / 秒的速度飞来, 运动员用硬棒击球后, 球以 30 米 / 秒的速度向反方向飞去。求棒对球做的功和对球的冲量。

7. 有两个质量相同的物体在水平面上分别以速度  $v_1$  和  $v_2$  运动, 如果物体与平面间的滑动摩擦系数相同。那么它们停止前经过的位移之比是多大? 停止前经过的时间之比是多大?

8. 一个质量为  $m$  的物体在水平面上作直线运动, 初速为零。开始  $t_1$  秒内的加速度为  $a_1$ , 接着在合外力  $F$  作用下继续加速, 运动  $t_1$  秒, 最后在只受摩擦力作用下运动  $t_2$  秒后停止。求滑动摩擦系数。

### 三、动量守恒定律

使用步枪射击时, 子弹向前飞出的同时枪身却要后退。打桌球时, 白弹击中红弹, 两弹会向不同方向滚去。两个穿溜冰鞋的人, 原来处于静止状态。无论谁推谁, 两人都会向相反的方向运动。这些事实说明两个物体在相互作用时, 它们的动量都会发生变化。动量定理只能说明一个物体受到冲量时, 动量发生的变化。那么, 两个物体相互作用时, 它们的动量变化又有什么规律呢?

图 5-5

在水平放置的气垫导轨上, 有质量  $m_1$  和  $m_2$  的两个滑块 A、B。它们分别以  $v_1$  和  $v_2$  的速度向相同方向运动, 且  $v_1 > v_2$  [图 5-5(a)]。在滑块 A 追上滑块 B 时, 它们发生了相互作用[图 5-5(b)]。相互作用的结果, 使两滑块的速度都发生了变化。在图 5-5(c) 中, A、B 分别以  $v_1'$  和  $v_2'$  的速度沿原方向运动。设相互作用过程中, B 对 A 的作用力是  $F_1$ , A 对 B 的作用力是  $F_2$ , 它们相互作用时间是  $t$ 。滑块受到的重力和支持力互相平衡; 摩擦阻力很小, 可以忽略。那么

滑块 A: 受到的冲量为  $F_1 t$ , 动量的变化为  $m_1 v_1' - m_1 v_1$ 。

滑块 B: 受到的冲量为  $F_2 t$ , 动量的变化为  $m_2 v_2' - m_2 v_2$ 。

根据动量定理, 可分别列出

$$F_1 t = m_1 v_1' - m_1 v_1,$$

$$F_2 t = m_2 v_2' - m_2 v_2$$

由牛顿第三定律可知,  $F_1 = -F_2$ , 即  $F_1 t = -F_2 t$ , 则

$$m_1 v_1' - m_1 v_1 = -(m_2 v_2' - m_2 v_2)。$$

上式表明, 两滑块在相互作用后, 动量的变化大小相等、方向相反, 即滑块 A 减少的动量等于滑块 B 增加的动量。这就是说, 两个物体在相互作用时, 一个物体把一定量的动量传递给了另一个物体。所以物体相互作用的过程, 就是动量传递的过程, 也就是机械运动传递的过程。

把上面的关系式整理后, 可写成

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'。$$

上式等号左边是两滑块相互作用前的总动量, 右边是两滑块相互作



用后的总动量。所以，相互作用的物体如果不受外力作用，或它们所受外力的合力为零，它们的总动量保持不变，这个结论叫做动量守恒定律。

可见，物体在传递动量的过程中，总动量是不变的。这就是说，用动量作为运动量的量度的话，运动总量是不变的。

动量守恒定律是自然界最重要、最普遍的规律之一。我们已经知道，牛顿定律只适用于宏观物体的低速运动。而动量守恒定律不但适用于宏观物体的低速运动，还能解决牛顿定律所不能解决的微观粒子在高速运动时的相互作用问题。在合外力为零的条件下，物体在发生相互作用时，不论相互作用后的物体是粘合在一起还是分裂成碎块，不论相互作用前后物体运动的方向如何，也不论相互作用的物体接触与否，动量守恒定律都是适用的。此外，这个定律并不限于两个物体的相互作用，不管有多少个物体相互作用时，只要这个整体受到的合外力为零，那么这个整体的动量总是守恒的。在自然界任何物体间的相互作用中，只要它们所受的合外力为零，动量总是守恒的。对整个宇宙来说，是不存在“宇宙之外”的外力，这就是我们至今没有发现宇宙的运动在减少的原因。

#### 思考

1. 以下是几位同学在讨论动量守恒定律时的几种说法，你认为谁的说法是正确的？

甲同学说：“既然两个物体的总动量保持不变，这就意味着每一个物体的动量也是不变的。”

乙同学说：“课本上只是说两个相互作用的物体的总动量保持不变，并没有说每一个物体的动量变不变。因此，每一个物体的动量有可能改变，也有可能不改变。”

丙同学说：“对于两个相互作用物体中的每一个物体来说，由于它受到另一个物体的作用，它的动量必然要改变，而且一个物体动量的增加必等于另一个物体动量的减少，即两个物体的总动量是不变的。”

2. 如果在光滑水平面上有一辆静止的小车 A，把另一辆小车 B 推着跟 A 相撞。对于这两辆小车，它们作用前后的总动量守恒吗？

S：动量守恒定律的适用条件是不受外力或所受合外力为零，但两个物体既然有相互作用，那不是每个物体都受到外力了吗？这不是有矛盾了吗？

T：这里所说的外力是指除了两物体间相互作用以外的力。也就是说，把这两个相互作用的物体作为一个整体，其他物体对这个整体的作用才是外力。其实，对其中每一个物体来说，如果不受力的话，那它的动量就不会变化，这就不是物体间发生相互作用时动量守恒的问题了。

#### [ 例题 1 ]

在光滑水平面上以 2 米 / 秒的速度前进的质量是 40 千克的轻便运货小车边缘，站着一个人质量是 60 千克。当人按以下几种情况从小车上跳下时，求每种情况人跳下后小车的速度，并说明人和车的相互作用情况。（1）跳车人落地前相对于地面在水平方向上保持原来的速度；（2）跳车人相对于地面没有水平方向的速度，就落在跳车的地方；（3）跳车人落地前相对于地面在水平方向上向前的速度是 4 米 / 秒。

解：人跳车时，人和车相互作用，人和车作为一个整体，所受合外

力为零，可以用动量守恒定律来解。设人的质量为  $m_1$ ，作用前后的速度为  $v_1$  和  $v_1'$ ；车的质量为  $m_2$ ，作用前后的速度为  $v_2$  和  $v_2'$ ，并以向前的方向为正。

(1) 根据  $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$ ，已知  $v_1' = v_1$ ，则  $v_2' = v_2$ ，即车仍保持原速度前进。

在这种情况下，人和车在运动方向上并没有发生相互作用。实际上，人好像是自己落下来一样。

(2) 已知  $m_1 = 60$  千克， $m_2 = 40$  千克， $v_1 = v_2 = 2$  米/秒， $v_1' = 0$ 。由动量守恒定律  $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$ ，则

作用后车的速度

$$v_2' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 - m_1 v_1'}{m_2} = \frac{60 \times 2 + 40 \times 2 - 0}{40} \text{ 米/秒} \\ = 5 \text{ 米/秒。}$$

在这种情况下，人速度减小，即动量减小。所以人必须向前蹬车，使车对人有一向后的冲量。

(3) 已知  $m_1 = 60$  千克， $m_2 = 40$  千克， $v_1 = v_2 = 2$  米/秒， $v_1' = 4$  米/秒，由动量守恒定律  $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$ ，则作用后车的速度

$$v_2' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 - m_1 v_1'}{m_2} = \frac{60 \times 2 + 40 \times 2 - 60 \times 4}{40} \text{ 米/秒} = -1 \text{ 米/秒。}$$

负值表示车向后运动。

在这种情况下，人速度增大，动量增大，所以人必须向后蹬车，使车对人有一向前的冲量。

[例题 2]

在水平放置的气垫导轨上，有两滑块相向运动，滑块 A 的质量为 0.4 千克，速率为 0.3 米/秒，滑块 B 的质量为 0.6 千克，速率为 0.1 米/秒。两滑块相碰后，滑块 A 以 0.18 米/秒的速率反弹回来，求滑块 B 的速度。

解：A、B 两滑块相互作用时，合外力为零，可用动量守恒定律。以滑块 A 原来的速度方向为正。

已知  $M_A = 0.4$  千克， $v_A = 0.3$  米/秒， $v_A' = -0.18$  米/秒， $m_B = 0.6$  千克， $v_B = -0.1$  米/秒。由动量守恒定律

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v_A' + m_B v_B', \\ \text{相碰后滑块 B 的速度} \\ v_B' = \frac{m_A v_A + m_B v_B - m_A v_A'}{m_B} \\ = \frac{0.4 \times 0.3 + 0.6 \times (-0.1) - 0.4 \times (-0.18)}{0.6} \text{ 米/秒}$$

=0.22 米 / 秒。

正值表示滑块 B 相碰后沿滑块 A 原来的速度方向运动，即滑块 B 也反弹回来。

### 练习十八

1. 在一块质量较小的玻璃板下面垫几根玻璃试管，使一辆玩具汽车在玻璃板上开动起来，如图 5 - 6 所示，你将会看到什么现象？怎样解释这一现象？

图 5-6

2. 一只小船跟岸垂直静止在河中，船头离岸 5 米。船上有一人，他从船尾助跑到船头，然后向岸上跳去。如果他平时在助跑下能跳 5 米远，那么在这种情况下他能跳到岸上吗？为什么？

3. 光滑的水平面上，停着一辆平板车，有两个人分别站在车头和车尾，如果两人同时在车上相向而行，在什么情况下车能保持静止？在什么情况下车要运动？运动的方向由什么决定？

4. 在合外力为零的情况下，A、B 两物体在一直线上相互作用。相互作用后 A 物体动量增加了 5 千克·米 / 秒，那么 B 物体的动量如何变比？两物体相互作用的冲量多大？

5. 质量为 60 千克的人以 8 米 / 秒的速度跑步赶上一辆质量为 40 千克，速度为 3 米 / 秒的小车，跳到车上，并跟小车保持相对静止，问车将以多大速度运动？如果人是以 8 米 / 秒的速度迎面跳上这辆车的，那么车将以多大速度运动？

6. 在水平桌面上有 A、B 两辆小车，质量各为 0.3 千克和 0.2 千克。这两辆小车分别靠在一根被压缩的弹簧的两端。放松弹簧，两辆小车在弹力作用下分开，A 车以 0.6 米 / 秒的速度向左运动，求 B 车的速度。

7. 水平放置的气垫导轨上有 A、B 两滑块相向运动，A 滑块的速率是 4 米 / 秒，滑块 B 的速率是 1 米 / 秒。两滑块相互作用后均以原速率向相反方向运动，求 A、B 两滑块的质量之比。

8. 质量为 0.01 千克，速度为 300 米 / 秒的子弹，水平射入质量为 2 千克，静止在光滑水平面的木块中。如果子弹留在木块里没有射穿，求木块获得的动量和动能。如果子弹从木块中穿出后的速度为 100 米 / 秒，求木块获得的动量和动能。

### 四、碰撞

有一种叫“碰碰球”的儿童玩具，如图 5-7 所示。它由可绕同一轴转动的两个质量相同的彩色小球组成。当甩动手柄两球相碰时，可以看到一个球静止，另一个球绕轴转动一周后第二次又跟静止小球相碰，碰撞后原来运动的小球变成静止，原来静止的小球变成运动。以后两球的运动状态轮番变换。类似上述的碰撞是一种常见的现象。物理学里研究的碰撞要比生活中的碰撞范围广泛得多，不但包括一般物体之间的碰撞，还包括分子间、原子间以及质子、中子等微观粒子间的碰撞，这些

微观粒子发生碰撞时还不需要直接接触。

图 5-7

碰撞现象的特点是物体间的相互作用时间很短，相互作用的力很大，并且是变力。一般说来，碰撞时即使受到其他外力作用，但在这种情况下外力的作用总远小于物体间的相互作用，因而是可以忽略的，这就符合动量守恒定律的适用条件。所以，碰撞问题可以用动量守恒定律来处理。

为了使研究的问题简化，这里只讨论碰撞前后物体都在一条直线上运动的情况。

### 碰撞实验

1666年，在英国皇家学会的例会上，物理学家胡克表演了碰撞球的实验，引起了与会者的很大的兴趣。如图 5-8，把两个质量相同的象牙球分别挂在细绳上，两球在静止时正好靠在一起。先使 A 球偏离一角度后放开[图 5-8(a)]，它回到原来位置时跟 B 球相撞[图 5-8(b)]，碰撞后 A 球静止 B 球摆到跟 A 球原来高度几乎相等的位置[图 5-8(c)]。当 B 球回到原来位置时，又跟 A 球相碰[图 5-8(d)]。碰撞后，B 球静止，A 球又摆到几乎是原来的高度上[图 5-8(e)]。这个过程不断继续。对这一现象许多学者提出了不同的甚至是混乱的解释。一直到 1668 年，才有三位学者作出了正确的说明，其中分析比较完整的是荷兰物理学家惠更斯。他认为在这种碰撞中，除了动量守恒以外，还有一个物理量守恒，他指出这个物理量 ( $mv^2$ )，就是当时所说的“活力”，后来人们把“活力”改叫动能，并把它定义式改为  $\frac{1}{2}mv^2$ 。

图 5-8

进一步的研究指出，并非所有的碰撞中动能都守恒，我们把这种动量和动能同时守恒的碰撞叫做完全弹性碰撞。如果碰撞中动能不守恒，其中有一部分动能转化成其他形式的能，这种碰撞叫做非完全弹性碰撞。在非完全弹性碰撞中，如果物体相碰后粘合在一起，这时动能损失最大，这种碰撞叫做完全非弹性碰撞。

#### [例题 1]

A 球在光滑水平面上以 4 米 / 秒的速度赶上以 1 米 / 秒的速度同方向运动的 B 球。两球发生碰撞后，A 球以 0.5 米 / 秒的速率反弹回来，B 球以 2.5 米 / 秒的速率沿原方向运动，求 A、B 两球质量之比。

解：设 A 球的质量为  $m_A$ ，碰撞前后的速度分别为  $v_A$  和  $v'_A$ ；B 球的质量为  $m_B$ ，碰撞前后的速度分别为  $v_B$  和  $v'_B$ 。以  $v_A$  的速度方向为正，由动量守恒定律，可得

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B。$$

$$m_B (v_B - v'_B) = m_A (v'_A - v_A)，$$

A、B 两球质量之比

$$\frac{m_A}{m_B} = \frac{v_B - v_B'}{v_A - v_A'} = \frac{1 - 25}{-0.5 - 4} = \frac{1}{3}。$$

上例实际上是一种测量或比较质量的方法。如果碰撞的是两个微观粒子，测出它们碰撞前后的速度，就可以求出它们的质量比，如果其中一个粒子的质量是已知的，就可以求出另一个粒子的质量。中子的发现也用到了这种方法（见本章阅读材料）。

[例题 2]

甲、乙两个小孩各乘一辆冰车在水平冰面上游戏。甲和他的冰车的质量  $M$  为 30 千克，乙和他的冰车的质量也是 30 千克。甲推着一个质量  $m$  为 15 千克的箱子和他一起以  $v_0$  为 2 米 / 秒的速度滑行，乙以同样的速率迎面滑来。为了避免相撞，甲突然将箱子沿冰面推给乙，箱子滑到乙处时，乙迅速把它接住后一起滑行。若不计冰面的摩擦，求甲至少要以多大速度（相对于地面）将箱子推出，才能避免与乙相撞。

解：由题意可知，甲、乙要想避免相撞，乙接住箱子后的速度  $v_2$  必须至少等于甲推出箱子后的速度  $v_1$ ，即  $v_1 = v_2$ 。设甲推出箱子的最小速度为  $v$ ，整个过程有两对相互作用的物体：甲推出箱子时甲和箱子相互作用；乙接住箱子时乙和箱子相互作用。由动量守恒定律可分别列出

甲和箱子相互作用时

$$(M+m)v_0 = Mv_1 + mv \quad (1)$$

乙和箱子相互作用时

$$mv - Mv_0 = (M+m)v_2 \quad (2)$$

又因  $v_1 = v_2$ ，由 (1)、(2) 式可得

$$\frac{(M+m)v_0 - mv}{M} = \frac{mv - Mv_0}{M+m}。$$

甲推出箱子的最小速度

$$\begin{aligned} v &= \frac{m^2 + 2mM + 2M^2}{m(m+2M)} v_0 \\ &= \frac{15^2 + 2 \times 15 \times 30 + 2 \times 30^2}{15(15 + 2 \times 30)} \times 2 \text{ 米 / 秒} = 5.2 \text{ 米 / 秒}。 \end{aligned}$$

### 练习十九

1. 质子 ( ${}^1_1\text{H}$ ) 以  $1.0 \times 10^7$  米 / 秒的速度撞入一个静止的铝核 ( ${}^{27}_{13}\text{Al}$ ) 中变成硅核 ( ${}^{28}_{14}\text{Si}$ )，求硅核的速度。

2. 一个中子以  $2.0 \times 10^7$  米 / 秒的速度撞到一个静止的原子核上，中子以  $1.7 \times 10^6$  米 / 秒的速率被反弹回来，那个原子核以  $3.1 \times 10^6$  米 / 秒的速度向前运动，你能判断那是什么元素的原子核吗？

3. A、B 两球的质量分别是  $M_A = 1$  千克， $M_B = 3$  千克。试求：(1) 若 A 球以 2 米 / 秒的速度跟静止的 B 球碰撞后 B 球以 1 米 / 秒的速度向前运动，则 A 球碰撞后的速度；(2) 若 B 球以 2 米 / 秒的速度跟静止的 A 球碰撞后，B 球以 1 米 / 秒的速度向前运动，则 A 球的速度；(3) 若 A、B 两球都以 2 米 / 秒的速率在一条直线上相向运动，碰撞后 B 球静止，则 A

球碰撞后的速度。

4. 一个质量为  $m_0$  的人站在质量为  $m_1$  的船上，随船一起以速度  $v$  向另一艘质量为  $m_2$  的静止小船靠近。为了避免相撞，该人就在两船间反复来回跳动，直到两船速度相等为止。不计船运动中水的阻力，这一速度为多大？

5. 如图 5-9 所示，悬在绳端的 A 球自高为  $h$  处释放，当它运动到最低位置时，恰与另一个悬在绳端的静止的 B 球发生碰撞。碰撞后，A 球反弹回来上升到  $h_1$  高处，B 球上升到  $h_2$  高处。求两球质量之比。

图 5-9

图 5-10

6. 如图 5-10 所示，在光滑地面上—质量为  $2m$  的铁块 A 与另一质量为  $m$  的铁块 B 紧靠在一起，而铁块间有少量炸药，开始时两铁块都处于静止状态，炸药引爆后两铁块分离。铁块 B 跟墙壁相碰后又以原速率弹回，与 A 再次碰撞后结合在一起以共同速度  $v$  运动，求 A、B 开始分离时的速率各为多大。

7. 一个质量为 0.2 千克的小球静止在高度为 5 米的直杆顶端（图 5-11）。一团质量为 0.05 千克的油灰以 10 米 / 秒的水平速度击中小球。它们粘合在一起后落地。求落地处的水 5. 动量定理动量守恒定律平距离和速度。（ $g$  取 10 米 / 秒<sup>2</sup>）

图 5-11

图 5-12

8. 如图 5-12 所示，用细线悬挂一个质量为 2.95 千克的砂袋，并使砂袋静止。一颗质量是 0.5 千克的子弹水平射入砂袋，并陷入砂中，砂袋可上升至 0.8 米高。求子弹射入砂袋前的速度。（ $g$  取 10 米 / 秒<sup>2</sup>）

## 五、反冲运动

发射炮弹时炮身要后退，步枪射出子弹时枪体也要后退。炮身和枪体的这种运动叫做反冲运动，反冲运动可运用动量守恒定律来研究。

图 5-13

消防队员灭火时，常常需要几个人同时握住水笼带，才能把握喷水方向。这是因为水从管口向前喷出时，动量很大，根据动量守恒，水笼带会向后退。水流的反冲运动有许多应用，例如绿化地带的自动喷水装置（图 5-13），水从两个相反方向的管口喷出时，水流的反冲作用就使管旋转起来，起到均匀喷洒的作用。大型水力发电站用的反击式水轮机（本书彩图 3）也是利用水流的反冲作用而旋转的。

火箭、喷气发动机都是利用燃料燃烧生成的气体以很大速度向后喷出而使火箭、飞机向前飞行的。本章导图 3 是一帧宇航员在太空中行走

的照片，想想看，他是怎样行走的？

我国早在宋代就发明了火箭(图 5 - 14)，它的构造跟“起花”相似。在竹筒里装入火药，把竹筒的前端封闭住，并捆在箭杆上。火药点燃后，燃烧生成的气体以很大速度从筒内向后喷出，由于反冲作用，箭体向前飞去。约在公元 1000 年，我国古代曾作为兵器使用过这种火箭，到了明代，我国还制成了原始的二级火箭，如图 5 - 15 所示，在龙体内的二级火箭是在火箭已经飞到空中以后才点燃的。

图 5-14

图 5-15

现代火箭主要作为运载工具用来发射科学探测仪器、弹头、人造卫星或宇宙飞船。不同用途的火箭内部结构、大小和使用的燃料都不同。小的如反坦克导弹的火箭，质量仅十余千克，长仅 1 米左右，可扛在人肩上发射。大的如发射飞往月球的宇宙飞船用的三级火箭，质量达 3000 吨，长度超过 100 米。

#### 思考

1. 一艘载有砖头的小船，在桨、橹、竹竿都没有的情况下，能不能驶向岸边？

2. 长形气球充气后，用细绳将它穿在铁丝上如图 5 - 16 所示。松开充气口，气球将会发生什么现象？

图 5-16

#### [例题]

一个连同装备质量为 100 千克的宇航员，脱离航天飞机后在离机 45 米处与飞机处于相对静止状态。他带有贮氧筒，贮氧筒有个可以使氧气以 50 米 / 秒的速度喷出的喷嘴。他必须向与返回飞机相反的方向释放氧气才能回到飞机上。如果他在开始返回的瞬间释放 0.1 千克的氧气，求他返回飞机所需的时间。

解：宇航员向着与返回飞机相反的方向释放氧气后，他将获得向着飞机运动方向的速度，取飞机为参照物，向着飞机运动的方向为正，已知释放氧气的质量  $m=0.1$  千克，氧气的速度  $v=-50$  米 / 秒，宇航员连同装备的质量  $M=100$  千克。设宇航员获得的速度为  $V$ ，由动量守恒定律可得

$$(M-m)V+mv=0。$$

$$V = -\frac{mv}{M-m} = \frac{0.1 \times 50}{100 - 0.1} \text{ 米 / 秒} = 0.05 \text{ 米 / 秒}。$$

宇航员离飞机的距离  $d=45$  米，则他返回飞机所需的时间

$$t = \frac{d}{V} = \frac{45}{0.05} \text{ 秒} = 900 \text{ 秒}。$$

#### 练习二十

1. 一门大炮，炮身的质量是 1000 千克，水平发射一枚质量是 2.5 千克的炮弹，如果炮弹飞出时的速度是 600 米 / 秒，求炮身后退的速度。

2. 原来静止的铀核 ( ${}_{92}^{238}\text{U}$ ) 放出  $\alpha$  粒子后衰变成钍核 ( ${}_{90}^{234}\text{Th}$ ) , 如果放出的  $\alpha$  粒子的速度是  $v$  , 求钍核的速度。

3. 一颗手榴弹以 10 米 / 秒的速度水平飞行时炸裂成两块, 其中质量为 0.4 千克的一块沿原方向以 250 米 / 秒的速度飞行, 求质量为 0.1 千克的另一块的速度。

4. 一个质量是 60 千克的人在质量是 100 千克的小船船头上以 3 米 / 秒的水平速度跳入水中, 求小船的速度。如果小船后退所受的阻力为船重的 0.02 倍, 问船能后退多远。(  $g$  取 10 米 / 秒<sup>2</sup> )

### 阅读材料

#### 完全弹性碰撞 中子的发现

动量和动能都守恒的碰撞叫做完全弹性碰撞。完全弹性碰撞有什么规律呢? 对于在同一平面一直线上作对心碰撞的物体来说, 设它们的质量分别是  $m_1$  和  $m_2$  , 碰撞前后的速度依次是  $v_1$ 、 $v_2$  和  $v_1'$ 、 $v_2'$ 。则由动量守恒定律和动能守恒可以列出以下方程

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad (2)$$

解得

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

$$v_2' = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2} \quad (4)$$

利用 (3) 式和 (4) 式, 可讨论以下两种特殊情况:

1. 如果两物体质量相等, 即  $m_1 = m_2$  , 则可得

$$v_1' = v_2; v_2' = v_1。$$

这就是说两物体碰撞后交换了速度。前面讲过的儿童玩具“碰碰球”(图 5-7) 和碰撞球实验(图 5-8) 就是因为两球的质量相等, 它们发生完全弹性碰撞时交换了速度。

2. 如果一个物体是静止的, 例如质量为  $m_2$  的物体在碰撞前是静止的, 即  $v_2 = 0$  , 则可得

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2},$$

$$v_2' = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2}。$$

这里又可有以下几种情况:

(1) 当  $m_1 > m_2$  时,  $v_1' > 0$  ,  $v_2' > 0$  , 表示碰撞后两物体都向前运动。

(2) 当  $m_1 < m_2$  时,  $v_1' < 0$  ,  $v_2' > 0$  , 表示质量较小的物体反弹回来, 质量较大的物体向前运动。

(3) 当  $m_1 = m_2$  时,  $v_1' = 0$  ,  $v_2' = v_1$  , 表示两物体交换速度。



(4) 当  $m_1 \ll m_2$  时,  $v_1' \approx -v_1$ ,  $v_2' \approx 0$ , 表示质量很小的物体几乎以原速率反弹回来, 而质量很大的物体几乎不动。例如橡皮球与墙壁的碰撞。

(5) 当  $m_1 \gg m_2$  时,  $v_1' \approx v_1$ ,  $v_2' \approx 2v_1$ , 表示质量很大的物体速度几乎不变, 而质量很小的物体获得的速度是原来运动物体速度的 2 倍, 这是原来静止的物体通过碰撞可以获得的最大速度, 例如铅球碰乒乓球。

1932 年, 英国科学家查得威克 (1891—1974 年) 运用完全弹性碰撞的理论处理实验数据而发现了中子。

1930 年, 人们发现由放射性元素钋 (Po) 放出的  $\alpha$  粒子在轰击被 (Be) 原子核时会产生一种贯穿本领很大的射线, 但它几乎不能使气体电离, 并且在电场和磁场中也不发生偏转。这种未知粒子, 由于不带电, 不能观察到它的运动径迹, 但是被它轰击出来的原子核却能在其运动路径上产生大量离子, 因而可用云室等方法观察到。查得威克运用完全弹性碰撞的理论, 通过比较由实验测出的未知粒子轰击出来的两种不同原子核的速度之比, 算出了未知粒子的质量。假设未知粒子的质量为  $m$ , 以速度  $v$  轰击原来静止的氢核, 可根据完全弹性碰撞的公式列出氢核碰撞后的速度

$$v_H' = \frac{2mv}{m + m_H},$$

式中  $m_H$  是氢核 (质子) 的质量。

同理, 当未知粒子以同样速度  $v$  轰击原来静止的氮核时 (质量为  $m_N$ ), 可以列出氮核碰撞后的速度

$$v_N' = \frac{2mv}{m + m_N}。$$

将上述两式相除, 得

$$\frac{v_H'}{v_N'} = \frac{m + m_N}{m + m_H}。$$

查得威克当时由实验测得的  $\frac{v_H'}{v_N'}$  约等于 7.5, 而  $m_H = 1u$ ,  $m_N = 14u$ ,

代入上式得  $m=1u$ 。这就确定了这个不带电的未知粒子的质量与氢核 (质子) 的质量近似相等, 并把它叫做中子。

## 本章学习要求

1. 理解冲量。
2. 理解动量。
3. 理解动量定理。
4. 理解动量守恒定律。
5. 理解碰撞。
6. 理解反冲运动。
7. 学会用冲击摆测定弹丸的速度。

## 复习题

### 1. 选择题 (以下各小题中只有一个正确答案)

(1) 实验用的滴水小车每隔相等时间滴下一滴水, 小车在光滑桌面上运动的过程中, [ ]

- (A) 速度不变, 动量也不变。
- (B) 速度不变, 动量改变。
- (C) 速度改变, 动量不变。
- (D) 速度改变, 动量也改变。

(2) 质量为  $m$  的子弹以速度  $v$  射入固定的木块甲并停留在内; 子弹以相同速度能射穿固定的木块乙后继续前进。在这两种情况下, 子弹对木块甲的冲量  $I_1$  和对木块乙的冲量  $I_2$  相比较是 [ ]

- (A)  $I_1 = I_2$ 。
- (B)  $I_1 > I_2$ 。
- (C)  $I_1 < I_2$ 。
- (D) 无法确定。

(3) 如果一个物体所受到的冲量不为零, 那么下列说法中正确的是 [ ]

- (A) 物体的动量可能不变, 动能也可能不变。
- (B) 物体的动量一定改变, 动能可能不变。
- (C) 物体的动量可能不变, 动能一定改变。
- (D) 物体的动量一定改变, 动能也一定改变。

(4) 质量  $m_1$ 、 $m_2$  的两个静止物体, 分别受到相同的冲量后, 它们的动能之比是 [ ]

- (A)  $1 : 1$ 。
- (B)  $m_1 : m_2$ 。
- (C)  $m_2 : m_1$ 。
- (D)  $m_2^2 : m_1^2$ 。

(5) 两球相向运动, 发生碰撞后都停止, 则它们在碰撞前一定是 [ ]

- (A) 质量相等。
- (B) 速率相等。
- (C) 动量大小相等。
- (D) 动能大小相等。

(6) 如图 5-17 所示, 斜面上有甲、乙两个物体正在匀速下滑, 已知  $m_{甲} > m_{乙}$ ,  $v_{甲} > v_{乙}$ , 它们在斜面上发生碰撞后 [ ]

- (A) 甲和乙的总动量守恒, 机械能也守恒。
- (B) 甲和乙的总动量守恒, 机械能不守恒。
- (C) 甲和乙的总动量不守恒, 机械能守恒。
- (D) 甲和乙的总动量不守恒, 机械能也不守恒。

### 2. 选择题 (以下各小题中有两个或两个以上正确答案)

(1) 关于动量, 以下说法中正确的是 [ ]

- (A) 速度很大的物体它的动量也一定很大。
- (B) 两个物体的质量相同, 速率也相同, 它们的动量一定相同。
- (C) 两个物体的速率相同, 那么质量大的物体动量一定大。
- (D) 两个物体的质量相同, 那么速度小的物体动量一定小。

(2) 质量不同的两个物体在摩擦系数相同的水平面上滑行, 起始时它们有相同的动量, 最后都静止, 在这过程中, 两物体 [ ]

- (A) 克服阻力做的功不相同，所受阻力的冲量相同。
- (B) 加速度相同。
- (C) 滑行的时间相同。
- (D) 滑行的位移相同。

3. 质量为  $m$  的质点，以角速度  $\omega$  沿半径  $R$  做匀速圆周运动，在经过  $1/2$  周期过程中，它所受合外力的冲量多大？

4. 如图 5 - 18 所示，有一台水平放置的皮带传送机，皮带以 2 米 / 秒速度前进，煤斗中煤以每秒 50 千克的速率落到皮带上，并随带前进。要使传送带保持匀速前进，皮带传送机应增加的推力是多大？

图 5-18

图 5-19

5. 如图 5 - 19 所示，一个下面装有轮子的氧气瓶，它的尾部顶在墙壁上。设氧气密度为  $\rho$ ，瓶口的截面积为  $S$ ，当打开阀门射出速率为  $v$  的氧气时，瓶对墙壁的作用力是多大？

6. 有一宇宙飞船以  $10^4$  米 / 秒的速度进入分布均匀的宇宙尘埃区，每秒钟有  $10^4$  个尘埃粘附到飞船身上，每个尘埃的平均质量为  $10^{-6}$  千克，为了维持原速前进，飞船的推力应为多大？

7. 质量为 4 千克的球，在空气中从静止开始下落时受到的阻力为 5 牛，下落 2 秒后进入水中，受到水向上的作用力为 20 牛，又经 3 秒到达河底。求球到达河底时的速度。

8. 溜冰场上 A、B 两人沿同一直线迎面滑来，A 的质量是 40 千克，速率是 3 米 / 秒；B 的质量是 60 千克，速率是 2 米 / 秒，求两人相撞在一起时的滑行速度。

9. A、B 两船在直线上沿相同方向前进，A 在前，B 在后，它们的速度分别是 2 米 / 秒和 3 米 / 秒，它们的总质量都是 150 千克。为了不让 B 船赶上 A 船，站在 A 船船尾上的人沿水平方向把一质量为 10 千克的物体抛向 B 船并被 B 船上的人接住。求物体抛出时对地的最小速度（水的阻力不计）。

10. 一玩具枪的质量为  $M$ ，发射出的子弹质量为  $m$ 。那么，当采用下面两种方式发射时，子弹获得的动能之比  $E_{k1} : E_{k2}$  为多大？（1）将枪放在光滑水平面上发射；（2）将枪紧紧抵在硬质墙壁上水平发射。

11. 如图 5 - 20 所示，在高为 1.8 米的光滑水平面上放一质量为 0.4 千克的小球 A，在它上方悬挂一质量为 0.2 千克的摆球 B。当 B 球离平台高 0.45 米处时把球释放，到达最低点时恰与 A 球发生碰撞。碰撞后 B 球反弹回到  $h_1=0.2$  米处。求 A 球落地处离平台的水平距离和落地时的速度。（ $g$  取 10 米 / 秒<sup>2</sup>）

图 5-20

图 5-21

12. 如图 5 - 21 所示，一块光滑的均匀木板在它的中点有一个固定

转动轴。在板的左端有一质量为  $m_B$  的静止小球 B，另有一质量为  $m_A$  的球 A 对准球 B 撞来。两球碰撞后均向右运动，且 B 球的速度是 A 球的 4 倍。碰撞前 A 球的速度是 A、B 两球碰撞后速度大小之和的 0.6 倍。试通过计算判断 B 球到达板右端时，板是否会翻倒。

## 理想气体状态方程

### 1. 热气球

### 2. 高压气锤

### 3. 汽轮机组

在生活和生产中，人们常利用气体的热学性质为人类服务，如利用空气热膨胀制成的热气球（本章导图 1）能载人在高空遨游；利用高压气体做功的高压气锤和汽轮机（本章导图 2 和 3）来提供动力。在必修课中，我们已经学习过有关描述气体热学性质的三个实验定律——查理定律、玻意耳定律和盖·吕萨克定律，这三个实验定律都是以真实气体为对象，采用控制变量的方法使一定质量气体的温度、体积和压强这三个状态量中的一个量保持不变，研究其他两个量的变化规律而得出的结论。

## 一、气体实验定律

### 查理定律

研究一定质量的气体在等体积变化过程中的压强跟温度的关系得出的结论，叫做查理定律。它的内容是：一定质量的气体在体积不变时，温度升高（或降低） $1^\circ\text{C}$ ，压强的增加量（或减少量）等于它在  $0^\circ\text{C}$  时压强的  $1/273$ 。

若引入热力学温度，查理定律可表述为：一定质量的气体在体积不变时，它的压强跟热力学温度成正比。

查理定律可用如下公式表示：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}。$$

描述一定质量气体经历的等体积过程，在  $p$ - $T$  图象中是一条通过坐标轴原点的倾斜直线（图 6-1），表示气体的压强随热力学温度的升高成正比增大。

图 6-1

图 6-2

在  $p$ - $V$  图象中描述的一定质量气体的等体积过程，是一条平行于  $p$  轴的直线（图 6-2），叫做等容线。

### 盖·吕萨克定律

研究一定质量的气体在等压变化过程中的体积跟温度的关系得出的结论，叫做盖·吕萨克定律。它的内容是：一定质量的气体在压强不变时，温度升高（或降低） $1^\circ\text{C}$ ，体积的增加量（或减少量）等于它在  $0^\circ\text{C}$  时体积的  $1/273$ 。

若引入热力学温度，盖·吕萨克定律可表述为：一定质量的气体在压强不变时，它的体积跟热力学温度成正比。

盖·吕萨克定律可用如下公式表示：

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}。$$

描述一定质量气体经历的等压过程，在  $V - T$  图象中是一条通过坐标轴原点的倾斜直线（图 6 - 3），表示气体的体积随热力学温度的升高成正比增大。

图 6-3

图 6-4

在  $p - V$  图象中描述的一定质量气体的等压过程，是一条平行于  $V$  轴的直线（图 6 - 4），叫做等压线。

### 玻意耳定律

研究一定质量的气体在等温变化过程中的压强跟体积的关系得出的结论，叫做玻意耳定律。它的内容是：一定质量的气体在温度不变时，它的压强跟体积成反比。

玻意耳定律可用如下公式表示：

$$pV = C \text{ (常数) ,}$$

或

$$p_1 V_1 = p_2 V_2。$$

在  $P - V$  图象中，玻意耳定律描述的气体压强 - 体积的关系是一条等轴双曲线，叫做等温线（图 6 - 5），表示在等温过程中，一定质量气体的压强跟体积成反比。

图 6-5

从  $p - V$  图象可以看出，气体在状态 1 时的压强和体积的乘积  $p_1 V_1$ （图线下一块矩形面积）跟气体在状态 2 时的压强和体积的乘积  $p_2 V_2$  是相等的。

## 练习二十一

### 1. 选择题（以下各题中只有一个正确答案）

（1）一级方程式赛车在高速行驶时，轮胎常易爆裂而酿成事故，这是由于 [ ]

- （A）赛车引擎排出的废气温度过高。
- （B）轮胎与地面剧烈摩擦引起温度升高，使轮胎内气体压强增大。
- （C）速度增大时引起轮胎变形。
- （D）轮胎经震动体积变小，使轮胎内气体压强增大。

（2）如图 6 - 6 所示的  $p - V$  图中，A、B、C 三点表示一定质量理想气体的三个状态。设三个状态的温度分别为  $T_A$ 、 $T_B$ 、 $T_C$ ，则 [ ]

- （A） $T_A = T_B = T_C。$
- （B） $T_A > T_B > T_C。$
- （C） $T_A = T_B > T_C。$
- （D） $T_A < T_B = T_C。$

图 6-6

图 6-7

(3) 如图 6-7 所示, 一端封闭的玻璃管内用一段水银柱封闭了一定质量的空气, 当把玻璃管开口向上静止地竖直放置时[图 6-7(a)], 设管内空气柱长度为  $l_a$ 。使玻璃管沿光滑斜面下滑时[图 6-7(b)], 管内空气柱长度为  $l_b$ , 则  $l_a$ 、 $l_b$  的大小有如下关系: [ ]

- (A)  $l_a = l_b$ 。                      (B)  $l_a > l_b > 0$ 。  
(C)  $l_a < l_b$ 。                      (D)  $l_a > l_b = 0$ 。

2. 在温度为 20 时, 轿车轮胎内气体的正常气压规定为  $2.3 \times 10^5$  帕。轿车在高速公路上长时间行驶时, 轮胎内气体温度上升到 80 时, 轮胎内的气体压强为多大?

3. 如图 6-8 所示, 平底烧瓶的瓶口用带有直角弯管的橡皮塞塞紧, 弯管的水平部分有一小段液体把瓶内的空气与外界隔开。已知 0 时烧瓶内的空气体积恰为 1 升, 弯管的内截面积为 0.1 厘米<sup>2</sup>。用手捂住瓶壁一会儿, 发现管内一小段液体向左移过 15 厘米距离, 瓶内空气温度升高几度?

图 6-8

图 6-9

4. 如图 6-9 所示, 粗细均匀的 U 形管, 右臂上端封闭, 左臂中有一活塞, U 形管内盛有密度为  $\rho$  的液体。开始时使活塞与封闭端位于同一高度, 这时两臂内的液面位于同一水平面, 液面上方各有一定质量的空气, 气柱长均为  $h$ 。今将活塞由图示位置向上移动  $2h$  距离, 这时两臂内液面高度差为  $h$ , 设整个过程中温度保持不变, 问活塞移动前, 左、右两臂液面上方空气的压强各为多大。

## 二、理想气体状态方程

### 理想气体

三个气体实验定律都是以真实气体为研究对象, 在温度不太低(相对于室温)和压强不太大(相对于大气压强)的情况下得出的。如果在温度很低、压强很大的情况下, 由于气体分子间的相互作用和分子本身体积的存在, 实验结果将会出现很大偏离。为了便于研究气体的热学性质, 可以设想一种气体模型, 这种气体在任何温度和压强下, 都将严格遵循气体实验定律, 这种气体叫做理想气体。

### 理想气体模型

为了便于研究真实气体的热学性质, 建立了理想气体模型, 并假定它有如下性质:

1. 分子之间除碰撞外, 不存在分子间的相互作用。
2. 分子只有质量而无体积, 理想气体可以无限压缩。
3. 永远不会液化。

这些假设使研究真实气体时能抓住气体的主要性质与特征，忽略在低温、高压下跟气体实验定律之间出现的偏离，从而使研究的问题得以简化。

### 理想气体状态方程

在实际情况下，当气体的一个状态量发生变化时，常会引起其他两个状态量同时发生改变，比如把打气筒的出气口堵住，迅速压下活塞时，筒内气体的体积减小，压强增大，同时温度也升高。怎样来研究一定质量的理想气体的三个状态量同时发生变化的情况呢？它们的变化是否也遵循一定的规律呢？

图 6-10

我们用上述打气筒的例子来进行研究。假定气筒内有一定质量的理想气体，开始时气体温度为  $T_1$ ，体积为  $V_1$ ，压强为  $p_1$ ，这是气体的初始平衡状态。当活塞下压到气体体积为  $V_2$  ( $V_2 < V_1$ ) 时，压强为  $p_2$  ( $p_2 > p_1$ )，温度为  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ )，这是气体的终末平衡状态。

气筒内一定质量的理想气体先后所处的这两个状态，可用图 6-10 所示的两条等温线上的点 1 和点 2 来表示。假定气体从状态 1 保持温度  $T_1$  不变，经历一个等温压缩过程变化到另一个平衡态 C，体积减小到  $V_C$  ( $V_C < V_2 < V_1$ )，压强增大到  $p_C = p_2$ ，由玻意耳定律可得

$$p_C = \frac{V_1}{V_C} = p_1 \quad (1)$$

接着，再保持压强不变，让气体经历一个等压膨胀过程，使体积增大到  $V_2$ ，由盖·吕萨克定律可得

$$V_2 = \frac{T_2}{T_1} V_C \quad (2)$$

将 (2) 式代入 (1) 式，且  $p_C = p_2$ ，整理后得

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}。$$

表明一定质量的理想气体的压强和体积的乘积，除以它的热力学温度得到的商，在状态变化过程中是保持不变的。即

$$\frac{pV}{T} = \text{常数}。$$

这个方程叫做理想气体状态方程。

上式中常数的值跟气体的质量和种类以及  $p$ 、 $V$ 、 $T$  三个量所用的单位有关。理想气体状态方程反映了一定质量理想气体的温度、体积和压强这三个状态量发生变化时所遵循的规律。对真实气体来说，在高温、低压的情况下同样是适用的。

### 思考

理想气体状态方程是否包含了三个气体实验定律？

### [例题]

如图 6-11 所示，水平放置的气缸 A 通过细管与容器 B 相连。开始



时细管上的阀门 S 是关闭的，容器 B 的容积为 2.4 升，并已抽成真空。气缸 A 内有一活塞，可以无摩擦地在气缸内滑动，气缸 A 置于温度为 27℃、压强为  $1 \times 10^5$  帕的大气中。已知活塞右侧部分气缸内贮有一定质量的理想气体，这部分气缸容积为 4.8 升，容器 B 置于温度为 127℃ 的恒温箱 C 内。气缸 A 和容器 B 的器壁都是热的良导体。打开阀门 S 后，气体将由 A 进入 B。当活塞达到平衡时，气缸 A 内的气体体积为多大？

图 6-11

解：阀门 S 未打开时，活塞是平衡的，气缸 A 内的气体压强和温度与周围大气相同，即压强  $p_1 = 1 \times 10^5$  帕，温度  $T_1 = (27 + 273)$  开 = 300 开。当阀门打开后，由于容器 B 内是真空，一部分气体将由 A 进入 B。当活塞重新平衡时，进入容器 B 中的气体压强  $p_2 = p_1 = 1 \times 10^5$  帕，体积  $V_2 = V_B = 2.4$  升，温度  $T_2 = (127 + 273)$  开 = 400 开，这部分气体是由气缸 A 中迁入的，它在原来压强为  $p_1$ 、温度为  $T_1$  的状态下占有的体积  $V_1$ ，可根据理想气体的状态方程求得

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

因  $p_1 = p_2$ ，所以

$$V_1 = \frac{T_1}{T_2} V_2 = \frac{300 \times 2.4}{400} \text{ 升} = 1.8 \text{ 升}。$$

把阀门打开前后的气体看成一个整体，它们的压强都等于  $1 \times 10^5$  帕，温度都等于 300 开。设活塞重新平衡时气缸 A 内气体体积为  $V'_A$ ，于是局部体积之和应等于整体积，即

$$V_A = V'_A + V_1，$$

$$\text{则 } V'_A = V_A - V_1 = (4.8 - 1.8) \text{ 升} = 3 \text{ 升}。$$

## 练习二十二

1. 某一定质量的理想气体在状态 2 时的温度为  $T_2$ ，体积为  $V_2$ ，压强为  $p_2$ 。如果先让它经过一个等体积过程，到达某一中间状态 C，使气体温度降低为  $T_1$ ，压强减小为  $p_c$ 。接着，让气体再经过一个等温膨胀过程，到达状态 1，使体积增大为  $V_1$ ，压强减小为  $p_1$ 。试利用 p-V 图，运用有关的气体实验定律推导出理想气体的状态方程。

图 6-12

2. 图 6-12 为一水平放置的金属容器，活塞 S 右端与大气相连通，活塞用插销固定，活塞左侧容器的容积是 0.5 升，通过电热丝 F 点燃容器中的可燃气体后，使活塞左侧容器内的气体压强达到  $20 \times 10^5$  帕，温度达到 1227℃，高压气体顶开插销推动活塞向右移动。若不计活塞与器壁间的摩擦，问最终这部分气体的体积是多少升？（已知室温是 27℃，大气压强是  $1.0 \times 10^5$  帕。）

图 6-13

3. 如图 6-13 所示, 粗细均匀的 U 形管, 一端开口, 一端封闭, 内盛水银。当管竖直放置时, 封闭端内水银面上方的空气柱长度  $l$  为 8 厘米, 温度为  $27^\circ\text{C}$  时, 两臂内的水银面在同一水平高度, 当时的大气压强为  $1.0 \times 10^5$  帕 ( $g$  取  $10 \text{ 米/秒}^2$ , 水银密度为  $13.6 \times 10^3$  千克/米<sup>3</sup>)。试求:

- (1) 当温度升高到几度时, 封闭端内的空气柱长度将增大到 9 厘米;
- (2) 保持这一温度不变, 从开口端再灌入水银, 使封闭端的空气柱恢复到原长, 则两臂内水银柱的高度差为多大。

图 6-14

4. 一圆柱形气缸直立在地面上, 内有一具有质量而无摩擦的绝热活塞, 把气缸分成容积相等的 A、B 两部分, 如图 6-14 所示。A、B 两部分内的气体温度都是  $27^\circ\text{C}$ , A 部分气体的压强是  $1.0 \times 10^5$  帕, B 部分气体的压强是  $2.0 \times 10^5$  帕, 现对 B 部分的气体加热使活塞上升, 保持 A 部分气体温度不变, 而体积减小为原来的  $2/3$ 。求此时 (1) A 部分气体的压强; (2) B 部分气体的温度。

### 三、气体的温度和压强的微观解释

根据分子动理论 (旧称分子运动论) 的基本假设, 物体内部大量分子永不停息地做无规则运动。因为分子具有质量, 所以分子具有动能, 对质量为  $m$  的一个分子来说, 当速度为  $v$  时, 它的动能为  $\frac{1}{2}mv^2$ 。对于一定质量的理想气体来说, 在某一平衡状态时, 各个分子的速度大小不等, 动能也不相等, 理论研究指出, 可用平均动能的概念来表示分子的动能, 分子平均动能为  $\frac{1}{2}m\bar{v}^2$  (式中  $\bar{v}^2$  为分子速度平方的平均值), 分子平均动能跟热力学温度成正比。

由于对气体传递热量或对气体压缩做功, 都将使分子热运动加剧, 使分子平均动能增大, 表现为气体温度的升高。所以说, 气体的温度是分子平均动能的标志。这就是气体温度这一宏观量的微观解释。

从分子动理论的观点来看, 气体的压强是由于组成气体的大量分子向各个方向运动时对器壁发生碰撞而产生的。气体分子碰撞器壁, 就对器壁有力的作用, 虽然每个气体分子对器壁的碰撞是不连续的, 但由于气体分子是大量的, 对器壁的碰撞十分频繁, 对器壁就产生一个持续的压力, 器壁单位面积上受到的压力就是气体对器壁的压强。

图 6-15

由于分子运动是无规则的, 它们沿各个方向运动的机会是均等的, 也就是说, 在前后、左右和上下各个方向中没有哪个方向的运动更占优势。设有一个向右运动的质量为  $m$  的分子与器壁发生碰撞, 如图 6-15。碰撞前动量为  $mv$  ( $v$  是分子的平均速度), 碰撞后向左运动, 速度大小

不变，动量变为 $-mv$ ，分子动量改变了 $-2mv$ 。从动量定理可知，这个动量的改变等于器壁。对分子的冲量。由牛顿第三定律可知，这时分子对器壁同时有一个大小相等方向相反的冲量，这样气体分子对器壁每碰撞一次，就给器壁 $2mv$ 的冲量，在一段时间内，大量分子对器壁碰撞多少次，分子对器壁的总冲量就是 $2mv$ 的多少倍，而在单位时间内给器壁的总冲量就等于器壁所受的压力，器壁单位面积上所受的压力就等于气体的压强。单位体积内气体分子数越多，在单位时间内分子对单位面积器壁的碰撞次数就越多；分子的平均速度越大，每次碰撞对器壁的冲量也越大。理论研究指出，气体的压强跟单位体积内的分子数 $n$ 和分子速度

平方的平均值 $\bar{v}^2$ 成正比。所以，气体压强的大小跟单位体积内的分子数和分子的平均速度有关，单位体积内的分子数越多，分子的平均速度越大，气体的压强也就越大。这就是气体压强这一宏观量的微观解释。

### 阅读材料

#### 克拉珀龙方程

一定质量的理想气体在状态变化过程中，它的压强 $p$ 和体积 $V$ 的乘积被它的热力学温度 $T$ 所除，得到的商是一个常数，即 $\frac{pV}{T} = \text{常数}$ 。这一常数的值对于不同质量的理想气体来说是不同的。这表明气体的质量也是决定气体状态的一个参量（如果研究对象是一定质量的气体，则决定气体状态的量只有压强、体积和温度）。在实际情况中，气体的质量常是变化的。如贮存在钢瓶中的氧气经使用，质量减少了，压强也降低了，温度可能也发生变化，而钢瓶内剩下的氧气的体积仍和使用前相同；又如开着窗户的房间里由于温度升高，一部分空气将逸出，室内空气质量将减小，密度也将减小。在研究气体质量发生变化时，它的压强、体积和温度间的变化规律，就不能应用理想气体的状态方程，而必须应用克拉珀龙方程。

由于1摩尔的任何气体在标准状况（压强 $p_0=1.013 \times 10^5$ 帕，温度 $T_0=273$ 开）下都具有相同的体积（ $v_0=22.4 \times 10^{-3}$ 米<sup>3</sup>），则1摩尔气体在该状态时，它的压强和体积的乘积被它的热力学温度所除，得出的常数

$$R = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{1.013 \times 10^5 \times 22.4 \times 10^{-3}}{273} \text{焦/摩} \cdot \text{开} = 8.31 \text{焦/摩} \cdot \text{开}。$$

这个常数对于任何理想气体都是相同的，所以常数 $R$ 叫做普适气体恒量。

对于 $n$ 摩尔的理想气体来说，设气体质量为 $m$ ，摩尔质量为 $M$ ，则

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = nR = \frac{m}{M} R，$$

可写成 
$$PV = \frac{m}{M} RT。$$

这一表达式叫做克拉珀龙方程。它表示理想气体在任何状态下，它的压强、体积、温度和质量的关系。对于摩尔质量 $M$ 已知的理想气体，

知道了  $p$ 、 $V$ 、 $T$ 、 $m$  中的任何三个量，就可以根据克拉珀龙方程求出第四个量。

对于任何真实气体来说，在温度不太低、压强不太大的情况下，同样近似遵循克拉珀龙方程。

### 本章学习要求

1. 理解查理定律。知道  $p-T$  图象。
2. 理解盖·吕萨克定律。知道  $V-T$  图象。
3. 理解玻意耳定律。知道  $p-V$  图象。
4. 知道理想气体。理解理想气体状态方程。

### 复习题

1. 选择题（以下各小题中只有一个正确答案）

- (1) 一定质量的理想气体，发生状态变化时可能出现的情况是 [ ]
- (A) 温度降低，压强减小，密度增大。
  - (B) 压强减小，密度不变，温度升高。
  - (C) 温度升高，压强不变，密度增大。
  - (D) 压强增大，温度不变，密度减小。

图 6-16

(2) 如图 6-16 所示，一端开口、一端封闭的粗细均匀的 U 形管内盛有水银，封闭端的水银面上方有一定质量的气体。当 U 形管竖直放置时，开口端管内的水银面比封闭端管内的水银面低。现使 U 形管绕 OO 轴缓慢转动到水平位置，则可能发生的情况是 [ ]

- (A) 封闭端内的气体压强将比原来增大。
- (B) 两管内水银面的距离将接近。
- (C) 封闭端内空气柱的长度将增大。
- (D) 封闭端内的气体压强将比原来减小。

(3) 将两端开口的一段玻璃管竖直插入水中，这时管内外的水面是相平的，然后用手指把管的上端堵住，缓慢地把管向下压入水中，则进入管中的水柱高度和管内水面的位置变化复习题情况是 [ ]

- (A) 高度不变，管内水面低于管外水面。
- (B) 高度减小，管内水面高于管外水面。
- (C) 高度增大，管内水面低于管外水面。
- (D) 高度增大，管内水面高于管外水面。

(4) 如图 6-17 所示，两端封闭的 U 形管内盛有水银，把管内气体分隔成两部分。在室温下，当 U 形管竖直放置，管内气体达到平衡时，左臂内水银面上方的空气柱长度  $l_1$  小于右臂内水银面上方的空气柱长度  $l_2$ ，左臂内水银柱高度  $h_1$  也小于右臂内的水银柱高度  $h_2$ 。今将这一 U 形管竖直地全部浸没在沸水中，则两臂内水银柱的高度差 [ ]

- (A) 增大。
- (B) 不变。

- (C) 减小。 (D) 以上答案都有可能。

图 6-17

图 6-18

(5) 如图 6-18 所示,  $p$ - $V$  图中的点 A 和点 B 表示一定质量理想气体的两个状态, 设状态 A 的温度为  $T_A$ , 状态 B 的温度为  $T_B$ , 由图可知  $T_A$  和  $T_B$  的关系为 [ ]

- (A)  $T_B=2T_A$ 。 (B)  $T_B=4T_A$ 。  
(C)  $T_B=6T_A$ 。 (D)  $T_B=8T_A$ 。

图 6-19

图 6-20

(6) 如图 6-19 所示, 一个圆筒形容器竖直放置, 用活塞 A 把一定质量的气体封闭在容器内。已知活塞上表面是水平的, 下表面与水平面的夹角为  $\theta$ , 活塞质量为  $M$ , 容器的横截面积为  $S$ , 不计活塞与容器内壁之间的摩擦。若大气压强为  $P_0$ , 则被活塞封闭在容器中的气体的压强等于 [ ]

- (A)  $p_0 + \frac{Mg \cos \theta}{S}$ 。 (B)  $\frac{p_0}{\cos \theta} + \frac{Mg}{S \cos \theta}$ 。  
(C)  $p_0 + \frac{Mg \cos^2 \theta}{S}$ 。 (D)  $p_0 + \frac{Mg}{S}$ 。

2. 一端开口、粗细均匀的玻璃管水平放置, 管内有一段长为  $h$  的水银封闭着长为  $l_0$  的一段空气柱, 如图 6-20 所示。若以封闭端 O 为圆心, 使玻璃管在竖直面里缓慢旋转  $360^\circ$  时, 温度保持不变, 水银未曾漏出。已知大气压强为  $p_0$ , 水银密度为  $\rho$ , 试求管内气体的最大体积和最小体积之比。

3. 用一根一端封闭的均匀细玻璃管做托里拆利实验, 在灌入水银时管中空气未能全部排尽, 灌满水银后把玻璃管倒插在水银槽内时, 出现了如图 6-21 所示的情况。测得管子顶部内一段空气柱长度为 4 厘米, 中间一段水银柱高度  $h_1$  为 4 厘米, 以下的一段空气柱长度为 8 厘米, 最下面的一段水银柱离槽内水银面的高度为 66 厘米。如果把玻璃管竖直向上提起一些, 不使管口离开槽内水银面, 发现管内顶部空气柱长度会有所增大。如果要使管子顶部这段空气柱长度增大到 5 厘米, 则玻璃管应提起几厘米? (设温度保持不变, 大气压强  $p_0=1.02 \times 10^5$  帕,  $g$  取  $10$  米/秒<sup>2</sup>)

图 6-21

图 6-22

图 6-23

4. 密闭在圆柱形容器中的空气温度为  $27^\circ\text{C}$ ，容器中间用两个绝热的、并能自由滑动的活塞分隔成体积都等于  $V$  的 A、B、C 三个部分，如图 6-22 所示。当将 A 部分加热到  $227^\circ\text{C}$ ，C 部分加热到  $327^\circ\text{C}$  时，A 部分的体积将变为多大？

5. 如图 6-23 所示，直立圆筒形气缸内活塞下方有一定质量的理想气体。活塞质量可不计，活塞上堆放着铁砂。开始时活塞搁放在气缸内壁的固定卡环上，气缸内气柱高度为  $H_0$ ，压强等于大气压强  $p_0$ 。现对气体缓慢加热，当气体温度升高了  $\Delta T=60\text{K}$  时，活塞（及铁砂）开始离卡环而上升。继续加热直到气柱高度为  $H_1=1.5H_0$ 。此后，在维持温度不变的条件下逐渐取走铁砂，直到铁砂全部取走时，气柱高度变为  $H_2=1.8H_0$ ，求此时气体的温度（不计活塞与气缸壁间的摩擦）。

## 电场中的电荷和导体

### 1. 高压带电作业

### 2. 范德格喇夫静电起电机

### 3. 显像管（部面）

我们在必修课中已经初步学习过静电场的两个基本性质，电场强度和电势。现在我们将在这个基础上进一步研究电场力移动电荷做功的特点以及带电粒子在电场中的运动规律。

#### 一、电场中移动电荷做功

图 7 - 1 是一种电子射线管工作原理示意图，K 是阴极，A 是带有小孔的阳极。当灯丝 F 通过电流炽热后，加热阴极 K 时，阴极 K 便发射出电子，这些电子经 A、K 间的电场加速，穿过小孔沿直线射向荧光屏 S，并在荧光屏上显示出一个光点。能使荧光屏发出荧光表明电子具有很大的速度和足够的能量。显然，这是由于阴极和阳极间形成的电场对电子作功，使电子获得动能的缘故。

图 7-1

图 7-2

#### 电场力移动电荷做功的特点

电子射线管的工作原理表明了电场能够对电子做功，使它获得能量。那么电场力移动电荷做功具有怎样的特点呢？

为了使讨论的问题简化，我们以匀强电场为例来进行分析。设匀强电场的场强为 E，电场中有 A、B 两点（图 7 - 2），把电量为 q 的正电荷沿不同的路径从 A 点移到 B 点时，电场力所做的功各等于多大呢？

我们可以先沿直线把电荷 q 从 A 点移到 B 点，由于电荷 q 受到的电场力  $F=qE$ ，方向沿着电场线，电场力对电荷做的功

$$W_{AB} = F \cdot \overline{AB} \cos \theta = qE \cdot \overline{AC}。$$

也可以沿着折线 ACB 把电荷 q 从 A 点先移到 C 点，然后再把电荷 q 从 C 点移到 B 点。在 AC 段上电场力对电荷做的功  $W_{AC} = F \cdot \overline{AC} = qE \cdot \overline{AC}$ ，在 CB 段上由于电荷移动方向跟电场力方向垂直，电场力不做功， $W_{CB}=0$ ，在整个移动过程中电场力对电荷所做的功  $W_{AB} = W_{AC} + W_{CB} = qE \cdot \overline{AC}$ 。

如果沿任意曲线  $\overline{ADB}$  把电荷 q 从 A 点移到 B 点，我们可以用许许多多跟电场力垂直和平行的短折线来代替曲线  $\overline{ADB}$ ，凡是沿着跟电场线垂直的短折线移动电荷时，电场力都不做功，凡是沿着电场线方向的短折线移动电荷，电场力都做功，而沿着电场线方向的短折线的总长度等于  $\overline{AC}$ ，所以，电场力对电荷做的功仍然是  $W_{AB} = qE \cdot \overline{AC}$ 。

由此可见，电场力移动电荷所做的功只跟电荷在电场中的始、末位置有关，而跟电荷经过的路径无关。电场力做功的这一特点虽然是从匀强电场的特例得出的，但在非匀强电场中电场力移动电荷做功，同样具有这一特点。

### 电势能

根据在电场中移动电荷时，电场力所做的功跟路径无关，可以在电场中引入势能的概念，电荷在电场中具有的势能叫做电势能。电场力对电荷做功，电荷的电势能减少，电荷克服电场力做功，电荷的电势能增加。

图 7 - 3 所示，正电荷顺着电场线从 A 点移到 B 点的过程中，电场力做功，正电荷的电势能减少（图 7 - 3 (a)）；而负电荷顺着电场线从 A 移到 B 的过程中，负电荷克服电场力做功，负电荷的电势能将增加（图 7 - 3 (b)）。可见，电荷电势能的改变，可用电场力所做的功来量度。

图 7-3

## 二、电势 电势差

### 电势

我们已经学习过电势的初步概念，知道电场中某点的电势在数值上等于单位正电荷在电场中某点具有的电势能，也就是说放在电场中某点的正电荷具有的电势能跟它的电量的比值，叫做电场中这一点的电势。

电势的定义式

$$U = \frac{W}{q}。$$

电势是电场的属性，是描述电场具有能的性质的物理量。电场中各点电势的大小只跟这一点在电场中的位置有关，而跟在这一点是否存在电荷无关。

### 电势差

设电场中有 A、B 两点（见图 7 - 3），电势分别为  $U_A$ 、 $U_B$ 。电量为  $q$  的正电荷在电场力作用下从 A 点移到 B 点，这过程中电场力对电荷所做的功  $W$  应等于电荷电势能的减少。

$$W = \Delta E_p = qU_A - qU_B = q(U_A - U_B)$$

上式中  $(U_A - U_B)$  就是 A、B 两点间的电势差。可见，

电场中某两点间的电势差等于电场力所做的功跟被移动电荷的电量的比值。

$$U_A - U_B = U_{AB} = \frac{W}{q}。$$

电势差的单位是伏特（V）。电量为 1 库的电荷在电场中某两点间移动时，如果电场力做功恰为 1 焦，则这两点间的电势差为 1 伏。

在必修课中我们曾经学过，电势差是电场中某两点电势的差，现在我们从电场力移动电荷做功的观点进一步认识了电势差。对于电场中给定的两个点来说，在这两点间移动电荷，电场力做功的多少跟被移动电



荷的电量成正比,然而电场力所做的功跟被移动电荷的电量  $q$  的比值(即电势差)却是不变的。这在实际工作中是有现实意义的。如本章第一节中所介绍的电子射线管中,只要知道 A、K 两极间的电势差(即所加电压),就可以知道被加速的电子获得的动能,不必考虑电场力的大小和电子移动的路径。 $W=qU$  或  $W=qU$  这两个关系式不仅对匀强电场适用,对非匀强电场同样也是适用的。

### 电子伏特 (eV) 的规定

电子通过电势差为 1 伏的两点所获得的能量,叫做 1 电子伏特 (eV)。简称电子伏。电子伏是能量的一种单位。因为电子所带电量  $e=1.60 \times 10^{-19}$  库,由公式  $W=qU$  可知,

$$1 \text{ 电子伏} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ 库} \times 1 \text{ 伏} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ 焦}。$$

1 电子伏的能量很小,在原子物理中常用它的  $10^6$  倍——兆电子伏 (MeV) 或  $10^9$  倍——吉电子伏 (GeV) 来计量原子核反应时所释放的能量或用来描述基本粒子具有的能量。如一个铀核裂变时释放的能量约为  $2.0 \times 10^2$  兆电子伏;当代著名实验物理学家、诺贝尔物理学奖获得者丁肇中教授,在 1974 年利用质子加速器发现的“J/ψ 粒子”的能量高达 3.1 吉电子伏。

图 7-4

### [例题]

图 7-4 表示一个正电荷产生的电场,已知 A、B 两点间的电势差为 200 伏,有一电量  $q=6.0 \times 10^{-8}$  库的电荷从 B 点移到 A 点。(1) 它的电势能改变了多少?是增加还是减少?(2) 如果电荷在到达 B 点时的动能为  $2.0 \times 10^{-5}$  焦,到达 A 点时的动能为多大?

解:(1) 正电荷从 B 到 A 是逆着电场线方向运动,由于克服电场力做功,正电荷的电势能将增加。电势能的增加量等于电荷克服电场力所做的功。

$$W_{AB} = qU_{AB} = 6 \times 10^{-8} \times 200 \text{ 焦} = 1.2 \times 10^{-5} \text{ 焦}。$$

(2) 在只有电场力做功的情况下,电荷电势能的增加量,应等于它的动能的减小量

$$W_{AB} = E_{KB} - E_{KA}。$$

所以,正电荷到达 A 点时的动能

$$\begin{aligned} E_{KA} &= E_{KB} - W_{AB} = 2.0 \times 10^{-5} \text{ 焦} - 1.2 \times 10^{-5} \text{ 焦} \\ &= 0.8 \times 10^{-5} \text{ 焦} = 8 \times 10^{-6} \text{ 焦}。 \end{aligned}$$

### 练习二十三

1. 如图 7-4 的电场中,如果在 A 点放一个负电荷,在电场力作用下它将向哪个方向运动,在运动过程中它的电势能是增加还是减少?

2. 把两个异种电荷之间的距离增大一些,在这过程中,是电场力做功还是克服电场力做功?电势能是增加还是减少?如果两个同种电荷之间的距离增大一些,又如何?

3. 顺着电场线方向有 A、B 两点。电量为  $4 \times 10^{-8}$  库的负电荷,从 B

点由静止出发到达 A 点时的动能为  $3.2 \times 10^{-6}$  焦。则 A、B 两点间的电势差为多大？

4. 初速为零的电子经 455 伏的电压加速后，具有的动能为多少电子伏？这时电子的速度为多大？

### 三、等势面

#### 零电势的选取

电场中电势为零的点是可以任意选取的，因此电场中某一点的电势，就会由于选取不同的点作为零电势而具有不同的数值。例如图 7-5 所示的电场中，取 C 点电势为零，单位正电荷分别从 A、B、D 三点移到 C 点，电场力所做的功分别为 15 焦、5 焦和 -3 焦，则这三点的电势分别为  $U_A=15$  伏、 $U_B=5$  伏、 $U_D=-3$  伏。

图 7-5

上例中 A、B 两点间电势差  $U_{AB}=U_A-U_B=10$  伏，A 点电势高；A、D 两点间电势差  $U_{AD}=U_A-U_D=15$  伏 - (-3 伏) = 18 伏，A 点电势高。

如果取 B 点的电势为零，由于单位正电荷从 B 点移到 C 点电场力做功 5 焦，电势能减少了 5 焦，因此 C 点电势  $U_C=-5$  V。同理可得  $U_A=10$  伏， $U_D=-8$  伏，而 A、B 两点间电势差  $U_{AB}=U_A-U_B=10$  伏 - 0 = 10 伏，A、D 两点间电势差  $U_{AD}=U_A-U_D=10$  伏 - (-8 伏) = 18 伏。

可见，电场中某点电势的值与零电势点的选取有关（通常选取大地的电势为零），但确定的两点间的电势差的值却与零电势点的选取无关。所以研究实际问题时，人们更关心的是电势差。

#### 等势面

从电场中移动电荷做功的讨论中，我们已经知道，无论正电荷或负电荷只要是沿着跟电场线垂直的方向移动，电场力都不做功。如果在电场中把电荷沿垂直于电场线方向移动并与电场线相交的那些点连结起来，便可得出处处都垂直于电场线的平面或曲面（如图 7-6 所示），电荷沿着这个面移动，电场力不做功，电势能也就保持不变，也就是说，垂直于电场线的面上的所有点都具有相同的电势，这样的面称为等势面。对于匀强电场来说，它的等势面是一组平行的平面，如图 7-6(a)，对于点电荷电场来说，它的等势面则是以点电荷为球心的一组同心球面，如图 7-6(b)。

同一等势面上的各点电势相等，不同的等势面电势的值是不相等的，由于沿着电场线方向电势是逐渐减小的，所以不同的等势面，它的电势的值也是沿着电场线方向逐渐减小，图 7-6 所示的电场中各等势面的电势  $U_1 > U_2 > U_3 \dots$ 。

图 7-6

#### 思考

在点电荷产生的电场中，如果取无限远处的电势为零。那么在正电荷产生的电场中，各点的电势是大于零还是小于零？为什么？在负电荷

产生的电场中，情况又如何？

#### 练习二十四

1. 如果电场中有 A、B 两点，它们的电势分别为  $U_A = -8$  伏， $U_B = -2$  伏，则下列说法中正确的是 [ ]

- (A) A、B 两点中，A 点电势较高。
- (B) A、B 两点间的电势差是 10 伏。
- (C) 把单位正电荷从 A 点移到 B 点，电场力做的功为 10 焦。
- (D) 把单位正电荷从 A 点移到 B 点，克服电场力做的功为 6 焦。

2. 电场中某点 A 的电势是 60 伏，某点 B 的电势是零，先后把电量为  $3 \times 10^{-8}$  库的电荷放在 A、B 两点时，电荷的电势能各为多大？若将这电荷从 A 点移到 B 点，电场力对它做了多少功？

3. 把一个电量为  $5 \times 10^{-8}$  库的正电荷，从电势为零的 O 点移到 M 点，克服电场力做的功是  $1.0 \times 10^{-6}$  焦，求 M 点的电势。如果把这个电荷从 N 点移到 O 点，电场力做的功是  $2.0 \times 10^{-6}$  焦，求 N 点的电势。

#### 四、电势差和电场强度的关系

我们知道，电场强度是描写电场的力的性质的物理量，电势（或电势差）是描写电场的能的性质的物理量。两者分别从不同侧面来描述电场的性质，因此电场强度和电势差之间必然有着密切的联系。下面我们以匀强电场为例，来研究两者的关系。

图 7-7

设匀强电场中沿着电场线方向有 A、B 两点，距离为  $d$ （图 7-7），电势差为  $U$ 。匀强电场场强为  $E$ 。把正电荷  $q$  从 A 移到 B，电场力所做的功

$$W = Fd = qEd \quad \text{或} \quad W = qU。$$

比较以上两式可得  $U = Ed$ 。

这表明，在匀强电场中，沿场强方向的两点间的电势差等于电场强度和这两点间距离的乘积。

由上式可得

$$E = \frac{U}{d}。$$

可见，在匀强电场中，场强的大小等于沿场强方向每单位距离上的电势差。

图 7-8

从上式还可得场强的单位是伏/米。由于  $1 \text{ 伏} \times 1 \text{ 库} = 1 \text{ 焦} = 1 \text{ 牛} \times 1 \text{ 米}$ ，所以  $1 \text{ 伏/米} = 1 \text{ 牛/库}$ ，即这两个场强单位是相等的。

电势差跟电场强度的关系在实用上很重要，因为测量电势差比测量电场强度要方便得多。例如两块带有等量异种电荷的平行金属板，只要测得两板间的距离和电势差，利用电势差跟电场强度的关系，便可算出

板间匀强电场的场强数值。

[例题]

如图 7-8 所示，平行金属板 A、B 间相距 4 厘米，用电压为 60 伏的电池组连接 A、B 两板，在闭合电键的情况下，(1) A、B 两板间的匀强电场的场强为多大？方向如何？(2) 减小 A、B 两板之间的距离，场强怎样改变？

解：(1) A、B 两板分别跟电池组正负极连接后，两板间的电势差  $U$  就等于电池组的电压，由公式  $E = \frac{U}{d}$  可计算场强  $E$ 。

$$E = \frac{U}{d} = \frac{60}{4 \times 10^{-2}} \text{ 伏 / 米} = 15 \times 10^3 \text{ 伏 / 米。}$$

A 板带正电，B 板带负电，场强方向由 A 板指向 B 板。

(2) 在两极电势差  $U$  不变的情况下，减小 A、B 两板间距  $d$ ，由  $E = \frac{U}{d}$  可知，场强将增大。

### 电容器中的电场能量

对一个具有固定电容值的电容器来说，未充电时电容器所带电量为零，两极板间的电势差为零，极板间不存在电场。当电容器充电后，设所带电量为  $Q$ ，两极板间的电势差为  $U$ ，两极板间存在电场，就具有了电场能。电场的能量可利用  $u$ - $q$  图象进行推导，由于电容器的电容  $C$  是不变的，两极板间的电势  $U$  正比于电容器所带电量  $Q$ ，所以  $u$ - $q$  图象是通过坐标轴原点的一条倾斜直线（图 7-9），该直线的斜率等于电容器电容的倒数  $\frac{1}{C}$ ；直线跟  $q$  轴包围的矩形面积在数值上等于充电时电源对电容器做的功，也就等于电容器内电场的能量。

$$W = \frac{1}{2} UQ = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}。$$

图 7-9

可见，对一个固定电容器来说，它的电场能量跟所带电量的平方成正比。

### 练习二十五

1. 在场强  $E = 1.5 \times 10^4$  伏/米的匀强电场中，沿电场方向依次排列着 A、B、C 三点，已知  $\overline{AB} = 4$  厘米， $\overline{BC} = 6$  厘米。那么，A、B 两点间，B、C 两点间，A、C 两点间的电势差各为多大？

2. 相距 0.05 米的平行金属板间加上  $10^4$  伏电压，两板间的场强  $E$  为多大？在两板之间的一个电子受到的电场力为多大？

3. 相距为 4 厘米的水平放置的两块平行金属板上，加上 200 伏电压时，可使一个质量为  $10^{-8}$  千克的带电油滴在两板间处于平衡状态。求油滴的电量。

4. 为使相距为 10 厘米的平行金属板间形成一个场强  $E=10^4$  伏/米的匀强电场，两板上必须加上多大电压？如果将带有电量为  $-1.6 \times 10^{-10}$  库的尘埃，从两板的正中央移到带正电的金属板，电场力做了多少功？

### 五、带电粒子在电场中的运动

在科学实验和技术设备中，常利用电场对带电粒子的作用来改变或控制带电粒子的运动。这种应用大致可以分成两种情况，一是利用电场来使带电粒子加速，一是利用电场来使带电粒子偏转。

我们以电子射线管为例，来说明如何利用电场来改变和控制电子的运动。电子射线管的结构示意图如图 7-10 所示。

#### 电子的加速

当阳极 A 和阴极 K 之间加上电压  $U_1$  时，A、K 间形成一电场，从阴极 K 发射出的电子在电场力作用下从 K 向 A 加速，电子从 K 发出时速度不大（设为零），到达 A 时速度为  $v$ 。由动能定理可知，电场力对电子所做的功等于电子动能的增加。

$$eU_1 = \frac{1}{2}mv^2, v = \sqrt{\frac{2eU_1}{m}}。$$

图 7-10

图 7-11

电子的电量  $e$  和质量  $m$  是已知的，只要知道 A、K 间所加的电压  $U_1$ ，就可计算出电子被加速后到达阳极 A 时的速度。电子束穿过阳极 A 上的小孔后，将沿直线打在荧光屏上，在屏中央 O 处将出现一个亮点（见课本彩图 7）。

#### 电子的偏转

如图 7-10 所示的电子射线管内偏转电极  $Y_1$ 、 $Y_2$  两板间距为  $d$ ，加上电压  $U_3$  后，两板间就产生一个匀强电场，场强  $E = \frac{U_3}{d}$ 。当速度为  $v_0$  的电子以垂直于场强的方向进入这一电场内，它就受到垂直于速度方向的电场力  $eE$  的作用。电子在两板间的运动和物体在重力场中的平抛运动相似（图 7-11 和课本彩图 8），我们可以用运动的分解和合成的方法来研究。为便于分析，可以建立一个直角坐标系，坐标系的原点取在电子开始进入电场的位置， $x$  轴沿着电子初速度  $v_0$  的方向， $y$  轴沿着垂直于电子初速度  $v_0$  的方向。

电子在  $x$  方向由于不受力作用，将做匀速直线运动，

$$x = v_0 t \quad (1)$$

电子在  $y$  方向受到电场力作用，将做初速度等于零的匀加速直线运动，

$$y = \frac{1}{2} at^2,$$

因为  $a = \frac{eE}{m} = \frac{eU_2}{md}$ ，所以

$$y = \frac{1}{2} \frac{eU_2}{md} t^2 \quad (2)$$

设偏转电极板长为  $l$ ，则电子在偏转电场中运动时水平位移  $x=l$ ，运动时间  $t = \frac{l}{v_0}$ 。代入 (2) 式，得电子沿  $y$  方向的偏转量为

$$y = \frac{eU_2 l^2}{2mdv_0^2}。$$

电子离开偏转电场后，因为不再受到电场力，它将偏离  $v_0$  某一角度  $\varphi$  的方向做匀速直线运动，这时电子的运动速度  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ ，因  $v_x = v_0$ ，

$v_y = at = \frac{eU_2 l}{mdv_0}$ ，所以电子将以速度  $v = \sqrt{v_0^2 + \left(\frac{eU_2 l}{mdv_0}\right)^2}$  打到荧光屏上。

由图7-10可知，设速度  $v$  和初速度  $v_0$  间的夹角为  $\varphi$ ，则  $\operatorname{tg}\varphi = \frac{v_y}{v_x} = \frac{eU_2 l}{mdv_0^2}$ 。

由于电子进入偏转电场时具有动能  $\frac{1}{2} mv_0^2 = eU_1$ ，把  $mdv_0^2 = 2eU_1$  代入

上式得电子偏转角  $\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{U_2 l}{2dU_1}$ 。

由于  $l$ 、 $d$  不能改变， $U_1$  一般也为定值，因此，在飞得出电场的情况下，只要改变偏转电压  $U_2$ ，偏转角  $\varphi$  也随之变化，从而在荧光屏上可观察到光点沿  $y$  方向发生位置变化。如果在电子射线管的  $Y_1$ 、 $Y_2$  偏转电极上不加电压，而将电压  $U_2$  加在  $X_1$ 、 $X_2$  偏转电极上，则当  $U_2$  发生改变时，荧光屏上的光点将沿  $x$  方向发生位置变化。

#### [例题 1]

原来都是静止的一个质子和一个  $\alpha$  粒子，经过同一电压为  $U$  的加速电场后，它们速度大小之比是多少？

解：在电场中，带电粒子所受重力远小于电场力，可以认为它们只受到电场力的作用，电场力对粒子做的功应等于粒子增加的动能。由于粒子原来都是静止的，初动能为零，则有

$$qU = \frac{1}{2} mv^2,$$

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}。$$

质子和  $\alpha$  粒子的电量之比  $\frac{q_1}{q_2} = \frac{1}{2}$ ，质量之比  $\frac{m_1}{m_2} = \frac{1}{4}$ ，因为  $U$  相同，所以质子和  $\alpha$  粒子的速度大小之比

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{q_1}{q_2} \times \frac{m_2}{m_1}} = \sqrt{\frac{1}{2} \times \frac{4}{1}} = \sqrt{2}。$$

[例题 2]

如图 7-12 所示，水平放置的两带电平行金属板间有一匀强电场，板间有一电量为  $e$ 、质量为  $m$  的电子，以速度  $v_0$  从两板中间垂直电场方向飞入，设金属板长  $l$ 、两板距离为  $d$ ，要使电子正好沿金属板边缘飞出电场，两板间电压应为多大？电子飞出电场时的动能多大？

图 7-12

解：电子在电场中偏转的距离为  $\frac{d}{2}$  时，电子正好沿金属板的边缘飞出电场。电子在水平方向运动的位移

$$x = l = v_0 t \quad (1)$$

电子在竖直方向运动的位移

$$y = \frac{d}{2} = \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} \frac{eU}{md} t^2 \quad (2)$$

解 (1) 和 (2) 式，得两板间电压

$$U = \frac{md^2 v_0^2}{el^2}。$$

电子的初动能是  $\frac{1}{2} mv_0^2$ ，在电场中偏转距离  $\frac{d}{2}$  的过程中，电场力对电子做的功是  $\frac{eU}{2}$ ，由动能定理可得出电子飞出电场时的动能

$$E_k = \frac{1}{2} mv_0^2 + \frac{eU}{2} = \frac{1}{2} mv_0^2 + \frac{md^2 v_0^2}{2l^2} = \frac{(l^2 + d^2)mv_0^2}{2l^2}。$$

S：在这一节课文里，研究电子、质子等在电场中运动时，为什么都不考虑重力的作用？

T：以质子为例，即使在场强很小的电场内，设  $E=100$  伏/米，质子的质量为  $1.67 \times 10^{-27}$  千克，电量  $q$  为  $1.6 \times 10^{-19}$  库，重力跟电场力的比值  $\frac{mg}{qE} = \frac{1.67 \times 10^{-26}}{1.6 \times 10^{-17}} = 10^{-9}$ ，重力远小于电场力。如果是电子，它所受的重力更远小于电场力了。即使是质量较大的离子，它们所受的电场力也比重力大得多。所以，在一般情况下，电子、质子、离子等在电场中运动时，都不必考虑重力。

练习二十六

1. 在真空中有两块平行金属板，相距 5 厘米。在其上加 100 伏电压，粒子从静止出发，从一块板到达另一块板时，它的动能为多少电子伏？等于多少焦？（这题可有几种解法？哪种解法比较简便？）

图 7-13

2. 一个电子以  $4.0 \times 10^7$  米/秒的初速度沿电场线方向射入场强为 2.5

$\times 10^4$  牛/库的匀强电场中，这个电子在电场中能前进多远？经过的时间是多少？电场中这段距离间的电势差是多大？（已知电子质量为  $9.1 \times 10^{-31}$  千克）

3. 如图 7-13 所示的阴极射线管中，电子流经加速电场加速后，以速度  $v_0$  依次经过图 7-13 偏转电场  $Y_1Y_2$ 、 $X_1X_2$ ，最后打到荧光屏上，产生一个亮点，在  $Y_1Y_2$ 、 $X_1X_2$  不加电压时，亮点在荧光屏中央 0 点。若偏转电压

(1)  $U_{y1}-U_{y2} > 0$   $U_{x1}-U_{x2} > 0$ ，则亮点位于区域\_\_。

(2)  $U_{y1}-U_{y2} > 0$   $U_{x2}-U_{x1} > 0$ ，则亮点位于区域\_\_。

(3)  $U_{y2}-U_{y1} > 0$   $U_{x1}-U_{x2} > 0$ ，则亮点位于区域\_\_。

(1)  $U_{y2}-U_{y1} > 0$   $U_{x2}-U_{x1} > 0$ ，则亮点位于区域\_\_。

4. 如果要使氢离子、氘离子和氚离子的混合物以垂直于场强方向进入偏转电场后，离开时偏转量相同。那么，这些离子必须具有相同的初速度，还是相同的初动量，还是相同的初动能？为什么？

5. 如图 7-14 所示，电子射线管偏转电极的长度  $x=2$  厘米，两极板间距  $d=0.4$  厘米。荧光屏距偏转电极  $L=15$  厘米，两极间的电压  $U=48$  伏。沿着与极板平行方向的电子以  $v_0=3 \times 10^7$  米/秒的初速度从两极板中央射入电场。求：(1) 电子通过偏转电极后产生的偏转距离  $y$ ；(2) 电子离开偏转电场时偏离原来方向的角度  $\varphi$ ；(3) 电子打到荧光屏上的 P 点离 0 点的距离。

图 7-14

6. 一束电子以速度  $v$  竖直向下从正中央射入水平方向的匀强电场，如图 7-15 所示。如果 A、B 两板间距离为  $d$ ，电势差为  $U$ ，电子质量为  $m$ ，电量为  $e$ ，试求这束电子进入电场后经过多长时间能撞到 A 板上。

图 7-16

7. 如图 7-16，试证明电子射线管中所加的偏转电压使电子在荧光屏上发生偏移的距离：

$$D = \frac{l}{2d} \frac{U_2}{U_1} \left( L + \frac{l}{2} \right)$$

式中  $l$  为偏转电极的长度， $d$  为偏转电极极板间距， $U_1$  为电子加速电压， $U_2$  为偏转电压， $L$  为偏转电极极板到荧光屏距离。

## \*六、电场中的导体 静电屏蔽

### 静电感应

金属导体中存在大量的自由电子，把金属导体放入电场中，导体中的自由电子受到电场力的作用，向电场相反的方向作定向移动。图 7-17 (a) 中，外电场  $E$  的方向是从左向右的，则金属导体中的自由电子就向左运动。自由电子定向运动的结果，使导体右面的电子逐渐减少，导体左面的电子逐渐增多，因此导体两侧出现等量异号电荷[如图 7-17(b)]。



这种导体内的电荷因受外电场的作用而重新分布的现象叫做静电感应。

图 7-17

由于静电感应，使导体两侧表面上出现正负电荷，因此在导体内部便形成了一个跟外电场  $E$  的方向相反的附加电场  $E'$  [如图 7-17 (c)]， $E'$  的产生就削弱了导体内部的电场。随着自由电子逐渐向左面聚集，附加电场  $E'$  逐渐增大，直到  $E'=E$  时，导体内部的合场强  $E_{内}=0$ ，自由电子的定向移动停止，这时导体处于静电平衡状态。

导体处于静电平衡时，导体内部任何一点的场强等于零。这就是静电平衡的条件。

导体处于静电平衡状态时，导体内部和表面都没有电荷作定向移动，因此导体内任意两点间的电势差为零，整个导体是一个等势体，导体表面是一个等势面。因此导体表面某处的场强方向必定跟它的表面垂直。

图 7-18

处于静电平衡状态下的带电导体，净电荷只分布在外表面上。这个实验事实是在 1842 年由英国物理学家法拉第首先发现的，他所做的实验被称为法拉第冰筒（圆筒）实验。现在我们用下面的实验来验证。如图 7-18 所示，取两个指针式验电器 A 和 B，相隔一段距离，在 B 上装一个空心的金属圆筒 C，使 C 带电，B 的指针张开一定角度，A 的指针不张开。用由绝缘细线吊着的不带电的金属圆筒 D（比 C 略小），跟 C 的外表面接触后，再跟 A 的金属球接触，可看到 A 的指针也张开一个角度，而 B 的指针偏转角度减小，这表明 D 把 C 的一部分电荷搬运给了 A，可见圆筒 C 的外表面是带电荷的，见图 7-18 (a)。如果把 D 放到 C 的内部跟 C 的内表面接触后，再跟 A 的金属球接触，则 A 的指针不张开，B 的指针偏转角度也没有变化，见图 7-18 (b)。这表明 D 并没有把 C 的电荷搬运给 A，可见圆筒 C 的内表面是不带电的，这说明静电平衡时电荷只分布在带电导体的外表面上。

利用静电平衡时净电荷只分布在导体壳外表面的这一性质，我们可让 D 一次次带正电后不断地跟 C 的内表面接触，使 C 的外表面电荷不断增多，C 的电势不断升高。一种静电起电机——范德格喇夫起电机（见本章导图 2）就是利用这个道理设计的。球壳直径约 1 米的静电起电机可以使球壳的电势高达  $10^6$  伏以上，用这种方法产生的高电势可以加速带电粒子。

### 静电屏蔽

不少电器设备装有金属外壳（罩），用以屏蔽电器设备，例如电视显像管荧光屏后面的管体外表面就涂有导电层（本章导图 3），为的是使它的内部不受外界电场的干扰。为什么金属外壳能起到屏蔽作用呢？因为电场中的导体（不论是实心的还是空心的）处于静电平衡时，导体内部的场强都为零，因此外电场对其内部空间不发生任何影响。图 7-19 用电场线表示仪器金属外壳的屏蔽作用，壳外的带电体产生的电场可使金属外壳感应带电，但电场线不能穿入金属壳内。

图 7-19

图 7-20

用一个空腔导体把外电场遮住，使其内部不受外电场影响，这种静电屏蔽只能阻止外电场对其内部的影响，而不能阻止其内部带电体对外界的影响。如果把导体外壳接地，即使内部有带电体存在，这时内表面的感应电荷与带电体电荷的代数和为零，而外表面的感应电荷将由于接地而流入大地，内部带电体对外也不产生任何影响。这种静电屏蔽就能隔离内、外电场的影响，如图 7-20 (a)、(b) 所示。

实际上常用金属网代替金属壳体，例如传送弱信号的连接线，校测电子仪器的屏蔽室。工人穿戴由金属丝网编织的均压服进行高压带电操作（见本章导图 1）就是利用静电屏蔽的道理。

### 阅读材料

#### 示波管的工作原理

示波管是示波器的核心部件。示波器是科学研究中的一种重要检测工具，在分组实验中我们将练习使用示波器，并用来测量电压。下面介绍示波管的工作原理。

示波管由电子枪、偏转电极和荧光屏等主要部件组成，内部抽成真空，它的结构示意图如图 7-10 所示。由电子枪发射的电子经 A、K 间的电场加速后，从金属板的小孔穿出，经过两对偏转电极打在荧光屏上。如果两对偏转电极上所加电压为零，则电子束在荧光屏上产生的亮斑将出现在屏的中央 0 处。如果在偏转电极  $Y_1$ 、 $Y_2$  上加一稳定电压  $U$ ，电子束将沿  $y$  方向发生偏转，亮斑的位置将出现在荧光屏上以 0 为原点的直角坐标系的  $(0, +y)$  或  $(0, -y)$  处。由于亮斑离 0 点的距离正比于偏转电压  $U$ ，在用示波器测量电压时，可将待测电压引起亮斑的偏移距离和经过校正的已知电压引起亮斑的偏移距离进行比较，在荧光屏上读出偏移距离的多少，就可计算出待测电压的大小。

图 7-21

如果在偏转电极  $Y_1$ 、 $Y_2$  上加一按正弦规律变化的交变电压，则荧光屏上的亮斑将以 0 点为中心沿  $y$  轴做简谐振动。振动周期等于交变电压的周期，振动的振幅（亮斑离 0 点的最大距离）决定于交变电压的最大值。

如果在示波管的偏转电极  $Y_1$ 、 $Y_2$  上不加电压，而在另一对偏转电极  $X_1$ 、 $X_2$  上加一稳定电压，就能使电子束沿与  $y$  方向垂直的  $x$  方向发生偏转，在荧光屏上产生的亮斑位置坐标将是  $(+x, 0)$  或  $(-x, 0)$ 。如果在偏转电极  $X_1$ 、 $X_2$  上加上如图 7-21 所示的一种特殊的交变电压，在一个周期的前半周期中，电压从负向最大值均匀变化增大到零，在后半周期中，电压以相同的变化快慢从零均匀变化增大到正向最大值，接着，电压又从负向最大值开始均匀增大。在以后每一周期中都重复同样的变化。这样，在示波管的荧光屏上可看到电子束产生的亮斑，在相等于电压变化的一个周期的时间内，从左端匀速地移动到右端连续地进行扫

描，所以加在偏转电极  $X_1$ 、 $X_2$  上的电压叫做扫描电压。

图 7-22

如果在偏转电极  $X_1$ 、 $X_2$  上加扫描电压的同时，在偏转电极  $Y_1$ 、 $Y_2$  上加一个按正弦规律变化的交变电压，则荧光屏上亮斑的运动将是沿  $y$  方向的简谐振动和沿  $x$  方向的匀速运动的合运动，如果  $y$  方向正弦交变电压的周期恰等于扫描电压的周期，这时在荧光屏上将出现一个正弦波形（图 7-22），这就是利用示波器可以观察交流电波形的原理。如果正弦交变电压的周期等于扫描周期的  $\frac{1}{n}$ ，则在荧光屏上就出现  $n$  个正弦波形。

### 本章学习要求

1. 理解电场力做功跟电荷电势能变化的关系。
2. 理解等势面。
3. 理解匀强电场中电势差和电场强度的关系。
4. 掌握带电粒子在匀强电场中运动的规律。
5. 初步学会用示波器测电压。

### 复习题

1. 选择题（以下各小题中只有一个正确答案）

(1) 在静电场中，点电荷从 A 点移到 B 点，电势能的变化为零，则 [ ]

- (A) A、B 两点的场强一定相等。
- (B) 该电荷一定沿同一等势面移动。
- (C) A、B 两点的电势一定相等。
- (D) 该电荷受到的电场力总是跟移动方向相垂直。

(2) 关于场强和电势的关系，下列说法中正确的是 [ ]

- (A) 场强为零的地方，电势一定为零。
- (B) 场强大的地方，电势一定高。
- (C) 沿场强方向，电势一定逐渐减小。
- (D) 沿电势降低的方向，场强一定逐渐减小。

(3) 两块平行金属板相距为  $d$ ，两板间的电势差保持固定不变，有一电荷位于两板间的匀强电场中受到电场力的大小为  $F$ 。若将两板间距增大到  $2d$ ，则这电荷受到的电场力的大小变为 [ ]

- (A)  $\frac{1}{4}F$ 。
- (B)  $\frac{1}{2}F$ 。
- (C)  $2F$ 。
- (D)  $4F$ 。

(4) 关于等势面，下列说法中错误的是 [ ]

(A) 若相距为  $d$  的两个等势面的电势差为  $U$ ，则两个等势面间的场强一定等于  $U/d$ 。

- (B) 任意两个等势面一定不会相交。
- (C) 在同一等势面上移动电荷电场力一定不作功。
- (D) 等势面一定跟电场线垂直。

2. 选择题 (以下各小题中有两个或两个以上的正确答案)

- (1) 下列说法中正确的是 [     ]
- (A) 电场中电场线上任一点的切线方向都跟该点的场强方向一致。
  - (B) 电场中电势相同的点, 其场强也一定相同。
  - (C) 沿电场线方向各点的电势逐渐降低。
  - (D) 在电场力作用下, 正电荷一定从电势高的地方向电势低的地方移动。

(2) 在电场中, 已知 A 点的电势高于 B 点的电势, 则以下说法中正确的是 [     ]

- (A) 把负电荷从 A 点移到 B 点, 克服电场力做功。
- (B) 把负电荷从 A 点移到 B 点, 负电荷的电势能增大。
- (C) 把正电荷从 A 点移到 B 点, 电场力做功。
- (D) 把正电荷从 A 点移到 B 点, 正电荷的电势能增大。

(3) 一价氢离子和二价氦离子的混合物从静止开始经过同一加速电场加速后垂直进入同一偏转电场, 则它们离开偏转电场时 [     ]

- (A) 两者具有相等的动能。
- (B) 氦离子具有较大的动能。
- (C) 两者的偏转量相等。
- (D) 氦离子的偏转量较大。

3. 干燥空气能够承受的最大电场强度是  $3 \times 10^6$  伏/米, 超过这一数值, 空气就要发生放电现象。如果在空气中有两块相距为 5 毫米的平行金属板, 则这两块金属板能加的最大电压为多少?

图 7-23

4. 如图 7-23 所示, 两根长度都为  $l$  的丝线, 上端悬于同一点  $O$ , 下端分别固定两个质量均为  $m$  的小球  $A$ 、 $B$ , 今使两个小球带上等量异种电荷  $+q$ 、 $-q$ , 同时沿水平方向加一场强为  $E$  的匀强电场, 在电场力作用下  $A$ 、 $B$  两球的距离恰等于  $l$ , 处于平衡, 求场强  $E$  的大小。

图 7-24

5. 如图 7-24, 在电场中的一条电场线上有  $A$ 、 $B$  两点, 若将电量  $q=2.0 \times 10^{-7}$  库的负电荷从  $A$  点移到  $B$  点, 电荷克服电场力做功  $4.0 \times 10^{-4}$  焦。那么, (1) 电场线方向如何? (2) 将负电荷  $q$  从  $A$  移到  $B$  的过程中, 电荷的电势能增加 (或减少) 了多少? (3) 如果在这条电场线上另有一点  $C$ , 已知  $A$ 、 $C$  间电势差为 500 伏,  $U_A > U_C$ , 那么, 在把上述负电荷从  $B$  点移到  $C$  点的过程中, 电场力对电荷做功还是电荷克服电场力做功? 所做的功为多大?

6. 如图 7-25, 已知板长  $L=10$  厘米, 能量为 1000 电子伏的电子水平射入场强  $E=4 \times 10^3$  伏/米的匀强电场中, 那么, 电子离开电场时, (1) 偏转量  $y$  等于多大? (2) 偏转角  $\varphi$  多大?

图 7-25

图 7-26

7. 两块水平放置的金属板长为  $l$ ，间距为  $d$ ，板间电压为  $U_0$ 。今有一质量为  $m$  的带电油滴，以某一水平速度从两板中央进入匀强电场，如图 7-26 所示，恰能沿直线穿出电场。若将电压增大到  $1.5U_0$ ，其他条件不变，则这油滴恰能从上板边缘飞出电常求：(1) 带电油滴的电量；(2) 带电微粒进入电场时的初速度；(3) 要使带电油滴恰能从下板边缘飞出电场，两板间的电压。

图 7-27

8. 图 7-27 是用来使带正电的粒子加速和偏转的装置。如果让一价氢离子和二价氦离子的混合物进入，它们在经过同一电场加速后在同样的电场里偏转，是否会分成两股，并在荧光屏上不同的地方产生两个亮点？

## 直流电路

### 1. 数字式多用表

### 2. 集成电路块

### 3. 电气化铁路

在必修课中我们已经学习了电路的基本连接方法和直流电路的规律。这一章我们要着重讨论直流电路规律的应用。

## 一、欧姆定律

### 欧姆定律

一段导体中的电流（强度）跟导体两端的电压成正比，跟导体的电阻成反比。

这一实验结论叫做欧姆定律。欧姆定律可写成公式

$$I = \frac{U}{R}。$$

对于一段电阻恒定的导体，随着它两端所加电压的增大，导体中通过的电流将成正比地增大。这一关系也可用 I-U 图象（又称伏安特性曲线）来描述，这是一条通过坐标轴原点的倾斜直线（图 8-1），表明导体电阻是不变的，直线的斜率等于导体电阻的倒数  $\frac{1}{R}$ 。

图 8-1

### 分压和分流

我们知道，在串联电路中，通过各部分电路的电流都相等，因此，串联电路中各部分电路两端的电压跟它的阻值成正比， $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ ，也就是说，阻值较大的电阻两端电压较大，阻值较小的电阻两端的电压较小，这就是串联电阻的分压作用。

图 8-2

根据串联电阻的分压作用，可将滑动变阻器作为分压器用，在图 8-2 所示电路中，滑动端 P 把可变电阻 R 分成两部分。滑动变阻器的固定端 a 和滑动端 P 之间的电压  $U_{ap}$  随 P 点位置的改变而改变。当 P 点滑向 a 端时，aP 间电阻减小， $U_{ap}$  也随着减小；当 P 点滑向 b 端时，aP 间电阻增大，电压  $U_{ap}$  也随着增大。

我们可以利用这种分压电路来获得实验所需的一定电压或连续可调的电压。

我们知道，在并联电路中，各支路两端的电压相等。因此，通过各支路的电流跟它的电阻成反比， $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ ，也就是说，电阻较大的支路中通

过的电流较小，电阻较小的支路中通过的电流较大，这就是并联电阻的分流作用。

[例题]

如果有三个电阻  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  并联，已知  $R_1=3$  欧， $R_2=6$  欧， $R_3=10$  欧，通过并联电路的总电流为  $I$ ，那么，每个电阻通过的电流各为多大？

解：可以先算出三个电阻中的任意两个电阻的等效电阻，然后再用并联电路的分流原理求解。

电阻  $R_1$  和  $R_2$  的等效电阻是

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{3 \times 6}{3 + 6} \text{ 欧} = 2 \text{ 欧} ,$$

通过  $R_1$ 、 $R_2$  并联支路的电流为  $I_{12}$ ，通过  $R_3$  支路的电流为  $I_3$

$$I_3 = I - I_{12} , \quad \frac{R_3}{R_{12}} = \frac{I_{12}}{I - I_{12}} ,$$

$$I_{12} = \frac{R_3}{R_{12} + R_3} I = \frac{10}{2 + 10} I = \frac{5}{6} I_0$$

所以 
$$I_3 = I - \frac{5}{6} I = \frac{1}{6} I_0$$

又 
$$\frac{I_1}{I_{12} - I_1} = \frac{R_2}{R_1} ,$$

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_{12} = \frac{6}{3 + 6} \times \frac{5}{6} I = \frac{5}{9} I ,$$

$$I_2 = I_{12} - I_1 = \left( \frac{5}{6} - \frac{5}{9} \right) I = \frac{5}{18} I ,$$

这个题也可以直接由并联电路电流跟电阻成反比的关系来求解。

$$\begin{aligned} \text{因为 } I_1 : I_2 : I_3 &= \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} = \frac{1}{3} : \frac{1}{6} : \frac{1}{10} = \frac{10}{30} : \frac{5}{30} : \frac{3}{30} \\ &= 10 : 5 : 3. \end{aligned}$$

所以

$$I_1 = \frac{10}{18} I = \frac{5}{9} I ,$$

$$I_2 = \frac{5}{18} I ,$$

$$I_3 = \frac{3}{18} I = \frac{1}{6} I_0$$

本题还可以用其他方法来解。

### 伏安法测电阻

根据欧姆定律可以得出  $R = \frac{U}{I}$  一式，这是电阻的定义式。如果用电压表测出电阻两端的电压，用电流表测出通过电阻的电流，即可求出电阻值。这就是伏安法测电阻。

伏安法测电阻原理虽然很简单，但由于电压表的内阻不是无限大，电流表的内阻不是零，把它们同时接入电路中，会给测量结果带来误差。把电压表和电流表接入电路测量电阻，有两种连接方法，如图 8-3 (a) 和 (b) 所示。

图 8-3

用图 8-3 (a) 接法（称电流表的外接法）测电阻时，电压表上指示的是电阻两端的电压  $U_R$ ，这是准确的。但由于电压表的分流作用，电流表上指示的电流不是通过电阻的电流  $I_R$ ，而是通过电阻的电流  $I_R$  和通过电压表电流  $I_V$  的总和，电流表指示的电流值  $I=I_R+I_V$ ，要比通过电阻的电流  $I_R$  大一些，这样，计算出的电阻值要比真实的电阻值  $R$  小一些。

用图 8-3 (b) 接法（称电流表的内接法）测电阻时，电流表上指示的是通过电阻的电流  $I_R$ ，这是准确的。但由于电流表的分压作用，电压表上指示的不是加在电阻两端的电压  $U_R$ ，而是加在电阻上的电压  $U_R$  和电流表上电压  $U_A$  的总和，电压表指示的电压值  $U=U_R+U_A$ ，要比加在电阻上的电压  $U_R$  大一些，这样，计算出的电阻值要比真实的电阻值  $R$  大一些。

如果待测电阻的阻值比电压表的电阻小得越多，选用图 8-3 (a) 接法时，测得的电阻值就越接近于真实值，因此测量阻值较小的电阻时应选用图 8-3 (a) 接法。如果待测电阻的阻值比电流表的电阻大得越多，选用图 8-3 (b) 接法时，测得的电阻值就越接近于真实值，因此测量阻值较大的电阻时应选用图：8-3 (b) 接法。

### 串联、并联电路中的功率分配

串联电路的主要特点是各部分电路中的电流都相等，所以串联电路各部分电路上的电功率跟电路的电阻成正比。即

$$P=UI=I^2R$$

电路中连接用电器的导线和用电器总是串联的，为了保证用电器得到足够电压，能正常工作，连接用电器的导线电阻必须足够小，使导线上的电压损失和消耗的电功率尽可能小。

并联电路的主要特点是并联各支路两端的电压相等，所以并联各支路上的电功率跟各支路的电阻成反比。即

$$P = UI = \frac{U^2}{R}。$$

在照明电路中，为了使各灯泡能独立工作，各灯泡都是并联在干路上的，阻值越小的灯泡，电功率越大。

### 练习二十七

1. 电阻  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  串联在电路中，通电时每个电阻上的电压  $U$  跟电流  $I$  的关系如图 8-4 所示。由图可知，各个电阻的阻值由大到小的次序是怎样的？各个电阻上发热而消耗的功率哪个最大？哪个最小？

图 8-4



图 8-5

2. 电阻  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  并联在电路中，通电时每个电阻中通过的电流  $I$  跟电压  $U$  的关系如图 8-5 所示。由图可知，各个电阻的阻值由大到小的次序是怎样的？各个电阻上的热功率哪个最大？哪个最小？

3. 在端电压保持不变，不计输电导线电阻的情况下，对室内开一盏电灯和同时开规格相同的四盏电灯相比较。正确的是 [ ]

- (A) 开一盏灯和开四盏灯，每盏灯中通过的电流相同。
- (B) 开一盏灯时干路上的总电流仅是开四盏灯时总电流的四分之一。
- (C) 开的灯数越多，总电阻越小，消耗的总功率越大。
- (D) 开的灯数越多，总电阻越大，消耗的总功率越大。

4. 三个电阻  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$ ，如图 8-6 连接，通电后消耗的功率相等，求  $R_1 : R_2 : R_3$ 。

图 8-6

图 8-7

5. 如图 8-7 所示电路中，保持 AB 两端电压 2 伏不变，图中滑动变阻器阻值为  $R$ ，虚线左面是一个分压电路，当滑动端 P 位于变阻器中点时，分压值  $U_{PB}$  恰好等于 1 伏，当虚线右面接上负载电阻  $R$  后，下列四种情况中，可使负载电阻  $R$  上获得的电压最接近于 1 伏的是 [ ]

- (A)  $R = 200$  欧， $R = 100$  欧。
- (B)  $R = 2 \times 10^5$  欧， $R = 4 \times 10^5$  欧。
- (C)  $R = 200$  欧， $R = 4 \times 10^5$  欧。
- (D)  $R = 2 \times 10^5$  欧， $R = 200$  欧。

### 金属的电阻率跟温度有关

由实验数据描绘出的白炽灯泡的伏安特性曲线不是一条直线（图 8-8），当电压较大时，图线发生了弯曲。表明随着灯丝两端电压增大，通过灯丝的电流不再是成正比增大，而是增大得较慢，这是因为当电流  $I$  增大后，单位时间内的焦耳热  $I^2R$  增大很多，灯丝温度明显升高，使灯丝电阻变大。

图 8-8

图 8-9

研究表明，在温度变化不大的范围内，几乎各种金属的电阻率都随温度作线性变化（图 8-9），即

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

$$\rho_t - \rho_0 = \rho_0 \alpha t.$$

式中  $\rho_0$  是 0 时的电阻率， $\rho_t$  是  $t$  时的电阻率，比例常数  $\alpha$  叫做

电阻温度系数，单位是  $\frac{1}{C}$ 。 值的大小跟金属性质有关，如铜为  $0.0039 \frac{1}{C}$ ，钨为  $0.0045 \frac{1}{C}$ 。

已知钨在  $0$  时的电阻率  $\rho_0 = 4.89 \times 10^{-8}$  欧·米，当温度升高到  $2000$  时，钨的电阻率  $\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t) = 4.89 \times 10^{-8}(1 + 0.0045 \times 2000)$  欧·米  $= 4.89 \times 10^{-7}$  欧·米，钨的电阻率增大为原来的  $10$  倍！可见，白炽灯泡中由于钨丝温度的升高对它的电阻影响之大，所以白炽灯泡的伏安特性曲线不是直线。

## 二、闭合电路的欧姆定律

我们知道电源是把其他形式的能转化为电能的装置。电源的电动势是表示电源把其他形式的能转化为电能本领大小的物理量。图 8 - 10 的闭合电路中，电键闭合后，正电荷自电源的正极经过外电路流向负极，而电源把流入负极的正电荷经过内电路移送到正极，使电源正极总是保持较高的电势。

下面我们从能量转化和守恒的观点来分析。

闭合电路中的电流为  $I$  时，在时间  $t$  内，消耗在外电阻  $R$  上的电能  $W_{外} = I^2 R t$ ，消耗在内电阻  $r$  上的电能为  $W_{内} = I^2 r t$ 。消耗的总电能为  $W = W_{外} + W_{内}$ ，即

$$W = I^2 R t + I^2 r t = (IR + Ir) I t。$$

电路中消耗的电能是由电源提供的能量转化来的，因此要在电路中维持单位电流，在单位时间内电源必须提供的能量是

$$\frac{W}{I t} = IR + Ir。$$

上式中  $\frac{W}{I t}$  就是电源电动势。从能量转化的观点看，电动势表示电源在电路中维持单位电流时所提供的功率，也表示电路中通过单位电量时电源所提供的能量，反映了电源把其他形式的能量转化为电能本领的大小。电动势在数值上等于闭合电路中内、外电路上的电压之和

$$= IR + Ir。$$

由上式可得

$$I = \frac{\quad}{R + r}。$$

这表示，闭合电路中的电流（强度） $I$  跟电源电动势成正比，跟电路中的总电阻（ $R + r$ ）成反比。这就是闭合电路的欧姆定律。

1. 图 8-10

2. 图 8-11

[例题 1]

如图 8 - 11 所示电路，当闭合电键  $K$  后，电流表和电压表的示数将如

何变化？

解：从图中可以看出电流表是测量通过  $R_0$  的分电流，电压表是测量端电压  $U$ 。闭合电键  $K$  后，电源电动势 内电阻  $r$  均不变，外电路电阻减小，总电流  $I = \frac{E}{R+r}$  增大，端电压  $U = E - Ir$ ， $r$  不变， $I$  增大， $U$  减小，电压表示数变校因端电压  $U$  减小，电阻  $R_0$  不变，所以通过  $R_0$  的电流将减小，电流表示数变小。

[例题 2]

如图 8 - 12 所示电路，当调节滑动变阻器  $R_2$  的滑动端  $P$  向上移动时，图中各电表的示数有何变化？

解：从图中可以看出电流表  $A_1$  测量的是总电流  $I$ ，电流表  $A_2$  是测量通过滑动变阻器  $R_2$  的分电流  $I_2$ ，电压表  $V_1$  测量的是  $R_1$  两端的电压  $U_1$ ，电压表  $V_2$  是测量  $R_2$ 、 $R_3$  两端的电压  $U_2$ ，电压表  $V_3$  则测量路端电压  $U$ 。

图 8-12

当滑动变阻器的滑动端  $P$  向上移动时， $R_2$  的阻值增大，外电阻

$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$  增大，总电流  $I = \frac{E}{R+r}$  减小。电流表  $A_1$  的示数减小。路端电压  $U = E - Ir$  增大，电压表  $V_3$  的示数增大。由于  $R_1$  不变，电压  $U_1 = IR_1$  随  $I$  的减小而减小，电压表  $V_1$  的示数减小。电压  $U_2 = U - U_1$  因  $U$  增大而  $U_1$  减小，所以  $U_2$  增大，电压表  $V_2$  的示数增大。由于  $U_2$  和  $R_2$  同时增大，不能用  $I_2 = \frac{U_2}{R_2}$  直接判断  $I_2$  的变化情况，而可根据  $I_2 = I - I_3 = I - \frac{U_2}{R_3}$  来判断，因  $U_2$  增大而  $R_3$  不变， $I_3$  一定增大，而  $I$  减小，所以  $I_2$  是减小的，电流表  $A_2$  的示数减小。

要注意，闭合电路的欧姆定律和部分电路欧姆定律的关系是整体和局部的关系。从整体看，电路中的总电流归根到底是由电源及外电路的连接方式决定的，在电源一定的情况下，一般认为电源电动势和内电阻是不变的。因此只要外电路中某一处的电阻发生变化，整个电路中的电流及电压分配都要发生变化。

练习二十八

1. 在图 8 - 13 所示电路中，当滑动变阻器的滑片  $P$  向右滑动时，则下列说法中正确的是 [ ]

- (A) 电流表  $A$  和电压表  $V_1$  的示数增大，电压表  $V_2$  的示数减小。
- (B) 电流表  $A$  和电压表  $V_2$  的示数增大，电压表  $V_1$  的示数减小。
- (C) 电流表  $A$  和电压表  $V_2$  的示数减小，电压表  $V_1$  的示数增大。
- (D) 电流表  $A$  的示数增大，电压表  $V_1$  和  $V_2$  的示数减小。

图 8-13

图 8-14

2. 在图 8 - 14 所示的电路中,  $r$  是电源的内电阻,  $R_1$  和  $R_2$  是外电路中的电阻, 如果用  $P_r$ 、 $P_1$  和  $P_2$  表示电阻  $r$ 、 $R_1$  和  $R_2$  上所消耗的功率, 当  $R_1=R_2=r$  时,  $P_r$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  等于 [ ]

- (A) 1 : 1 : 1。
- (B) 2 : 1 : 1。
- (C) 1 : 4 : 4。
- (D) 4 : 1 : 1。

3. 如图 8 - 15 所示电路中, 电源电动势为  $\mathcal{E}$ , 内阻为  $r$ , 当滑片  $P$  在  $R$  上左右移动时, 则下列说法中正确的是 [ ]

- (A) 电压表读数在 0 和  $\mathcal{E}$  之间变化。
- (B) 电压表读数在 0 和  $\mathcal{E} R / (R + r)$  之间变化。
- (C) 电流表读数在  $\frac{\mathcal{E}}{R + r}$  和  $\frac{\mathcal{E}}{r}$  之间变化。
- (D) 电流表读数在 0 和  $\frac{\mathcal{E}}{r}$  之间变化。

图 8-15

图 8-16

4. 如图 8 - 16 所示电路中, 电池组电动势  $\mathcal{E} = 8$  伏, 内电阻  $r = 1$  欧, 外电路有三个电阻,  $R_1 = 4.5$  欧、 $R_2 = 2$  欧、 $R_3 = 3$  欧。求: (1) 干路中的电流和支路中的电流; (2) 电池组的功率及内电阻上消耗的功率。

5. 现有电动势为 1.5 伏, 内电阻为 1 欧的电池若干个, 每个电池允许输出的电流为 0.1 安, 又有不同阻值的电阻可选作分压电阻。试设计一种电路, 使额定电压为 6 伏、额定电流为 0.1 安的用电器正常工作。画出电路图, 并标明分压电阻的阻值。

6. 电源在正常工作时, 允许通过的最大电流和端电压的乘积  $UI$ , 叫做电源的额定输出功率。某电源的额定输出功率为 360 瓦, 这时通过电源的电流为 5 安。现有额定电压为 36 伏、额定功率为 30 瓦的灯泡若干只, 要使灯泡正常发光, 应该怎样把它们接入电路? 试画出电路图。

7. 如图 8-17 所示, 可变电阻  $R_2$  的阻值调到 2 欧处,  $R_1$  为 4 欧, 电源内阻  $r$  为 1 欧。当电键  $K$  闭合时, 电源消耗的总功率为 16 瓦, 输出功率为 12 瓦, 这时小灯泡恰能正常发光。求: (1) 小灯泡的额定电压和额定功率; (2) 当  $K$  断开后, 为使小灯泡仍能正常发光, 可变电阻  $R_2$  的阻值应调节到多大?

图 8-17

图 8-18

8. 如图 8-18 所示的电路中, 已知电源电动势  $\mathcal{E} = 30$  伏, 内阻  $r = 0.5$  欧,  $R_1 = 5$  欧,  $R_2 = R_3 = 10$  欧,  $R_4 = 3.5$  欧。求: (1) 外电阻  $R_{AB}$ ; (2)  $R_1$  两端电压  $U_1$ ; (3) 电源内损耗的功率。

阅读材料

## 分压器的负载电压

电位器是一个可以连续改变电压的装置。设它的总电阻为  $R$ ，长度为  $l$ ，滑动端  $P$  到  $B$  端的长度为  $x$ ，设在  $PB$  间接一负载电阻  $r$ ，我们来研究  $r$  两端的电压跟  $x$  有什么样的关系。如图 8-19，电位器每单位长度

的电阻为  $\frac{R}{l}$ ， $U_r = U_{PB} = I_1 r = I_2 \frac{R}{l} x$ 。

$$U = U_{AP} + U_{PB} = I \frac{R}{l} (l-x) + I_2 \frac{R}{l} x,$$

而  $l = l_1 + l_2$ ，

可以解得

$$I_1 = \frac{l x}{r l^2 + R l x - R x^2} U,$$

$$U_r = \frac{r l x}{r l^2 + R l x - R x^2} U。$$

可见，负载电压  $U_r$  是  $x$  的函数，但不是线性函数。

当  $x=0$  时，即  $P$  在  $B$  点， $U_r=0$ ；

当  $x=l$  时，即  $P$  在  $A$  点， $U_r=U$ ；

当  $r \ll R$  时， $U_r \approx \frac{r l x}{R l x - R x^2} U = \frac{r l}{R(l-x)} U$ ， $U_r$  是较小的；

当  $r \gg R$  时， $U_r \approx \frac{r l x}{r l^2} U = \frac{x}{l} U$ ，这就是说，只有当负载电阻  $r$  比电位器电阻  $R$  大得多时，负载电压才能是一个均匀变化的电压。

图 8-19

### 本章学习要求

1. 掌握欧姆定律。
2. 理解串联电路的分压作用和并联电路的分流作用。
3. 理解串联、并联电路的功率分配。
4. 掌握闭合电路的欧姆定律。

### 复习题

1. 选择题（以下各小题中只有一个正确答案）

(1) 有位同学在用下面的电路（图 8-20）测灯泡电阻的实验中，误将电流表、电压表的连接位置互换，则 [ ]

- (A) 电压表有读数，电流表读数几乎为零，灯泡不亮。
- (B) 只有电流表烧毁。
- (C) 只有电压表烧毁。
- (D) 灯泡和电流表都烧毁。

(2) 某学生在做实验时，当他把如图 8-21 所示电路的电键  $K$  闭合后，电流表上无读数，于是他把电压表接到电源两端检查，电压表上读

数为 6 伏，若把这一电压表接在定值电阻  $R_0$  两端，则读数为零。若把电压表接在灯泡 L 两端，则读数为零，若把电压表接在电流表两端，读数为 6 伏，已知导线和电键都是良好的。由此可判定 [ ]

- (A) 电源没有电。 (B) 电流表没有接通。  
(C)  $R_0$  处发生断路。 (D) 灯泡 L 的灯丝已断。

(3) 如图 8-22 所示，直线 1、2 分别是电源 1、2 的端压  $U$  和电流  $I$  的关系图象。由图象可知，电源的电动势  $\mathcal{E}_1$ 、 $\mathcal{E}_2$  和内阻  $r_1$ 、 $r_2$  的关系是 [ ]

- (A)  $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$ ,  $r_1 < r_2$  (B)  $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$ ,  $r_1 = r_2$ 。  
(C)  $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$ ,  $r_1 > r_2$  (D)  $\mathcal{E}_1 < \mathcal{E}_2$ ,  $r_1 < r_2$ 。

图 8-22

图 8-23

(4) 如图 8-23 所示的电路中，电池电动势为  $\mathcal{E}$ ，内阻为  $r$ ， $R_1$  和  $R_2$  是两个阻值固定的电阻，当滑动变阻器  $R$  的滑片向 a 点移动时，通过  $R_1$  的电流  $I_1$  和通过  $R_2$  的电流  $I_2$  将发生如下的变化 [ ]

- (A)  $I_1$  变大， $I_2$  变校  
(B)  $I_1$  变大， $I_2$  变大。  
(C)  $I_1$  变小， $I_2$  变大。  
(D)  $I_1$  变小， $I_2$  变校

(5) 如图 8-24 所示电路中，当滑动变阻器的滑动片 P 向 b 点移动时， [ ]

- (A) 电压表的读数增大，电流表的读数减小。  
(B) 电压表和电流表的读数均增大。  
(C) 电压表和电流表的读数均减小。  
(D) 电压表读数减小，电流表读数增大。

图 8-24

图 8-25

2. 选择题 (以下各小题中有两个或两个以上正确答案)

(1) 如图 8-25 所示，均匀金属丝圆环，弧长  $\overline{AB} = \overline{BC} = \overline{CA}$ ，每段圆弧金属丝的电阻为 1 欧，今在 C 点处断开，串联一个内阻为 1 欧，量程为 0.3 安的电流表，当将 A、B 两点接入电路后若电流表满偏，则 [ ]

- (A) A、B 两端的电压为 0.9 伏。  
(B) A、B 两端的电压为 0.3 伏。  
(C) 通过弧  $\overline{BC}$  的电流为 0.3 安。  
(D) 通过弧  $\overline{AC}$  的电流为 0.9 安。

(2) 图 8-26 所示，电流表 A 和电压表 V 对电路影响不计，当滑片 P 向右滑动时， [ ]

- (A) (a)、(b) 两图中，电压表读数均减小。
- (B) (a)、(b) 两图中，电压表读数均增大。
- (C) (a) 图中电压表读数增大，(b) 图中电压表读数减小。
- (D) (a) 图中电流表读数不变，(b) 图中电流表读数增大。

图 8-26

3. 如图 8-27 所示，甲、乙两地相距 6 千米，两地间架设两条电阻都是 6 欧的导线，当两条导线在甲、乙两地间某处发生短路时，接在甲地的电压表读数为 6 伏，电流表读数为 1.2 安，发生短路处距甲地的距离为多大？

图 8-27

图 8-28

4. 图 8-28 所示电路中，每节电池的电动势  $\mathcal{E} = 1.5$  伏，内电阻  $r = 0.5$  欧，定值电阻  $R_1 = 1$  欧， $R_3 = 3$  欧，滑动变阻器总阻值  $R_2 = 6$  欧，那么，(1) 要使电压表的读数分别是最大值和最小值，滑动变阻器的有效阻值应分别调节到多大？(2) 要使  $R_3$  上消耗的电功率最大，滑动变阻器有效阻值应调节到多大？此时  $R_3$  上的消耗功率为多大？

5. 图 8-29 所示电路中，电源电动势为  $\mathcal{E}$ ，内阻不计，负载电阻分别为  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$ ；求：(1) 流经电流表的电流  $I$ ；(2) 若将图中电源和电流表位置对调后，流经电流表的电流  $I'$  为多大。

6. 图 8-30 是电饭锅电路的示意图， $K$  是用感温材料制造的开关， $R_1$ 、 $R_2$  为电阻丝的电阻。电饭锅有两种工作状态，一种是加热状态，另一种是保温状态。(1) 试判断开关  $K$  断开和接通时，电饭锅分别处于哪种工作状态？请说明理由；(2) 如果  $R_1 = 4R_2$ ，保温时的电功率是加热时的电功率的几分之一？

7. 三个不同规格的小电珠 A、B、C 连接成图 8-31 所示的电路，这三个小电珠的规格分别是 A 为“2 伏，0.1 瓦”、B 为“1.5 伏，0.075 瓦”、C 为“1.5 伏，0.15 瓦”。电源电动势  $\mathcal{E} = 6$  伏，内阻  $r = 5$  欧，那么，(1) 应选用阻值为多大的变阻器？滑动端 P 调到 Pb 间电阻为多大时，恰能使三个小电珠都正常发光？(2) 当三个小电珠都正常发光时，电源在 1 分钟内有多少其他形式的能转化为电能？在电源内部有多少电能转化为内能？

图 8-31

图 8-32

8. 如图 8-32 所示电路，已知电源电动势  $\mathcal{E} = 6.3$  伏，内阻  $r = 0.5$  欧，固定电阻  $R_1 = 2$  欧、 $R_2 = 3$  欧，滑动变阻器  $R_3$  的总电阻是 5 欧，按下电键  $K$ ，调节滑动变阻器的滑动片 P，求通过电源的电流大小的变化范围。

## 磁场 电磁感应

### 1. 洛仑兹力实验

### 2. 中国第一台回旋加速器

### 3. 北京正负电子对撞机

电和磁有着密切的联系，电流的周围产生磁场，凡是有电流的地方，总是伴随着磁现象的存在。同样，磁场的变化会产生电流。也就是说，电和磁在一定条件下是可以相互转化的。发电机、电动机、变压器等电力装置，以及电话、电视和各种电子设备，都是电和磁相互转化的应用实例。

在必修课中我们初步学习了磁场的知识和电磁感应的规律，现在我们将进一步学习磁场对电流的作用力以及法拉第电磁感应定律的有关应用。

## 一、磁感强度

### 磁感强度

在必修课中，我们从磁场对通电导线有力的作用，初步建立了磁感强度的概念，并以此来定量地描述磁场。

磁场对电流的作用力不仅与电流的大小和通电导线的长度有关，而且还与电流跟磁场的方向有关。当导线的长度  $l$  和电流  $I$  一定时，如果通电导线跟磁场垂直，导线受到的磁场力  $F$  最大；如果通电导线跟磁场平行，导线受到的磁场力  $F$  为零。当通电导线跟磁场垂直时，如果导线长度  $l$  一定，电流  $I$  越大，导线受到的磁场力  $F$  也越大；如果电流  $I$  一定，导线  $l$  越长，导线受到的磁场力  $F$  也越大。在磁场中某一确定的地方，比值  $\frac{F}{Il}$  是一个定值，它反映了这个地方磁场的强弱程度，叫做磁场中该处的磁感强度  $B$ ，

$$B = \frac{F}{Il}。$$

磁感强度  $B$  是矢量，磁感强度的方向就是该点的磁场方向。磁感强度  $B$  的单位规定为特斯拉，简称特，符号是  $T$ 。如果在磁场中某处，垂直于磁场方向通以 1 安电流的长 1 米的导线受到的磁场力为 1 牛，则该处的磁感强度为 1 特。

### 磁感线

磁场中各处的磁感强度的大小和方向可以形象地用磁感线来描述。磁感线的疏密程度用以表示磁感强度的大小。理论上规定，在垂直于磁场方向的 1 平方米面积上穿过的磁感线条数跟那里的磁感强度（单位为特）的数值相同。磁感线上任一点的切线方向即为该点的磁场方向。

### 磁通量

穿过某个面的磁感线条数，叫做穿过这个面的磁通量（简称磁通），符号是  $\Phi$ 。



由于垂直于磁场方向的单位面积上的磁感线条数等于磁感强度  $B$ 。因此在匀强磁场中，垂直于磁场方向的某个面积  $S_0$  上穿过的磁通量  $\Phi = BS_0$ 。

图 9-1

磁通量 的单位规定为韦伯，简称韦，符号是  $Wb$ 。1 韦 = 1 特 · 米<sup>2</sup>。

如果平面  $S$  和匀强磁场的磁感强度不垂直，如图 9-1 所示，并设平面  $S$  的法线跟磁感强度的夹角为  $\theta$ ，则平面  $S$  垂直磁场方向的投影  $S_0 = S \cos \theta$ 。

所以通过  $S$  面的磁通量

$$\Phi = BS_0 = BS \cos \theta$$

从上式可知，当  $\theta$  从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  变化时，磁通量 从最大值减小到零。

### 练习二十九

1. 磁场中某点的磁感强度的方向，是 [ ]  
 (A) 通过该点的磁感线的切线方向。  
 (B) 放在该点的通电导线的受力方向。  
 (C) 放在该点的小磁针 N 极的受力方向。  
 (D) 放在该点的小磁针 S 极的受力方向。

2. 有位同学根据磁感强度的定义式  $B = \frac{F}{Il}$ ，认为：(1) 磁场中某处的磁感强度  $B$  跟磁场力  $F$  成正比，跟电流  $I$  和导线长度  $l$  的乘积  $Il$  成反比。(2) 通电导线在磁场中受到的磁场力  $F$  等于磁感应强度  $B$ 、电流  $I$  和导线长度  $l$  三者的乘积。这两种说法对不对？如果不对，错在哪里？

3. 磁感线和电场线有哪些相同点和不同点？

4. 长 0.1 米的导线，垂直于磁场方向放在匀强磁场内，当导线通以 6 安电流时，受到的磁场力为  $3 \times 10^{-1}$  牛，求磁感强度。

图 9-2

5. 把面积为 0.3 米<sup>2</sup> 的矩形线圈，放在磁感强度  $B$  为 0.2 特的匀强磁场内，开始时，线圈平面与磁场平行，如图 9-2 所示。那么，(1) 在线圈从图示位置绕  $OO'$  轴转过  $30^\circ$  的过程中，穿过线圈的磁通量的变化  $\Delta \Phi_1$  是多少？(2) 在线圈围绕  $OO'$  轴再转过  $30^\circ$  的过程中，穿过线圈的磁通量的变化  $\Delta \Phi_2$  是多少？

## 二、磁场对电流的作用力

### 安培力的大小

电流所受的磁场力通常叫做安培力。根据磁感强度的定义式  $B = \frac{F}{Il}$ ，在磁感强度为  $B$  的匀强磁场内，当长为  $l$ 、电流为  $I$  的导线垂直于磁场放

置时，受到的安培力  $F=IIB$ 。

图 9-3

如果导线中电流  $I$  的方向与磁感强度  $B$  的方向不垂直，而是成一角度  $\theta$ ，如图 9-3，这时通电导线受到的安培力

$$F=IIB\sin\theta。$$

当电流方向与磁场方向平行时，即  $\theta=0^\circ$  或  $180^\circ$  时， $\sin\theta=0$ ，导线受到的安培力为零。

#### 安培力的方向

通电导线在磁场中受到的安培力的方向跟导线中电流的方向和磁场的方向都有关，安培力总是垂直于电流  $I$  和磁感强度  $B$  决定的平面，可用左手定则来判断。

#### [例题 1]

两条平行长直导线通以同向电流时，会相互吸引。通以反向电流时，会相反排斥。试解释这一现象。

解：通电直导线周围产生的磁场中，磁感线是以直线电流为轴的一系列同心圆，它的方向由右手螺旋定则确定。另一通电导线处于这磁场中，受到的安培力方向由左手定则确定，如图 9-4 所示。由于左边的通电导线的磁场对右边通电导线有作用力，同时右边通电导线的磁场对左边通电导线也有作用力。当它们通以同向电流时，它们受到的安培力方向都是指向另一条通电导线的，所以表现为相互吸引。反之，当通以反向电流时，由于它们受到的安培力的方向都是背离另一条通电导线的，所以表现为相互排斥。

#### [例题 2]

利用如图 9-5 所示装置可以测定磁感强度。一个长方形线圈共绕 15 匝，底边  $bc$  长 5 厘米，挂在等臂天平的一个臂上，并使线圈的  $bc$  边水平地悬于某一匀强磁场中，线圈平面跟磁场垂直。先使天平保持平衡，然后在线圈内通入 0.5 安的电流，这时天平将不平衡，为使天平重新达到平衡需在右端盘内加入 37.5 克砝码。问：(1) 线圈中电流方向怎样？(2) 匀强磁场的磁感强度多大？

解：线圈通电流后， $ab$  边和  $cd$  边所受安培力是等值反向而平衡的，而  $bc$  边所受安培力方向应竖直向下，才会使天平失去平衡。由左手定则可判断线圈中的电流方向是  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。

图 9-4

图 9-5

根据平衡条件，合力矩为零，因天平两臂等长，所以作用于天平两端增加的力相等，

$$NIIB = \Delta mg,$$
$$\text{磁感强度 } B = \frac{\Delta mg}{NIl} = \frac{375 \times 10^{-3} \times 9.8}{15 \times 0.5 \times 0.05} \text{ 特} = 0.98 \text{ 特}。$$

#### [例题 3]

如图 9-6 所示，两条平行导轨组成的平面与水平面成  $30^\circ$  角，导轨

两端 M、N 间接一电动势为 3 伏、内阻为 0.5 欧的电源，垂直于导轨平面有一匀强磁场，当将长为 10 厘米、质量为 10 克、电阻为 1 欧的金属棒放在平行导轨上，金属棒恰能静止不动。那么，垂直于导轨平面的磁场方向向上还是向下？磁场的磁感强度多大？（导轨与金属棒间摩擦不计）

图 9-6

图 9-7

解：金属棒在导轨上处于平衡。它受到重力  $mg$ 、弹力  $N$  和安培力  $F$  的作用。因磁场垂直于导轨，安培力  $F$  的方向沿导轨向上，如图 9-7 所示。由左手定则，可判断磁场方向应垂直于导轨平面向下，根据平衡条件

$$mgsin\theta = IIB = \left(\frac{E}{R+r}\right)lB,$$

磁感强度  $B = \frac{(R+r)mgsin\theta}{Il} = \frac{1.5 \times 10 \times 10^{-3} \times 9.8}{2 \times 0.1 \times 3} \text{特} = 0.25 \text{特}。$

### 练习三十

1. 把一个通电线圈放入蹄形磁铁的两极间，在安培力作用下将发生转动。在图 9-8 所示的三种情况下，

图 9-8

- (1) 图 (a) 中线圈将怎样转动？
- (2) 图 (b) 中线圈从上往下看是逆时针转动的，磁铁哪边是 N 极？哪边是 S 极？
- (3) 图 (c) 中线圈从上往下看是逆时针转动的，线圈中电流方向怎样？

2. 如图 9-9 中，马蹄形磁铁用丝线悬于 O 点，在磁铁正下方，固定着一水平放置的长直导线。当导线中通以自左向右的电流时，蹄形磁铁将怎样运动？

图 9-9

图 9-10

3. 如图 9-10 所示，线圈内电流方向为 A B C D A。当接通电磁铁电路后，沿着轴  $OO'$  方向看，线圈将作顺时针方向转动还是逆时针方向转动？

4. 如图 9-11 所示，导线  $ab$  长 20 厘米，用平行悬线将  $ab$  水平挂起，两悬线间距为 10 厘米。沿水平方向垂直于纸面向里的匀强磁场的磁感强度  $B=0.5$  特。已知导线  $AB$  所受重力为 0.1 牛。为了使悬线不发生形变，导线内电流的方向和大小应如何？

5. 有一长  $L=0.5$  米，重  $G=1$  牛的直导线  $ab$ ，用两条等长的细导线水

平地挂在匀强磁场中，悬挂点为 c、d，c、d 在 X 轴上，当 ab 中通以电流后，沿 -Z 方向加磁感强度  $B=1.0$  特的匀强磁场，这时导线 ab 在悬线 ad、bc 与竖直方向成  $30^\circ$  角情况下处于平衡。如图 9-12 所示，求导线 ab 内通过电流的大小和方向。

6. 两平行光滑导轨相距  $L=0.1$  米，并与水平面成  $\theta=37^\circ$ ，竖直向下的匀强磁场的磁感强度  $B=0.2$  特。现将一个质量  $m=10$  克的导体棒 ab 与导轨相互垂直地搁在导轨上，如图 9-13 所示。为了使导体棒 ab 能静止在导轨上，导体棒内的电流的方向和大小各如何？

### 磁场对运动电荷的作用力

磁场对通电导体有作用力的微观原因是由于磁场对运动电荷有作用力，我们可以通过以下实验进行观察。实验装置如图 9-14 所示，在电子射线管两极间加上高电压后发射出电子束，在荧光板 P 上可显示出电子束运动的径迹。在不加磁场时，电子束沿直线前进，当把蹄形磁铁放到射线管旁边，电子束运动的径迹就发生了弯曲。这表明，运动电荷受到了磁场的作用力。通常把磁场对运动电荷的作用力叫做洛仑兹力。

研究表明，当带电量为  $q$  的粒子以速度  $v$  垂直进入磁感强度为  $B$  的匀强磁场中，这一运动电荷受到的洛仑兹力的大小

$$f=qvB。$$

式中如果电量  $q$  的单位是库，速度  $v$  的单位是米 / 秒，磁感强度  $B$  的单位是特，则洛仑兹力  $f$  的单位是牛。

洛仑兹力的方向始终垂直于速度  $v$  和磁感强度  $B$  所决定的平面，洛仑兹力  $f$ 、正电荷  $q$  的运动速度  $v$ 、磁感强度  $B$  这三者方向间的关系，可用左手定则表示。伸开左手，让磁感线垂直穿过手心，跟大拇指垂直的四指沿着正电荷运动的方向。那么，大拇指的指向就是洛仑兹力的方向。对于负电荷，例如电子，电子运动的方向与电流方向相反。在应用左手定则时要注意负电荷运动的反方向相当于电流方向。图 9-15(a)、(b) 分别表示在同一磁场中向同一方向运动着的正电荷和负电荷受到的洛仑兹力的方向。

如果带电粒子的速度方向跟磁场方向不垂直，而成一角度  $\theta$ ，可以把速度  $v$  分解为平行于磁感强度方向的分量  $v_{\parallel}=v\cos\theta$  和垂直于磁感强度方向的分量  $v_{\perp}=v\sin\theta$ ，如图 9-16 所示。

图 9-15

图 9-16

图 9-17

这时，洛仑兹力

$$f=qvB\sin\theta。$$

洛仑兹力的方向仍始终垂直于磁场和速度方向决定的平面。如图 9-17(a)、(b) 所示。

带电粒子以垂直于磁场方向的速度进入匀强磁场后，由于所受洛仑

兹力  $f$  的方向既跟  $v$  垂直又跟  $B$  垂直，因此粒子只能在  $f$  与  $B$  决定的平面内运动。由于  $f$  与  $v$  垂直，所以洛仑兹力只能改变速度的方向，不能改变速度的大小。这时，洛仑兹力作为向心力，带电粒子进入磁场后，将作匀速圆周运动。

带电粒子在磁场中作圆周运动可以用实验来观察，如本章导图 1 所示的是一台洛仑兹力演示仪，主要由一对环形线圈和一个电子射线管组成，射线管产生高速电子流，电子流可使管内低压气体发光，显示出电子的运动径迹，一对环形线圈位于电子射线管的前后面，使在中间形成一个匀强磁场，磁场方向垂直于电子射线的方向。线圈不通电时中间没有磁场，电子的径迹是一条直线。在线圈通电时产生足够强的磁场时，可使电子的径迹变成圆。

### 三、电磁感应现象

#### 电磁感应现象

让我们回忆以下几个典型的电磁感应现象的实验。实验表明：当导体  $ab$  在磁铁两极间向左或向右做切割磁感线运动时（图 9-18）；当磁铁插进线圈，或抽出线圈时（图 9-19）；当连接原线圈的电键  $K$  从断开到闭合时，或从闭合到断开时；在  $K$  闭合后，移动滑动变阻器滑片的过程中（图 9-20），跟线圈连接的灵敏电流计指针都会发生偏转。

图 9-18

图 9-19

图 9-20

上述实验事实可以概括为：只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就会产生感应电流。

这种由于磁通量变化而产生感应电流的现象叫做电磁感应现象。

#### 感应电流方向

在必修课中我们已经知道，在导体做切割磁感线运动的情况下，导体中产生的感应电流的方向可以用右手定则来判定；在通过闭合电路的磁通量发生变化的一般情况下，电路中感应电流的方向可由楞次定律来判断。

楞次定律的内容是：感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。

图 9-21

#### [例题 1]

如图 9-21 所示，在通电长直导线旁有一矩形线框  $abcd$ ，导线与线框在同一平面内，在下列各种情况下，线框中是否有感应电流？如有，方向如何？

- (1) 将线框向右平移。
- (2) 将线框向下平移。

(3) 以 ab 边为轴，向纸外转动  $90^\circ$  的过程中。

解：(1) 在直线电流右侧的磁场是垂直于纸面向里的，磁感线在 ab 边附近比在 cd 边附近要密。当线框向右平移时，穿过线框的磁通量减少，根据楞次定律，感应电流的磁场总要阻碍穿过线框的磁通量的减少，可知感应电流的磁场方向应是垂直于线框向里的，由右手螺旋定则判断出感应电流方向为 b a d c b。

图 9-22

(2) 当线框向下平移时，通过线框的磁通量没有变化，因此感应电流为零。

(3) 当以 ab 边为轴向外转时，为了便于判断磁通量的变化，我们作出俯视图如图 9-22 所示。可以看出通过线框的磁通量是逐渐减少的，根据楞次定律，感应电流的磁场方向应跟直线电流在线框内的磁场方向相同，以阻碍磁通量的减少。由右手螺旋定则判断出感应电流的方向为 b a d c b。

我们也可以用手定则判断感应电流方向，以第(1)种情况为例，ad 边和 bc 边没有切割磁感线，不产生感应电动势，ab 边、cd 边同时作切割磁感线的运动，同时产生感应电动势  $\mathcal{E}_1$ 、 $\mathcal{E}_2$ ，由于 ab 边靠近直线电流，在 ab 边所处位置的磁感强度比在 cd 边所处位置的磁感强度大，所以  $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$ ，由于线框的 ab 边和 cd 边做切割磁感线运动的方向相同，相当于两个电动势不相等的电池反接，感应电流方向由  $\mathcal{E}_1$  决定，为 b a d c b。其他两种情况同学们可自行分析判断。所得结果是否跟用楞次定律判断的结果相同？

#### [例题 2]

如图 9-23 (a) 所示，线圈 A、B 分别绕在铁心的两边，在下列几种情况下，线圈 B 中有没有感应电流？如有，方向如何？

图 9-23

(1) K 刚闭合时。

(2) K 一直闭合时。

(3) 调节变阻器滑片位置使电阻增大时。

解：线圈 B 中有没有电流、方向如何，决定于穿过线圈 B 中磁通量的变化情况，因此研究对象是线圈 B。

(1) 当 K 接通的瞬时，线圈 A 中的电流由零增大，电流方向如图 9-23 (b) 所示，在铁心内产生一个增强的磁场，使穿过线圈 B 的磁通量增加，方向如图，由楞次定律可知，线圈 B 内感应电流（感应电动势）的方向为 b a，通过灵敏电流计的电流方向是 a b。

(2) K 一直闭合时，穿过线圈 B 的磁通量没有变化，因此没有感应电动势，没有感应电流。

(3) 在 K 闭合的情况下，当 R 由小变大时，通过线圈 A 的电流减小，铁心内的磁场减弱。穿过线圈 B 的磁通量减少，线圈 B 内感应电流的磁场要阻碍磁通量的减少，由楞次定律可判断出线圈 B 内感应电流方向从 a b，通过灵敏电流计的电流是 b a。

思考：如果线圈 B 的绕向同图 9-23 (a) 所示相反，情况又如何？

### 练习三十一

1. 如图 9-24 所示，一匀强磁场的宽度为  $d$ ，若将一个边长为  $l$  的正方形线圈，以速度  $v$  匀速地通过磁场区域，已知  $d > l$ ，则导线框中没有感应电流的时间是 [ ]

- (A)  $d/v$ 。 (B)  $l/v$ 。  
(C)  $(d-l)/v$ 。 (D)  $(d-2l)/v$ 。

2. 如图 9-25 所示一条形磁铁自左向右穿过闭合线圈，在这过程中，电路内 [ ]

- (A) 始终有感应电流，方向为 a G b。  
(B) 始终有感应电流，方向为 b G a。  
(C) 先有 a G b 的感应电流，后有 b G a 的感应电流。  
(D) 先有 b G a 的感应电流，后有 a G b 的感应电流。

3. 如图 9-26 所示，铁心上绕有 A、B 两线圈，A 的两端接一平行导轨，导轨间有一匀强磁场垂直于纸面向里，导轨电阻不计，导体棒  $ab$  搁在导轨上，要使灵敏电流计内有从  $c$  到  $d$  的电流通过，则导体棒  $ab$  在导轨上应作 [ ]

- (A) 向左的匀速运动。 (B) 向右的匀速运动。  
(C) 向左的加速运动。 (D) 向右的加速运动。

图 9-26

图 9-27

4. 如图 9-27 所示电路中，将滑动变阻器  $R$  的滑动片向左移动，使电阻增大时，试确定通过灵敏电流计  $G_1$  和  $G_2$  的感应电流方向。

5. 如图 9-28 所示，闭合矩形线圈  $abcd$  上端由轻质弹簧挂住，在线圈同一平面的下方，有一含有电源的固定导线框，当电键  $K$  闭合瞬间，线圈内感应电流的方向如何？线圈将怎样运动？

6. 试判断下列各图中（图 9-29）线圈 B 中感应电流的方向。

图 9-28

图 9-29

## 四、法拉第电磁感应定律

上一节中，我们讨论了感应电流的方向，现在进一步来讨论感应电流的大小。我们知道，闭合电路中的电流是由电源电动势产生的，电磁感应现象中感应电流也是由感应电动势产生的，要知道感应电流的大小，首先要研究感应电动势的大小是由什么因素决定的。在上一节的实验里，如果我们加快导线在磁场中做切割磁感线运动的速度，也就是穿过闭合电路的磁通量变化得越快，感应电流就越大，表明了闭合电路中

产生的

感应电动势越大。磁通量变化的快慢可以由单位时间内磁通量的变化  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  来表示， $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  叫做磁通量的变化率。

实验和理论研究表明：电路中感应电动势的大小，跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比。这个结论叫做法拉第电磁感应定律。写成公式

$$= \frac{\Delta\phi}{\Delta t}。$$

如果磁通量变化率  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  用韦 / 秒做单位，感应电动势 用伏做单位，则比例常数  $k=1$ ，于是可写成

$$= \frac{\Delta\phi}{\Delta t}。$$

在实际工作中，为了获得较大的感应电动势，常采用多匝线圈，由于穿过每匝线圈的磁通量的变化率都相同，而  $n$  匝线圈就是由  $n$  个单匝线圈串联而成的，因此整个线圈中感应电动势就是单匝线圈的  $n$  倍，即

$$= n \frac{\Delta\phi}{\Delta t}。$$

图 9-30

导体做切割磁感线运动时，导体中产生的感应电动势的大小可以从法拉第电磁感应定律推导出来。如图 9-30 所示，匀强磁场的磁感强度为  $B$ ，有一线框  $abcd$  放在这个磁场中，它的平面跟磁感线垂直，有一段长度为  $l$  的导线，架在线框上组成了闭合电路，导线以速度  $v$  向右运动。在时间  $t$  内，导线从位置  $MN$  移到  $M'N'$ 。闭合电路面积的变化  $S=lv t$ 。磁通量变化  $\Delta\phi = B \Delta S$ 。

根据法拉第电磁感应定律  $\mathcal{E} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{B\Delta S}{\Delta t} = \frac{Blv\Delta t}{\Delta t} = Blv$ 。这就是

我们在必修课中学过的当  $B$ 、 $l$ 、 $v$  三者方向相互垂直，导体做切割磁感线运动时，产生的感生电动势的关系式。

导体做切割磁感线运动时，感应电动势公式  $\mathcal{E} = Blv$  也可以从能量守恒定律来推导。如图 9-30，当导线以速度  $v$  无摩擦地垂直于磁场向右运动时，导线内感应电流的方向是  $N \rightarrow M$ 。设这时导线中产生的感应电动势为  $\mathcal{E}$ ，电路中的感应电流为  $I$ ，导线受到的安培力大小为  $F=IlB$ ，方向由左手定则可知跟导线运动方向相反。为了使导线能匀速地做切割磁感线运动，必须有一个与  $F$  大小相等方向相反的外力作用在导线上。在这过程中，通过外力克服安培力做功，机械能转化为电能。

在时间  $t$  内，外力克服安培力做功

$$W_1 = Fs = Fvt = IlBvt。$$

转化的电能  $W_2 = \mathcal{E} It$ ，

根据能量的转化和守恒

$$W_1 = W_2。$$



代入后可得  $\quad =Blv$ 。

从法拉第电磁感应定律和能量守恒定律都能够推导出导体作切割磁感线运动时产生的感应电动势的关系式，表明了电磁感应现象中磁和电的转换是遵循能的转化和守恒的。同样，应用楞次定律也可以从能量转化的观点来认识电磁感应现象。我们以图 9-31 (a)、(b) 中的条形磁铁插入、抽出闭合线圈为例来作简单分析。把磁铁的 N 极插入线圈时，线圈内感应电流的磁场方向向上，线圈上端相当于 N 极，下端相当于 S 极，这时感应电流的磁场将阻碍磁铁的插入。把磁铁的 N 极抽出线圈时，线圈内感应电流的磁场方向向下，线圈上端相当于 S 极，下端相当于 N 极，这时感应电流的磁场将阻碍磁铁的抽出。总之，当磁铁插入或抽出线圈时，外力都要克服感应电流的磁场对磁铁的斥力或引力做功，这过程中机械能转化为回路的电能。

图 9-31

[例题 1]

图 9-32 中，abcd 是水平放置的矩形金属框，OO' 是金属导体棒，可在框上无摩擦地滑动。整个框放在竖直向下的匀强磁场中，磁感强度为 B，导体棒 OO' 长为 l，电阻为 R，ab、cd 的电阻都是 2R，ad、bc 的电阻不计。当使导体棒 OO' 向右以速度 v 匀速移动时，求：

图 9-32

- (1) 作用在导体棒 OO' 上的外力 F；
- (2) 移动过程中，导体棒 OO' 两端的电压；
- (3) 外力 F 的功率和整个电路由于发热而消耗的功率。

解：(1) 当导体棒 OO' 向右以速度 v 匀速运动时，棒中产生的感应电动势和感应电流分别是

$$= Blv, I = \frac{Blv}{R + \frac{2R}{2}} = \frac{Blv}{2R}。$$

作用在导体棒 OO' 上的安培力  $F_A = I l B = \frac{B^2 l^2 v}{2R}$ ，方向向左。

由于导体棒作匀速运动，外力跟安培力平衡。

外力  $F = F_A = \frac{B^2 l^2 v}{2R}$ ，方向向右。

- (2) 金属导体棒两端电压

$$U = IR_{外} = I \times \left(\frac{2R}{2}\right) = \frac{Blv}{2R} \times R = \frac{Blv}{2}。$$

- (3) 外力 F 的功率

$$P = Fv = \frac{B^2 l^2 v^2}{2R}。$$

整个电路消耗的功率

$$P_Q = I^2 \left(R + \frac{2R}{2}\right) = \frac{B^2 v^2 l^2}{4R^2} \times 2R = \frac{B^2 l^2 v^2}{2R}。$$

可见，外力克服安培力做功的功率等于内、外电阻消耗的总功率。

做切割磁感线运动的导体棒  $OO'$ ，就是这一闭合电路中产生感应电动势的电源。

[例题 2]

图 9-33 中，有一方向水平向外的匀强磁场，磁感强度  $B=0.2$  特，在垂直于磁场的竖直平面内放有金属平行导轨，导体棒  $ab$  可在导轨上无摩擦地滑动。棒  $ab$  的质量  $m=2 \times 10^{-3}$  千克，长  $L=0.2$  米，电阻  $R=0.2$  欧，导轨电阻不计， $g$  取  $10$  米/秒<sup>2</sup>，求导体棒  $ab$  下落的最大速度。

图 9-33

解：导体棒  $ab$  下落时做切割磁感线运动， $ab$  中就产生感应电动势，电路内就有电流， $ab$  中感应电流方向从  $b$  到  $a$ ，下落过程中， $ab$  受到向下的重力和向上的安培力作用，随着下落速度的增大，安培力也增大，向下的合力逐渐减小，下落的加速度也逐渐减小。只要导轨足够长，磁场范围足够大，安培力可增大到等于重力，这时导体棒  $ab$  所受合力为零，加速度也等于零，速度达到最大值  $v_M$ ，此后导体棒将以这一速度作匀速直线运动。当安培力等于重力时，

$$I_M LB = mg, I_M = \frac{M}{R}, \quad M = Bv_M L,$$

$$\text{得} \quad v_M = \frac{mgR}{B^2 L^2} = \frac{2 \times 10^{-3} \times 10 \times 0.2}{(0.2)^2 \times (0.2)^2} \text{米/秒} = 2.5 \text{米/秒}.$$

图 9-34

[例题 3]

电阻为  $R$  的矩形导线框  $abcd$ ，边长  $ab=l$ ， $ad=h$ ，质量为  $m$ ，自某一高度自由下落，通过方向垂直于纸面向里的水平匀强磁场，磁场宽度为  $h$ ，如图 9-34 所示。若线框恰好以恒定速度通过磁场，线框中产生的热量是多少？

解：线框中产生的热量  $Q=I^2 R t$ ， $I = \frac{Blv}{R}$ 。由于线框匀速地通过磁场

区域， $Bll = mg$ ，即  $\frac{B^2 l^2 v^2}{R^2} = mg$ 。产生感应电流的时间是从  $cd$  边进入磁场

到  $ab$  边离开磁场，即矩形导线框以速度  $v$  匀速下落  $2h$  的时间  $t = \frac{2h}{v}$ 。

$$Q = I^2 R t = \frac{B^2 l^2 v^2}{R^2} \times R \times \left(\frac{2h}{v}\right) = \frac{B^2 l^2 v}{R} \times 2h = 2mgh.$$

本题也可从能量转换的观点求解。线框从  $cd$  边进入磁场到  $ab$  边离开磁场下落  $2h$  距离的过程中，由于穿过线框的磁通量不断发生变化，产生感应电动势和感应电流，电流做的功等于线框中产生的热量，由于不考虑空气阻力，电流所做的功应等于线框在下落过程中机械能的减少，线框匀速通过磁场，动能不变，重力势能减少，即  $W=Q=2mgh$ 。

## 练习三十二

1. 如图 9 - 35 所示, 矩形线圈  $abcd$  的面积为  $0.2 \times 0.4$  米<sup>2</sup>, 共 100 匝。在磁感强度为 0.2 特的匀强磁场中, 以  $n=30$  / 秒的转速绕  $OO'$  轴匀速转动。那么,

(1) 从图示位置开始计时, 线圈在转过  $1/4$  周这段时间内的平均感应电动势为多大?

(2) 线圈转到什么位置时, 感应电动势最大? 感应电动势的最大值为多少?

图 9-35

图 9-36

2. 如图 9 - 36, 线圈面积  $S=10^{-2}$  米<sup>2</sup>, 共 10 匝, 电阻为 0.5 欧, 外接电阻  $R=4.5$  欧。线圈处在一个均匀变化的磁场中, 磁感强度在 0.2 秒内增加 0.1 特。求: (1) 线圈内的感应电动势; (2) 通过外电阻  $R$  的电流大小和方向。

3. 长和宽都为  $L$  的矩形线圈, 电阻为  $r$ , 要将它从磁感强度为  $B$  的匀强磁场中以速度  $v$  匀速拉出, 如图 9 - 37 所示。求: (1) 外力的功率; (2) 通过导线截面的电量。

图 9-37

图 9-38

4. 图 9 - 38 中,  $abcd$  是一个水平放置的 U 形金属框架,  $ab$  和  $cd$  两边都有足够的长度, 长度为  $L$  的金属杆  $ef$  放置在框架上, 它可以在框架上无摩擦地滑动, 框架电阻不计, 金属杆的电阻为  $R$ 。现沿垂直于框架平面的方向上加一恒定的匀强磁场, 它的磁感强度为  $B$ , 方向向下, 当以恒力  $F$  向右拉动金属杆  $ef$  平移时。那么, (1) 金属杆在滑动过程中的速度和加速度是怎样变化的? (2) 金属杆作匀速滑动的速度为多大?

5. 如图 9 - 39 所示, 匀强磁场的磁感强度为  $B$ , 方向垂直于纸面向里, 宽度为  $l$ , 具有一定电阻  $R$  的矩形线圈长为  $x$ , 宽为  $y$ , 已知  $x > l$ 。今用外力使线圈以速度  $v$  匀速拉出磁场。那么, (1) 外力做了多少功? (2) 线圈产生的热量是多少?

图 9-39

图 9-40

6. 如图 9 - 40 所示, 线框  $abcd$  每边长  $L=0.2$  米, 质量  $m=0.1$  千克, 电阻  $R=0.1$  欧。砝码质量  $M=0.14$  千克。匀强磁场的磁感强度  $B=0.5$  特, 磁场区域的宽度  $h$  等于线框边长  $L$ 。当砝码  $M$  从某一初位置释放, 线圈上升到  $ab$  边进入磁场时开始作匀速运动。求: (1) 线圈匀速上升的速度; (2) 在作匀速运动的过程中, 砝码对线框作了多少功, 有多少机械能转

化为电能。(g取10米/秒<sup>2</sup>)

### 阅读材料

#### 磁现象的电本质

19世纪20年代以前,人们普遍认为电现象和磁现象是彼此独立、互不相关的。发现电现象和磁现象之间存在着相互联系的事实,首先应归功于丹麦物理学家奥斯特。1820年7月21日他在题为《电流对磁针作用实验》的论文中,宣布了通电直导线会使附近的磁针发生偏转的发现。接着他又发表了第二篇论文,指出磁铁也可以使自由悬挂着的通电导线发生偏转。这在当时的物理界引起了极大的关注。

许多科学家在奥斯特实验的基础上,做了许多新的实验,法国物理学家安培将奥司特的发现推进到了新的更高的阶段。安培做了环形电流对磁针的作用,平行载流导线间的相互作用,以及环形电流间相互作用等实验,1820年9月,安培发表了确定直线电流附近小磁针偏转取向的右手螺旋定则。与此同时,安培还发表了地球的磁场是由于地球内部带正电物质中的从东向西绕地轴做圆周运动的环形电流所引起的设想。这一设想导致安培关于解释物质磁性的分子电流假说的建立,同年10月,安培提出了分子电流的假说,他认为,在原子、分子等物质微粒内部存在着一种环形电流——分子电流。分子电流使每个物质微粒都成为一个微小的磁体。这一假说很好地解释了各种磁现象,并揭示了磁现象的电本质,即磁铁的磁场和电流的磁场都是由电荷的运动产生的。1876年,美国物理学家罗兰用实验证实了旋转电荷会产生磁场,这就进一步揭示了磁现象的电本质。

#### 本章学习要求

1. 理解磁感强度。
2. 理解安培力的大小和方向。
3. 理解电磁感应现象。
4. 掌握法拉第电磁感应定律。

#### 复习题

1. 选择题(以下每一小题中只有一个正确答案)

(1) 一段通电导线放在匀强电场中,则 [ ]

- (A) 一定受到安培力的作用。
- (B) 安培力的方向跟电流方向相同。
- (C) 安培力的方向跟磁场方向相同。
- (D) 安培力的方向一定跟磁场方向垂直。

(2) 有一矩形线圈面积为S,置于匀强磁场中,线圈平面与磁感线之间的夹角为 ,匀强磁场的磁感强度为B,则穿过这线圈的磁通量为

[ ]

- (A)  $BS\sin$  。
- (B)  $BS\cos$  。

(C)  $\frac{B}{S \cos \theta}$ 。                      (D)  $\frac{S}{B \sin \theta}$ 。

(3) 关于感应电动势的下列说法中，正确的是 [     ]

(A) 只要穿过电路的磁通量发生变化，电路中就有感应电动势产生。

(B) 只有穿过闭合电路的磁通量发生变化，才有感应电动势产生。

(C) 穿过闭合电路的磁通量变化越大，感应电动势也越大。

(D) 穿过闭合电路的磁通量等于零的瞬间，感应电动势一定等于零。

(4) 如图 9 - 41 所示闭合线圈 abcd 在两个磁极间落下，当线圈 ab 边刚进入磁场和 cd 边将离开磁场时，线圈的加速度 [     ]

(A) 等于重力加速度 g。

(B) 大于重力加速度 g。

(C) 小于重力加速度 g。

(D) 进入时小于 g，离开时大于 g。

图 9-41

图 9-42

(5) 位于载流长直导线近旁有两根平行导轨 A、B，在 A、B 导轨上套有两段可以自由滑动的导线 C 和 D，平行导轨与长直导线在同一平面内，如图 9 - 42 所示。若用力使导线 D 向右运动，则导线 C 将

[     ]

(A) 保持不动。

(B) 向右运动。

(C) 向左运动。

(D) 先向右运动，后向左运动。

(6) 如图 9 - 43 所示，两个连在一起的金属圆环，粗金属环的电阻为细金属环电阻的  $\frac{1}{2}$ 。磁场垂直穿过粗金属环所在区域，当磁感强度随时间均匀变化时，在粗金属环内产生的感应电动势为  $\epsilon$ ，则 a、b 两点间的电势差为 [     ]

(A)  $\frac{1}{2} \epsilon$ 。

(B)  $\frac{1}{3} \epsilon$ 。

(C)  $\frac{2}{3} \epsilon$ 。

(D)  $\epsilon$ 。

图 9-43

图 9-44

2. 用粗细均匀的绝缘导线折成一正方形，正方形内有一用相同绝缘导线做成的内接圆，把它们放入均匀变化的磁场中，如图 9—44 所示。求正方形中感应电流  $I_1$  和圆环中感应电流  $I_2$  的比值。

3. 在图 9 - 45 中的绝缘台上，平行放置两条光滑金属导轨，间距 0.2 米，电阻不计。在平面和斜面上的导轨上分别放着质量  $m_1=m_2=0.01$  千克，电阻 R 都是 1 欧的导体棒。整个装置放在磁感强度  $B=1$  特，方向竖直向

上的匀强磁场中,为使  $m_1$  保持静止  $m_2$  应以多大的速度向什么方向运动?

图 9-45

4. 如图 9 - 46 所示, 一个边长  $L=0.1$  米。质量  $m=0.128$  千克, 电阻  $R=0.2$  欧的正方形线圈, 从  $H=5$  米高处自由下落, 然后进入一个宽度为  $h=0.1$  米的匀强磁场区域, 进入磁场后线圈恰好做匀速运动。求: (1) 磁感强度  $B$  的大小; (2) 线圈穿过磁场过程中, 感应电流所做的功。(  $g$  取  $10$  米 / 秒<sup>2</sup> )

5. 把每米长电阻为 2 欧的硬质裸导线组成一个边长 1 米的正方形框  $abcd$ , 放置在相互平行的裸铜长导轨  $PQ$ 、 $MN$  上, 导轨电阻不计, 导轨间距为 0.5 米, 导轨右端接一电阻  $R$  为 0.1 欧 整个装置处在磁感强度  $B=0.1$  特的匀强磁场中, 如图 9 - 47 所示。若始终保持  $cd$  与  $QP$  平行, 当线框以速度  $v=6$  米 / 秒向左作匀速运动时, 求: (1) 电阻  $R$  中电流的大小和方向; (2) 使线框作匀速运动的外力。

图 9-46

图 9-47

## 学生实验

### 一、研究平抛运动

实验装置如图 1，在竖直放置的木板左上角固定一个斜槽，且使槽末端水平，调整好斜槽位置，使小球离开斜槽做平抛运动时刚好不碰到木板。在木板上用图钉固定一张方格纸。水平放置的木条 AB 可沿木板平面上、下移动，并可固定在任一位置。在木条上装有一个如图 2 所示的可以移动的指示针（针的高  $h$  和长  $l$  都等于小球的半径）。

图 1

在方格纸上画出  $x$ 、 $y$  直角坐标，坐标原点  $O$  就是小球离开斜槽末端的位置，且跟小球球心重合。将木条调到某一高度，在木条上放复写纸，下填白纸，并用图钉固定。把斜槽上的定位器固定在某一位置，使小球每次都从这位置静止开始释放。小球离开斜槽末端后做平抛运动，落到木条上，在白纸上打出一个点。把指示针移到小球落点的位置，利用指示针可定出小球球心在木板上的投影点，用铅笔在方格纸上记下这一点。

图 2

把木条下移到若干个不同位置，用同样的方法重复实验，可在方格纸上记下若干点。取下方格纸，把这些点连成平滑的曲线，这就是小球做平抛运动的轨迹。从原点  $O$  开始沿  $x$  轴取几个等距离的点，找出轨迹上在  $y$  轴上的对应点，这些点下降的高度的比值近似等于什么？由此可知，平抛运动可以看成是哪两个分运动的合运动？

在曲线上任意取一点，测出这点的坐标，用  $x = v_0 t$  和  $y = \frac{1}{2} g t^2$  可求出小球的初速度  $v_0$ ，再取不同的点，用相同的方法分别求出小球的初速度，计算出它的平均值。

### 二、研究有固定转动轴的物体的平衡条件

这个实验是利用力矩盘研究有固定转动轴的物体的平衡条件。

如图 3 所示，把力矩盘支在短轴  $O$  上，轴  $O$  水平地固定在铁架台上，在铁架台上力矩盘的正上方固定一横杆。

在力矩盘上钉一张白纸，在纸上任意选择四个位置，各插一枚大头针，其中三枚针上用细线分别悬挂不同个数的钩码。第四枚针上用细线系住弹簧秤的挂钩，弹簧秤的圆环挂在横杆的某个套环上，调整所选用的套环，使弹簧秤跟细线在一直线上，并和其他三根细线在同一竖直平面内。

当力矩盘处于平衡时，量出各个力的力臂，把力和力臂的值记录在自己设计的表格内。在记录时，要区分清楚哪些力使盘向逆时针方向转动，哪些力使盘向顺时针方向转动的，以便确定力矩的正、负。

改变大头针的位置和悬挂钩码的个数，重复实验。

通过实验研究，得出有固定转动轴的物体的平衡条件。

图 3

讨论：作用在盘上的四个力中，有一个是用弹簧秤的弹力而不全用钩码，这样做实验有什么好处？弹簧秤的拉线方向为什么不应该通过力矩盘的转轴？在这个实验中，力矩盘本身所受的重力对实验结果是否有影响？为什么？

### 三、用冲击摆测弹丸的速度

实验装置如图 4 所示，A 是弹簧枪，用来发射弹丸，它有三档速度。B 是一个用四根线悬挂着的摆锤，线的长度可以调节，摆锤是中空的，弹丸射入摆锤后陷在里面。C 是指针，D 是刻度盘。

图 4

设弹丸的质量为  $m$ ，速度为  $v$ ，摆锤的质量为  $M$ ，弹丸未射入摆锤时，摆锤静止在平衡位置，弹丸射入摆锤后，它们以共同速度  $v$  运动，根据动量守恒定律有

$$mv = (M + m)v \quad (1)$$

摆锤连同弹丸一起运动后，能摆动到某一最大高度  $h$ ，在这过程中，只有重力做功，机械能守恒，则有

$$\frac{1}{2}(M + m)v^2 = (M + m)gh$$

$$\text{即} \quad v = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

代入 (1) 式，可得

$$v = \frac{M + m}{m} \sqrt{2gh} \quad (3)$$

根据摆锤摆动时推动指针偏转的最大角度  $\theta$  和摆长  $l$  就可测出上升的高度

$$h = l(1 - \cos \theta)。$$

实验时要将整个装置水平放在桌上，调节四根悬挂摆锤的线的长度，使弹丸恰好能射入摆锤，并使摆锤摆动时不发生晃动。让摆锤静止在平衡位置上，扳动弹簧枪的板机，把弹丸射入摆锤内，摆锤和弹丸一起运动推动指针偏转。为了减少摆锤推动指针偏转克服摩擦引起的能量损失，应使指针先停留在适当高度处。记下指针偏转的最大角度  $\theta$ ，测出悬线的长度  $l$ ，即可算出最大高度  $h$ ，根据已知的弹丸质量  $m$  和摆锤质量  $M$ ，用公式 (3) 求出弹丸的速度  $v$ 。

用同样的方法，求出使用弹簧枪另外两档发射的弹丸速度。

### 四、用示波器测电压

示波器是一种常用的电子仪器，可用它观察电信号随时间变化的情况，也可以测量电压，我们现在来学习使用示波器测电压。

图 5



图 5 所示是一种示波器的外形。

1. 先了解面板上各控制旋钮和开关的名称和作用。

“1”是电源开关，用它接通、断开电源，当扳向“开”时，电源接通，指示灯亮，预热 1~2 分钟，即可工作。

“2”是辉度旋钮，用它调节荧光屏上光点或图象的亮度，顺时针旋转时亮度增大，逆时针旋转时亮度减弱，使用前及用毕时应将旋钮旋到逆时针方向到底位置。

“3”是聚焦旋钮，用它调节电子射线聚焦在荧光屏上，形成清晰的亮点。

“4”是辅助聚焦旋钮，通常与聚焦旋钮配合使用。使用前都旋在中间位置。“5”和“6”分别是 X 轴位移和 Y 轴位移旋钮，用来调节图象在竖直方向和水平方向的位置。

“衰减”旋钮的作用是减弱输入信号电压，使得在荧光屏上出现适当大小的图象。旋动选择开关，可使输入到 Y 轴放大器的实际电压分别为“Y 输入”所加信号电压的 1、 $\frac{1}{10}$ 、 $\frac{1}{100}$ 、 $\frac{1}{1000}$  倍。

“扫描范围”旋钮的作用是改变加在水平方向的扫描电压的频率范围，当置于“外 X”档时，扫描停止，水平方向的电压可从外界输入，中间的小旋钮用来作微小调整扫描电压的频率，以使波形稳定。

“Y 输入”、“X 输入”和“地”分别是竖直方向偏转电压、水平方向偏转电压和公共接地的输入接线柱。

“DC、AC”是竖直方向输入信号的直流、交流选择开关，置于“DC”时，输入信号直接送到 Y 轴放大器，适用于观测低频及含有直流分量的信号。置于“AC”时，输入信号经电容器送到 Y 轴放大器，隔绝了信号中的直流成分，不受直流电压的影响，适用于观测交流电。

“同步”是极性选择开关。置于“+”时，扫描电压与被测信号的正半周同步，置于“-”时，扫描与负半周同步。

2. 使用前的调整

在使用示波器测电压前，要把面板上各旋钮及开关放置在不同位置。其中辉度、X 增益和 Y 增益旋钮应逆时针转到最小位置。衰减置于 1000，扫描范围旋钮置于“外 X”，X 输入、Y 输入均不接。电源开关处于“关”。

然后将电源开关扳向“开”，接通电源，指示灯亮。过 1~2 分钟预热后，顺时针方向旋转辉度旋钮，使荧光屏上出现一个亮度适中的光点。再缓慢地分别调节 X、Y 方向位移，聚焦和辅助聚焦等旋钮，使光点位于荧光屏的正中央，有足够的清晰度。这样示波器就调整好了。

要注意不应使亮度过亮，特别是当亮点较长时间停留在屏上不动时，需把亮度减弱，以免损伤荧光屏，影响示波管的使用寿命。

图 6

1 Y 输入, 2 地。

3. 观察光点偏移距离跟输入电压的关系

把“DC、AC”开关置于“DC”。按图 6 连接电路，A、B 间连接一干电池，闭合电键 K，逐步减小衰减档，观察亮点向上偏移，再调整 Y 增益

使亮点偏移一段适当的距离。调节 R 改变输入电压，可以看到亮点的偏移随着改变，电压越高，偏移越大。调换电池的正负极，改变输入电压的学生实验方向，可以看到亮点改为向下偏移。

#### 4. 用示波器测直流电压

亮点偏移的距离跟输入电压成正比，因而用示波器可以测量电压。示波器出厂前已校准好，当衰减旋钮处于“1”位置、Y增益旋钮顺时针旋到底时，如果输入电压为50毫伏，则亮点恰好偏移1格。

测量时，将“DC、AC”置于“DC”，Y增益顺时针转到底。先将“Y输入”和“地”短路，调出亮点在荧光屏面刻度盘正中，然后去掉短路，参考图6所示，将1节干电池的正极用导线接在“Y输入”接线柱上，干电池的负极接在“地”接线柱上时，亮点将偏移一段距离，适当调节衰减倍率K，如偏移的格数为n，则被测电压值为

$$U=50nK \text{ (毫伏)}。$$

实验结束时，要注意应先把辉度调节到最小，然后再关掉电源开关。

## 家庭实验

### 一、测量玩具手枪子弹射出时的初速度

根据平抛运动的规律，用刻度尺就可以简便地测出玩具手枪子弹射出时的初速度。想一想，这个实验该怎样做？

也可以根据竖直上抛运动的规律，在操场上或空地上进行。这时不用刻度尺而用一只秒表就可以简便地测出子弹的初速度，想一想，这个实验又该怎样做？

### 二、观察物体的转动和平动

找一个绕熔丝（保险丝）的线筒，或可用缝纫机上用完的线筒，在它两侧固定两个圆纸板，在线筒上，用细线按逆时针方向绕上几圈，线的一端固定在线筒上，另一端从线筒下方拉出，如图 7 所示。

将线筒放在粗糙的水平桌面上，设想一下，如果沿水平方向向右拉动线端，整个线筒将怎样运动？然后试做一下，看看结果跟你的设想是否一致，并解释其原因。

图 7

图 8

图 9

如果将线端沿着竖直向上的方向拉动（图 8），设想一下，整个线筒将怎样运动？试做一下，看看结果跟你的设想是否一致。

是否有可能使线端向某一方向拉动时（图 9），整个线筒只沿桌面平动，而不发生转动，这必须满足什么条件？试做一下，并作出解释。

### 三、估测高抛发球时运动员对乒乓球所做的功

已知一只标准乒乓球的质量为 2.43 克，你能利用手表估测乒乓运动员高抛发球时他对乒乓球所做的功吗？试着测一下。

### 四、估测玩具手枪的弹簧压缩时具有的弹性势能

找一把弹簧玩具打靶手枪（图 10），将带有橡皮吸盘的“子弹”塞入枪管，水平端着手枪，击发后要测出哪些量就能估算出手枪未击发时，枪内弹簧具有的弹性势能。实际做一下。

图 10

### 五、喷水反冲手套

取弹性好的薄橡胶手套一只，套在自来水笼头上灌水而胀大，然后绞上三、五转使手套口封闭并用手指捏住从笼头上取下，不使散开。在空地上把它抛出，当手套口自然松弛后，手套内贮的水喷射而出，观察并描述、解释手套的运动。

## 六、观察磁化杯内磁场的分布

用一个小磁针（或小的指南针）放在磁化杯外部周围的不同位置，观察小磁针的指向有什么不同？如果把小磁针放在磁化杯内部同一水平面上不同的位置，观察小磁针的指向有什么不同？你能判断出磁化杯内部 N 极、S 极的大致部位吗？

