

第1章

功和机械能

导 入 神奇之能

第1节 机械功

第2节 功率

第3节 动能和动能定理

第4节 势能及其改变

第5节 科学验证：机械能守恒定律

▶▶ 本章学业要求

- 能理解功、功率、动能、重力势能及机械能守恒定律的内涵，定性了解弹性势能；能用动能定理和机械能守恒定律等分析解释生产生活中的相关现象，解决一些相关的实际问题，能体会守恒观念对认识物理规律的重要性。具有与功和机械能相关的初步的能量观念。——物理观念
- 能在熟悉的问题情境中运用机械能守恒定律解决问题时建构物理模型，会分析机械能守恒的条件；能从机械能守恒的角度分析动力学问题，通过推理，获得结论；能用与机械能守恒定律等相关的证据说明结论；能从不同视角解决动力学问题。——科学思维
- 能完成“验证机械能守恒定律”等物理实验。能提出实验中可能出现的物理问题；能在他人帮助下设计实验方案，获取数据；能分析数据、验证机械能守恒定律，能反思实验过程，尝试减小实验误差；能撰写比较完整的实验报告，在报告中能呈现实验表格及数据分析过程，能尝试利用证据进行交流。——科学探究
- 通过对机械能守恒定律的验证，能认识科学规律的建立需要实验证据的检验；有较强的学习和研究物理的兴趣；能认识机械能守恒定律对日常生活的影响。——科学态度与责任

导 人

神奇之能

小小的一颗子弹被抛出后，人可轻易将其接住。但是，子弹被高速射出，则可击穿玻璃、木块甚至石头等。

水能滋润庄稼，也能冲毁农田。若水被拦蓄在高处，其能量可以转化为电能，用来取暖、照明等。

这里面有怎样的奥秘？



子弹击碎玻璃瞬间



水电站泄洪场景

能量，我们既熟悉又陌生。运动的物体具有动能，被举高的物体具有势能，物体的动能和势能可相互转化。这些能量与哪些因素有关？能量转化遵循怎样的规律？

通过本章的学习，认识了功和机械能之间的关系，你就会明白其中的奥秘。

第1节

机械功

用一定的力斜拉购物篮移动时（图 1-1），拉力方向与篮的位移方向有一定的夹角，拉力对篮做功了吗？在初中物理的基础上，本节我们进一步深化对功的认识，学习力与位移互成角度时功的计算。



图 1-1 人拉购物篮

1. 机械功的含义

如果施力于某物体，并使该物体在力的方向上移动一段距离，我们就说力对这个物体做了功。如果作用于某物体的恒力大小为 F ，该物体沿力的方向运动的位移大小为 s ，则 F 与 s 的乘积称为**机械功**（mechanical work），简称**功**，用 W 表示，其公式为

$$W = Fs$$

这个公式只适用于恒力方向与运动方向一致的情况。在生产生活中，我们经常见到类似斜拉购物篮的情景，这时作用于物体的力与物体的位移成一定夹角。在这个过程中，拉力做的功是多少呢？我们把斜拉购物篮这类情景转换为物理模型：物体在与水平方向成 α 角的恒定拉力 F 作用下沿水平方向移动，发生的位移是 s ，在这个过程中，拉力 F 所做的功是多少？

如图 1-2 所示，可将 F 分解为沿水平方向向右的分力 F_1 和沿竖直方向向上的分力 F_2 。 F_1 与物体位移的方向一致，对物体做了功； F_2 与物体位移的方向垂直，不对物体做功。因此，恒力 F 对物体所做的功 W 就等于分力 F_1 所做的功。再结合功的定义，可得出恒力做功的计算公式

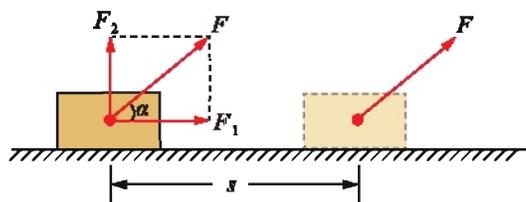


图 1-2 分析力做功的示意图

$$W = Fscos\alpha$$

功只有大小没有方向，是标量。在国际单位制中，功的单位是焦耳，用符号 J 表示。如果 1 N 的力使物体在力的方向上发生了 1 m 的位移，那么这个力对该物体所做的功就是 1 J，即

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$$



拓展一步

功的图像描述

我们也可用图像来描述力对物体做功的大小。当力的方向与位移方向一致时，以力 F 的大小为纵坐标、位移 s 的大小为横坐标，作出 F 随 s 变化的图像。

当 F 为恒力时，由 F 和 s 为邻边构成的矩形面积即表示功的大小，如图 1-3 (a) 所示。若 F 不是恒力，可将位移划分为若干等距的小段，在每个小段中 F 可近似看成恒力，其所做功的大小即为该小段对应的小矩形的面积，整个过程中 F 所做功的大小近似等于所有小矩形面积之和，如图 1-3 (b) 所示。

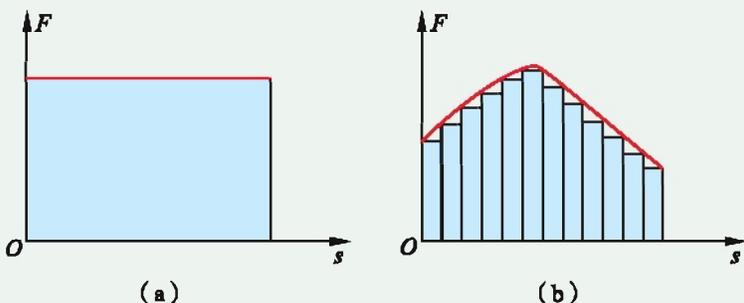


图 1-3 用图像描述功的大小

2. 机械功的计算

由功的计算公式可知，当力 F 和物体位移 s 的大小都一定时，功 W 就由 F 与 s 的夹角 α 的余弦 $\cos \alpha$ 决定。

当 $\alpha = 0^\circ$ 时， $\cos \alpha = 1$ ， $W = Fs$ ，这就是初中物理中作用力与物体位移方向相同的情况。

当 $\alpha = 90^\circ$ 时， $\cos \alpha = 0$ ， $W = 0$ ，表示力 F 与物体位移的方向垂直时，对物体不做功。

当 $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ 时， $\cos \alpha > 0$ ， $W = Fscos \alpha > 0$ ，表示力 F 对物体做正功。

当 $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ 时， $\cos \alpha < 0$ ， $W = Fscos \alpha < 0$ ，表示力 F 对物体做负功，也可说物体克服这个力做了功。

当 $\alpha = 180^\circ$ 时， $\cos \alpha = -1$ ， $W = -Fs$ ，表示作用力与物体位移方向相反。例如，在某些飞机着陆滑跑中，要打开尾部的减速伞（图 1-4）。在这个过程中，减速伞拉力的方向与飞机位移的方向相反，对飞机做负功，也可以说飞机克服这个拉力做了功。



图 1-4 飞机着陆后打开尾部减速伞



当物体在多个外力共同作用下运动，求所有外力对物体做的总功时，需要逐个分析哪些力做功，哪些力不做功，哪些力做正功，哪些力做负功。功是标量，对功的叠加应采用求代数和的方法。所有外力对物体做的总功，等于各个力分别对物体做功的代数和，即

$$\begin{aligned} W_{\text{总}} &= W_1 + W_2 + W_3 + \cdots \\ &= F_1 s \cos \alpha_1 + F_2 s \cos \alpha_2 + F_3 s \cos \alpha_3 + \cdots \end{aligned}$$

可以证明，某个物体在多个外力作用下运动时，所有外力对这个物体做的总功，也等于这些外力的合力对该物体做的功，即

$$W_{\text{总}} = F_{\text{合}} s \cos \alpha$$

例题

一人用平行于斜面的推力把重 $G = 500 \text{ N}$ 的货物从斜面底端推到斜面顶端。已知斜面的倾角 $\alpha = 37^\circ$ ，斜面长 $l = 5 \text{ m}$ ，斜面与货物间的动摩擦因数 $\mu = 0.2$ ，推力 $F = 400 \text{ N}$ 。求货物从斜面底端运动到顶端的过程中，所受各力分别对其做的功，以及所有外力对其做的总功。（货物可视为质点，取 $\sin 37^\circ = 0.6$ ， $\cos 37^\circ = 0.8$ ）

分析

斜面上的货物受到重力 G 、推力 F 、支持力 N 和摩擦力 f 共四个力的作用，受力分析如图 1-5 所示。货物位移 s 的方向沿斜面向上， G 与 s 的夹角是 $90^\circ + \alpha$ ， N 与 s 的夹角是 90° ， f 与 s 的夹角是 180° 。由功的计算公式可知各力做的功，再计算各力做功的代数和可知合外力做的功。

解

将货物视为质点，则其位移 $s = l = 5 \text{ m}$ 。

推力 F 对货物做功

$$W_1 = Fs = 400 \times 5 \text{ J} = 2\,000 \text{ J}$$

重力 G 对货物做功

$$\begin{aligned} W_2 &= Gs \cos (90^\circ + \alpha) = -Gss \sin \alpha \\ &= -500 \times 5 \times 0.6 \text{ J} \\ &= -1\,500 \text{ J} \end{aligned}$$

支持力 N 对货物做功

$$W_3 = Ns \cos 90^\circ = 0$$

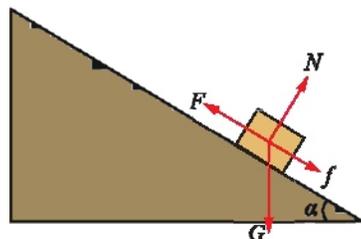


图 1-5 货物的受力分析示意图



摩擦力 f 对货物做功

$$\begin{aligned} W_4 &= f s \cos 180^\circ = (\mu G \cos \alpha) s \cos 180^\circ \\ &= -0.2 \times 500 \times 0.8 \times 5 \text{ J} \\ &= -400 \text{ J} \end{aligned}$$

所有外力对货物做的总功

$$\begin{aligned} W_{\text{总}} &= W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \\ &= (2\,000 - 1\,500 + 0 - 400) \text{ J} \\ &= 100 \text{ J} \end{aligned}$$

讨论

求得所有外力对货物做的总功大于零，表明货物所受的动力大于阻力。



策略提炼

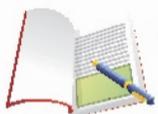
计算某力做功时，需先确定物体在该力的作用下发生的位移，找出力与位移的夹角 α ，再运用 $W = F s \cos \alpha$ 计算该力所做的功。

计算合外力所做的功时，可分别计算每个力所做的功，再求其代数和；也可先求物体所受的合外力，然后计算合外力所做的功。具体采用哪种方法，应视题目情况而定。



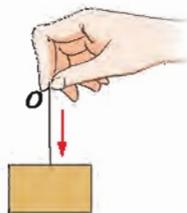
迁移

上述问题中，能否先求出物体所受的合外力，再求出合外力做的功？试一试，看看计算结果是否相同。

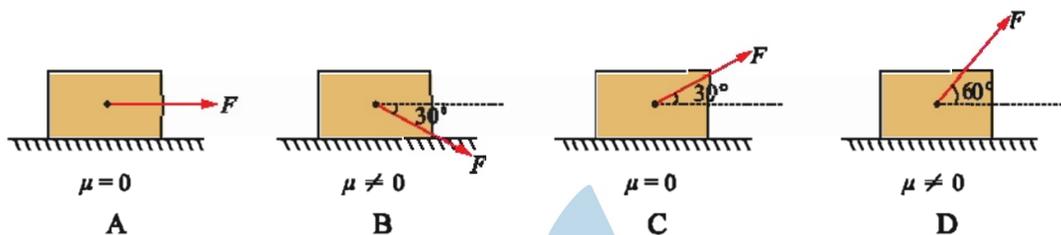


节练习

- 如图所示，若用轻绳拴一物体，使物体以恒定加速度向下做减速运动，则下列说法正确的是
 - 重力做正功，拉力做负功，合外力做正功
 - 重力做正功，拉力做负功，合外力做负功
 - 重力做正功，拉力做正功，合外力做正功
 - 重力做负功，拉力做负功，合外力做负功
- 下列选项中，物体所受力 F 的大小相等，位移方向向右、大小相同。其中， F 做功最少的是



第1题





3. 质量 $m = 2 \text{ kg}$ 的物体，受到与水平方向成 37° 角斜向右上方、大小为 10 N 的拉力 F 的作用，在水平地面向右移动的距离 $s = 2 \text{ m}$ ，物体与地面间的滑动摩擦力 $f = 4.2 \text{ N}$ 。取 $\sin 37^\circ = 0.6$ ， $\cos 37^\circ = 0.8$ ，求在此过程中合外力对物体所做的功。
4. 下列说法正确的是
- A. 静摩擦力一定不做功
B. 滑动摩擦力一定做负功
C. 滑动摩擦力一定做正功
D. 滑动摩擦力既可以做正功也可以做负功
5. 关于作用力与反作用力做功，有同学认为：当作用力做正功时，反作用力一定做负功。你认为这种观点正确吗？请说明理由。
6. 以一定的速度竖直向上抛出一小球，小球上升的最大高度为 h 。假设空气阻力大小恒为 F ，那么在小球被抛出至落回出发点的过程中，空气阻力对小球做的功为多少？



请提问

第2节

功率

在生产生活中，人们不仅关注做功的多少，还关注做功的快慢。例如，借助挖掘机挖土比直接用人工挖土做功快得多（图 1-6）。怎样描述做功的快慢？本节我们将在初中物理的基础上，进一步深化对功率的认识。



图 1-6 挖掘机挖土

1. 功率的含义

做功的快慢不仅与做功的多少有关，还与做这些功所耗费的时间有关。物理学中将力所做的功 W 与完成这些功所用的时间 t 之比，称为**功率**（power），用符号 P 表示，即

$$P = \frac{W}{t}$$

在国际单位制中，功率的单位是瓦特，简称瓦，用符号 W 表示。如果某力在 1 s 内做 1 J 的功，它的功率就是 1 W。瓦这个单位比较小，在工程技术上常用千瓦（kW）作为功率的单位。

$$1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W}$$

功率是描述做功快慢的物理量，是标量。

2. 常见机械的功率

汽车、轮船、火车等交通工具和各种起重机械的动力由内燃机或电动机等动力机械提供，功率是衡量动力机械性能的重要参数。每一种动力机械都有一个长时间工作的最大允许功率，这个功率称为机械的**额定功率**（rated power）。实际工作时，动力机械的功率可能大于或小于额定功率。例如，汽车爬陡坡时，如果要保持较大速度，实际功率就可能超过额定功率，这对动力机械有害，要尽量避免。汽车在平直公路上缓慢匀速行驶时，实际功率就往往小于额定功率。



一些机械的功率见下表。

表1-1 一些机械的功率

一些有特定意义机械的功率		一些常见家用电器的功率	
莱特兄弟发明的“ 飞行者一号 ”约 9 kW	中国制造的第一辆汽车约 70 kW	电动剃须刀约 1.5 W	波轮式洗衣机 200 ~ 500 W
第一艘装有螺旋桨推进器的蒸汽机船“ 阿基米德号 ”约 59 kW	“ 和谐号 ”CRH1 电力动车组 5 300 ~ 11 000 kW	电风扇 38 ~ 68 W	家用小定速空调约 800 W
中国制造的第一台蒸汽机车 1 100 kW	“ 辽宁号 ”航空母舰的最大功率约 1.5×10^5 kW	冰箱 90 ~ 200 W	吸尘器 400 ~ 1 000 W

机械的功率表示其做功的快慢。从表中可以看出，随着社会的发展和技术的进步，一些同类型机械的功率越来越大，表示其做功越来越快，即在同样的时间里能够做更多的功。

3. 功率与力、速度的关系

当我们用恒力 F 推动书本，让书本在水平桌面上做直线运动时（图 1-7），力 F 对书本做功的功率是多大呢？

力 F 的方向和书本位移的方向相同，推力 F 所做的功 $W = Fs$ 。根据功率的公式 $P = \frac{W}{t}$ 可得 $P = \frac{Fs}{t}$ ，而其中 $\frac{s}{t} = v$ ，因此，推力 F 做功的功率

$$P = Fv$$



图 1-7 手推书本运动

从上面推导可见，公式中的 v 是平均速度，对应的功率 P 是 t 时间内的平均功率。若时间间隔很小，我们可将平均速度看成瞬时速度，那么此时的功率 P 可看成该时刻的瞬时功率。当物体受力为变力时，在力与速度方向相同的情况下，功率 $P = Fv$ 仍然成立，此时 v 为瞬时速度， F 为相应时刻的力， P 则为对应的瞬时功率。

由公式 $P = Fv$ 可知，当功率 P 一定时，力 F 与物体运动的速度 v 成反比。例如，机械正常工作时的功率通常是一定的，车床在切削硬的工件时需要用较大的力，因此要降低车床的运转速度。当速度 v 一定时，力 F 与功率 P 成正比。例如，汽车上坡时（图 1-8），司机可通过加大油门，提高发动机的输出功率来增大牵引力。



图 1-8 汽车上坡

例题

—列高速列车总质量 $m = 465 \text{ t}$ ，其额定功率 $P = 5\,300 \text{ kW}$ ，在水平直轨道上行驶时，轨道对列车的阻力 $F_{\text{阻}}$ 是车重的 0.018 。列车以额定功率工作，取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，求：

- (1) 当行驶速度 $v = 10 \text{ m/s}$ 时，列车的牵引力和加速度；
- (2) 列车在水平直轨道上行驶的最大速度。

分析

由已知的速度和额定功率可求出牵引力，再根据牛顿第二定律可求出加速度。列车以额定功率工作，若牵引力 F 大于阻力 $F_{\text{阻}}$ （图 1-9），列车做加速运动。随着速度的增大，牵引力 $F = \frac{P}{v}$ 会逐渐减小，当 $F = F_{\text{阻}}$ 时列车的加速度为 0 ，速度达到最大值 v_{max} 。

解

由题意可知 $F_{\text{阻}} = 0.018 mg$ 。设列车以额定功率工作，当行驶速度 $v = 10 \text{ m/s}$ 时，牵引力为 F_1 ；行驶速度达到最大值 v_{max} 时，牵引力为 F_2 。

- (1) 由 $P = F_1 v$ 得

$$F_1 = \frac{P}{v} = \frac{5.3 \times 10^6}{10} \text{ N} = 5.3 \times 10^5 \text{ N}$$

根据牛顿第二定律，有

$$F_1 - F_{\text{阻}} = ma$$

解得

$$a = 0.96 \text{ m/s}^2$$

列车的加速度方向与牵引力方向一致。

- (2) 当 $F_2 = F_{\text{阻}}$ 时，列车行驶速度最大。

由 $P = F_2 v_{\text{max}}$ 得

$$v_{\text{max}} = \frac{P}{F_{\text{阻}}} = 63.3 \text{ m/s}$$

列车的最大行驶速度方向与牵引力方向一致。

讨论

列车的最大行驶速度与其额定功率成正比，与受到的阻力成反比。因此，要提高列车的最大行驶速度，就需增大发动机的额定功率，并尽量减小阻力。动车组通常由多节动力车厢相连，且外形被设计成流线型。请解释一下其中的道理。

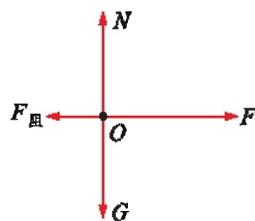


图 1-9 列车的受力分析示意图

策略提炼

运用功率概念和牛顿第二定律解决列车行驶等问题时，牵引力是连接二者的桥梁。此时，功率公式中的 F 是牵引力。

火车或汽车以额定功率水平行驶，当牵引力等于阻力时，速度最大。



迁移

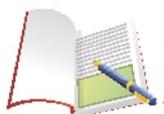
前面我们讨论了机械以额定功率工作的问题，那么机械不在额定功率下工作的问题又该怎样求解呢？试解答下面的问题。

在符合安全行驶要求的情况下，通过减少汽车内放置的物品和控制油箱里的油量等措施，可实现节能减排。一辆汽车以 72 km/h 的速度匀速行驶时，采取以上措施前、后汽车受到的阻力分别为 2 000 N 和 1 950 N。试分别求出采取措施前、后汽车的实际功率，并加以比较。



物理贴吧

在本节中，功率与力、速度的关系式 $P = Fv$ 是在力的方向与速度的方向一致的情况下得出的。想想看，如果力与速度的方向相反，或者成任意角度 θ 时，功率与力、速度之间又会有怎样的关系呢？谈谈你的看法，并与其他同学讨论交流。



节练习

- 关于某力做功的功率，下列说法正确的是
 - 该力越大，其功率就越大
 - 该力在单位时间内做的功越多，其功率就越大
 - 功率越大，说明该力做的功越多
 - 功率越小，说明该力做功的时间越少
- 一质量为 m 的物块沿倾角为 θ 的斜面滑下，到达斜面底端时的速度大小为 v ，此时重力做功的瞬时功率是
 - mgv
 - $mgv\sin\theta$
 - $mgv\cos\theta$
 - $mgv\tan\theta$
- 如图所示，某同学的质量为 50 kg，自行车的质量为 15 kg，设该同学骑自行车在平直路面上匀速行驶时所受阻力为人车总重的 4%，克服阻力做功的功率为 260 W。取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，求该自行车匀速行驶的速度大小。
- 重量为 G 的某汽车，最大功率为 P_m ，在平直公路上以速度 v 匀速行驶时，汽车发动机的功率为 P 。
 - 求汽车所受的阻力。
 - 若汽车在倾角为 α 的坡路以最大功率匀速向上行驶时，所受路面和空气的阻力大小之和与 (1) 中所求阻力大小相等，求此时汽车的速度。

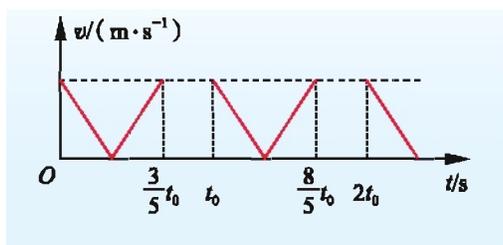


第3题

5. 用体重计测量你的质量，用卷尺测量一段楼梯的高度，如图所示。试用最快速度跑上这段楼梯，并记录所用时间。请估算此过程中你克服重力所做功的平均功率。
6. 跳绳是一种健身运动。一位同学在原地跳绳过程中，离开地面后竖直方向的速率—时间图像如图所示。若已知 t_0 和跳绳者的质量 m ，重力加速度为 g ，不计阻力，请估算：
- (1) 跳绳者重心上升的最大高度；
 - (2) 跳绳者克服重力做功的平均功率。



第5题



第6题

请提问



第3节

动能和动能定理

运动的物体可以做功，说明物体运动时具有能量。例如，台风、龙卷风（图 1-10）等强烈的空气流动具有巨大的能量，可以拔起大树、掀翻汽车甚至摧毁房屋。运动的物体具有的能量与哪些因素有关？其变化与功有着怎样的关系？本节将深入学习动能和动能定理。



图 1-10 龙卷风

1. 动能

物理学中把物体因运动而具有的能量称为**动能**（kinetic energy）。人类利用动能已有很长的历史。例如，在船上加挂风帆，利用气流的动能推动帆船前进；制造风车和水车，利用气流和水流的动能从事各种生产活动。现在，我们能更广泛、更有效地利用气流和水流的动能来进行发电等活动。

那么，物体动能的大小与哪些因素有关？让我们通过一个小实验来回顾初中物理介绍过的内容。



迷你实验室

影响小车动能大小的因素

如图 1-11 所示，同一小车从斜面的不同高度处由静止开始下滑，撞击放在水平面上的木块。可以发现，小车开始下滑时的高度越高，木块被撞击后运动的距离越大。

质量不同的小车从斜面的同一高度处由静止开始下滑，撞击放在水平面上的木块。可以发现，小车的质量越大，木块被撞击后运动的距离越大。

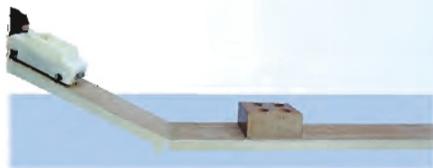


图 1-11 实验装置

由以上实验可以看出，动能的大小与物体的质量和运动速度有关。物体的质量 m 越大，速度 v 越大，其动能就越大。在物理学中，物体的动能 E_k 表示为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

动能是标量。它的单位与功的单位相同，在国际单位制中都是焦耳，符号为 J。从上式也可以看出

$$1 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 = 1 \text{ kg} \cdot (\text{m/s}^2) \cdot \text{m} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ J}$$

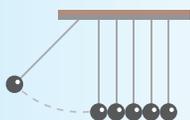
2. 恒力做功与动能改变的关系

在“迷你实验室”中，小车通过撞击对木块做功，使木块从静止开始运动，木块的动能从无到有。滚动的保龄球具有动能，当其克服球瓶阻力做功时，动能减小（图 1-12）。那么，若外力对物体做功，该物体的动能总会增大吗？若物体克服外力做功，该物体的动能总会减小吗？做功与动能的改变之间究竟有什么关系？



图 1-12 保龄球撞击球瓶

我们从简单的情况入手，通过实验来探究恒力做功与动能改变的关系。



实验与探究

恒力做功与动能改变的关系

要研究恒力做功与动能改变的关系，需要测出作用于物体的力、物体的位移，以及物体的质量和速度，求出恒力所做的功和物体的动能，然后进行比较。

用打点计时器测小车的位移和速度，用天平测小车的质量，用钩码给小车提供作用力。此实验的装置与“探究加速度与力、质量的关系”的实验装置基本相同。思考实验中如何平衡摩擦力？如何让小车所受的合力近似等于钩码的重力？为什么？

如图 1-13 所示，用细线通过定滑轮连接小车与钩码，纸带通过打点计时器与小车相连。实验中，通过改变钩码数量来改变小车所受拉力的大小，测出需要测的物理量，然后算出每次拉力做的功及相应的小车动能的改变量。比较二者之间的关系，可以得出什么结论？

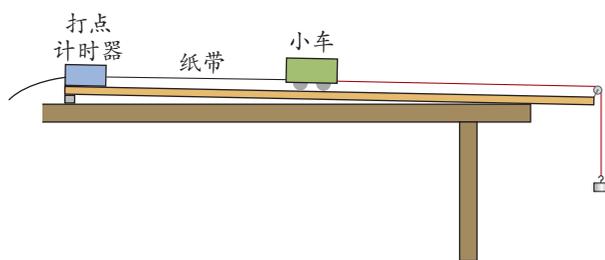


图 1-13 实验装置示意图



3. 动能定理

运用牛顿第二定律和匀变速直线运动的规律，可推导出恒力对物体做功与物体动能改变的关系。

设一个物体的质量为 m ，初速度为 v_1 ，在与其运动方向相同的合外力 F 的作用下经过一段位移 s 后，速度增加到 v_2 （图 1-14）。根据牛顿第二定律和匀变速直线运动的规律

$$F = ma$$

$$s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$$

可得
$$Fs = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

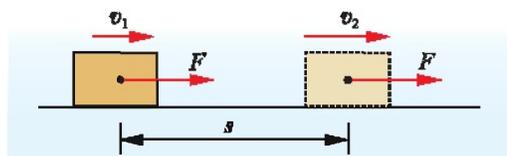


图 1-14 物体在恒力作用下速度变化的示意图

用 W 表示合外力 F 在这一过程中所做的功，用 E_{k1} 表示物体的初动能 $\frac{1}{2}mv_1^2$ ，用 E_{k2} 表示物体的末动能 $\frac{1}{2}mv_2^2$ ，于是有

$$W = E_{k2} - E_{k1}$$

上式表明，合外力对物体所做的功等于物体动能的变化量。这个结论称为**动能定理** (theorem of kinetic energy)。从上式可以看出，当合外力对物体做正功时，物体的末动能大于初动能，动能增大。例如，在汽车加速的过程中，牵引力和阻力的合力对汽车做正功，汽车的动能增大。当合外力对物体做负功，或者物体克服合外力做功时，物体的末动能小于初动能，动能减小。例如，在汽车刹车的过程中，阻力对汽车做负功，汽车的动能减小。我们可用合外力做功的多少来量度物体动能的变化量。

可以证明，动能定理在物体受到变力作用或做曲线运动的情况下也是成立的。动能定理是物理学的重要规律。通过它，我们既可用做功的多少来量度动能的变化量，也可用动能的变化量来确定做功的多少，这为分析力学问题提供了新的思路。

例题

如图 1-15 所示，一辆汽车正以 $v_1 = 72 \text{ km/h}$ 的速度匀速直线行驶，司机发现在前方 150 m 处停有一故障车辆，马上进行刹车操作。设司机的反应时间 $t_1 = 0.75 \text{ s}$ ，刹车时汽车受到的阻力为重力的 $\frac{1}{2}$ 。取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。请计算从发现故障车至停下，汽车在这段时间内发生的位移，据此判断这两辆车是否会相撞。



图 1-15 急刹车情境的示意图

分析

在司机的反应时间内，后车做匀速直线运动，位移 $s_1 = v_1 t_1$ 。后车刹车后，在水平方向只受到阻力 $F_{\text{阻}}$ 的作用，发生的位移为 s_2 。根据已知条件，运用动能定理即可求出 s_2 ，若 $s_1 + s_2 < 150 \text{ m}$ ，则两车不会相撞。

解

设后车刹车时所受阻力为 $F_{\text{阻}}$ ；司机反应时间内后车的位移为 s_1 ；从开始刹车到停止，后车的位移为 s_2 。后车受力分析如图 1-16 所示。

由题意可知 $v_1 = 72 \text{ km/h} = 20 \text{ m/s}$ ， $F_{\text{阻}} = \frac{1}{2} mg$ 。

由匀速直线运动公式可得

$$s_1 = v_1 t_1 = 20 \times 0.75 \text{ m} = 15 \text{ m}$$

由动能定理得

$$-F_{\text{阻}} s_2 = 0 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

整理得

$$s_2 = \frac{m v_1^2}{2 F_{\text{阻}}} = \frac{v_1^2}{g} = \frac{20^2}{10} \text{ m} \\ = 40 \text{ m}$$

发现故障车至停下汽车发生的位移为

$$s = s_1 + s_2 = 55 \text{ m}$$

$s < 150 \text{ m}$ ，故两车不会相撞。

讨论

从计算结果看，后车不会与前车发生追尾。为避免交通事故，汽车在行驶中保持一定安全距离是很重要的。通常车速越大，需要保持的安全距离也越大。

《中华人民共和国道路交通安全法》规定，机动车在道路上行驶，不得超过限速标志标明的最高时速。你能从物理学的角度说明该规定的理由吗？

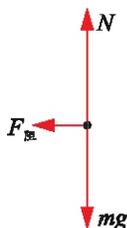


图 1-16 受力分析示意图

策略提炼

若研究的问题只涉及力、位移与物体运动的初、末状态，用动能定理求解通常比用牛顿运动定律求解简便得多。

对于一些变力做功问题，利用功的计算公式很难求解，通常可利用动能定理求解。

迁移

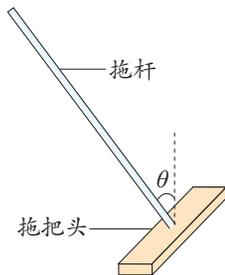
运用动能定理不仅可以较简便地求解一些恒力做功问题，还可求解一些特殊情况下的变力做功问题。请你解答下面的问题。

雨滴在空中下落时会受到空气阻力，空气阻力 f 的大小与雨滴下落速率 v 的二次方成正比，即 $f = kv^2$ ，其中 k 为常数。若质量为 m 的雨滴，从高 h 处以初速度 v_0 竖直加速下落，接近落地前开始做匀速直线运动。已知重力加速度为 g ，求该雨滴从高处下落到地面的过程中，空气阻力对其所做的功。

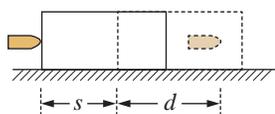


节练习

- 若汽车行驶速度增加为原来的2倍，则该车从开始刹车到停下的距离约将增大为原来的4倍。请你从动能定理的角度加以解释。
- 2017年5月5日，我国自行研制的大型喷气式客机C919首飞成功，标志着我国大型客机项目取得重大突破。假设飞机在水平跑道上的滑跑是初速度为0的匀加速直线运动，当位移 $s = 1.6 \times 10^3 \text{ m}$ 时才能达到起飞所要求的速度 $v = 80 \text{ m/s}$ 。已知飞机质量 $m = 7.0 \times 10^4 \text{ kg}$ ，滑跑时受到的阻力为自身重力的0.1，取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，求：
 - 飞机起飞时的动能；
 - 飞机滑跑过程中受到的牵引力。
- 质量为 m 的汽车在平直公路上行驶，发动机的功率 P 和汽车受到的阻力 $f_{\text{阻}}$ 均恒定不变。在时间 t 内，汽车的速度由 v_0 增加到最大速度 v_{max} ，则此段时间内汽车沿直线运动的距离为多少？
- 拖把是由拖杆和拖把头构成的清洁工具，如图所示。若某同学保持拖杆与竖直方向的夹角 $\theta = 37^\circ$ ，并用沿拖杆方向的恒力 $F = 30 \text{ N}$ 推动拖把头，使其由静止开始在水平地面沿直线运动，位移 $s = 1 \text{ m}$ 。已知拖把头的质量 $m = 1.6 \text{ kg}$ ，不计拖杆质量，拖把头与地面间的动摩擦因数 $\mu = 0.3$ ，取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ， $\sin 37^\circ = 0.6$ ， $\cos 37^\circ = 0.8$ ，求：
 - 摩擦力对拖把头做的功；
 - 拖把获得的动能。
- 如图所示，木块放在光滑水平面上，一颗子弹水平射入木块。已知子弹受到的平均阻力为 $F_{\text{阻}}$ ，射入深度为 d ，在此过程中木块的位移为 s ，求子弹动能的减少量和木块动能的增加量。
- *6. 假设某地强风的风速为 v ，空气密度为 ρ 。如果把通过横截面积 S 的风的动能转化为电能，转化效率为 η ，请写出电功率的表达式。



第4题



第5题



请提问

第4节

势能及其改变

松软的白雪给人以恬静、美丽的印象。然而发生雪崩时（图 1-17），雪会以排山倒海之势摧毁沿途的一切，给自然界和人类带来灾难。雪崩破坏力强大是由于积雪处在一定高度而具有巨大的能量。这种能量有什么特点？它与积雪所处的高度有什么关系？与重力又有什么关系？本节将主要学习与重力势能及其改变有关的内容。



图 1-17 雪崩

1. 重力势能

物理学中，把物体因为处于一定的高度而具有的能量称为**重力势能**（gravitational potential energy）。例如，高处的石头、打桩时被举高的重锤、水电站储存的水等，都具有重力势能。

物体重力势能的大小与哪些因素有关？我们先通过一个小实验来回顾初中物理学习过的内容。

迷你实验室

影响小球重力势能大小的因素

准备两个大小相同、质量不同的光滑小球，在一盆中放入适量细沙。

在沙盆上方同一高度由静止释放两小球，小球落入细沙时会出现什么现象？是否质量大的小球陷得更深？让同一个小球分别从不同的高度由静止落下（图 1-18），又会出现什么现象？是否释放位置越高小球陷得越深？对比以上两种现象，你能得出什么结论？



图 1-18 释放小球



由以上实验可知，重力势能的大小与物体的质量和所处的高度有关。物体的质量 m 越大，所处的高度 h 越高，重力势能就越大。在物理学中，物体的重力势能 E_p 表示为

$$E_p = mgh$$

重力势能是标量。它的单位与功的单位相同，在国际单位制中都是焦耳，符号为 J。

对同一物体，重力势能的大小由物体所处的高度决定。物体所处的高度总是相对一定的水平面而言，相对于不同的水平面，物体所处的高度是不同的。为了便于研究问题，我们一般先选定某一个水平面作参考。若把这个水平面的高度设为零，则物体在该水平面的重力势能也为零，这样的水平面称为零势能参考平面。例如，选定物体放在桌面上时重心所在的水平面 B 为零势能参考平面（图 1-19），当质量为 m 的物体重心位于该参考平面上方高度为 h_1 的水平面 A 时，它的重力势能 $E_{pA} = mgh_1$ ；当物体放在桌面上时，它的重力势能 $E_{pB} = 0$ ；当物体放在地面上时，其重心在水平面 C 上，与水平面 B 的距离为 h_2 ，它的重力势能则为 $E_{pC} = -mgh_2$ 。

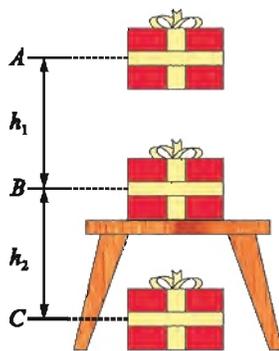


图 1-19 零势能参考平面的选择

2. 重力做功与重力势能改变的关系

我们知道，滑雪者靠重力可沿山坡滑下（图 1-20）。下面，我们通过对滑雪者滑雪模型的建构，进一步探索重力做功与重力势能改变的关系。

首先，建构滑雪者及其滑雪过程的物理模型。如图 1-21 所示，将滑雪者视为质量为 m 的物体（质点），物体从 A 点滑向 C 点，位移为 l ，与竖直方向的夹角为 θ ， A 点的高度为 h_1 ， C 点的高度为 h_2 。根据功的定义，物体从 A 点到 C 点过程中，重力做功为

$$W = mgl \cos \theta = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2$$

上式的结果正好等于物体从 A 点竖直下落到 B 点过程中重力所做的功。这表明，从 A 点到 B 点和从 A 点到 C 点，虽然路径不同，但重力做的功是相同的。其实，理论上可证明，无论物体沿哪条路径下滑（如图 1-21 中的曲线），其重力做功皆为 $mgh_1 - mgh_2$ 。由此可知，重力做功与始末位置的高度差有关，与路径无关。因此，滑雪者无论沿什么路线下滑，无论雪坡平缓还是陡峭，只要其始末位置的高度差



图 1-20 滑雪

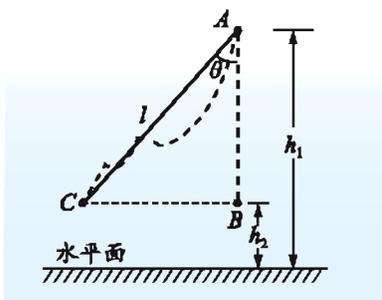


图 1-21 分析滑雪过程重力做功的示意图

相同，重力做功就相同。

由重力做功的特点可知，重力做功与重力势能改变的关系为

$$W_G = E_{p1} - E_{p2} = -\Delta E_p$$

式中， $E_{p1} = mgh_1$ ，表示物体在初位置时的重力势能； $E_{p2} = mgh_2$ ，表示物体在末位置时的重力势能。

物体从高处下落的过程中， $W_G > 0$ ，重力做正功， $E_{p1} > E_{p2}$ ，重力势能减小；物体被举高的过程中， $W_G < 0$ ，重力做负功，即物体克服重力做功， $E_{p1} < E_{p2}$ ，重力势能增大。总之，重力势能的改变是由重力做功决定的：重力对物体做多少正功，物体的重力势能就减小多少；物体克服重力做多少功，物体的重力势能就增大多少。物体的重力势能值与参考平面的选取有关，是相对的；而重力势能的改变量与参考平面的选取无关。

实际上，高处的物体在下落时对外做功。因此，重力势能可视为一种被暂时存储起来的潜在能量。在生产生活中，人们根据需要将重力势能转化成其他形式的能量。例如，建筑工地常用的打桩机就是把重力势能转化为动能，从而把桩钉打入地下；在江河中修筑堤坝提高水位，就可以利用水的重力势能发电（图 1-22）。

3. 弹性势能及其改变

在射箭比赛中，运动员的手一松开，拉开的弓在恢复原状的过程中就能把箭发射出去（图 1-23）。可见，发生弹性形变的物体在恢复原状的过程中能够做功，说明它具有能量。物理学中，把物体因为发生弹性形变而具有的能量称为**弹性势能**（elastic potential energy）。拉开的弓弦、上紧的钟表发条等都具有弹性势能。在弹簧被拉长或被压缩时，弹簧中就存储了弹性势能；在恢复原状的过程中，弹簧就对外做功。理论研究表明，物体的弹性形变越大，具有的弹性势能就越大，恢复原状时对外做的功就越多。

用劲度系数不同的两根弹簧做实验，会发现弹性势能还与弹簧的劲度系数有关。在同样的形变下，劲度系数越大的弹簧弹性势能越大。因此，在生产生活中，人们会根据需要选用不同劲度系数的弹簧。



物理时间

滑雪者下滑过程中会受到阻力的影响，甚至会受到滑雪杆或滑雪板的影响。在这种情况下，重力做功的多少会受到影响吗？



图 1-22 水力发电站利用水的重力势能发电



图 1-23 拉开的弓存储了弹性势能



迷你实验室

小纸帽能弹多高

将圆珠笔里的弹簧取出，再用硬卡纸做个小纸帽，套在弹簧上（图1-24）。用力把小纸帽往下压，使弹簧产生一定的弹性形变，然后迅速放开手，看看小纸帽能弹多高。

用大小不同的力使弹簧产生大小不同的弹性形变，重复做几次，看看小纸帽弹起的高度有什么不同。

换用不同劲度系数的弹簧做此实验，看看小纸帽弹起的高度又有什么不同。

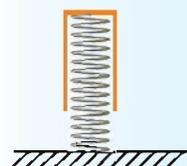
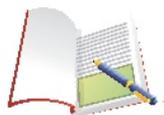


图1-24 实验装置示意图

在上面的实验中，弹簧在恢复原状的过程中对小纸帽做功。同时，随着弹簧迅速恢复到原状，弹性势能也减小到零，弹簧也就不再对外做功。研究表明，与重力做功的情况类似，弹簧的弹力对外做多少功，弹性势能就减小多少；反之，克服弹力做多少功，弹性势能就增大多少。

弹性势能和重力势能一样，都与物体间的相对位置有关：重力势能与物体和地球的相对位置有关，弹性势能与发生弹性形变的物体各部分的相对位置有关。人们把这类由相对位置决定的能量称为**势能**（potential energy）。势能是存储于一个物体系统内的能量，不是物体单独具有的，而是相互作用的物体所共有的。例如，重力势能是物体与地球所组成的“系统”共有的，没有地球，就谈不上重力，也谈不上重力势能。关于势能，我们在后面还将进一步学习。



节练习

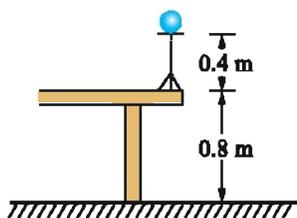
1. 如图所示，水平桌面距地面 0.8 m，一质量为 2 kg 的小球放在距桌面 0.4 m 的支架上。小球可视为质点，取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

(1) 以地面为零势能参考平面，计算小球具有的重力势能；若小球由支架落到桌面，重力势能减小多少？

(2) 以桌面为零势能参考平面，计算小球具有的重力势能；若小球由支架落到桌面，重力势能减小多少？

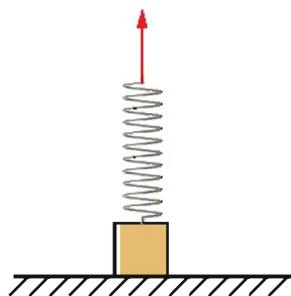
(3) 分析以上计算结果，你能得出什么结论？

2. 一举重运动员将质量为 160 kg 的杠铃从地面举到了 1.8 m 的高度。取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。在此过程中，他对杠铃做了多少功？杠铃的重力势能改变了多少？



第1题

3. 质量为 m 的物体，在距地面高 h 处以 $\frac{2}{3}g$ 的加速度由静止竖直下落到地面。在此过程中，物体的重力势能和动能的变化量分别是多少？
4. 以初速度 v_0 竖直向上抛出一质量为 m 的小球。假定小球所受的空气阻力 f 大小不变，已知重力加速度为 g ，求：
- (1) 小球上升的最大高度；
 - (2) 小球返回原抛出点时的速率。
5. 如图所示，质量为 M 的物体静止在地面上，物体上面连着一个轻弹簧。用手拉住弹簧上端将物体缓缓提升高度 H ，则人做的功
- A. 等于 MgH B. 小于 MgH C. 大于 MgH D. 无法确定
- *6. 早期人们用不易弯曲的竹竿或金属杆进行撑竿跳高，后来采用了有弹性的玻璃纤维杆，如图所示，撑竿跳高的世界纪录也因此有了很大的提高。请上网查询，解释为何使用弹性玻璃纤维杆有助于撑竿跳高成绩的提高。



第5题



第6题

请提问



第5节

科学验证：机械能守恒定律

过山车（图 1-25）在最高点无动力释放后，会沿着轨道下滑、爬升、翻转，速度时快时慢，惊险刺激。过山车在运行过程中既有重力势能，又有动能。高度减小时，重力势能减小，动能增大；高度增大时，重力势能增大，动能减小。当重力势能与动能发生变化时，它们之间遵循着什么规律？本节我们将学习机械能，并研究动能与势能转化时遵循的规律。



图 1-25 过山车

1. 机械能守恒定律

运动的物体往往既有动能又有势能，物体的动能与重力势能（弹性势能）之和称为**机械能**（mechanical energy）。若用符号 E 表示机械能，则物体的机械能为

$$E = E_p + E_k$$

在物体运动过程中，不同形式的能量常会相互转化。例如，射箭时，弓的弹性势能减小，箭的动能增大；蹦极时，重力势能会转化为动能和弹性势能等。大量事实表明，物体的机械能可从一种形式转化为另一种形式。下面，我们先从理论上研究只有重力势能与动能发生转化时能量遵循的规律。

如图 1-26 所示，如果小球只在重力作用下自由下落，从 A 到 B 的过程中重力做功为 W_G ，根据动能定理可知，重力做的功等于小球下落过程中动能的增加量，即

$$W_G = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

由重力做功与重力势能改变的关系可知，重力做的功等于小球下落过程中重力势能的减少量，即

$$W_G = mgh_1 - mgh_2$$

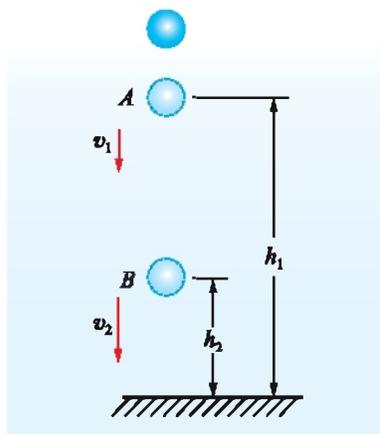


图 1-26 小球下落示意图

由以上两式可得

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_1 - mgh_2$$

即在小球自由下落的过程中，动能的增加量等于重力势能的减少量，说明重力对小球做了多少功，就有多少重力势能转化为等量的动能。上式移项后得

$$\frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1$$

即

$$E_{k2} + E_{p2} = E_{k1} + E_{p1}$$

上式表明，在小球自由落体运动中，只有重力做功，小球在 A 点的动能与重力势能的总和等于在 B 点的动能与重力势能的总和。由于 A 、 B 两点是任意选定的，故在自由落体运动中，任何位置（时刻）物体的总机械能保持不变。

同样可以证明，在只有弹力做功的物体系统内，动能和弹性势能可相互转化，总的机械能保持不变。

大量研究结果表明，**在只有重力或弹力这类力做功的情况下，物体系统的动能与势能相互转化，机械能的总量保持不变。**这个结论称为**机械能守恒定律**（law of conservation of mechanical energy）。

事实上，并非只有动能和势能可以相互转化，任何形式的能量都可以相互转化，但总能量保持不变，这就是更普遍的能量守恒定律。

能在熟悉的问题情境中运用机械能守恒定律解决问题时建构物理模型，会分析机械能守恒的条件；能从机械能守恒的角度分析动力学问题，通过推理，获得结论；能用与机械能守恒定律等相关的证据说明结论；能从不同视角解决动力学问题。

——科学思维

素养提升

2. 验证机械能守恒定律

在只有重力或弹力做功的情况下，物体系统的机械能是守恒的。我们已经从理论上推导出了机械能守恒定律，现在用实验进行验证。

实验目的

- (1) 验证机械能守恒定律。
- (2) 进一步熟悉打点计时器的使用。

实验器材

铁架台、打点计时器、交流电源、纸带、重物、天平、砝码、刻度尺。





实验原理与设计

实验装置如图 1-27 所示。让带有纸带的重物自由下落，利用打点计时器记录重物下落过程中的运动情况。选取纸带上的某点作为高度的起点，量出纸带上其他点相对该点的距离作为高度。用天平称出重物的质量，算出重物经过这些点的重力势能。再计算重物经过这些点的瞬时速度，算出动能。最后，通过比较重物经过这些点的机械能，得出实验结论。

实验步骤

- (1) 使用天平称出重物质量。
- (2) 纸带一端吊重物，另一端穿过打点计时器。手提纸带，使重物靠近打点计时器并静止。接通电源，松开纸带，让重物自由落下。
- (3) 取下纸带并选其中一个点作为参考点，设打该点时重物的重力势能为 0，计算打该点时重物的动能，它就是重物下落过程中动能与重力势能的总和。
- (4) 分别计算纸带上其他各点对应的重物的动能和重力势能之和。

数据分析

请将测量的数据记入你设计的表格中，并分析数据，形成结论。

实验结论

请写出实验结论。

讨论

- (1) 引起实验误差的主要因素有哪些？如何减小实验误差？
- (2) 若实验中不测量重物质量，还能验证机械能守恒定律吗？
- (3) 你能设计其他实验方案验证机械能守恒定律吗？



图 1-27 实验装置



安全警示

使用打点计时器时注意用电安全。释放重物时不要让重物砸到人或实验台。

能提出实验中可能出现的物理问题；能在他人帮助下设计实验方案，获取数据；能分析数据、验证机械能守恒定律，能反思实验过程，尝试减小实验误差；能撰写比较完整的实验报告，在报告中能呈现实验表格及数据分析过程，能尝试利用证据进行交流。

注意提升提出问题、分析论证及反思评估的能力。

——科学探究

素养提升

例题

荡秋千是一种常见的娱乐休闲活动（图 1-28）。若秋千绳的长度 $l = 2 \text{ m}$ ，荡到最高点时秋千绳与竖直方向的夹角 $\theta = 60^\circ$ 。取重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，求荡到最低点时秋千的速度大小。（忽略阻力及秋千绳的质量，且人在秋千上的姿势可视为不变）



图 1-28 荡秋千

分析

秋千绳拉力的大小和方向不断变化,难以直接用牛顿第二定律和运动学公式来求解。但在摆动过程中,秋千绳拉力不做功,只有重力做功,系统的机械能守恒,可用机械能守恒定律求解。

解

以人和秋千座椅组成的系统为研究对象并将其视为质点,受力分析如图 1-29 所示。选择秋千在最低位置时的水平面为零势能参考平面。设秋千荡到最高点 A 处为初状态,在最低点 B 处为末状态。已知 $l=2\text{ m}$, $\theta=60^\circ$ 。

初动能 $E_{k1}=0$, 此时重力势能 $E_{p1}=mgl(1-\cos\theta)$ 。

末动能 $E_{k2}=\frac{1}{2}mv^2$, 此时重力势能 $E_{p2}=0$ 。

根据机械能守恒定律有

$$E_{k2} + E_{p2} = E_{k1} + E_{p1}$$

$$\text{即 } \frac{1}{2}mv^2 = mgl(1 - \cos\theta)$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } v &= \sqrt{2gl(1 - \cos\theta)} \\ &= \sqrt{2 \times 9.8 \times 2 \times (1 - \cos 60^\circ)} \text{ m/s} \\ &= 4.4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

讨论

在现实中,若人在荡秋千时姿势不变,秋千将逐渐停下来,这是有阻力的缘故。因此,人荡秋千时,只有在保持姿势不变且忽略阻力的情况下,其机械能才守恒。为什么有的人可以越荡越高,他是怎么做到的呢?请分析原因。

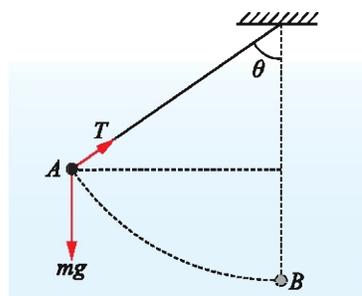


图 1-29 荡秋千时的受力分析示意图

策略提炼

运用机械能守恒定律分析解决问题时,需要先分析研究对象在所研究的过程中是否满足机械能守恒条件,然后确定研究对象的初、末状态及其机械能,最后列式求解。

迁移

下列问题能否运用牛顿运动定律或机械能守恒定律解答?请试一试。

1924年,跳台滑雪被列为首届冬奥会比赛项目。如图 1-30 所示,假设运动员从雪道的最高点 A 由静止开始滑下,不借助其他器械,沿光滑的雪道到达跳台的 B 点时,速度为多少?

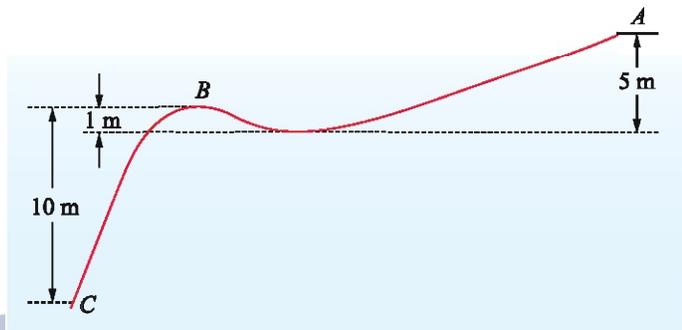


图 1-30 跳台滑雪示意图



当他落到离 B 点竖直高度为 10 m 的雪地 C 点时，速度又是多少？（假设这一过程中运动员没有做其他动作，忽略摩擦力和空气阻力，取重力加速度 $g = 10\text{ m/s}^2$ ）

能理解功、功率、动能、重力势能及机械能守恒定律的内涵，定性了解弹性势能；能用动能定理和机械能守恒定律等分析解释生产生活中的相关现象，解决一些相关的实际问题，能体会守恒观念对认识物理规律的重要性。具有与功和机械能相关的初步的能量观念。

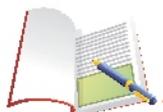
——物理观念

素养提升



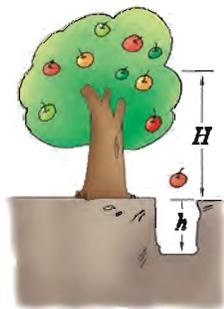
物理园地

跳水运动员在弹离跳板后，先上升到一定的高度，在空中完成一系列复杂而优美的动作后入水。请你分析一下，从运动员起跳到入水的全过程中，有哪些能量发生了相互转化。说出你的判断依据，并与同学讨论交流。



节练习

- 请撰写“验证机械能守恒定律”的实验报告，注意在报告中呈现设计的表格及数据分析过程。
- 下列说法正确的是
 - 物体的机械能守恒时，一定只受重力作用
 - 物体处于平衡状态时，机械能一定守恒
 - 物体除受重力外，还受其他力时，机械能也可能守恒
 - 物体的重力势能和动能之和增大时，必有重力以外的力对其做功
- 如图所示，质量为 m 的苹果从距地面高度为 H 的树上由静止开始下落，树下有一深度为 h 的坑。若以地面为零势能参考平面，则苹果刚要落到坑底时的机械能为
 - $-mgh$
 - mgH
 - $mg(H+h)$
 - $mg(H-h)$
- 在水平地面以 20 m/s 的速度将一物体竖直上抛。若以水平地面为零势能参考平面，忽略空气阻力，取重力加速度 $g = 10\text{ m/s}^2$ ，求：
 - 物体上升的最大高度；
 - 物体在上升过程中其重力势能和动能相等的位置距地面的高度。
- 如图所示，轻弹簧 k 一端与墙相连，质量 $m = 4\text{ kg}$ 的木块沿光滑水平面以 $v_0 = 5\text{ m/s}$ 的初速度向左运动。求：
 - 弹簧在被压缩过程中的最大弹性势能；
 - 木块压缩弹簧后速度减小到 3 m/s 时弹簧的弹性势能。



第3题



第5题

6. 某同学计划通过测量重物自由下落的瞬时速度 v 和下落高度 h 来验证机械能守恒定律。

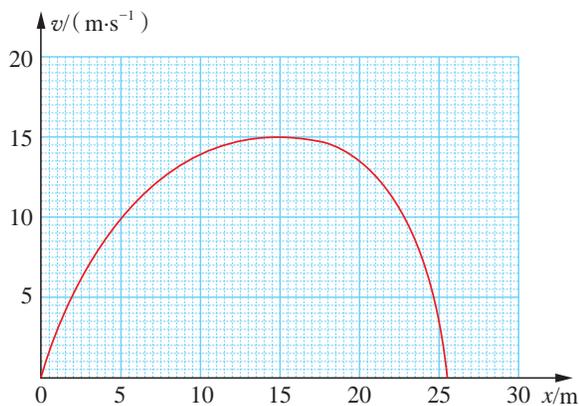
(1) 以下四种测量方案中, 合理的是 _____ (填正确选项前的字母), 理由是 _____。

- A. 直接测量下落高度 h 和下落时间 t , 通过 $v = gt$ 算出瞬时速度 v
- B. 直接测量下落高度 h , 通过 $v^2 = 2gh$ 算出瞬时速度 v
- C. 根据纸带上某点的相邻两点间的平均速度, 得到该点的瞬时速度 v , 再由 $v^2 = 2gh$ 算出高度 h
- D. 直接测量下落高度 h , 根据纸带上某点的相邻两点间的平均速度, 得到该点的瞬时速度 v

(2) 实验中产生系统误差的主要原因是纸带通过打点计时器时存在摩擦阻力, 使重物获得的动能往往 _____ (选填“大于”“小于”或“等于”) 它所减小的重力势能。

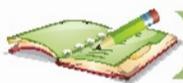
(3) 如果以 $\frac{v^2}{2}$ 为纵轴、 h 为横轴, 根据实验数据绘出的 $\frac{v^2}{2} - h$ 图线是一条通过坐标原点的倾斜直线, 该直线的斜率是 _____。

7. 研究蹦极运动时, 在运动员身上装好传感器, 用于测量他在不同时刻下落的高度及速度。已知运动员及其所携带的全部设备的总质量为 60 kg , 弹性绳原长为 10 m 。运动员从蹦极台无初速度下落, 根据传感器测到的数据, 得到如图所示的速度—位移图像。不计空气阻力, 取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。问: 运动员下落过程中在什么位置动能最大? 该位置受力有什么特点? 运动员下落速度最大时和落到最低点时, 绳的弹性势能分别为多大? 请陈述运用相关定律解决问题的条件。



第7题

请提问



章末练习

科学认知

1. 竖直向上抛一小球，小球又落回原处。假设空气阻力的大小不变，小球在上升过程中克服重力做功的平均功率和下降过程中重力做功的平均功率哪个更大？请说明理由。
2. 拖着旧橡胶轮胎跑步是一种训练体能的常用方法。某消防队员在体能训练时拖着轮胎在操场上以恒定的速率跑了 80 m，下列说法正确的是

- A. 摩擦力对轮胎做了负功
- B. 合外力对轮胎做了正功
- C. 拉力对轮胎所做的功等于轮胎动能的改变
- D. 支持力对轮胎做了正功

3. 如图所示，质量为 m 的小球用长 l 的细线悬挂并静止在竖直位置 P 。用水平拉力 F 将小球缓慢地拉到 Q 点的过程中，拉力 F 做功为

- A. $mg l \cos \theta$
- B. $mg l (1 - \cos \theta)$
- C. $F l \sin \theta$
- D. $F l$

4. 修建高层建筑常用的塔式起重机如图所示。在起重机将质量 $m = 5 \times 10^3 \text{ kg}$ 的重物竖直吊起的过程中，重物由静止开始向上做匀加速直线运动，加速度 $a = 0.2 \text{ m/s}^2$ 。当起重机的输出功率达到其允许的最大值时，保持该功率不变直到重物做 $v_{\text{max}} = 1.02 \text{ m/s}$ 的匀速运动。取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，不计额外功，求：

- (1) 起重机允许输出的最大功率；
- (2) 重物做匀加速直线运动所经历的时间。

5. 雪车是冬季竞技运动项目之一。如图所示，在一段赛道上，运动员操控雪车无动力滑行，沿斜坡赛道经 A 点至坡底 O 点，再沿水平赛道经 B 点滑至 C 点。已知运动员与雪车的总质量为 m ， A 点距水平赛道的高度为 h ， OB 距离为 s ，雪车在 A 、 B 和 C 各点的速度分别为 v_A 、 v_B 和 v_C ，从 B 点滑至 C 点所用时间为 t_{BC} 。忽略空气阻力，设雪车与赛道表面间的摩擦力大小恒定，重力加速度大小为 g ，求：

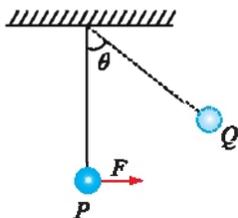
- (1) 滑行过程中雪车所受摩擦力的大小；
- (2) 雪车与运动员从 A 点滑到 O 点的过程中机械能的改变量。

6. 某人将质量为 0.2 kg 的小球斜向上抛出，抛出点距离地面 2.6 m ，抛出时速度大小为 12 m/s ，方向与水平方向之间的夹角为 30° 。取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

- (1) 若不计空气阻力，求小球落地时的速度大小。
- (2) 若小球落地时的速度为 13 m/s ，求小球在空中运动过程中克服阻力做的功。

7. “辽宁号”航空母舰的质量为 m ，以速度 v 沿直线匀速驶向某训练海域，此时多台蒸汽轮机发动机的输出总功率为 P 。若因需要临时关闭其中一半的发动机，则

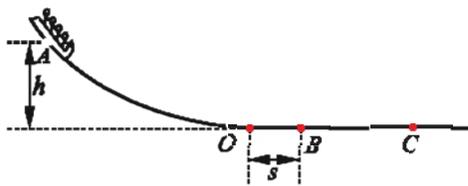
- (1) 求发动机刚刚关闭时“辽宁号”航空母舰的加速度大小；
- (2) 描述发动机关闭后一段时间内航空母舰的运动速度和加速度的变化情况。



第3题



第4题

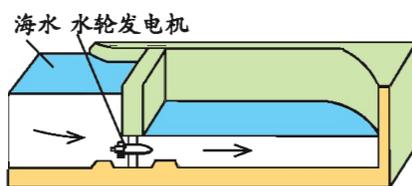


第5题



第7题

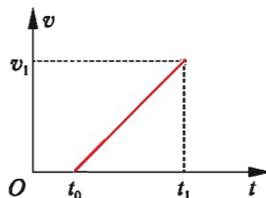
8. 某海湾面积为 $1.0 \times 10^7 \text{ m}^2$, 涨潮时水深 20 m, 退潮时水深降至 18 m. 现利用此海湾筑水坝建潮汐水力发电站, 利用涨潮 (如图所示) 和落潮过程中进出海湾的潮水推动水轮发电机组发电. 若重力势能转化为电能的效率是 10%, 每天有两次涨潮, 取海水密度 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$, 求该发电站一天能发出多少电能.



第8题

科学探究

9. 某同学为了探究书本在下落过程中所受的空气阻力, 将一质量为 m 的书本放在运动传感器的正下方由静止释放, 得到书本落地前下落的速度—时间图像如图所示. 求:



第9题

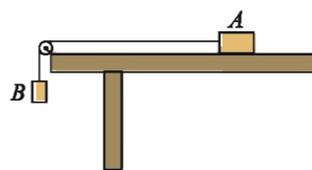
- (1) 书本下落的距离;
- (2) 书本在落地前损失的机械能以及在此下落过程中所受空气阻力的大小.

温故知新

10. 某航模兴趣小组设计出一架遥控飞行器, 质量 $m = 2 \text{ kg}$, 动力系统提供的恒定升力 $F = 28 \text{ N}$. 试飞时, 飞行器从地面由静止开始竖直上升. 假设飞行器飞行时所受阻力大小不变, 取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$.

- (1) 第一次试飞, 飞行器飞行 $t_1 = 8 \text{ s}$ 时到达的高度 $h = 64 \text{ m}$, 求飞行器所受阻力 f .
- (2) 第二次试飞, 飞行器飞行 $t_2 = 6 \text{ s}$ 时遥控器出现故障, 飞行器立即失去升力, 求飞行器能到达的最大高度 H .

11. 如图所示, 可视为质点的两物块 A 、 B 的质量分别为 M 、 m . A 放在光滑水平桌面上, 一不可伸长的轻绳跨过光滑轻质定滑轮, 两端分别与 A 、 B 相连接, A 和滑轮间的轻绳与桌面平行. 现将 A 从静止释放, 不计空气阻力, 重力加速度为 g . 请你设计两个问题, 使其可应用下面的物理规律解决.



第11题

- (1) 牛顿第二定律.
- (2) 动能定理或机械能守恒定律.

12. 请根据第1章 (功和机械能) 的内容, 结合你的理解, 画出概念图.



我的学习总结



单元自我检测

一、选择题(本题共5小题。在每小题给出的四个选项中,第1~3题只有一项符合题目要求,第4、5题有多项符合题目要求)

1. 如图所示,某同学从一滑坡的顶端由静止开始下滑,然后沿水平面滑动了一段距离后停下来。在整个运动过程中

- A. 支持力对他做正功
- B. 他的重力势能一直不变
- C. 他的机械能守恒
- D. 他的机械能减小



第1题

2. 假设摩托艇受到的阻力的大小与它的速率成正比。如果摩托艇发动机的输出功率变为原来的2倍,则摩托艇的最大速率变为原来的

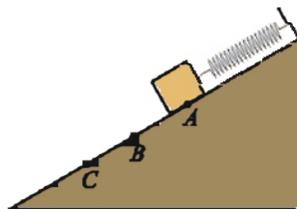
- A. 4倍
- B. 2倍
- C. $\sqrt{3}$ 倍
- D. $\sqrt{2}$ 倍

3. 某同学骑自行车下坡。已知坡长500 m、高8 m,人和车的总质量为100 kg。下坡时车的初速度为4 m/s,在人不踏车的情况下,到达坡底时车速为10 m/s。取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$,则下坡过程中阻力做的功为

- A. -4 000 J
- B. -3 800 J
- C. -5 000 J
- D. 200 J

4. 如图所示,在粗糙斜面顶端固定一弹簧,弹簧下端挂一物体,物体在A点处于平衡状态。现用平行于斜面向下的力拉物体,第一次直接拉到B点,第二次将物体先拉到C点,从静止释放后,再回到B点。在这两次到B点的过程中

- A. 物体重力势能的改变量相等
- B. 弹簧的弹性势能的改变量相等
- C. 摩擦力对物体做的功相等
- D. 弹簧弹力对物体做的功相等



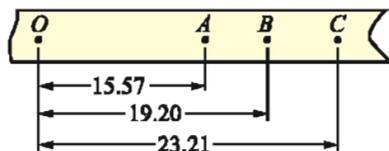
第4题

5. 一物体静止在粗糙水平地面上。现用一大小为 F_1 的水平拉力拉动物体,经过一段时间后其速度为 v 。若将水平拉力的大小改为 F_2 ,物体从静止开始经过同样的时间后其速度为 $2v$ 。对于上述两个过程,用 W_{F_1} 、 W_{F_2} 分别表示拉力 F_1 、 F_2 所做的功, W_{f_1} 、 W_{f_2} 分别表示物体前、后两次克服摩擦力所做的功,则

- A. $W_{F_2} > 4W_{F_1}$
- B. $W_{F_2} < 4W_{F_1}$
- C. $W_{f_2} = 2W_{f_1}$
- D. $W_{f_2} < 2W_{f_1}$

二、非选择题

6. 在“验证机械能守恒定律”的实验中,质量为1 kg的重物自由下落,在纸带上打出一系列的点,其中O为第一个点,A、B、C为从合适位置开始选取的连续三个点,如图所示。相邻计数点间隔的时间为0.02 s,测量点间距所用单位为cm,取重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。(计算结果均保留3位有效数字)



第6题

(1) 打点计时器打下计数点B时,重物的速度是_____ m/s。

(2) 从起点 O 到打下计数点 B 的过程中, 重物重力势能的减少量 $\Delta E_p =$ _____ J, 动能的增加量 $\Delta E_k =$ _____ J。

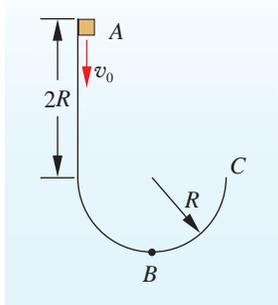
(3) 通过计算可知, 在数值上 ΔE_p _____ (选填 “>” “<” 或 “=”) ΔE_k 。这是因为 _____。

7. 如图所示, 质量为 m 的物体, 以某一初速度 v_0 从 A 点向下在光滑的轨道中运动。不计空气阻力, 若物体通过 B 点时的速度为 $3\sqrt{gR}$, 求:

- (1) 物体在 A 点时的速度;
- (2) 物体离开 C 点后还能上升的高度。

8. 如图所示, 在某些少数民族地区, 溜索也是一种交通工具。溜索通常由铁索和滑轮组成, 某溜索的铁索长度为 l , 等高固定于两岸。若质量为 m 的滑行者滑到溜索中央最低点时高度下降了 h_0 , 且滑行者及滑轮在滑行过程中所受阻力大小恒为 f , 不计滑轮质量, 重力加速度为 g 。

- (1) 若滑行者初速度为 0, 当其滑到最低点时, 滑行者的速度是多少?
- (2) 若要到达对岸, 滑行者至少要做多少功?
- (3) 若要架设的溜索在两岸的固定点不等高, 请从物理学角度回答架设溜索时应注意哪些问题。



第 7 题



第 8 题



单元自我评价

回顾本单元的学业要求和所学内容, 结合本次单元自我检测和平时学习情况进行自我评价, 写一篇“单元自我评价”报告。说说你学会了什么、存在什么问题及今后努力的方向等。

第2章

抛体运动

导 入 更准、更远

第1节 运动的合成与分解

第2节 平抛运动

第3节 科学探究：平抛运动的特点

第4节 生活中的抛体运动

▶▶ 本章学业要求

- 能了解曲线运动的内涵，知道物体做曲线运动的条件，能从运动合成与分解角度认识抛体运动；能综合分析生产生活中的抛体运动问题，解决一些相关的实际问题。具有与抛体运动相关的初步的运动观念。

——物理观念

- 能在熟悉情境中运用抛体运动模型解决问题；能对平抛运动等问题进行分析推理，能体会将复杂运动分解为简单运动的物理思想；能用与抛体运动规律相关的证据说明结论并作出解释；能从不同角度分析解决抛体运动问题。

——科学思维

- 能完成“探究平抛运动的特点”等物理实验。能有针对性地提出可探究的物理问题；能在他人帮助下制订相关的探究方案，有根据器材调整实验方案的意识，获取数据；能分析数据、提出猜想、形成与实验目的相关的结论；能撰写比较完整的实验报告，在报告中能呈现实验表格、数据分析过程及实验结论，能根据实验报告进行交流。

——科学探究

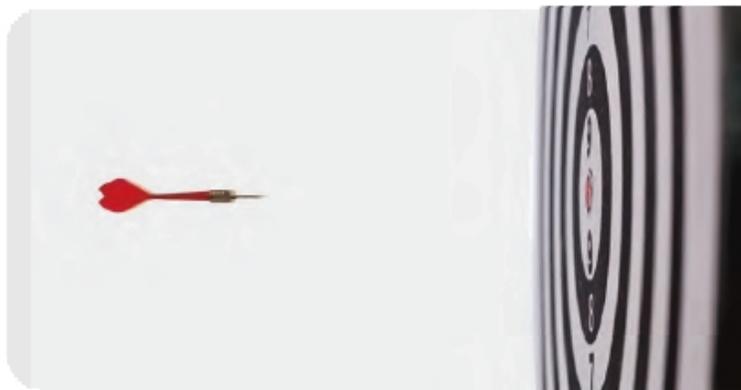
- 通过对平抛运动特点的探究，能认识物理学是人们有意识探究而形成的对自然现象的描述与解释；能主动参加科技活动，有学习物理的内在动力；能体会物理学的应用对日常生活的影响。

——科学态度与责任

导 入

更准、更远

飞镖运动是一项非常有趣的运动。在一次飞镖比赛中，一位同学沿水平方向正对飞镖盘的靶心投出飞镖，飞镖能命中靶心吗？从物理学的角度看，怎样才能投得更准？



如何投飞镖更准



如何掷标枪更远

在田径运动会上，运动员投掷标枪、铅球、铁饼，都会非常注意投掷的角度。如果要参加学校田径运动会的投掷比赛，你知道怎样才能投掷得更远吗？除了力度外，为何还与投掷角度有关？

投出的飞镖、掷出的标枪的运动均属于曲线运动。曲线运动有怎样的规律？如何探究曲线运动的特点？本章将从运动的合成与分解入手，学习平抛运动等内容。

第1节

运动的合成与分解

我们已经学习了研究某些直线运动的方法，如果物体的运动是较为复杂的曲线运动，该如何分析呢？本节将学习利用运动的合成与分解的思想，分析和解决曲线运动的相关问题。

1. 认识曲线运动

自然界中物体的运动通常十分复杂。为了便于研究，可根据研究的问题，将运动简化为直线运动和曲线运动。

下落的苹果、竖直向上抛出的石子、沿平直公路行驶的汽车，其运动轨迹都可视为直线，这种轨迹为直线的运动称为直线运动。水平扔出的飞镖、绕地球运动的卫星（图 2-1），其运动轨迹都是曲线，这种轨迹为曲线的运动称为**曲线运动**（curvilinear motion）。

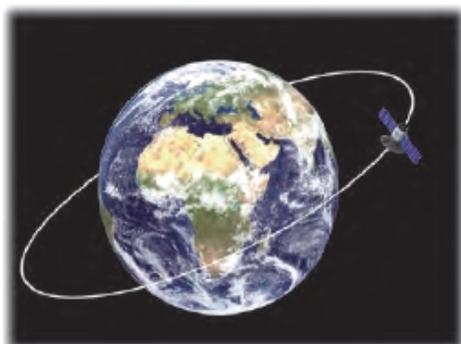


图 2-1 绕地球运动卫星的示意图

物体在什么情况下做曲线运动呢？让我们一起来观察下面的实验。



迷你实验室

钢珠在磁铁吸引下的运动

首先推动钢珠，让钢珠在水平桌面上做直线运动，观察其运动轨迹。然后在其运动轨迹旁放一块磁铁（图 2-2），再次推动钢珠，观察其运动轨迹。解释观察到的现象。

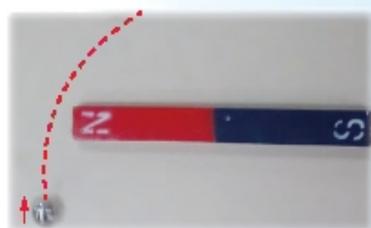


图 2-2 钢珠在磁铁吸引下的运动轨迹

当物体所受合力的方向跟它的速度方向在同一直线上时,由牛顿第二定律可知,加速度方向与速度方向在一条直线上,物体做直线运动。当物体所受合力的方向跟它的速度方向不在同一直线上时,物体做曲线运动。钢珠第一次滚动时受到的阻力与速度方向相反,做减速直线运动。钢珠第二次滚动时受到阻力和磁铁的吸引力,所受合力的方向与速度方向不在同一直线上,做曲线运动。水平扔出的飞镖、喷泉口倾斜喷出的水柱,因为所受重力的方向与速度的方向不在同一直线上,所以都做曲线运动。

速度是矢量,它既有大小,又有方向。做曲线运动的物体在某一点的速度方向,为沿曲线在该点的切线方向。曲线运动中速度的方向时刻在变化,因此曲线运动是变速运动。



迷你实验室

曲线运动的速度方向

用笔画一条直线,你会发现,笔尖运动方向保持不变(图2-3);再用笔画一条曲线,观察笔尖运动,你会发现,笔尖运动方向不断改变(图2-4)。在图2-4中,根据平均速度的定义,笔尖经时间 t 沿曲线从 A 点运动到 B 点,平均速度的方向与位移 AB 的方向相同。 t 越短,平均速度越接近 A 点的瞬时速度,其方向越接近 A 点的切线方向。因此,物体在某点的速度方向,就是沿曲线在该点的切线方向。

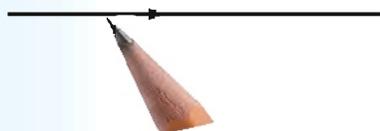


图2-3 画直线时,笔尖运动的方向不变

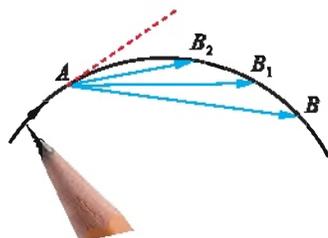


图2-4 画曲线时,笔尖运动的方向不断改变

2. 生活中运动的合成与分解

运动的合成与分解是处理复杂运动的基本方法。如果一个物体同时参与了几个运动,那么物体实际发生的运动就是这几个运动的合运动,这几个运动就是物体实际运动的分运动。对于复杂运动,可将其分解为几个简单的直线运动,再运用直线运动规律分别进行研究。下面我们通过竹筏过小河的运动,来具体探讨运动的合成与分解问题。



如图 2-5 所示, 假设当竹筏始终垂直于河对岸匀速划动时, 它会从小河 A 处匀速运动到河对岸的 B 处, 位移为 s , 速度为 v 。若河水不流动, 竹筏在静水中沿 AB' 方向划动, 经过时间 t , 竹筏从 A 点匀速运动到 B' 点, 这个分运动的位移为 s_1 , 速度为 v_1 。若竹筏没有划动, 河水使竹筏从 A 点匀速运动到 A' 点, 这个分运动的位移为 s_2 , 速度为 v_2 , 时间仍为 t 。竹筏在流动的河水中划动时, 经过相同时间 t , 竹筏从 A 点运动到 B 点, 这就是上述两个分运动的合运动。

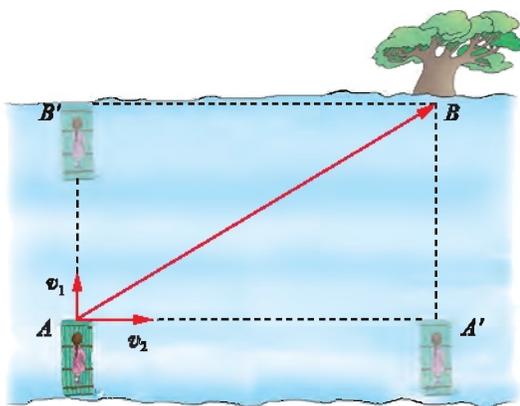


图 2-5 竹筏过小河的运动分解示意图

运动的合成与分解实质上是对描述运动的物理量如位移、速度、加速度的合成与分解, 遵从矢量运算法则。如上所述, 竹筏过小河时, 设竹筏在 AB' 方向是匀速划动的, 河水在 AA' 方向是匀速流动的, 竹筏的两个分运动的速度都是恒定的, 所以合运动也是匀速直线运动, 其位移、速度的矢量合成图, 分别如图 2-6、图 2-7 所示。由于两分运动的方向相互垂直, 对应的位移大小和速度大小为

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2}$$

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$

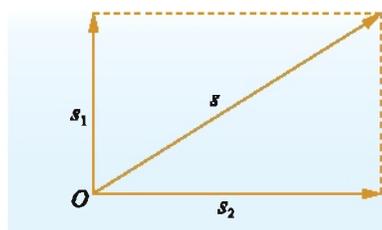


图 2-6 位移的合成与分解

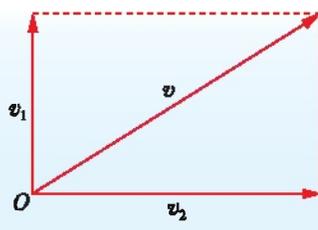


图 2-7 速度的合成与分解



物理趣吧

在图 2-5 所示竹筏过小河的运动中, 如果河水的流动保持匀速直线运动, 但竹筏在静水中的运动为匀加速直线运动, 请尝试在图中用粗略描点的方法, 画出这种情况下竹筏的实际运动轨迹, 看看其合运动是否为直线运动, 并与同学交流。

例题

跳伞员打开降落伞下落一段时间后的运动可近似视为匀速下落。若无风，跳伞员着地的速度约为 5 m/s，方向竖直向下；若有风，且风速大小为 4 m/s，方向水平向东，假设跳伞员在水平方向的速度与风速相等，落地时在竖直方向的速度与水平风速无关，则跳伞员着地的速度将是多大？速度的方向怎样？

分析

有风时跳伞员实际的运动是竖直下落的运动和水平方向的运动的合运动。可通过平行四边形定则求解。

解

跳伞员在有风时着地的速度 $v_{地}$ ，为降落伞无风时匀速下降的速度 $v_{伞}$ 和风速 $v_{风}$ 的合速度，如图 2-8 所示。由勾股定理求得

$$v_{地} = \sqrt{v_{风}^2 + v_{伞}^2} = \sqrt{4^2 + 5^2} \text{ m/s} = 6.4 \text{ m/s}$$

设着地速度 $v_{地}$ 与竖直方向的夹角为 θ ，则

$$\tan \theta = \frac{v_{风}}{v_{伞}} = \frac{4}{5} = 0.8$$

解得 $\theta = 38.7^\circ$

讨论

风变大时，跳伞员水平方向的速度将变大，那么其落地的速度将会怎样改变？

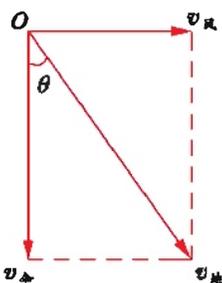


图 2-8 速度的合成

策略提炼

求解运动的合成与分解问题，首先要分清合运动与分运动，然后根据矢量运算法则进行合成或分解。

迁移

如图 2-9 所示，一条小船位于宽 200 m 的河的正中间 A 点处，下游 150 m 处有一危险区，已知小船在静水中的最大速度为 3 m/s，水流速度为 4 m/s。为了使小船避开危险区安全到达河岸，船员立刻使船头正对河岸奋力划船，小船能安全到达河岸吗？

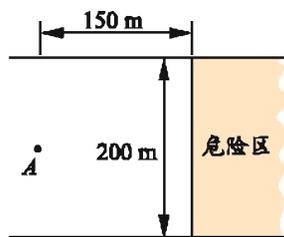
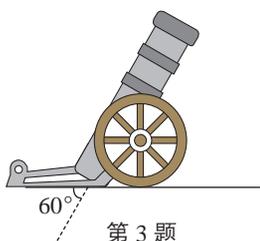


图 2-9 小船过河示意图



节练习

1. 设空中的雨滴从静止开始下落，遇到水平方向吹来的风。请分析风速对雨滴下落时间和着地速度的影响。
2. 下列说法正确的是
 - A. 物体在恒力作用下不可能做曲线运动
 - B. 物体在变力作用下一定做曲线运动
 - C. 物体的速度方向与合力方向不在同一条直线上时，物体一定做曲线运动
 - D. 做曲线运动的物体所受合力的方向一定是变化的
3. 如图所示，炮筒与水平方向的夹角为 60° ，炮弹从炮筒射出时速度的大小为 800 m/s 。求炮弹射出时在竖直方向和水平方向的分速度大小。
4. 如图所示，汽艇在静水中的航行速度是 12 km/h 。若它在流速为 3 km/h 的河水中航行，当船头与河岸垂直时，求合速度的大小和方向。

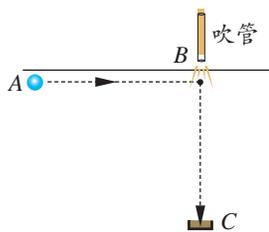


第3题



第4题

5. 在雪地军事演习中，已知子弹射出时的速度是 500 m/s ，射击者坐在以 10 m/s 的速度向正东方向行驶的雪橇上，要射中位于他正北方的靶子，必须向什么方向射击？（结果可用三角函数表示）
6. 某趣味物理实验中，在水平桌面上从桌子的一个角 A 向 B 发射一个乒乓球，一同学在桌边试着用一支吹管将球由 B 处吹进球门 C ，如图所示。该同学将吹管对准 C 用力吹，但球总是进不了球门。请帮他分析失败的原因。



第6题

请提问



第2节

平抛运动

多数情况下，抛出去的物体做曲线运动。在射箭运动中，若运动员将箭头正对靶心水平射出，这支箭在离弦后做直线运动还是曲线运动？最终能否射中靶心？要分析解决这个问题，需要用到平抛运动的相关知识。

1. 什么是平抛运动

物体以一定的初速度沿水平方向抛出，只在重力作用下所做的运动，称为**平抛运动**（horizontal projectile motion）。比如，用力推一下水平桌面上的小球，小球在桌面上运动，直至以一定的初速度沿水平方向飞出。不考虑空气阻力的作用，小球飞出后所做的运动就是平抛运动（图 2-10）。平抛运动在体育运动项目中很常见。比如，网球运动员举拍沿水平方向用力击球，球离开球拍后在重力的作用下划出一条抛物线，向对方场地飞去，这时球的运动可近似视为平抛运动（图 2-11）。

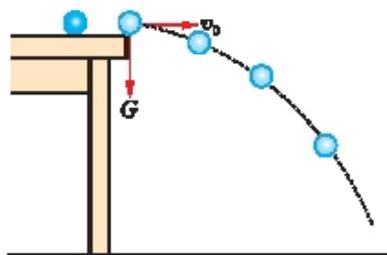


图 2-10 小球做平抛运动的示意图

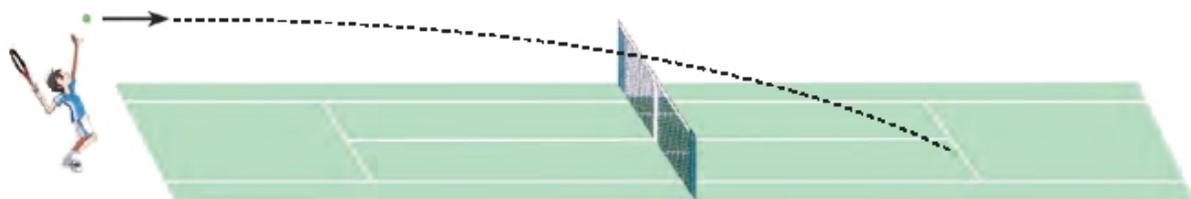


图 2-11 网球做平抛运动的示意图

2. 平抛运动的规律

下面，我们来进一步认识平抛运动。



研究平抛运动

(1) 通过如图 2-12 (a) 所示的平抛运动演示器来研究平抛运动。用小锤击打弹性金属片 C ，球 A 沿水平方向飞出，做平抛运动。与此同时，与球 A 相同的球 B 被松开做自由落体运动。改变实验装置离地面的高度，多次实验，两球总是同时落地。在同一高度改变小锤击打的力度，使球 A 的平抛初速度大小不同，多次实验，两球也总是同时落地。这说明做平抛运动的球 A 在竖直方向上的运动情况与球 B 相同，为自由落体运动。

(2) 在如图 2-12 (b) 所示的装置中， M 、 N 是两个完全相同的轨道，轨道末端都与水平方向相切。其中，轨道 N 的末端与光滑水平面相切，轨道 M 通过支架固定在轨道 N 的正上方。将小铁球 P 、 Q 分别吸在电磁铁 C 、 D 上，然后切断电源，使两球以相同的初速度 v_0 同时通过轨道 M 、 N 的末端，发现两球同时到达 E 处，发生碰撞。改变轨道 M 在轨道 N 上方的高度，再进行实验，结果两球也总是发生碰撞。这说明做平抛运动的 P 球在水平方向上的运动情况与 Q 球相同，为匀速直线运动。

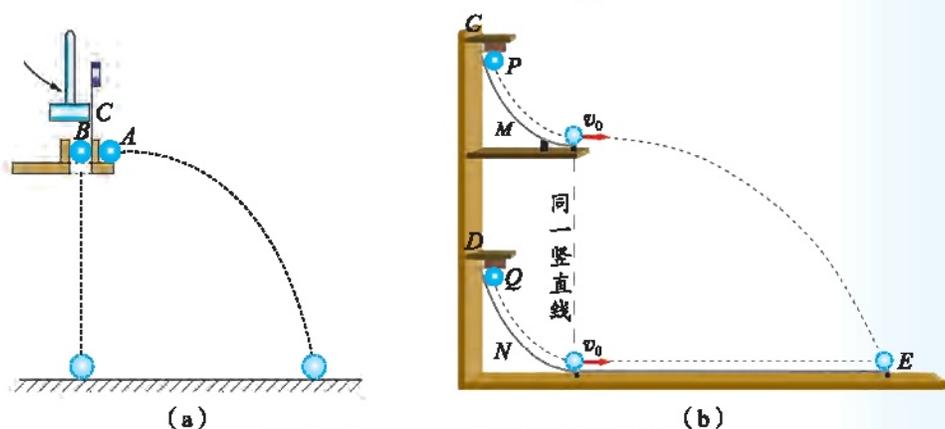


图 2-12 研究平抛运动实验装置示意图

为了对平抛运动有更深入的认识，可用频闪照相拍摄小球的运动。图 2-13 是两个小球同时开始分别做自由落体运动和平抛运动的频闪照片。从照片上可以看出，两个小球在同一时刻的高度相同，表明做平抛运动的小球在竖直方向上的运动规律与自由落体运动相同。进一步分析表明，小球在水平方向上的运动是匀速直线运动。因此，平抛运动可以分解为沿水平方向的匀速直线运动和沿竖直方向的自由落体运动。

既然平抛运动可视为水平方向的匀速直线运动与竖直方向的自由落体运动的合运动，我们就可以运用运动的合成与分解，确定平抛物体在任一时刻的位置和速度。



图 2-13 平抛运动和自由落体运动的频闪照片

以抛出点为坐标原点，初速度方向为 x 轴正方向，重力方向为 y 轴的正方向，建立直角坐标系（图 2-14）。在这个坐标系中，加速度方向与 y 轴正方向相同。根据匀速直线运动和自由落体运动的规律，可以得到物体在任意时刻的位置坐标，即

$$x = v_0 t$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2$$

还可得到物体在任意时刻的分速度和速度，即

$$v_x = v_0$$

$$v_y = g t$$

由此可得 $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}$

设速度的方向与水平分速度 v_x 的方向成 θ 角，则

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{g t}{v_0}$$

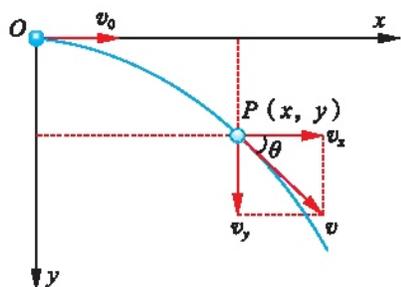


图 2-14 在直角坐标系中分析平抛运动的示意图

能在熟悉情境中运用抛体运动模型解决问题；能对平抛运动等问题进行分析推理，能体会将复杂运动分解为简单运动的物理思想；能用与抛体运动规律相关的证据说明结论并作出解释；能从不同角度分析解决抛体运动问题。

——科学思维

素养提升



物理趣吧

图 2-15 为一探究小组成员探究平抛运动的情景。他在同一位置以不同的初速度先后水平抛出三个小球。

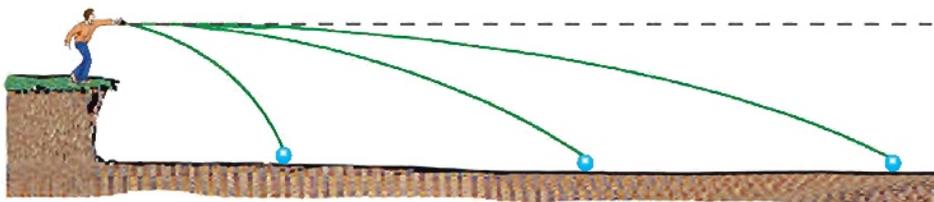


图 2-15 投出的小球做平抛运动的示意图

请讨论：根据上述探究活动能否得出下列结论？

- (1) 在相同的高度，以大小不同的初速度水平抛出的小球，初速度越大，抛出点到落地点的水平距离越远；
- (2) 在高度不变的情况下，水平初速度的大小并不影响平抛物体在竖直方向上的运动；
- (3) 平抛运动过程经历的时间完全由抛出点到落地点的竖直高度决定，与抛出时初速度的大小无关。



例题

在一次军事演习中，一架装载军用物资的飞机，在距地面 500 m 的高处以 50 m/s 的水平速度飞行。为了把军用物资准确地投掷到地面目标位置，飞行员应在距目标水平距离多远处投放物资？（取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，不计空气阻力）

分析

如图 2-16 所示，从飞机上投放的物资在离开飞机瞬间具有与飞机相同的水平速度。因为其在下落过程中只受重力作用，所以离开飞机后的物资做平抛运动。题目中已知水平速度，求水平距离，需要确定物资在水平方向的运动时间，该时间与竖直方向的运动时间相同，可根据题目中给出的高度求出。

解

物资在空中飞行的时间 t 取决于竖直高度。

由自由落体的位移公式 $H = \frac{1}{2}gt^2$

$$\text{得 } t = \sqrt{\frac{2H}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 500}{10}} \text{ s} = 10 \text{ s}$$

设投放物资处到地面目标位置的水平距离为 s ，由于物资在水平方向做匀速运动，则

$$s = v_0 t = 50 \times 10 \text{ m} = 500 \text{ m}$$

即飞行员应在距地面目标位置水平距离为 500 m 远的地方投放物资。

讨论

要使军用物资准确地落到目标位置，需在飞机到达目标位置上空前投放。提前的时间和水平距离分别由哪些因素决定？

若将飞镖或箭正对靶心水平射出，能够命中靶心吗？



图 2-16 投放的物资做平抛运动的示意图

策略提炼

对于平抛运动问题，一般可从位移关系和速度关系求解。抓住平抛运动（合运动）与水平分运动、竖直分运动经过的时间相等这一点，往往是解决问题的关键。

迁移

平抛运动的问题中不仅会涉及位移关系，有时还会涉及速度关系。如图 2-17 所示，在摩托车赛道上，水平路面的前方有一个壕沟，壕沟两侧高度差为 0.8 m，水平间距为 5 m。若忽略空气阻力，取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，摩托车水平飞出的速度至少要多大才能越过这个壕沟？摩托车刚好越过壕沟时速度方向与水平方向的夹角是多大？

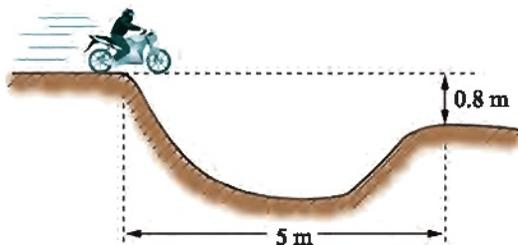
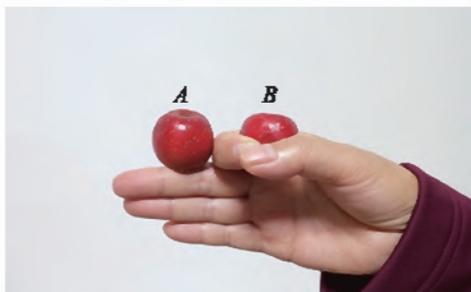


图 2-17 摩托车的速度多大才能越过壕沟

节练习

1. 取两个形状、大小尽量相同的山楂 A 、 B ，将山楂 B 夹在拇指与弯曲的食指之间，山楂 A 放在中指上，使两山楂尽量处于同一高度，如图所示。用食指弹击放在中指上的山楂 A ，山楂 A 沿水平方向抛出，山楂 B 同时被释放，自由下落。它们是否会同时落地？动手做一做，看看与你的判断是否相同，并说明其中的道理。



第1题

2. 一架飞机沿水平方向匀速飞行，从飞机上每隔 1 s 投放一件物品，先后共投放四件相同的物品。如果不计空气阻力，这四件物品在空中任何时刻总在飞机正下方的竖直线上，且落地点是等间距的。请判断这种说法是否正确，并说明理由。

3. 关于平抛物体的运动，下列说法正确的是

A. 平抛运动是物体只在重力作用下的运动

B. 平抛运动是物体不受任何外力作用的运动

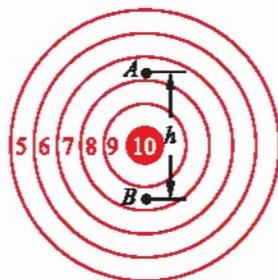
C. 做平抛运动的物体在水平方向初速度为 0

D. 做平抛运动的物体在竖直方向初速度为 0

4. 某实验小组成员站在高处沿水平方向抛出一物体。已知抛出时物体距地面 5 m ，物体落到地面时的水平位移为 9 m 。取重力加速度 $g = 10\text{ m/s}^2$ ，不计空气阻力，求物体抛出时水平速度的大小。

5. 以 30 m/s 的初速度水平抛出一个物体，经过一段时间后，物体的速度方向与水平方向成 30° 角。取重力加速度 $g = 10\text{ m/s}^2$ ，不计空气阻力，求此时物体相对于抛出点的水平位移和竖直位移。

6. 如图所示，两支步枪先后在同一位置沿水平方向各射出一颗子弹，打在 100 m 远处的靶子上，两弹孔在竖直方向相距 5 cm ，其中 A 为甲枪的子弹孔， B 为乙枪的子弹孔。



第6题

(1) 哪支枪射出的子弹速度较大？为什么？

(2) 若甲枪子弹射出时的速度为 500 m/s ，取重力加速度 $g = 10\text{ m/s}^2$ ，不计空气阻力，求乙枪子弹射出时的速度。

请提问

第3节

科学探究：平抛运动的特点

我们经常能够观察到做平抛运动的物体在空中划过一条曲线，这条曲线有什么特点？本节我们将用实验的方法记录下做平抛运动物体的运动轨迹，然后根据记录的轨迹对平抛运动的特点做进一步的探究。

实验目的

- (1) 描绘物体做平抛运动的轨迹并分析其特点。
- (2) 根据平抛运动的轨迹求平抛初速度。

实验器材

斜槽、小球、木板、铅垂线、坐标纸、图钉、刻度尺、铅笔（或卡孔）等。

实验原理与设计

将斜槽等器材安装起来，实验装置如图 2-18 所示。小球从斜槽上滚下，通过水平槽飞出后做平抛运动。使小球每次都从斜槽上同一位置由静止释放，小球在空中做平抛运动的轨迹相同。设法用铅笔描出小球经过的位置。通过多次实验，在坐标纸上记录小球所经过的多个位置，用平滑的曲线将各点连起来，从而得到小球做平抛运动的轨迹。

根据平抛运动的公式 $x = v_0 t$ 和 $y = \frac{1}{2} g t^2$ ，可求出小球做平抛运动的初速度。

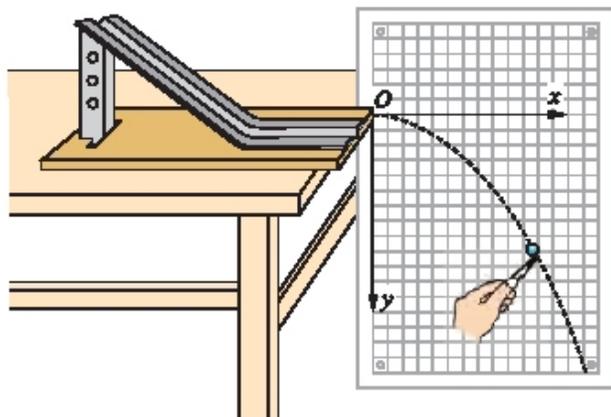


图 2-18 实验装置示意图



安全警示

不随意扔小球并注意小球落地过程，避免小球伤人或损坏实验室物品。

实验步骤

(1) 用图钉把坐标纸钉在竖直木板上，在木板的左上角固定斜槽，并使其末端保持水平。

(2) 用悬挂在槽口的铅垂线把木板调整到竖直方向，并使木板平面与小球下落的竖直面平行且靠近，固定好木板。

(3) 把小球放在槽口处，用铅笔记下小球在槽口时球心在木板上的水平投影点 O ，再利用铅垂线在纸上画出通过 O 点的竖直线。

(4) 将小球从斜槽上合适的位置由静止释放，使小球的运动轨迹大致经过坐标纸的右下角。

(5) 把笔尖放在小球可能经过的位置，如果小球运动中碰到笔尖，用铅笔在坐标纸该位置画上一笔。用同样的方法，从同一位置释放小球，在小球运动路线上描下若干点。

数据分析

(1) 根据实验记录，在坐标纸上描绘小球平抛运动的轨迹。

(2) 在平抛运动轨迹上选取几个水平间距相等的测量点，测出并计算相应物理量填入你设计的表格中。

(3) 观察描出的轨迹，与你熟悉的曲线进行比较，猜想 y 与 x 的关系，作出 $y-x^2$ 图像，验证你的猜想。

实验结论

请写出实验结论。

讨论

在平抛轨迹上依次选取水平方向等间距的 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 几个点，在竖直方向上测量并计算 $y_{EF}-y_{DE}$ 、 $y_{DE}-y_{CD}$ 、 $y_{CD}-y_{BC}$ 、 $y_{BC}-y_{AB}$ ，在误差允许的范围内，它们有怎样的特点？由此你能得出小球在竖直方向上的运动性质吗？

能有针对性地提出可探究的物理问题；能在他人帮助下制订相关的探究方案，有根据器材调整实验方案意识，获取数据；能分析数据、提出猜想、形成与实验目的相关的结论；能撰写比较完整的实验报告，在报告中能呈现实验表格、数据分析过程及实验结论，能根据实验报告进行交流。

注意提升实验操作能力及猜想验证能力。

——科学探究

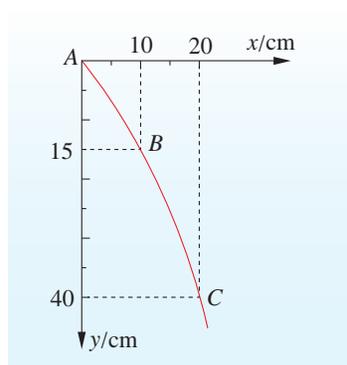
素养提升

节练习

1. 请撰写“探究平抛运动的特点”的实验报告，注意在报告中呈现设计的实验表格以及数据分析过程和实验结论。
2. 在“探究平抛运动的特点”实验中，下列做法可以减小实验误差的是
 - A. 使用体积更小的球
 - B. 尽量减小球与斜槽间的摩擦
 - C. 使斜槽末端的切线保持水平
 - D. 使小球每次都从同一高度由静止开始滚下



3. 在“探究平抛运动的特点”的实验中，某同学记录了运动轨迹上的三个点A、B、C，如图所示。以A点为坐标原点建立坐标系，各点的坐标值已在图中标出。求：
- (1) 小球做平抛运动的初速度大小；
 - (2) 小球做平抛运动的初始位置坐标。
4. 一农用水泵的出水管是水平的。当水泵工作时，水流从整个水管中流出。若用平抛运动的知识测量水的流量（此处指单位时间内流经水管横截面的水的体积），你需要测量哪些物理量？根据这些物理量推导出计算流量的表达式。



第3题



请提问

第4节

生活中的抛体运动

田径场上投掷出的链球、铅球、铁饼、标枪以及杂技表演中抛出去的球在空中的运动（图 2-19）都可视为抛体运动。以一定的初速度将物体抛出，物体仅在重力作用下所做的运动，称为**抛体运动**（projectile motion）。根据抛出物体的初速度方向，我们可把抛体运动分为平抛运动、竖直上抛运动、竖直下抛运动和斜抛运动（斜上抛运动和斜下抛运动）。

对于抛体运动，我们可用运动的合成与分解的方法进行分析和研究。以斜抛（斜上抛）运动为例，我们可建立一个直角坐标系，将坐标系的原点选择在物体的抛出点，物体运动的水平方向为 x 轴正方向，竖直向上为 y 轴正方向，如图 2-20 所示。物体抛出方向与 x 轴正方向之间的夹角称为抛射角，用 θ 表示。在这个坐标系中，物体被抛出的初速度 v_0 可分解为水平方向的 v_{0x} 、竖直方向的 v_{0y} 。物体在水平方向没有受到外力的作用，在竖直方向上只受到竖直向下的重力作用。因此，斜上抛运动可看成水平方向初速度为 v_{0x} 的匀速直线运动和竖直方向初速度为 v_{0y} 的竖直上抛运动的合运动。图 2-21 是做斜抛（斜上抛）运动小球的频闪照片。分析可知，小球运动的轨迹是抛物线。

在图 2-20 中，物体能到达的最大高度称为射高，物体从抛出点到落地点的水平距离称为射程。研究表明：抛射角一定，初速度增大，射高和射程都增大。初速度大小一定，当抛射角为 45° 时，射

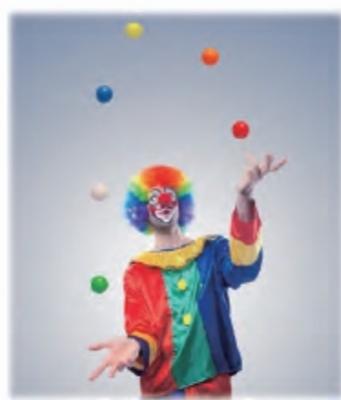


图 2-19 空中抛球表演

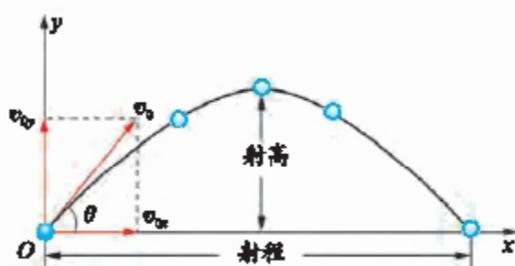


图 2-20 分析斜抛运动的示意图



图 2-21 做斜抛运动的小球的频闪照片



程最大；当抛射角为 90° 时，射高最大。斜抛运动的射高和射程是实际生产生活中所关注的问题。

投掷出的链球、铁饼、标枪所做的运动都可视为斜抛运动，考虑到抛出点离地面有一段高度，为使它们的射程最大，抛射角通常可略小于 45° （请分析为什么）。有些喷泉喷射出的水的运动也可视为斜抛运动，控制喷水的喷射初速度，可使水的射程和射高不同而形成美景（图 2-22）。以上是忽略空气阻力的情况，若考虑空气阻力，情况会有所不同。

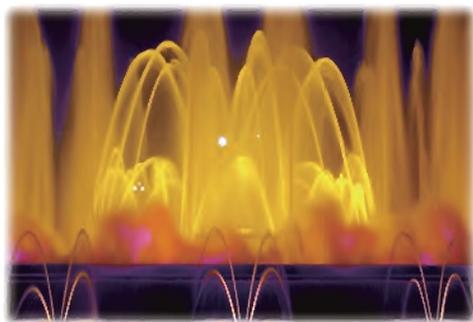
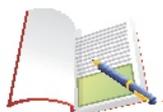


图 2-22 美丽的喷泉

能了解曲线运动的内涵，知道物体做曲线运动的条件，能从运动合成与分解角度认识抛体运动；能综合分析生产生活中的抛体运动问题，解决一些相关的实际问题。具有与抛体运动相关的初步的运动观念。
——物理观念

素养提升



节练习

1. 抛体运动是匀变速运动吗？请说明理由。
2. 如果把物体斜向下抛出，请运用运动合成与分解的方法，说明斜向下的抛体运动可视为哪两个运动的合运动。

请提问

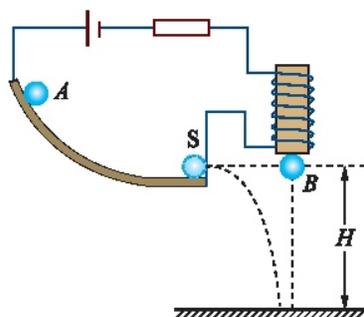




章末练习

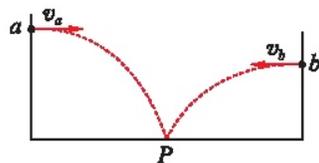
科学认知

1. 如图所示, 在研究平抛运动时, 小球 A 沿轨道滑下, 离开轨道末端 (末端水平) 时撞开轻质接触式开关 S , 被电磁铁吸住的小球 B 同时自由下落。改变整个装置的高度, 多次实验, 发现 A 、 B 两球总是同时落地。该实验现象说明, A 球在离开轨道后, 竖直方向的运动有何特点?



第1题

2. 如图所示, 在同一竖直面内, 小球 a 、 b 从高度不同的两点分别以初速度 v_a 和 v_b 沿水平方向抛出, 若不计空气阻力, 经过时间 t_a 和 t_b 后落到与两抛出点水平距离相等的 P 点。请比较 v_a 和 v_b 、 t_a 和 t_b 的大小。

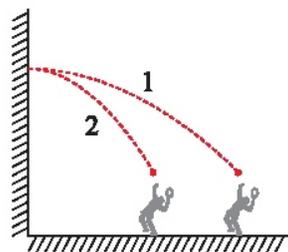


第2题

3. 关于平抛运动, 下列说法正确的是

- A. 做平抛运动的物体不受任何外力的作用
- B. 平抛运动是曲线运动, 不可能是匀变速运动
- C. 做平抛运动的物体在竖直方向做自由落体运动
- D. 物体做平抛运动的落地时间与初速度的大小无关

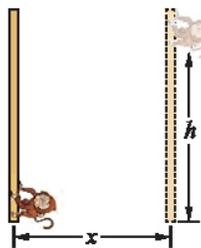
4. 网球运动员训练时, 将球从某一点斜向上打出, 若不计空气阻力, 网球恰好能垂直撞在竖直墙上的某一固定点, 等速反弹后又恰好沿抛出轨迹返回击出点。如图所示, 运动员在同一高度的前后两个不同位置将网球击出后, 垂直击中竖直墙上的同一固定点。下列判断正确的是



第4题

- A. 沿轨迹 1 运动的网球击出时的初速度大
- B. 两轨迹中网球撞墙前的速度可能相等
- C. 从击出到撞墙, 沿轨迹 2 运动的网球在空中运动的时间短
- D. 沿轨迹 1 运动的网球刚要撞墙时的速度小

5. 在马戏表演中, 猴子沿竖直杆向上做初速度为 0、加速度为 a 的匀加速运动, 同时人顶着直杆以速度 v_0 水平匀速移动, 经过时间 t , 猴子沿杆向上移动的高度为 h , 人顶杆沿水平地面移动的距离为 x , 如图所示。关于猴子的运动情况, 下列说法正确的是



第5题

- A. 相对地面的运动轨迹为直线
- B. 相对地面做匀变速曲线运动
- C. t 时刻猴子对地速度的大小为 $v_0 + at$
- D. t 时间内猴子对地的位移大小为 $\sqrt{x^2 + h^2}$

6. 从离地面高 h 处以水平速度 v_0 抛出一物体。不计空气阻力, 重力加速度为 g , 求物体落地时的速度大小及速度方向与竖直方向所成的夹角的正切值。

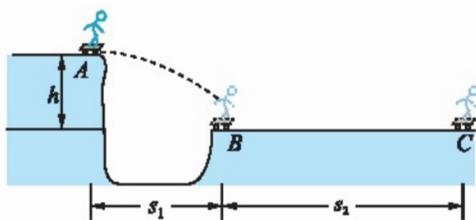
7. 船在宽 400 m 的河中横渡, 河水的流速是 2 m/s, 船在静水中的航速是 4 m/s。

- (1) 要使船到达对岸的时间最短, 船头应指向何处? 最短时间是多少?
- (2) 要使船航程最短, 船头应指向何处? 到达对岸用时多少?



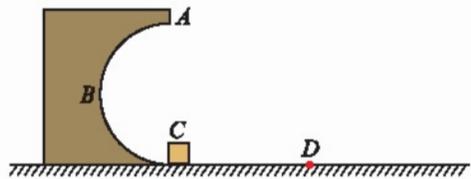
8. 如图所示, 某滑板爱好者在距地面高度 $h = 1.8 \text{ m}$ 的平台上滑行, 水平离开 A 点后落在水平地面的 B 点, 其水平位移 $s_1 = 3 \text{ m}$ 。由于着地时存在能量损失, 着地后速度变为 $v = 4 \text{ m/s}$, 并以此为初速度沿水平地面滑行 $s_2 = 8 \text{ m}$ 后停止。已知人与滑板的总质量 $m = 60 \text{ kg}$, 取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$, 不计空气阻力, 求:

- (1) 人与滑板在水平地面滑行时受到的平均阻力大小;
(2) 人与滑板离开平台时的水平初速度。



第8题

9. 如图所示, 一半径 $R = 0.5 \text{ m}$ 的光滑半圆形轨道 ABC 固定在竖直平面内, 轨道在 C 处与水平地面相切。在 C 处放一小物块, 给它一个水平向左的初速度 $v_0 = 5 \text{ m/s}$, 结果它沿 CBA 运动, 通过 A 点, 最后落在水平地面上的 D 点。取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$, 不计空气阻力, 求 C 、 D 间的距离 s 。



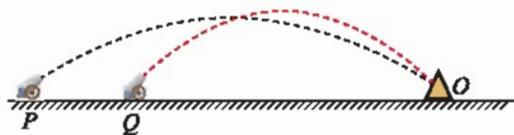
第9题

科学辨析

- *10. 如图所示, 夜空中绽放的烟花绚丽多彩, 璀璨夺目。你在欣赏这一美景的时候, 有没有注意过它们的形状? 有没有思考过它们为什么呈现这样的形状? 请从抛体运动的视角写一篇小短文, 阐述你的看法。
11. 某次军事演习中, 在 P 、 Q 两处的炮兵向正前方同一目标 O 发射炮弹, 要求同时击中目标。若忽略空气阻力, 炮弹轨迹如图所示, 你认为哪一处的炮兵先发射炮弹? 请简述理由。



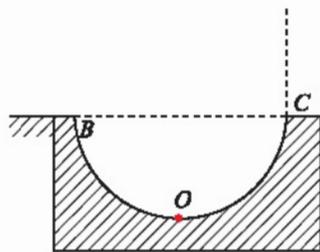
第10题



第11题

温故知新

12. 如图所示, 自行车特技运动员从 B 点由静止出发, 经圆弧 BOC , 从 C 点竖直冲出后完成空翻。已知完成空翻的时间为 t , 由 B 点到 C 点的过程中克服摩擦力做功为 W_f , 自行车运动员和自行车的总质量为 m , 重力加速度为 g , 空气阻力忽略不计, 求运动员从 B 点到 C 点至少做了多少功。



第12题

我的学习总结

