

机械能及其守恒定律

一、功 功率

考点 1：功

1. 功的公式： $W = Fscos\theta$

$0 \leq \theta < 90^\circ$ 力 F 对物体做正功，

$\theta = 90^\circ$ 力 F 对物体不做功，

$90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ 力 F 对物体做负功。

特别注意：

①公式只适用于恒力做功

② F 和 S 是对应同一个物体的；

③某力做的功仅由 F、S 决定，与其它力是否存在以及物体的运动情况都无关。

2. 重力的功： $W_G = mgh$ ——只跟物体的重力及物体移动的始终位置的高度差有关，跟移动的路径无关。

3. 摩擦力的功(包括静摩擦力和滑动摩擦力)

摩擦力可以做负功，摩擦力可以做正功，摩擦力可以不做功，一对静摩擦力的总功一定等于

0，一对滑动摩擦力的总功等于 $-f\Delta S$

4. 弹力的功

(1)弹力对物体可以做正功可以不做功，也可以做负功。

(2)弹簧的弹力的功—— $W = 1/2 kx_1^2 - 1/2 kx_2^2$ (x_1 、 x_2 为弹簧的形变量)

5. 合力的功——有两种方法：

(1)先求出合力，然后求总功，表达式为 $\Sigma W = \Sigma F \times S \times \cos\theta$

(2)合力的功等于各分力所做功的代数和，即 $\Sigma W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$

6. 变力做功：基本原则——过程分割与代数累积

(1)一般用动能定理 $W_{合} = \Delta E_k$ 求之；

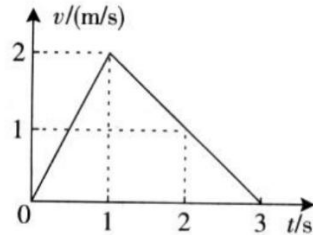
(2)也可用(微元法)无限分小法来求,过程无限分小后,可认为每小段是恒力做功

(3)还可用 F-S 图线下的“面积”计算.

(4)或先寻求 F 对 S 的平均作用力 \bar{F} , $W = \bar{F}S$

7.做功意义的理解问题:解决功能问题时,把握“功是能量转化的量度”这一要点,做功意味着能量的转移与转化,做多少功,相应就有多少能量发生转移或转化。

例 1.物体在合外力作用下做直线运动的 v-t 图象如图所示。下列表述正确的是



- A. 在 0—1s 内,合外力做正功
- B. 在 0—2s 内,合外力总是做负功
- C. 在 1—2s 内,合外力不做功
- D. 在 0—3s 内,合外力总是做正功

答案: A

考点 2: 功率

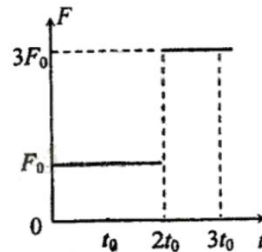
1.定义式: $P = \frac{W}{t}$, 所求出的功率是时间 t 内的平均功率。

2.计算式: $P = Fv \cos \theta$, 其中 θ 是力 F 与速度 v 间的夹角。用该公式时,要求 F 为恒力。

- (1)当 v 为即时速度时,对应的 P 为即时功率;
- (2)当 v 为平均速度时,对应的 P 为平均功率。
- (3)重力的功率可表示为 $P_G = mgv_{\perp}$, 仅由重力及物体的竖直分运动的速度大小决定。
- (4)若力和速度在一条直线上,上式可简化为 $P = F \cdot vt$

例 2.质量为 m 的物体静止在光滑水平面上,从 $t=0$ 时刻开始受到水平力的作用。力的大小 F 与时间 t 的关系如图所示,力的方向保持不变,则

- A. $3t_0$ 时刻的瞬时功率为 $\frac{5F_0^2 t_0}{m}$
- B. $3t_0$ 时刻的瞬时功率为 $\frac{15F_0^2 t_0}{m}$



C. 在 $t = 0$ 到 $3t_0$ 这段时间内, 水平力的平均功率为 $\frac{23F_0^2 t_0}{4m}$

D. 在 $t = 0$ 到 $3t_0$ 这段时间内, 水平力的平均功率为 $\frac{25F_0^2 t_0}{6m}$

解析: AB 选项 0 到 $3t_0$ 时刻物体的速度为 $5F_0 t_0/m$, 所以 $3t_0$ 的瞬时功率为 $\frac{15F_0^2 t_0}{m}$ A 错 B 对。

CD 选项 0 到 $3t_0$ 时刻 F 对物体做的功为 $25F_0^2 t_0^2/2m$, 所以 $3t_0$ 内平均功率为 $25F_0^2 t_0/6m$ C 错 D 对。 **答案:** BD

二、动能、动能定理

考点 1: 动能

1. 定义: 物体由于运动而具有的能叫动能

2. 表达式为: $E_k = \frac{1}{2}mv^2$,

3. 动能和动量的关系: 动能是用以描述机械运动的状态量。动量是从机械运动出发量化机械运动的状态, 动量确定的物体决定着它克服一定的阻力还能运动多久; 动能则是从机械运动与其它运动的关系出发量化机械运动的状态, 动能确定的物体决定着它克服一定的阻力还能运动多远。

考点 2: 动能定理

1. 定义: 合外力所做的总功等于物体动能的变化量。—— 这个结论叫做动能定理。

2. 表达式: $W_{\text{合}} = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \Delta E_k$,

式中 $W_{\text{合}}$ 是各个外力对物体做功的总和, ΔE_k 是做功过程中始末两个状态动能的增量。

3. 推导: 动能定理实际上是在牛顿第二定律的基础上对空间累积而得:

在牛顿第二定律 $F=ma$ 两端同乘以合外力方向上的位移 s , 即可得

$$W_{\text{合}} = Fs = mas = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

4. 对动能定理的理解:

①如果物体受到几个力的共同作用, 则(1)式中的 W 表示各个力做功的代数和, 即合外力所做的功。 $W_{\text{合}}=W_1+W_2+W_3+\dots$

②应用动能定理解题的特点：跟过程的细节无关.即不追究全过程中的运动性质和状态变化细节.

③动能定理的研究对象是质点.

④动能定理对变力做功情况也适用.动能定理尽管是在恒力作用下利用牛顿第二定律和运动学公式推导的,但对变力做功情况亦适用.动能定理可用于求变力的功、曲线运动中的功以及复杂过程中的功能转换问题.

⑤对合外力的功(总功)的理解

(1)可以是几个力在同一段位移中的功,也可以是一个力在几段位移中的功,还可以是几个力在几段位移中的功

(2)求总功有两种方法:

一种是先求出合外力,然后求总功,表达式为 $\Sigma W = \Sigma F \times S \times \cos \theta$, θ 为合外力与位移的夹角;

另一种是总功等于各力在各段位移中做功的代数和,即 $\Sigma W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$

重难点：汽车启动中的变力做功问题

例 1. 以初速度 v_0 竖直向上抛出一质量为 m 的小物体.假定物块所受的空气阻力 f 大小不变.

已知重力加速度为 g , 则物体上升的最大高度和返回到原抛出点的速率分别为

A. $\frac{v_0^2}{2g(1+\frac{f}{mg})}$ 和 $v_0\sqrt{\frac{mg-f}{mg+f}}$

B. $\frac{v_0^2}{2g(1+\frac{f}{mg})}$ 和 $v_0\sqrt{\frac{mg}{mg+f}}$

C. $\frac{v_0^2}{2g(1+\frac{2f}{mg})}$ 和 $v_0\sqrt{\frac{mg-f}{mg+f}}$

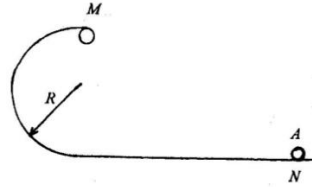
D. $\frac{v_0^2}{2g(1+\frac{2f}{mg})}$ 和 $v_0\sqrt{\frac{mg}{mg+f}}$

解析： 上升的过程中,重力做负功,阻力 f 做负功,由动能定理得

$$-(mgh + fh) = -\frac{1}{2}mv_0^2, h = \frac{v_0^2}{2g(1+\frac{f}{mg})}, \text{ 求返回抛出点的速度由全程使用动能定理重}$$

力做功为零,只有阻力做功为有 $-2mgh = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$, 解得 $v = v_0\sqrt{\frac{mg-f}{mg+f}}$, A 正确。

例 2. 半径 $R=20\text{cm}$ 的竖直放置的圆轨道与水平直轨道相连接。如图所示。质量为 $m=50\text{g}$ 的小球 A 以一定的初速度由直轨道向左运动，并沿圆轨道的内壁冲上去，如果 A 经过 N 点时的速度 $v_1=4\text{m/s}$ ，A 经过轨道最高点 M 时对轨道的压力为 0.5N ，取 $g=10\text{m/s}^2$ 。



求：小球 A 从 N 到 M 这一过程中克服阻力做的功 W 。

解析： 小球运动到 M 点时，速度为 v_m ，轨道对球的作用

力为 N ，由向心力公式可得：
$$N+mg=m\frac{v_m^2}{R}, \quad 0.5+0.05\times 10=0.05\times\frac{v_m^2}{0.2} \quad v_m=2\text{m/s}$$

从 N 到 M 点由动能定理：
$$-mg\cdot 2R-W_f=\frac{1}{2}mv_M^2-\frac{1}{2}mv_N^2$$

$$W_f=\frac{1}{2}mv_N^2-\frac{1}{2}mv_M^2-mg\times 2R=\frac{1}{2}\times 0.05\times 4^2-\frac{1}{2}\times 0.05\times 2^2-0.05\times 10\times 2\times 0.2$$

$W_f=0.1\text{J}$

例 3. 质量为 $5\times 10^3\text{kg}$ 的汽车在 $t=0$ 时刻速度 $v_0=10\text{m/s}$ ，随后以 $P=6\times 10^4\text{W}$ 的额定功率沿平直公路继续前进，经 72s 达到最大速度，设汽车受恒定阻力，其大小为 $2.5\times 10^3\text{N}$ 。求：
(1) 汽车的最大速度 v_m ；(2) 汽车在 72s 内经过的路程 s 。

解析：

(1) 当达到最大速度时， $P=Fv=fv_m$ ， $v_m=\frac{P}{f}=\frac{6\times 10^4}{2.5\times 10^3}\text{m/s}=24\text{m/s}$

(2) 从开始到 72s 时刻依据动能定理得：

$$Pt-fs=\frac{1}{2}mv_m^2-\frac{1}{2}mv_0^2, \quad \text{解得：} s=\frac{2Pt-mv_m^2+mv_0^2}{2f}=1252\text{m}.$$

答案： (1) 24m/s (2) 1252m

三、重力势能 机械能守恒定律

(一)机械能守恒问题

例 1. 游乐场中的一种滑梯如图所示。小朋友从轨道顶端由静止开始下滑，沿水平轨道滑动了一段距离后停下来，则

- A. 下滑过程中支持力对小朋友做功
- B. 下滑过程中小朋友的重力势能增加
- C. 整个运动过程中小朋友的机械能守恒



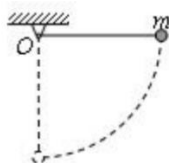
D. 在水平面滑动过程中摩擦力对小朋友做负功

解析: 在滑动的过程中, 人受三个力重力做正功, 势能降低 B 错; 支持力不做功, 摩擦力做负功, 所以机械能不守恒, AC 皆错, D 正确。

(二)机械能守恒问题、重力势能问题

例 2.如图 8 所示, 用一轻绳系一小球悬于 O 点。现将小球拉至水平位置, 然后释放, 不计阻力。小球下落到最低点的过程中, 下列表述正确的是

- A. 小球的机械能守恒
- B. 小球所受的合力不变
- C. 小球的动能不断减小
- D. 小球的重力势能增加



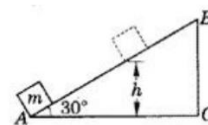
解析:

- A 选项小球受到的力中仅有重力做功, 所以机械能守恒, A 选项对。
- B 选项小球受到的合力的大小方向时时刻刻在发生变化, B 选项错。
- C 选项小球从上到最低点的过程中动能是不断增大的, C 选项错。
- D 选项小球从上到最低点的过程中机械能是不断减少的, D 选项错。

答案: A

例 3. 如图所示, 一个质量为 m 的物体(可视为质点)以某一速度从 A 点冲上倾角为 30° 的固定斜面, 其运动的加速度为 $3g/4$, 物体在斜面上上升的最大高度为 h 。则物体在沿斜面上升的全过程中 ()

- A. 重力势能增加了 $\frac{3}{4}mgh$
- B. 重力势能增加了 mgh
- C. 动能损失了 mgh
- D. 机械能损失了 $\frac{1}{2}mgh$



答案: BD

(三) 知识网络

考点 1: 重力做功的特点与重力势能

1.重力做功的特点: 重力做功与路径无关, 只与始末位置的竖直高度差有关, 当重力为的物体从 A 点运动到 B 点, 无论走过怎样的路径, 只要 A、B 两点间竖直高度差为 h , 重力 mg

所做的功均为 $W_G = mgh$

2.重力势能：物体由于被举高而具有的能叫重力势能。其表达式为： $E_p = mgh$ ，其中 h 为物体所在处相对于所选取的零势面的竖直高度，而零势面的选取可以是任意的，一般是取地面为重力势能的零势面。由于零势面的选取可以是任意的，所以一个物体在某一状态下所具有的重力势能的值将随零势面的选取而不同，但物体经历的某一过程中重力势能的变化却与零势面的选取无关。

3.重力做功与重力势能变化间的关系：重力做的功总等于重力势能的减少量，即

a. 重力做正功时，重力势能减少，减少的重力势能等于重力所做的功 $-\Delta E_p = W_G$

b. 克服重力做功时，重力势能增加，增加的重力势能等于克服重力所做的功 $\Delta E_p = -W_G$

考点 2：弹性势能

1.发生弹性形变的物体具有的能叫做弹性势能

2.弹性势能的大小跟物体形变的大小有关， $E_p' = 1/2 \times kx^2$

3.弹性势能的变化与弹力做功的关系：

弹力所做的功，等于弹性势能减少。 $W_{弹} = -\Delta E_p'$

考点 3. 机械能守恒定律

1.机械能：动能和势能的总和称机械能。而势能中除了重力势能外还有弹性势能。所谓弹性势能批量的是物体由于发生弹性形变而具有的能。

2.机械能守恒定律：只有重力做功和弹力做功时，动能和重力势能、弹性势能间相互转换，但机械能的总量保持不变，这就是所谓的机械能守恒定律。

3.机械能守恒定律的适用条件：

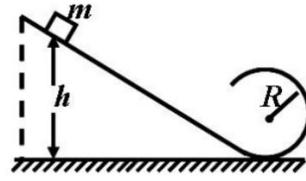
(1)对单个物体，只有重力或弹力做功。

(2)对某一系统,物体间只有动能和重力势能及弹性势能相互转化,系统跟外界没有发生机械能的传递,机械能也没有转变成其它形式的能(如没有内能产生),则系统的机械能守恒。

(3)定律既适用于一个物体(实为一个物体与地球组成的系统),又适用于几个物体组成的物体系,但前提必须满足机械能守恒的条件。

重难点：如何理解、应用匀变速直线运动规律的这个公式？

例 4. 如图所示，位于竖直平面内的光滑轨道，由一段斜的直轨道和与之相切的圆形轨道连接而成，圆形轨道的半径为 R 。一质量为 m 的小物块从斜轨道上某处由静止开始下滑，然后沿圆形轨道运动。要求物块能通过圆形轨道的最高点，且在该最高点与轨道间的压力不能超过 $5mg$ (g 为重力加速度)。求物块初始位置相对于圆形轨道底部的高度 h 的取值范围。



解析： 设物块在圆形轨道最高点的速度为 v ，由机械能守恒得

$$mgh = 2mgR + \frac{1}{2}mv^2 \quad ①$$

物块在最高点受的力为重力 mg 、轨道的压力 N 。重力与压力的合力提供向心力，有

$$mg + N = m\frac{v^2}{R} \quad ②$$

物块能通过最高点的条件是 $N \geq 0$ ③

由②③式得 $v \geq \sqrt{gR}$ ④

由①④式得 $h \geq \frac{5}{2}R$ ⑤

按题的要求， $N \leq 5mg$ ，由②⑤式得

$$v \leq \sqrt{6gR} \quad ⑥$$

由①⑥式得 $h \leq 5R$ ⑦

h 的取值范围是 $2.5R \leq h \leq 5R$

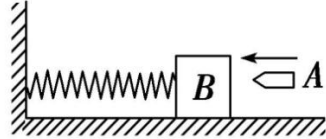
答案： $2.5R \leq h \leq 5R$

四、功能关系 能的转化和守恒定律

考点：功能关系——功是能量转化的量度

- (1) 重力所做的功等于重力势能的减少
- (2) 电场力所做的功等于电势能的减少
- (3) 弹簧的弹力所做的功等于弹性势能的减少
- (4) 合外力所做的功等于动能的增加
- (5) 只有重力和弹簧的弹力做功，机械能守恒
- (6) 重力和弹簧的弹力以外的力所做的功等于机械能的增加 $W_F = E_2 - E_1 = \Delta E$
- (7) 克服一对滑动摩擦力所做的净功等于机械能的减少 $\Delta E = f\Delta S$ (ΔS 为相对滑动的距离)

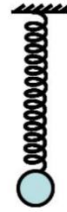
例 1.如图 7—8—1 所示装置中，木块与水平桌面间的接触面是光滑的，子弹 A 沿水平方向射入木块后留在木块内，将弹簧压缩到最短，则从子弹开始射木块到弹簧压缩至最短的整个过程中(bd)



- A. 子弹与木块组成的系统机械能守恒
- B. 子弹与木块组成的系统机械能不守恒
- C. 子弹、木块和弹簧组成的系统机械能守恒
- D. 子弹、木块和弹簧组成的系统机械能不守恒

答案：BD

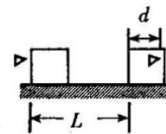
例 2. 如图所示，弹簧下面挂一质量为 m 的物体，物体在竖直方向上作振幅为 A 的简谐运动，当物体振动到最高点时，弹簧正好为原长。则物体在振动过程中 ()



- A. 物体在最低点时的弹力大小应为 $2mg$
- B. 弹簧的弹性势能和物体动能总和不变
- C. 弹簧的最大弹性势能等于 $2mgA$
- D. 物体的最大动能应等于 mgA

答案：AC

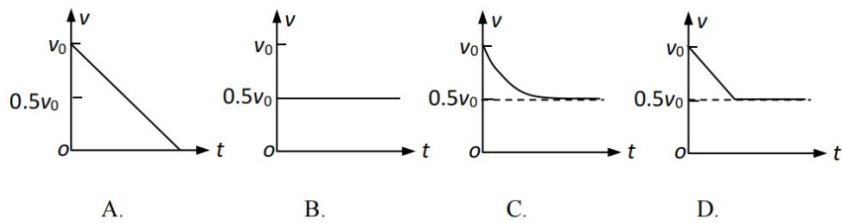
例 3. 如图所示，木块静止在光滑水平桌面上，一子弹平射入木块的深度为 d 时，子弹与木块相对静止，在子弹入射的过程中，木块沿桌面移动的距离为 L ，木块对子弹的平均阻力为 f ，那么在这一过程中 ()



- A. 木块的机械能增量 fL
- B. 子弹的机械能减少量为 $f(L+d)$
- C. 系统的机械能减少量为 fd
- D. 系统的机械能减少量为 $f(L+d)$

五、功和能机械能守恒定律测试

1.汽车在平直公路上以速度 v_0 匀速行驶，发动机功率为 P .快进入闹市区时，司机减小了油门，使汽车的功率立即减小一半并保持该功率继续行驶.下面四个图象中，哪个图象正确表示了从司机减小油门开始，汽车的速度与时间的关系 ()



2.光滑水平面上静置一质量为 M 的木块,一质量为 m 的子弹以水平速度 v_1 射入木块,以速度 v_2 穿出,木块速度变为 v ,在这个过程中,下列说法中正确的是()

- A. 子弹对木块做的功为 $1/2 mv_1^2 - 1/2 mv_2^2$
- B. 子弹对木块做的功等于子弹克服阻力做的功
- C. 子弹对木块做的功等于木块获得的动能与子弹跟木块间摩擦产生的内能之和
- D. 子弹损失的动能转变成木块获得的动能与子弹跟木块间摩擦产生的内能

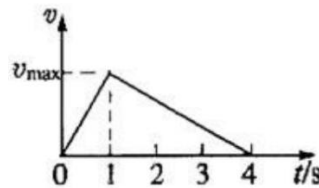
3.如图 5—9 所示,一轻弹簧一端系在墙上,自由伸长时,右端正好处在 B 处,今将一质量为 m 的小物体靠着弹簧,将弹簧压缩到 A 处,然后释放,小物体能在水平面上运动到 C 点静止, AC 距离为 s ;如将小物体系在弹簧上,在 A 由静止释放,则小物体将向右运动,最终停止,设小物体通过的总路程为 L ,则下列选项正确的是()



图 5 - 9

- A. $L > s$
- B. $L = s$
- C. $L = 2s$
- D. 以上答案都有可能

4.在平直公路上,汽车由静止开始作匀加速运动,当速度达到某一值时,立即关闭发动机后滑行至停止,其 $v-t$ 图像如图所示,汽车牵引力为 F ,运动过程中所受的摩擦阻力恒为 f ,全过程中牵引力所做的功为 W_1 ,克服摩擦阻力所做的功为 W_2 ,则下列关系中正确的是



- ()
- A. $F:f=1:3$
- B. $F:f=3:1$
- C. $W_1:W_2=1:1$
- D. $W_1:W_2=1:3$

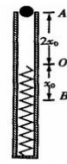
5. 一个小物块从斜面底端冲上足够长的斜面后又返回到斜面底端,已知小物块的初

动能为 E ，它返回到斜面底端的速度为 V ，克服摩擦力所做功为 $E/2$ ，若小物块以 $2E$ 的初动能冲上斜面，则有 ()

- A. 返回到斜面底端时的动能为 $3E/2$
- B. 返回斜面底端时的动能为 E
- C. 返回斜面底端时的速度大小为 $\sqrt{2}V$
- D. 小物块在两次往返过程中克服摩擦力做的功相同

6. 如图所示，在一直立的光滑管内放置一轻质弹簧，上端 O 点与管口 A 的距离为 $2x_0$ ，一质量为 m 的小球从管口由静止下落，将弹簧压缩至最低点 B ，压缩量为 x_0 ，不计空气阻力，则()

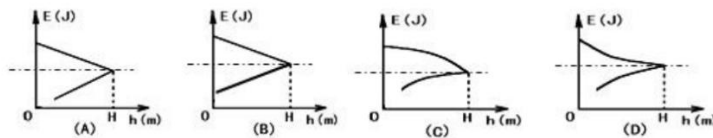
- A. 小球运动的最大速度大于 $2\sqrt{gx_0}$
- B. 小球运动中最大加速度为 g
- C. 弹簧的劲度系数为 mg/x_0
- D. 弹簧的最大弹性势能为 $3mgx_0$



7. 一质量为 m 的物体以速度 v 在竖直平面内做半径为 R 的匀速圆周运动，假设 $t=0$ 时刻物体在轨迹最低点且重力势能为零，那么，下列说法正确的是()

- A. 物体运动的过程中，重力势能随时间的变化关系为 $E_p = mgR(1 - \cos \frac{v}{R}t)$
- B. 物体运动的过程中，动能随时间的变化关系为 $E_k = \frac{1}{2}mv^2 - mgR(1 - \cos \frac{v}{R}t)$
- C. 物体运动的过程中，机械能守恒，且机械能为 $E = \frac{1}{2}mv^2$
- D. 物体运动的过程中，机械能随时间的变化关系为 $E = \frac{1}{2}mv^2 + mgR(1 - \cos \frac{v}{R}t)$

8. 将一物体从地面竖直上抛，设物体在地面时的重力势能为零，则从抛出到落回原地的过程中，物体的机械能 E 与物体距地面高度 h 的关系正确的是 ()



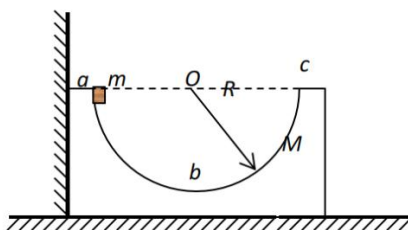
- A. 如果上抛运动过程中所受的空气阻力恒定，则可能为图(a)，
- B. 如果上抛运动过程中所受的空气阻力恒定，则可能为图(b)，

- C. 如果上抛运动过程中所受的空气阻力与速度成正比，则可能为图(d)，
 D. 如果上抛运动过程中所受的空气阻力与速度成正比，则四图都不对。

9. 如图所示，半径为 R ，质量为 M ，内表面光滑的球形凹槽形物体放在光滑的水平面上，左端紧靠着墙壁，一个质量为 m 的物块从凹槽的顶端 a 点无初速释放，图中 b 点为凹槽的最低点， c 点为凹槽另一侧与 a 等高的顶点，关于以后物块和 m 的运动，下列说法正确的有：

()

- A. m 从 a 点运动到 b 点的过程中， m 与 M 系统的机械能守恒
 B. m 从 a 点运动到 b 点的过程中， m 与 M 系统的动量守恒
 C. m 释放后运动到 b 点右侧， m 不能到达最高点 c
 D. 当 m 从右侧最高点首次返回最低点 b 时， M 的速度达到最大



10. 汽车的质量为 2000kg，汽车发动机的额定功率为 80kW，它在平直的公路上行驶时所受的阻力是 4000N，试求：

- (1) 汽车保持额定功率从静止启动后达到的最大速度是多少？
 (2) 若汽车以 2m/s^2 的加速度做匀加速直线运动，可维持多长时间？
 (3) 若汽车达到最大速度后，突然阻力变为原来的两倍，将做什么运动？

答案：

1C 2D 3BC 4C 5BC 6AD 7AD 8BD 9 ACD

10. 解析：15. (1) 汽车以额定功率行驶，其牵引力为 $F=P/v$ ，由牛顿第二定律 $F-F_f=ma$

当 $F=F_f$ 时， $a=0$ ，此时 $v_m = \frac{P}{F_f} = \frac{80 \times 10^3}{4000} \text{m/s} = 20\text{m/s}$

(2) 汽车以恒定加速度启动后 $F' - F_f = ma$ ，

$$\text{所以 } F' = F_f + ma = (4000 + 2000 \times 2)N = 8000N$$

$$\text{匀加速运动可达到的最大速度为 } v'_m = \frac{P}{F'} = \frac{80 \times 10^3}{8000} m/s = 10m/s$$

$$\text{所以匀加速运动的时间为 } t = \frac{v'_m}{a} = \frac{10}{2} s = 5s$$

(3) 阻力增大到 $2F_f$ 后，汽车做加速度逐渐减小的减速运动，最终作匀速运动，速度为

$$v''_m = \frac{P}{2F_f} = \frac{80 \times 10^3}{2 \times 4000} m/s = 10m/s$$