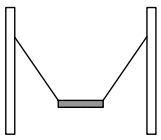
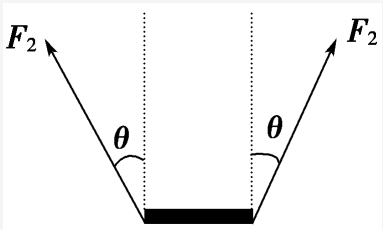
# 2014 年山东理综

1. 如图，用两根等长轻绳将木板悬挂在竖直木桩上等高的两点，制成一简易秋千。某次维修时将两轻绳各剪去一小段，但仍保持等长且悬挂点不变。木板静止时，$F_1$ 表示木板所受合力的大小，$F_2$ 表示单根轻绳对木板拉力的大小，则维修后（A）

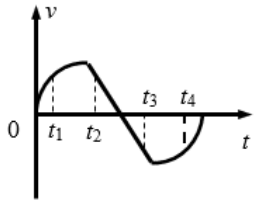


A. $F_1$ 不变，$F_2$ 变大　　B. $F_1$ 不变，$F_2$ 变小

C. $F_1$ 变大，$F_2$ 变大　　D. $F_1$ 变小，$F_2$ 变小

> 由于木板始终处于静止状态，因此木板所受合力为零，故选项 C、D 错误；对木板进行受力分析如图所示，由平衡条件得：$2F_2\cos\theta = G$，当轻绳被剪短后，$\theta$ 增大，$\cos\theta$ 减小，则 $F_2$ 增大，故选项 A 正确，B 错误。
>
> 
> 

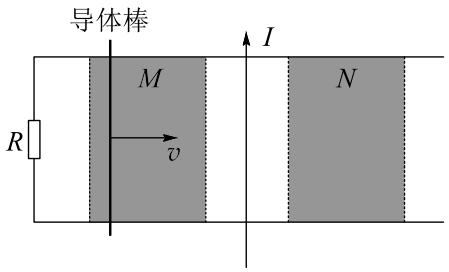
2. 一质点在外力作用下做直线运动，其速度 $v$ 随时间 $t$ 变化的图像如图。在图中标出的时刻中，质点所受合外力的方向与速度方向相同的有（AC）




A. $t_1$　　B. $t_2$　　C. $t_3$　　D. $t_4$

> 当合外力方向与速度方向相同时，质点做加速运动。由 $v-t$ 图像可知，质点在 $t_1$、$t_3$ 时刻做加速运动，在 $t_2$、$t_4$ 时刻做减速运动。故选项 A、C 正确，选项 B、D 错误。

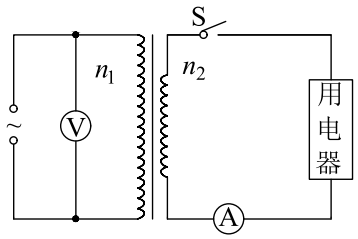
3. 如图，一端接有定值电阻的平行金属轨道固定在水平面内，通有恒定电流的长直绝缘导线垂直并紧靠轨道固定，导体棒与轨道垂直且接触良好。在向右匀速通过 M、N 两区的过程中，导体棒所受安培力分别用 $F_M$、$F_N$ 表示。不计轨道电阻。以下叙述正确的是（BCD）




A. $F_M$ 向右　　B. $F_N$ 向左　　C. $F_M$ 逐渐增大　　D. $F_N$ 逐渐减小

由楞次定律的第二种表述可知，感应电流的效果总要阻碍产生感应电流的原因，因此导体棒进入 M、N 区都要受到安培力的作用，导体棒受到的安培力方向一直向左，故 A 错误、B 正确。由闭合电路欧姆定律得 $I=\frac{BLv}{R}$，安培力 $F=BIL$，联立得 $F=\frac{B^2L^2v}{R}$。导体棒靠近导线时磁感应强度 $B$ 增大，安培力增大，即 $F_M$ 增大；远离导线时 $B$ 减小，安培力减小，即 $F_N$ 减小，故 C、D 正确。

4. 如图，将额定电压为 60 V 的用电器，通过一理想变压器接在正弦交变电源上。闭合开关 S 后，用电器正常工作，交流电压表和交流电流表（均为理想电表）的示数分别为 220 V 和 2.2 A。以下判断正确的是 ( BD )




A. 变压器输入功率为 484 W

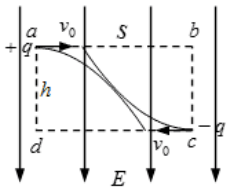
B. 通过原线圈的电流的有效值为 6.6 A

C. 通过副线圈的电流的最大值为 2.2 A

D. 变压器原、副线圈匝数比 $n_1:n_2=11:3$

电流表测量的是有效值，因此通过副线圈电流的最大值为 $2.2\sqrt{2}$ A，故 C 错误；变压器输出功率 $P=U_2I_2=60\times2.2\,\mathrm{W}=132\,\mathrm{W}$，理想变压器输入功率等于输出功率，故输入功率为 132 W，A 错误；输入电流 $I_1=\frac{P}{U_1}=\frac{132}{220}\,\mathrm{A}=0.6\,\mathrm{A}$，故 B 正确；由 $\frac{I_1}{I_2}=\frac{n_2}{n_1}$ 可得原、副线圈匝数比为 11 : 3，故 D 正确。

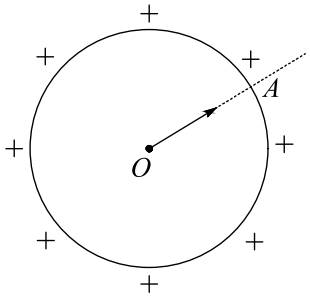
5. 如图，场强大小为 $E$、方向竖直向下的匀强电场中有一矩形区域 abcd，水平边 ab 长为 $s$，竖直边 ad 长为 $h$。质量均为 $m$、带电量分别为 $+q$ 和 $-q$ 的两粒子，由 a、c 两点先后沿 ab 和 cd 方向以速率 $v_0$ 进入矩形区（两粒子不同时出现在电场中）。不计重力。若两粒子轨迹恰好相切，则 $v_0$ 等于 ( B )

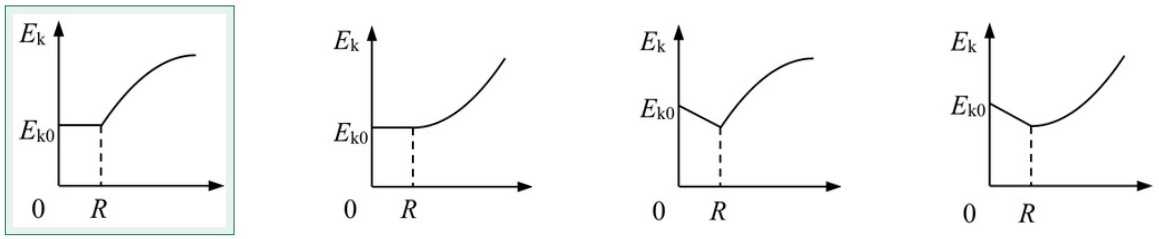



A. $\frac{s}{2}\sqrt{\frac{2qE}{mh}}$　　B. $\frac{s}{2}\sqrt{\frac{qE}{mh}}$　　C. $\frac{s}{4}\sqrt{\frac{2qE}{mh}}$　　D. $\frac{s}{4}\sqrt{\frac{qE}{mh}}$

两粒子在电场中都做类平抛运动，初速度大小相同、加速度大小相同，因此运动轨迹相同，故两粒子一定相切于矩形区域的中心，此时两粒子的水平位移都为 $\frac{s}{2}$、竖直位移都为 $\frac{h}{2}$。由牛顿第二定律得加速度 $a=\frac{qE}{m}$，由类平抛运动规律得 $\frac{s}{2}=v_0t$、$\frac{h}{2}=\frac{qE}{2m}t^2$，联立得 $v_0=\frac{s}{2}\sqrt{\frac{qE}{mh}}$，故 B 正确。

6. 如图，半径为 $R$ 的均匀带正电的薄球壳，其上有一小孔 A。已知壳内的场强处处为零；壳外空间的电场，与将球壳上的全部电荷集中于球心 O 时在壳外产生的电场一样。一带正电的试探电荷（不计重力）从球心以初动能 $E_{k0}$ 沿 OA 方向射出。下列关于试探电荷的动能 $E_k$ 与离开球心的距离 $r$ 的关系，可能正确的是 ( A )



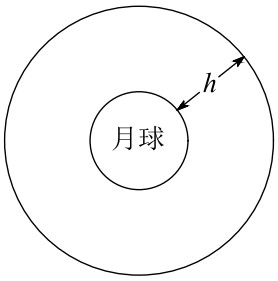




A.　　B.　　C.　　D.

球壳内场强处处为零，正电荷在壳内运动时电场力不做功，由动能定理知动能不变；电荷出球壳后受向外的库仑斥力，斥力做正功，动能增大。由 $\Delta E_k=Fr$ 知 $E_k-r$ 图像的斜率表示库仑力大小，由库仑定律知电荷在球壳外向外运动过程中所受库仑力逐渐变小，故 $E_k-r$ 图像斜率减小，A 正确。

7. 2013 年我国相继完成“神十”与“天宫”对接、“嫦娥”携“玉兔”落月两大航天工程。某航天爱好者提出“玉兔”回家的设想：如图，将携带“玉兔”的返回系统由月球表面发射到 $h$ 高度的轨道上，与在该轨道绕月球做圆周运动的飞船对接，然后由飞船送“玉兔”返回地球。设“玉兔”质量为 $m$，月球半径为 $R$，月面的重力加速度为 $g_{月}$。以月

面为零势能面，“玉兔”在 $h$ 高度的引力势能可表示为 $E_p=\frac{GMmh}{R(R+h)}$，其中 $G$ 为引力常量，$M$ 为月球质量。若忽略月球的自转，从开始发射到对接完成需要对“玉兔”做的功为 ( D )




A. $\frac{mg_{月}R}{R+h}(h+2R)$　　B. $\frac{mg_{月}R}{R+h}(h+\sqrt{2}R)$　　C. $\frac{mg_{月}R}{R+h}(h+\frac{\sqrt{2}}{2}R)$　　D. $\frac{mg_{月}R}{R+h}(h+\frac{1}{2}R)$

> 在月球表面，万有引力约等于重力，$G\frac{Mm}{R^2}=mg_{月}$。设“玉兔”在飞船轨道上的速度为 $v$，万有引力提供向心力，$\frac{GMm}{(R+h)^2}=\frac{mv^2}{R+h}$。由功能关系知发动机对“玉兔”做的功等于其增加的机械能，$W=\frac{GMmh}{(R+h)R}+\frac{1}{2}mv^2$。三式联立得 $W=\frac{mg_{月}R}{R+h}\left(h+\frac{R}{2}\right)$，故 D 正确。

8. 某实验小组利用弹簧秤和刻度尺，测量滑块在木板上运动的最大速度。实验步骤：

① 用弹簧秤测量橡皮泥和滑块的总重力，记作 $G$；

② 将装有橡皮泥的滑块放在水平木板上，通过水平细绳和固定弹簧秤相连，如图 甲 所示。在 A 端向右拉动木板，待弹簧秤示数稳定后，将读数记作 $F$；

③ 改变滑块上橡皮泥的质量，重复步骤①②；实验数据如下表所示：

| $G$/N | 1.50 | 2.00 | 2.50 | 3.00 | 3.50 | 4.00 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $F$/N | 0.59 | 0.83 | 0.99 | 1.22 | 1.37 | 1.61 |

④ 如图 乙 所示，将木板固定在水平桌面上，滑块置于木板上左端 C 处，细绳跨过定滑轮分别与滑块和重物 P 连接，保持滑块静止，测量重物 P 离地面的高度 $h$；

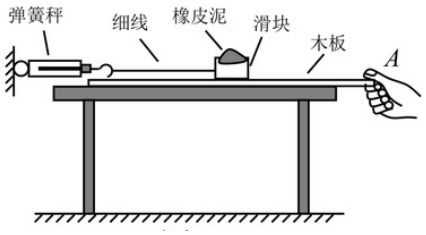
⑤ 滑块由静止释放后开始运动并最终停在木板上的 D 点（未与滑轮碰撞），测量 C、D 间的距离 $s$。

完成下列作图和填空：

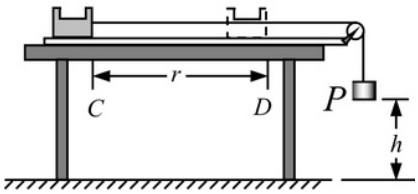
(1) 根据表中数据在给定的坐标纸（见答题卡）上作出 $F-G$ 图线。

(2) 由图线求得滑块和木板间的动摩擦因数 $\mu=$_____（保留 2 位有效数字）

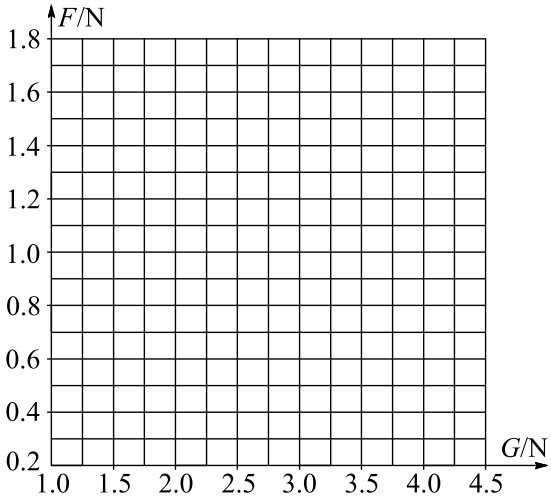
(3) 滑块最大速度的大小 $v=$_____（用 $h$、$s$、$\mu$ 和重力加速度 $g$ 表示。）



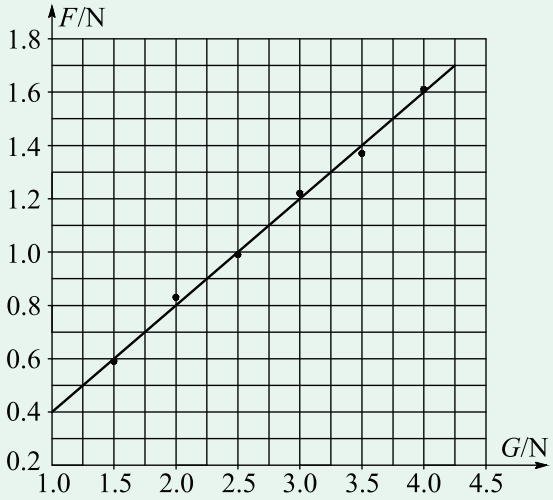
图甲



图乙




(1) 如图所示




(2) 0.40（0.38、0.39、0.41、0.42 均正确）

(3) $\sqrt{2\mu g(s-h)}$

（1）作 $F-G$ 图像时先描点，再用平滑直线连接（图见答案）。

（2）由 $F=\mu G$ 得 $F-G$ 图像的斜率表示动摩擦因数，故 $\mu=\frac{1.6-0.4}{4-1}=0.40$。

（3）滑块由静止释放后先做加速运动，重物下落高度 $h$ 落地后再做匀减速运动，减速运动的位移为 $s-h$。由牛顿第二定律得减速运动的加速度 $a=\mu g$，由 $0-v^2=$

$-2\mu g(s-h)$ 解得 $v=\sqrt{2\mu g(s-h)}$。

9. 实验室购买了一捆标称长度为 100 m 的铜导线，某同学想通过实验测定其实际长度。该同学首先测得导线横截面积为 $1.0\,\mathrm{mm}^2$，查得铜的电阻率为 $1.7\times10^{-8}\,\Omega\cdot\mathrm{m}$，再利用图 甲 所示电路测出铜导线的电阻 $R_x$，从而确定导线的实际长度。

可供使用的器材有：

电流表：量程 0.6 A，内阻约为 0.2 Ω；

电压表：量程 3 V，内阻约 9 kΩ；

滑动变阻器 $R_1$：最大阻值 5 Ω；

滑动变阻器 $R_2$：最大阻值 20 Ω；

定值电阻：$R_0=3\,\Omega$；

电源：电动势 6 V，内阻可不计；

开关、导线若干。

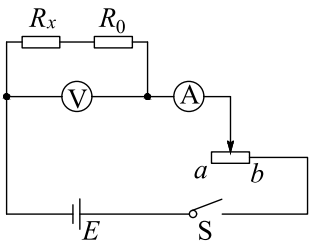
回答下列问题：

(1) 实验中滑动变阻器应选 _____（填“$R_1$”或“$R_2$”），闭合开关 S 前应将滑片移至 _____ 端（填“a”或“b”）。

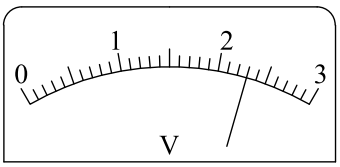
(2) 在实物图中，已正确连接了部分导线，请根据图 甲 电路完成剩余部分的连接。

(3) 调节滑动变阻器，当电流表的读数为 0.50 A 时，电压表示数如图 乙 所示，读数为 _____ V。

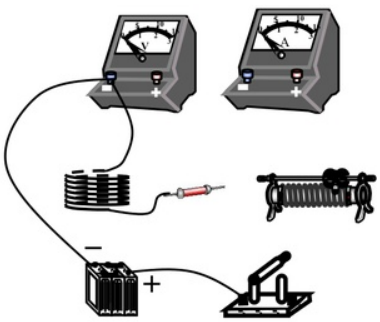
(4) 导线实际长度为 _____ m（保留 2 位有效数字）。



甲
图甲

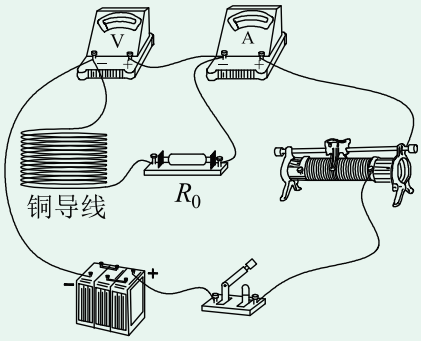


乙
图乙



(1) $R_2$；a

(2) 如图所示




(3) 2.30（2.29、2.31 均正确）

(4) 94（93、95 均正确）

（1）由电阻定律 $R=\frac{\rho L}{S}$ 代入数据可得导线电阻约为 $2\,\Omega$。电源电动势为 $6\,\mathrm{V}$，若用全阻值较小的滑动变阻器 $R_1$，待测电阻和定值电阻两端的最小电压将超出电压表量程，故选用全阻值较大的 $R_2$；闭合开关前应使待测电阻两端电压最小，故滑片开始时应停在 a 端。

（2）连线时滑动变阻器用限流法，电流表用外接法（图见答案）。

（3）每个大格表示 $1\,\mathrm{V}$、每个小格表示 $0.1\,\mathrm{V}$，故电压表读数为 $2.30\,\mathrm{V}$。

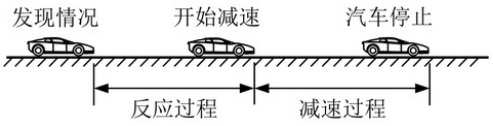
（4）由欧姆定律得 $R_x+R_0=\frac{2.3}{0.5}\,\Omega$，故 $R_x=1.6\,\Omega$；由 $R=\frac{\rho L}{S}$ 得导线长度为 $94\,\mathrm{m}$。

10. 研究表明，一般人的刹车反应时间（即图 甲 中“反应过程”所用时间）$t_0=0.4\,\mathrm{s}$，但饮酒会导致反应时间延长。在某次试验中，志愿者少量饮酒后驾车以 $v_0=72\,\mathrm{km/h}$ 的速度在试验场的水平路面上匀速行驶，从发现情况到汽车停止，行驶距离 $L=39\,\mathrm{m}$。减速过程中汽车位移 $s$ 与速度 $v$ 的关系曲线如图 乙 所示，此过程可视为匀变速直线运动。取重力加速度的大小 $g=10\,\mathrm{m/s^2}$。求：

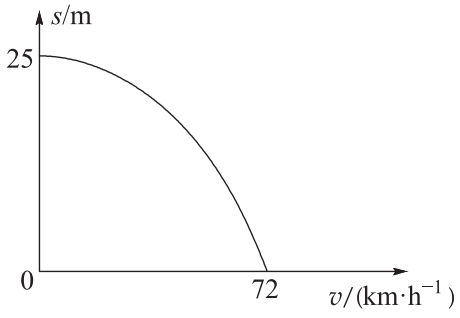
(1) 减速过程汽车加速度的大小及所用时间；

(2) 饮酒使志愿者的反应时间比一般人增加了多少？

(3) 减速过程汽车对志愿者作用力的大小与志愿者重力大小的比值。



图甲



乙
图乙

(1) $a=8\,\mathrm{m/s^2}$，$t=2.5\,\mathrm{s}$　(2) $\Delta t=0.3\,\mathrm{s}$　(3) $\frac{\sqrt{41}}{5}$

（1）设减速过程中汽车加速度的大小为 $a$，所用时间为 $t$，由题可得初速度 $v_0=20\,\mathrm{m/s}$，末速度 $v_t=0$，位移 $s=25\,\mathrm{m}$，由运动学公式得

$v_0^2=2as$ ①

$t=\frac{v_0}{a}$ ②

联立①②式，代入数据得

$a=8\,\mathrm{m/s^2}$ ③

$t=2.5\,\mathrm{s}$ ④

（2）设志愿者反应时间为 $t'$，反应时间的增加量为 $\Delta t$，由运动学公式得

$L=v_0t'+s$ ⑤

$\Delta t=t'-t_0$ ⑥

联立⑤⑥式，代入数据得

$\Delta t=0.3\,\mathrm{s}$ ⑦

（3）设志愿者所受合外力的大小为 $F$，汽车对志愿者作用力的大小为 $F_0$，志愿者质量为 $m$，由牛顿第二定律得

$F=ma$ ⑧

由平行四边形定则得

$F_0^2=F^2+(mg)^2$ ⑨

联立③⑧⑨式，代入数据得

$\frac{F_0}{mg}=\frac{\sqrt{41}}{5}$ ⑩

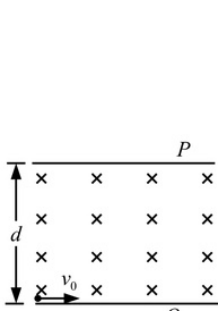
11. 如图 甲 所示，间距为 $d$ 且垂直于纸面的两平行板 P、Q 间存在匀强磁场。取垂直于纸面向里为磁场的正方向，磁感应强度随时间的变化规律如图 乙 所示。$t=0$ 时刻，一

质量为 $m$、带电量为 $+q$ 的粒子（不计重力），以初速度 $v_0$ 由 Q 板左端靠近板面的位置，沿垂直于磁场且平行于板面的方向射入磁场区。当 $B_0$ 和 $T_B$ 取某些特定值时，可使 $t=0$ 时刻入射的粒子经 $\Delta t$ 时间恰能垂直打在 P 板上（不考虑粒子反弹）。上述 $m$、$q$、$d$、$v_0$ 为已知量。

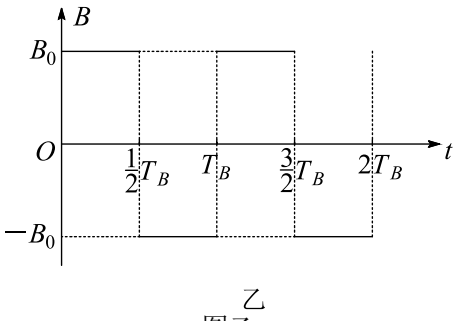
(1) 若 $\Delta t=\frac{1}{2}T_B$，求 $B_0$；

(2) 若 $\Delta t=\frac{3}{2}T_B$，求粒子在磁场中运动时加速度的大小；

(3) 若 $B_0=\frac{4mv_0}{qd}$，为使粒子仍能垂直打在 P 板上，求 $T_B$。



图甲



乙

图乙

(1) $B_0=\frac{mv_0}{qd}$　(2) $a=\frac{3v_0^2}{d}$　(3) $T_B=\frac{\pi d}{3v_0}$ 或 $T_B=\left(\frac{\pi}{2}+\arcsin\frac{1}{4}\right)\frac{d}{2v_0}$

（1）设粒子做圆周运动的半径为 $R_1$，由牛顿第二定律得

$qv_0B_0=\frac{mv_0^2}{R_1}$ ①

据题意由几何关系得 $R_1=d$ ②

联立①②式得 $B_0=\frac{mv_0}{qd}$ ③

（2）设粒子做圆周运动的半径为 $R_2$，加速度大小为 $a$，由圆周运动公式得

$a=\frac{v_0^2}{R_2}$ ④

据题意由几何关系得 $3R_2=d$ ⑤

联立④⑤式得 $a=\frac{3v_0^2}{d}$ ⑥

（3）设粒子做圆周运动的半径为 $R$，周期为 $T$，由圆周运动公式得

$T=\frac{2\pi R}{v_0}$ ⑦

由牛顿第二定律得 $qv_0B_0=\frac{mv_0^2}{R}$ ⑧

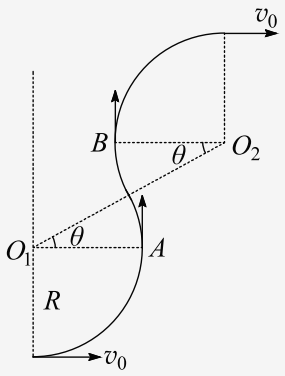
由题意知 $B_0=\frac{4mv_0}{qd}$，代入⑧式得

$d=4R$ ⑨

粒子运动轨迹如图所示，$O_1$、$O_2$ 为圆心，$O_1O_2$ 连线与水平方向夹角为 $\theta$。在第 $T_B$

内，只有 A、B 两个位置才有可能垂直击中 P 板，且均要求 $0<\theta<\frac{\pi}{2}$，由题意可知

$\frac{\frac{\pi}{2}+\theta}{2\pi}T=\frac{T_B}{2}$ ⑩




设经历整个完整 $T_B$ 的个数为 $n$（$n=0$、1、2、3……）

若在 A 点击中 P 板，据题意由几何关系得

$R+2(R+R\sin\theta)n=d$ ⑪

当 $n=0$ 时，无解 ⑫

当 $n=1$ 时，联立⑨ ⑪ 式得

$\theta=\frac{\pi}{6}$（或 $\sin\theta=\frac{1}{2}$）⑬

联立⑦⑨⑩ ⑬ 式得 $T_B=\frac{\pi d}{3v_0}$ ⑭

当 $n\geq 2$ 时，不满足 $0<\theta<\frac{\pi}{2}$ 的要求 ⑮

若在 B 点击中 P 板，据题意由几何关系得

$R+2R\sin\theta+2(R+R\sin\theta)n=d$ ⑯

当 $n=0$ 时，无解 ⑰

当 $n=1$ 时，联立⑨ ⑯ 式得

$\theta=\arcsin\frac{1}{4}$（或 $\sin\theta=\frac{1}{4}$）⑱

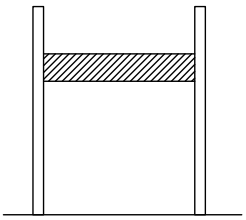
联立⑦⑨⑩ ⑱ 式得 $T_B=\left(\frac{\pi}{2}+\arcsin\frac{1}{4}\right)\frac{d}{2v_0}$ ⑲

当 $n\geq 2$ 时，不满足 $0<\theta<\frac{\pi}{2}$ 的要求 ⑳

12. **（1）**（5 分）如图，内壁光滑、导热良好的气缸中用活塞封闭有一定质量的理想气体。当环境温度升高时，缸内气体 ( AB )。（双选，填正确答案标号）

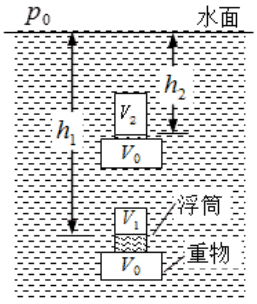
A. 内能增加　　B. 对外做功

C. 压强增大　　D. 分子间的引力和斥力都增大



**（2）**（7 分）一种水下重物打捞方法的工作原理如图所示。将一质量 $M=3\times10^3\,\mathrm{kg}$、体积 $V_0=0.5\,\mathrm{m}^3$ 的重物捆绑在开口向下的浮筒上，向浮筒内充入一定量的气体。开始时筒内液面到水面的距离 $h_1=40\,\mathrm{m}$，筒内气体体积 $V_1=1\,\mathrm{m}^3$，在拉力作用下浮筒缓慢上升，当筒内液面到水面的距离为 $h_2$ 时，拉力减为零，此时气体体积为 $V_2$，随后浮筒和重物自动上浮。求 $V_2$ 和 $h_2$。

已知大气压强 $p_0=1\times10^5\,\mathrm{Pa}$，水的密度 $\rho=1\times10^3\,\mathrm{kg/m}^3$，重力加速度的大小 $g=10\,\mathrm{m/s}^2$，不计水温变化，筒内气体质量不变且可看作理想气体，浮筒质量和筒壁厚度可忽略。




$V_2=2.5\,\mathrm{m}^3$，$h_2=10\,\mathrm{m}$

（2）当 $F=0$ 时，由平衡条件得

$Mg=\rho g(V_0+V_2)$ ①

代入数据得

$V_2=2.5\,\mathrm{m}^3$ ②

设筒内气体初态、末态的压强分别为 $P_1$、$P_2$，由题意得

$P_1=P_0+\rho gh_1$ ③

$P_2=P_0+\rho gh_2$ ④

在此过程中筒内气体温度和质量不变，由玻意耳定律得

$P_1V_1=P_2V_2$ ⑤

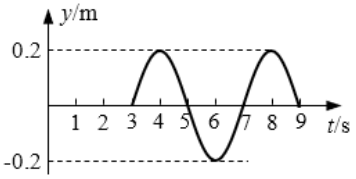
联立②③④⑤式，代入数据得

$h_2 = 10\,\text{m}$ ⑥

13. **(1)**(5 分)一列简谐横波沿直线传播。以波源 O 由平衡位置开始振动为计时零点，质点 A 的振动图像如图所示，已知 O、A 的平衡位置相距 0.9 m。以下判断正确的是 ( AB )。(双选，填正确答案标号)

A. 波长为 1.2 m　　B. 波源起振方向沿 $y$ 轴正方向

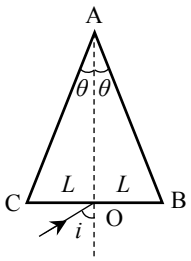
C. 波速大小为 0.4 m/s　　D. 质点 A 的动能在 $t = 4\,\text{s}$ 时最大




**(2)**（7 分）如图，三角形 ABC 为某透明介质的横截面，O 为 BC 边的中点，位于截面所在平面内的一束光线自 O 以角 $i$ 入射，第一次到达 AB 边恰好发生全反射。已知 $\theta = 15°$，BC 边长为 $2L$，该介质的折射率为 $\sqrt{2}$。求：

(1) 入射角 $i$；

(2) 从入射到发生第一次全反射所用的时间(设光在真空中的速度为 $c$,可能用到 $\sin 75° = \frac{\sqrt{6}+\sqrt{2}}{4}$ 或 $\tan 15° = 2 - \sqrt{3}$)。




(1) $i = 45°$　(2) $\frac{(\sqrt{6}+\sqrt{2})L}{2c}$

(2) (i) 根据全反射定律可知，光线在 AB 面上 P 点的入射角等于临界角 $C$，由折射定律得

$\sin C = \frac{1}{n}$ ①

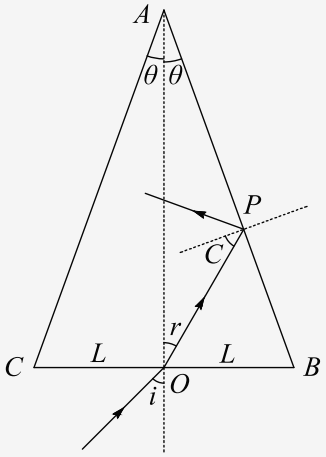
代入数据得 $C = 45°$ ②

设光线在 BC 面上的折射角为 $r$，由几何关系得

$r = 30°$ ③

由折射定律得 $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ ④

联立③④式，代入数据得 $i = 45°$ ⑤




(ii) 在 $\triangle OPB$ 中，根据正弦定理得

$\frac{\overline{OP}}{\sin 75^\circ} = \frac{L}{\sin 45^\circ}$ ⑥

设所用时间为 $t$，光线在介质中的速度为 $v$，得

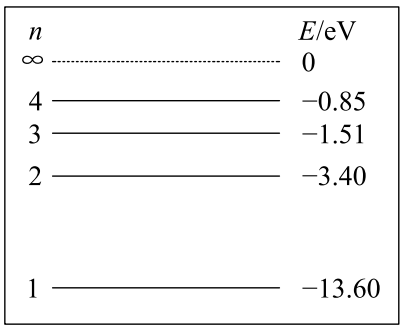
$\overline{OP} = vt$ ⑦

$v = \frac{c}{n}$ ⑧

联立⑥⑦⑧式，代入数据得

$t = \frac{(\sqrt{6}+\sqrt{2})L}{2c}$ ⑨

14. **(1)**（5 分）氢原子能级如图，当氢原子从 $n = 3$ 跃迁到 $n = 2$ 的能级时，辐射光的波长为 656 nm。以下判断正确的是 ( CD )。（双选，填正确答案标号）




A. 氢原子从 $n = 2$ 跃迁到 $n = 1$ 的能级时，辐射光的波长大于 656 nm

B. 用波长为 325 nm 的光照射，可使氢原子从 $n = 1$ 跃迁到 $n = 2$ 的能级

C. 一群处于 $n = 3$ 能级上的氢原子向低能级跃迁时最多产生 3 种谱线

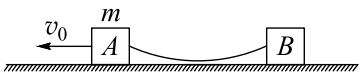
D. 用波长为 633 nm 的光照射，不能使氢原子从 $n = 2$ 跃迁到 $n = 3$ 的能级

**(2)**（7 分）如图，光滑水平直轨道上两滑块 A、B 用橡皮筋连接，A 的质量为 $m$。开始时橡皮筋松弛，B 静止，给 A 向左的初速度 $v_0$。一段时间后，B 与 A 同向运动发生碰撞并粘在一起。碰撞后的共同速度是碰撞前瞬间 A 的速度的两倍，也是碰撞前瞬间

B 的速度的一半。求：

(1) B 的质量；

(2) 碰撞过程中 A、B 系统机械能的损失。




(1) $m_B=\frac{m}{2}$ (2) $\Delta E=\frac{1}{6}mv_0^2$

（2）(i) 以初速度 $v_0$ 的方向为正方向，设 B 的质量为 $m_B$，A、B 碰撞后的共同速度为 $v$，由题意知：碰撞前瞬间 A 的速度为 $\frac{v}{2}$，碰撞前瞬间 B 的速度为 $2v$，由动量守恒定律得

$m\frac{v}{2}+2m_Bv=(m+m_B)v$ ①

由①式得 $m_B=\frac{m}{2}$ ②

(ii) 从开始到碰后的全过程，由动量守恒定律得

$mv_0=(m+m_B)v$ ③

设碰撞过程 A、B 系统机械能的损失为 $\Delta E$，则

$\Delta E=\frac{1}{2}m\left(\frac{v}{2}\right)^2+\frac{1}{2}m_B(2v)^2-\frac{1}{2}(m+m_B)v^2$ ④

联立②③④式得 $\Delta E=\frac{1}{6}mv_0^2$ ⑤