2026 年云南

1. 云南省锡、铟等有色金属储量丰富。已知锡和铟的逸出功分别为 4.42 eV 和 4.09 eV，若用光子能量为 4.30 eV 的紫外线分别照射这两种金属，则（B）

A. 只有锡能发生光电效应　　B. 只有铟能发生光电效应

C. 锡和铟都能发生光电效应　　D. 锡和铟都不能发生光电效应

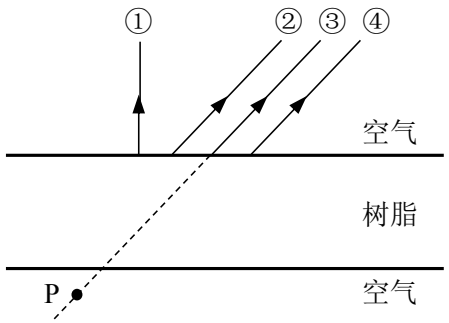
> 光电效应的发生条件为：入射光子的能量 E 大于等于金属的逸出功 W_0，即 $E \geq W_0$ 时可发生光电效应。
>
> 锡的逸出功 $W_{锡} = 4.42\,\text{eV} > 4.30\,\text{eV}$，不满足光电效应发生条件，锡不能发生光电效应；
>
> 铟的逸出功 $W_{铟} = 4.09\,\text{eV} < 4.30\,\text{eV}$，满足光电效应发生条件，只有铟能发生光电效应。
>
> 故选 B。

2. 云南宣威尼珠河大峡谷的“青云电梯”为谷底孩子们上学提供了交通便利。若电梯由静止开始上升 260 m，用时 100 s，则此过程电梯的平均速度大小及电梯向上加速时乘客所处的状态分别为（A）

A. 2.6 m/s，超重　　B. 0.38 m/s，超重　　C. 2.6 m/s，失重　　D. 0.38 m/s，失重

> 平均速度计算：根据平均速度定义式 $\overline{v} = \frac{x}{t}$，代入位移 $x = 260\,\text{m}$、时间 $t = 100\,\text{s}$，
>
> 可得 $\overline{v} = \frac{260}{100} = 2.6\,\text{m/s}$
>
> 超重失重判断：电梯向上加速时加速度竖直向上，乘客处于超重状态。
>
> 故选 A。

3. 在测量某种透明树脂折射率的实验中，让激光束射入一块两面平行的树脂砖，改变入射点和入射角，得到①、②、③、④四条出射光线，如图所示。不考虑反射，图中经 P 点射入树脂砖的光，出射后的光线可能是（B）



A. ① B. ② C. ③ D. ④

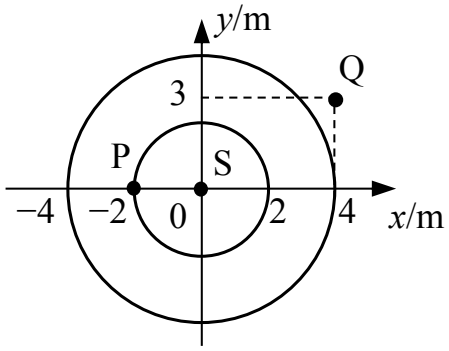
> 光通过平行树脂砖，出射光线与入射光线平行；
>
> 由于由空气进入树脂为由光疏介质进入光密介质，折射角应小于入射角，则光线会向法线侧移，出射光线在入射光线延长线的左侧，符合条件的是②。
>
> 故选 B。

4. 我国“天宫”空间站的轨道离地高度约为 400 km，空间站内的宇航员每 24 h 能看到 16 次日出。“吉林一号”遥感卫星组网中的某颗卫星轨道离地高度约为 535 km。已知地球半径约为 6400 km，空间站与该卫星绕地球的运动均视为匀速圆周运动，则该卫星的周期约为 (B)

A. 1.0 h B. 1.5 h C. 2.0 h D. 2.4 h

> 由题知“天宫”空间站周期 $T_1 = \frac{24}{16}\,\mathrm{h} = 1.5\,\mathrm{h}$，运行半径 $r_1 = 6800\,\mathrm{km}$
>
> “吉林一号”遥感卫星运行半径 $r_2 = 6935\,\mathrm{km}$，根据开普勒第三定律有 $\frac{r_1^3}{T_1^2} = \frac{r_2^3}{T_2^2}$
>
> 解得 $T_2 \approx T_1 = 1.5\,\mathrm{h}$
>
> 故选 B。

5. 如图所示，均匀介质中的三个质点 S、P、Q，它们分别静止于直角坐标系 Oxy 平面内的（0，0）、（−2，0）和（4，3）处。$t = 0$ 时刻，S 从平衡位置开始垂直 Oxy 平面向上振动，振动频率为 2 Hz，形成向外传播的简谐横波，图中实线圆表示某时刻相邻的两个波峰，则 (C)



A. 该波的波速大小为 8 m/s

B. $t = 0.125\,\mathrm{s}$ 时，P 位于波峰

C. 该波传播到 P、Q 的时间差为 0.75 s

D. $t = 1.25\,\mathrm{s}$ 以后，P、Q 的位移始终相同

A．由题知实线圆表示某时刻相邻的两个波峰，则该波波长 $\lambda=2\,\mathrm{m}$，且已知频率为 $2\,\mathrm{Hz}$，根据 $v=\lambda f=4\,\mathrm{m/s}$

故 A 错误；

$T=\frac{1}{f}=0.5\,\mathrm{s}$

B．已知 $t=0.125\,\mathrm{s}$，即 $\frac{T}{4}$，由于此时（$t=0$）时 P 在波峰，则 $t=0.125\,\mathrm{s}$ 时，P 位于平衡位置，故 B 错误；

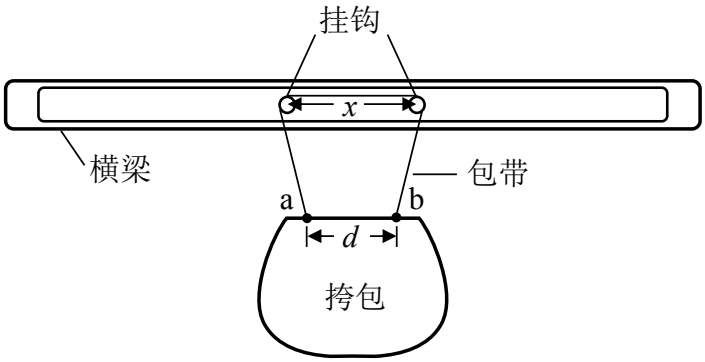
C．根据几何关系可知 Q 距离波源 S 有 $5\,\mathrm{m}$，则该波传播到 P、Q 的时间差为 $\frac{5-2}{v}=\frac{3}{4}\,\mathrm{s}=0.75\,\mathrm{s}$

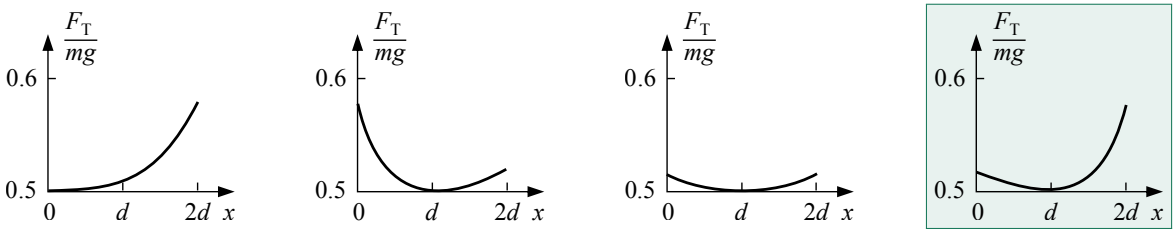
故 C 正确；

D．P、Q 所在的波面相距 $3\,\mathrm{m}$，为 $\frac{3}{2}\lambda$，则 $t=1.25\,\mathrm{s}$ 以后，P、Q 的位移始终相反，故 D 错误。

故选 C。

6. 如图所示，两挂钩可沿固定水平横梁滑动到任意位置后锁定。一挎包质量为 m，其轻质包带长度约为 $4d$，a、b 为包与包带的连接点，相距为 d。将挎包悬挂在两挂钩上，两挂钩相距为 x 时，锁定挂钩。挎包静止时，a、b 在同一水平直线上，包带的张力大小为 F_T，重力加速度为 g，不计包带与挂钩之间的摩擦及两挂钩尺寸。能正确反映 $\frac{F_T}{mg}$ 随 x 变化的图像是 (D)





A. B. C. D.

设挎包带与竖直方向的夹角为 θ。对挎包受力分析，竖直方向受重力 mg 和两股包带的拉力 F_T，由平衡条件 $2F_T\cos\theta=mg$

根据几何关系有单侧包带长度 $l=\frac{4d-x}{2}=2d-\frac{x}{2}$

单侧包带水平投影长度 $\Delta x=\frac{|x-d|}{2}$

则 $\sin\theta=\frac{\Delta x}{l}=\frac{|x-d|}{4d-x}$

故 $\frac{F_T}{mg}=\frac{4d-x}{2\sqrt{3d(5d-2x)}}$

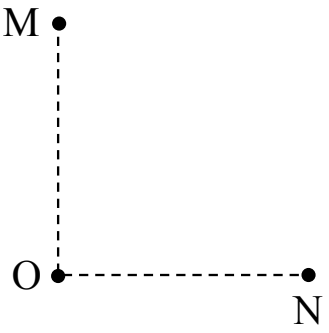
代入特殊点 $x=0$，$\frac{F_T}{mg}\approx 0.52$

$x=d$，$\frac{F_T}{mg}=0.5$

$x=2d$，$\frac{F_T}{mg}=\frac{\sqrt{3}}{3}\approx 0.58$

故选 D。

7. 如图所示，在大小、方向均未知的匀强电场中，O、M、N 三点处于同一竖直面内，将一质量为 0.1 kg、电荷量为 1.0×10^{-6} C 的带正电的小球（视为质点）从 O 点抛出，小球 1 s 后到达 O 点正上方 3 m 处的 M 点，再经 1 s 到达 N 点，O、N 两点在同一水平线上且相距 3 m。不计空气阻力，重力加速度 g 取 10 m/s^2，设电场强度大小为 E，O、N 两点的电势分别为 φ_O 和 φ_N，则 (C)



A. $E=6.7\times10^5$ V/m，$\varphi_O>\varphi_N$　　B. $E=6.7\times10^5$ V/m，$\varphi_O<\varphi_N$

C. $E=5.0\times10^5$ V/m，$\varphi_O>\varphi_N$　　D. $E=5.0\times10^5$ V/m，$\varphi_O<\varphi_N$

根据题意 $0\sim1$ s 水平位移为 0，可得 $v_{0x}+0.5a_x=0$

竖直位移为 3 m，可得 $v_{y0}+0.5a_y=3$

$0\sim2$ s 水平位移为 3 m，可得 $2v_{0x}+2a_x=3$

竖直位移为 0，可得 $2v_{y0}+2a_y=0$

解得 $a_x=3$ m/s^2，$a_y=-6$ m/s^2

对小球受力分析有 $a_x=\frac{qE_x}{m}$，$a_y=-g+\frac{qE_y}{m}$

代入数据得 $E_x=3.0\times10^5$ V/m，$E_y=4.0\times10^5$ V/m

故电场强度大小 $E=\sqrt{E_x^2+E_y^2}=5.0\times10^5$ V/m

> 电场方向斜向上偏 N 侧，$E_x > 0$ 表明沿 x 轴正方向电势降低，故 $\varphi_O > \varphi_N$。
>
> 故选 C。

8. 云南至广东高压输电工程在调试阶段采用 $800\,\mathrm{kV}$ 高压输电，输送功率为 $2.6 \times 10^9\,\mathrm{W}$，关于该输电线路，下列说法正确的是（BD）

A. 输电电流为 $3.25 \times 10^6\,\mathrm{A}$

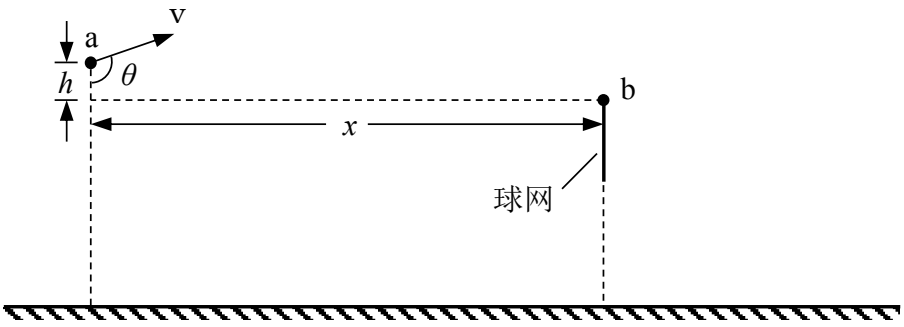
B. 输电电流为 $3.25 \times 10^3\,\mathrm{A}$

C. 若输送功率不变，提高输电电压，则输电损耗会增加

D. 若输送功率不变，提高输电电压，则输电损耗会减小

> AB．根据输电功率公式 $P = UI$，输电电流 $I = \frac{P}{U} = \frac{2.6\times10^9}{800\times10^3}\,\mathrm{A} = 3.25 \times 10^3\,\mathrm{A}$，故 A 错误，B 正确；
>
> CD．输电损耗功率为 $P_{损} = I^2R$，输送功率 P 不变时，提高输电电压 U，由 $I = \frac{P}{U}$ 可知输电电流 I 减小，因此 $P_{损}$ 减小，故 C 错误，D 正确。
>
> 故选 BD。

9. 如图所示，运动员在空场上将排球从 a 点击出，a 点与球网顶部 b 点的水平距离为 x、竖直距离为 h，排球被击出时速度大小为 v、方向与重力方向之间的夹角为 θ（$0° < \theta < 180°$）。将排球视为质点，其运动轨迹所在平面与球网平面垂直，不计空气阻力，不考虑擦网球。运动员某次以 $\theta = 90°$ 击球时，排球贴近 b 点越过球网后正好落到对方场地的底线上，相对于此次击球，下列说法正确的是（AC）



A. 保持 v、x、h 不变，减小 θ，排球一定下网

B. 保持 v、x、h 不变，增大 θ，排球一定不会出界

C. 保持 θ 不变，增大 x 同时减小 h，排球不下网就一定出界

D. 保持 x、h 不变，同时增大 v 和 θ，排球从被击出到落地所需时间可能不变

> 根据题意可知，运动员某次以 $\theta = 90°$ 击球时，即初速度方向为水平，排球贴近 b 点越过球网，则有 $x = vt$

解得 $t=\frac{x}{v}$

竖直方向上有 $h=\frac{1}{2}gt^2$

A．保持 v、x、h 不变，减小 θ，则球竖直向下的初速度大于零，水平方向的分速度小于 v，

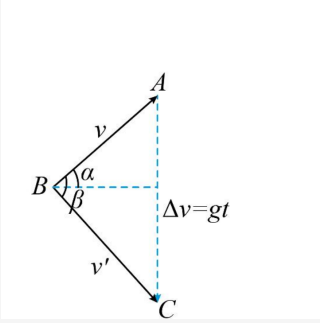
竖直方向根据 $h=v_{y0}t'+\frac{1}{2}gt'^2$

可知 $t'<t$

水平方向 $x'=v_{x0}t'<x$

可知排球一定下网，故 A 正确；

B．设球抛出时与水平方向的夹角为 α（$0\leq\alpha\leq90°$），落地时速度为 v'，画出速度的矢量三角形，如图所示



在矢量三角形 ABC 中，面积 $S=\frac{1}{2}gt\cdot v_0\cos\alpha$

水平位移 $x=v_0\cos\alpha\cdot t$

联立可得 $S=\frac{1}{2}gx$

即三角形面积最大时，水平位移最大，又 $S=\frac{1}{2}v_0v'\sin\beta$

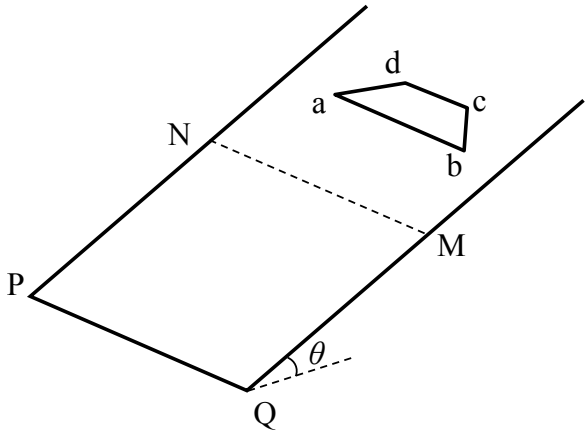
根据动能定理可知落地时速度 v' 为定值，v_0 也为定值，当 $\sin\beta=1$ 即 $\beta=90°$ 时，S 有最大值，即末速度方向与初速度方向垂直时，水平位移有最大值，显然当球水平抛出时，末速度方向与初速度方向夹角为小于 90°，根据数学知识可知，保持 v、x、h 不变，增大 θ，排球的水平射程先增大后减小，可知排球可能会出界，故 B 错误；

C．保持 θ 不变，增大 x 同时减小 h，根据 $h=\frac{1}{2}gt_1^2$ 可知球抛出到网顶点的时间变小，要能过网，则需要增大初速度，设恰好能过网的初速度为 v''，设网高为 H，球到网顶点竖直方向的速度 $v_y=gt_1$ 变小，过网后，竖直方向根据 $H=v_yt''+\frac{1}{2}gt''^2$ 可知球运动的时间比增大 x 同时减小 h 前长，水平方向 $x''=v''t''$ 的位移比增大 x 同时减小 h 前大，故一定会出界，故 C 正确；

D．保持 x、h 不变，同时增大 v 和 θ，则球竖直向上向的初速度不为零，根据 $h=-v_{y0}t'+\frac{1}{2}gt'^2$ 可知时间变大，故 D 错误。

> 故选 AC。

10. 如图所示，光滑绝缘斜面固定在水平面上，与水平面交于 PQ，倾角 $\theta = 30°$，斜面上矩形 $MNPQ$ 区域存在垂直斜面向下、磁感应强度大小 $B = 0.5\,\mathrm{T}$ 的匀强磁场（图中未画出）。单匝等腰梯形导线框 $abcd$ 的下底 $ab = 1.2\,\mathrm{m}$，上底 $cd = 0.6\,\mathrm{m}$，$\angle a = 53°$，质量 $m = 0.5\,\mathrm{kg}$，总电阻 $R = 0.12\,\Omega$。线框从斜面上高于 MN 的某处由静止释放，ab 边进入磁场时开始对线框施加外力 F 控制其运动，cd 边进入磁场时 ab 边未出磁场。线框始终沿斜面运动，ab 边始终与 MN 平行，速度方向始终与 ab 边垂直。取重力加速度大小 $g = 10\,\mathrm{m/s^2}$，$\sin 53° = 0.8$，设 ab 边进入磁场时速度为 v_0，在线框进入磁场的过程中（ AD ）



A. 若速度保持恒定，且 $v_0 = 2.0\,\mathrm{m/s}$，则线框中的感应电流方向为 $abcda$

B. 若速度保持恒定，且 $v_0 = 2.0\,\mathrm{m/s}$，则该过程中 F 对线框始终做正功

C. 若感应电流恒定，且 F 对线框做的功 $W = -0.79\,\mathrm{J}$，则 $v_0 = 0.3\,\mathrm{m/s}$

D. 若感应电流恒定，且 F 对线框做的功 $W = -0.79\,\mathrm{J}$，则该过程的时间 $t = 1.5\,\mathrm{s}$

> A．根据右手定则可知，线框中的感应电流方向为 $abcda$，故 A 正确；
>
> B．若速度保持恒定，且 $v_0 = 2.0\,\mathrm{m/s}$，线框刚进入磁场时，感应电动势为 $E_1 = BL_{ab}v_0 = 1.2\,\mathrm{V}$
>
> 感应电流为 $I_1 = \frac{E_1}{R} = 10\,\mathrm{A}$
>
> 线框所受安培力为 $F_{A1} = BI_1L_{ab} = 6\,\mathrm{N}$
>
> 又有 $mg\sin 30° = 2.5\,\mathrm{N}$
>
> 则有 $F_{A1} > mg\sin 30°$，可知外力 F 沿斜面向下；cd 边要进入磁场时，感应电动势为 $E_2 = BL_{cd}v_0 = 0.6\,\mathrm{V}$
>
> 感应电流为 $I_2 = \frac{E}{R} = 5\,\mathrm{A}$
>
> 线框所受安培力为 $F_{A2} = BI_2L_{cd} = 1.5\,\mathrm{N}$

则有 $F_{A2} < mg\sin 30°$，可知外力 F 沿斜面向上，则该过程中 F 对线框先做正功后做负功，故 B 错误；

CD．根据题意，由几何关系可得，等腰梯形的高 $h = \frac{L_{ab}-L_{cd}}{2} \cdot \tan 53° = 0.4\,\mathrm{m}$

该过程中重力做功为 $W_G = mgh\sin 30° = 1\,\mathrm{J}$

若感应电流恒定，则感应电动势恒定，则有 $BL_{ab}v_0 = BL_{cd}v$

解得 $v = 2v_0$

安培力做功为

$$W_A = -\frac{F'_{A1}+F'_{A2}}{2}h = -\frac{B^2\left(L_{ab}^2v_0+L_{cd}^2v\right)}{2R}h = -0.9v_0$$

由动能定理有

$$W_F + W_G + W_A = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

解得 $v_0 = -1.4\,\mathrm{m/s}$（舍去），$v_0 = 0.2\,\mathrm{m/s}$

则感应电流为

$$I = \frac{BL_{ab}v_0}{R} = 1\,\mathrm{A}$$

则有 $Q = |W_A| = I^2Rt$

代入数据解得 $t = 1.5\,\mathrm{s}$，故 C 错误，D 正确。

故选 AD。

11. 某同学做力的合成实验，实验装置如图 a 所示，该装置中三根支撑脚 L、M、N 的高度可通过地脚螺钉调节。完成下列填空：

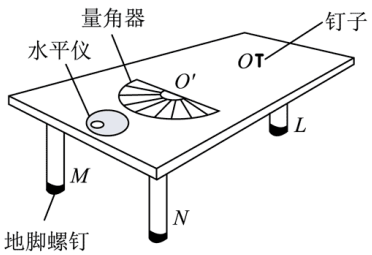


图 a



图 b

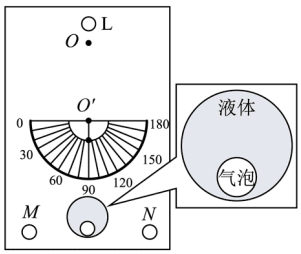


图 c

(1) 该同学借助水平仪将实验装置台面调至水平。水平仪内封有液体和气泡，当水平仪底面水平时，气泡会静止在水平仪中心处，俯视图如图 b 所示。将水平仪放到台面上，气泡静止在水平仪中的位置俯视图如图 c 所示，下列操作能将台面调成水

平的是 A 或 D（填正确答案标号）；

A. 保持 M 和 N 高度不变，调高 L

B. 保持 M 和 N 高度不变，调低 L

C. 保持 L 高度不变，同时调高 M 和 N

D. 保持 L 高度不变，同时调低 M 和 N

(2) 如图 a 所示，将橡皮筋一端固定在 O 点，另一端通过圆环、细线与弹簧测力计相连。某次实验时，拉伸橡皮筋调整圆环圆心至 O' 点并保持静止，记录两细线的夹角，由弹簧测力计读出拉力 F_1 和 F_2 的大小，其中 F_1 的读数为 3.00 N；

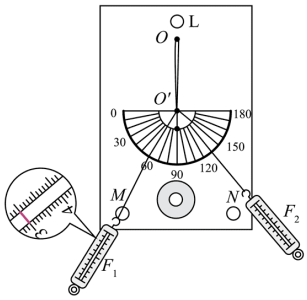


图 a

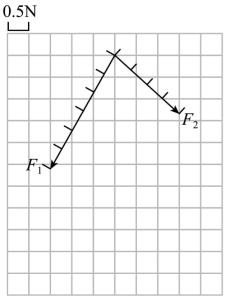


图 b

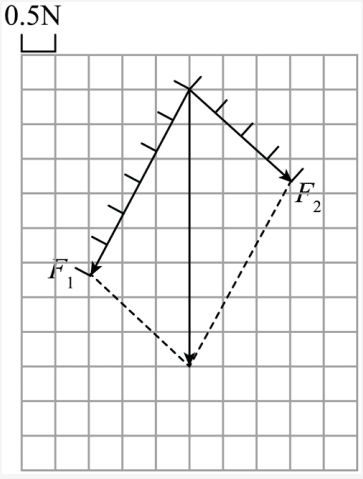
(3) 根据测量结果在方格纸上画出 F_1 和 F_2 的图示，如图 b 所示。已知方格纸上每小格边长代表 0.5 N，用作图法可得 F_1 和 F_2 的合力大小为 4.0 N（结果保留 2 位有效数字）。

(1) A，D　(2) 3.00　(3) 4.0

(1) 水平仪气泡会向较高的一端移动，根据图 c 可知是 M 和 N 端高了的原因，所以要将台面调成水平，需要保持 M 和 N 高度不变，调高 L 或者保持 L 高度不变，同时调低 M 和 N，故选 A 或 D。

(2) 由图可知 F_1 的读数为 3.00 N

(3) 根据平行四边形法则做出合力图像如图所示



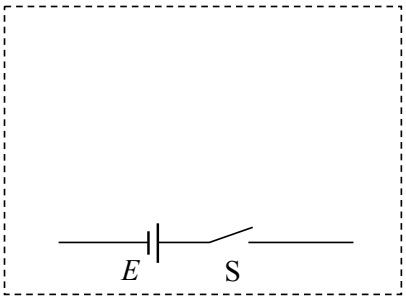
由于每小格边长代表 0.5 N，故可得 F_1 和 F_2 的合力大小为 $F = 8 \times 0.5\,\mathrm{N} = 4.0\,\mathrm{N}$

12. 某同学购买的蓝牙耳机电池上标有“80 mA · h”字样，为了测量该电池电动势和实际容量，该同学进行了如下实验：

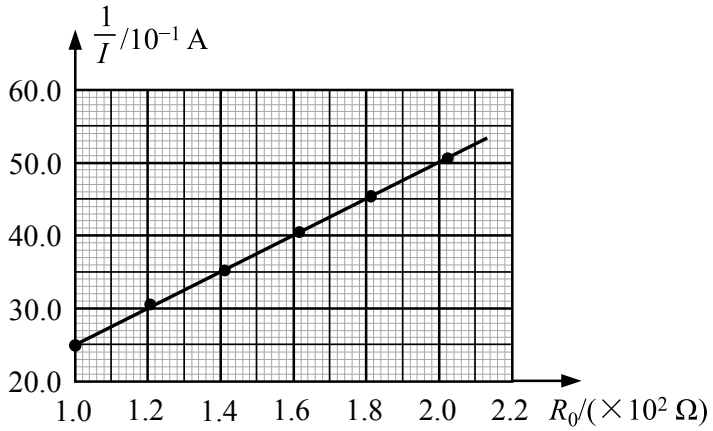
(1) 测量电池的电动势，可供选择的器材如下：待测电池 E、电流表 A_1（$0 \sim 0.6\,\mathrm{A}$，内阻较小）、电流表 A_2（$0 \sim 100\,\mathrm{mA}$，内阻较小）、电阻箱 R_0（$0 \sim 99999.9\,\Omega$）、开关 S 和导线若干。完成下列填空：

①该电池允许的最大放电电流为 80 mA，电流表应选 A_2（填“A_1”或“A_2”）；

②请根据上述器材设计实验电路，并在答题卡上指定位置补全电路图；



③按照②中正确电路图连接电路，闭合开关 S，记录电流表示数 I 及电阻箱阻值 R_0；断开开关 S，改变 R_0。重复以上步骤，得到 $\frac{1}{I}$ 和 R_0 的关系如图 12 所示，由图可得电池电动势 $E =$ 4.0 V（结果保留 2 位有效数字）。



(2) 该同学设计出测量电池容量的电路，如图 a 所示。完成下列填空：

①电路连接完毕，闭合开关 S，每隔一段时间记录电压表、电流表的示数 U 和 I，得到 U 和 I 随时间 t 变化的图像分别如图 b 、c 所示；

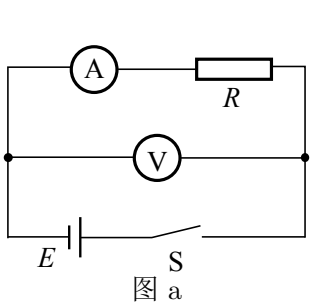


图 a

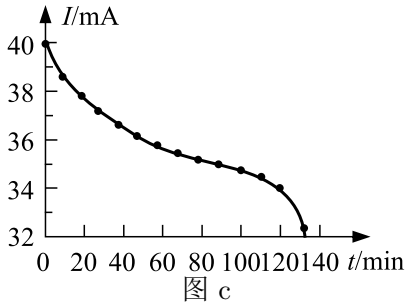


图 c

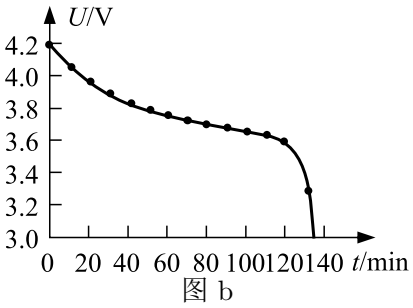
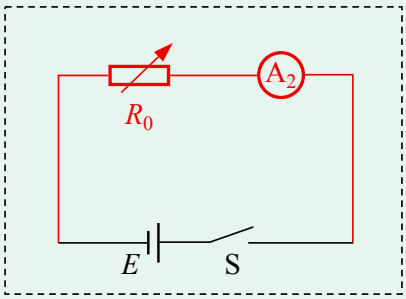


图 b

②由图 b 、c 可知，随着电池持续放电，输出电压和电流均持续减小。当 $t=120\,\text{min}$ 时，电池输出电压为 3.6 V，随后电池输出电压和电流开始迅速衰减，电池无法正常工作。电池处于正常工作状态可以放出的总电量称为实际容量，由测量结果可估算出该电池的实际容量为 73 $\text{mA}\cdot\text{h}$（以上结果均保留 2 位有效数字）。

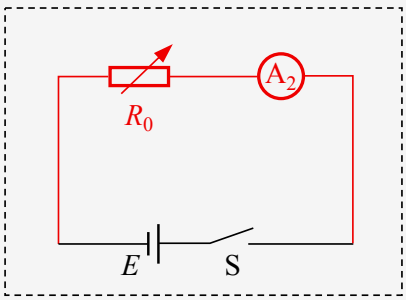
(1) ① A_2 ②



③ 4.0　(2) ② 3.6，73

（1）①由于电池允许的最大放电电流为 80 mA，为了减小测量误差应该选择电流表 A_2；

②根据上述器材，因为只有电流表和电阻箱，故采用安阻法测量，实验电路如图所示



③根据闭合电路欧姆定律可知 $E=IR_0+Ir$

变形可得 $\frac{1}{I}=\frac{1}{E}\cdot R_0+\frac{r}{E}$，所以在 $\frac{1}{I}-R_0$ 图像中图线的斜率即为 $\frac{1}{E}$，所以根据图像有 $k=\frac{1}{E}=\frac{50-25}{200-100}=\frac{1}{4}$

即 $E=4.0\,\mathrm{V}$

（2）根据图 b 、c 可知在 120 min 时，电池输出电压约为 3.6 V，120 min 时的输出电流约为 34 mA，此后不能正常工作；其中 $120\,\mathrm{min}=2\,\mathrm{h}$；

根据 $i-t$ 图像围成的面积表示电量，对 $i-t$ 图线做近似处理如图可知

$Q=\frac{(39+34)\times 2}{2}=73\,\mathrm{mA\cdot h}$

13. 洛伦兹力演示仪示意图如图 a 所示，玻璃泡处于励磁线圈产生的磁场中。玻璃泡内有一垂直磁场的竖直圆面，图 b 为其放大示意图，其圆心为 O、半径为 R、最高点为 P，区域内的磁场视为匀强磁场。电子枪将电子从 O 点正下方 $0.8R$ 处的 S 点，以速度 v 水平向左射出，电子在圆面内运动一段时间后到达 P 点。已知电子质量为 m、电荷量为 e，不计电子的重力和电子之间的相互作用。求：

(1) 匀强磁场的磁感应强度大小和方向；

(2) 电子从 S 点第一次到达 P 点所用的时间。

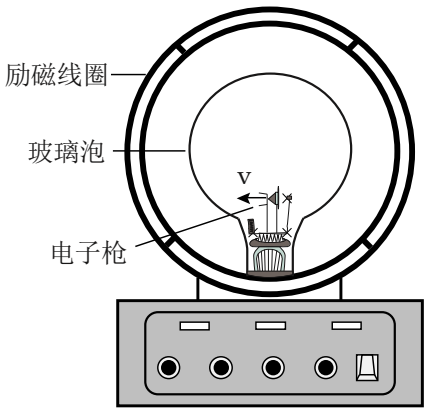


图 a 洛伦兹力演示仪示意图

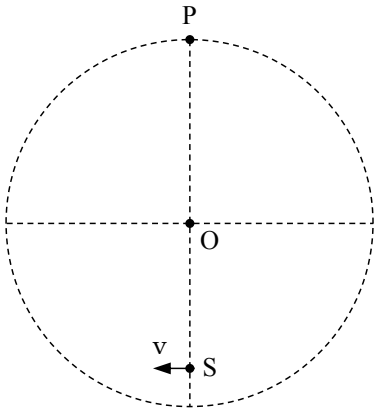


图 b 匀强磁场区域

(1) $\frac{10mv}{9eR}$，垂直纸面向里 (2) $\frac{9\pi R}{10v}$

（1）根据洛伦兹力提供向心力有

$$evB=m\frac{v^2}{r}$$

可得 $r=\frac{mv}{eB}$

根据几何关系可得 $r=\frac{R+0.8R}{2}=\frac{9}{10}R$

联立可得 $B=\frac{10mv}{9eR}$

根据左手定则可知磁感应强度方向垂直纸面向里。

（2）根据 $T=\frac{2\pi r}{v}$ 结合 $r=\frac{9}{10}R$ 可得 $T=\frac{9\pi R}{5v}$

电子从 S 点第一次到达 P 点转过的圆心角为 $180°$，电子从 S 点第一次到达 P 点所用的时间

$$t=\frac{180°}{360°}\cdot T$$

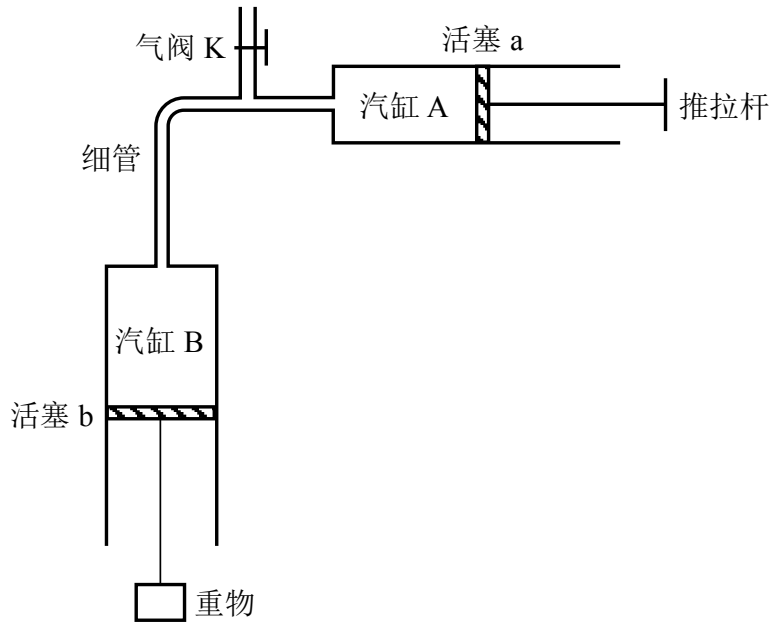
联立可得 $t=\frac{9\pi R}{10v}$

14. 某同学制作了一个简易气动装置，可简化为如图所示的模型。水平汽缸 A 和竖直汽缸 B 固定在气压为 p_0 的恒温环境中，其活塞 a、b 的横截面积分别为 S_1、S_2（$S_1<S_2$）。两汽缸通过细管连通，汽缸 A 内壁光滑，汽缸 B 内壁与活塞 b 间的最大静摩擦力等于滑动摩擦力，整个装置气密性和导热性良好。不计活塞的质量和厚度，重力加速度为 g。

(1) 打开气阀 K，在活塞 b 上用轻质细线悬挂重物，逐渐增加重物的质量，当重物质量为 m 时活塞 b 刚要开始向下运动，求汽缸 B 内壁与活塞 b 间的最大静摩擦力大小；

(2) 在 (1) 问操作后关闭气阀 K，封闭体积为 V_0 的气体（视为理想气体），然后用水平拉力向右缓慢拉动活塞 a，直到重物刚要开始向上运动，已知此过程中气体吸收的热量为 Q，求该过程活塞 a 的位移大小及拉力对活塞 a 做的功；

(3) 在 (2) 问操作后继续缓慢拉动活塞 a，使重物上升高度 H，此时活塞 b 未到达汽缸 B 的顶部，求该过程中水平拉力对活塞 a 做的功。



(1) mg (2) $\frac{2mgV_0}{S_1(p_0S_2-2mg)}$，$\frac{2mgp_0V_0}{p_0S_2-2mg}-Q$ (3) $2mgH$

（1）打开气阀 K，对活塞 b 进行受力分析，当活塞 b 刚要开始向下运动时，在竖直方向上，重物的重力 mg 与最大静摩擦力 f 平衡，即 $f=mg$

（2）在（1）问操作后关闭气阀 K，则气体压强为 p_0，然后用水平拉力向右缓慢拉动活塞 a，直到重物刚要开始向上运动，对活塞 b，根据平衡条件有 $p_1S_2+mg+f=p_0S_2$

设活塞 a 向右移动的位移为 x，气体体积变为 $V_1=V_0+S_1x$

因为缓慢拉动，气体做等温变化，根据玻意耳定律 $p_1V_1=p_0V_0$

联立解得 $x=\frac{2mgV_0}{S_1(p_0S_2-2mg)}$

以气体为研究对象，根据热力学第一定律 $\Delta U=W+Q$

其中 $\Delta U=0$

活塞对气体做功为 $W=-Q$

则气体对活塞做功为 $W=Q$

对活塞，根据动能定理 $W_F+W'-p_0S_1x=0$

解得拉力对活塞 a 做的功 $W_F=\frac{2mgp_0V_0}{p_0S_2-2mg}-Q$

（3）重物上升 H 过程中，活塞 b 匀速运动，气体压强保持 p_1 不变，恒温下气体总体积不变，因此活塞 a 向右移动位移 x' 满足 $S_1x'=S_2H$

得 $x'=\frac{S_2H}{S_1}$

$$F=p_0S_1-p_1S_1=\frac{2mgS_1}{S_2}$$

拉力大小不变

拉力做功 $W_F'=Fx'$

联立解得 $W_F'=2mgH$

15. 某同学设计的弹球游戏装置示意图如图所示，装置由一段倾斜直管道和 N 个相同的不对称“倒 V”形管道平滑连接而成，管道透明且光滑，固定在竖直平面内。入口端与第一个“倒 V”形管道左端高度差为 h_0，每个“倒 V”形管道最高点与其左、右两端的高度差分别为 h_1 和 h_2（$h_1<h_2$），每个“倒 V”形管道的左端均静置 1 个质量为 m 的弹球，自上而下依次编号为 1，2，3，…，N。开始游戏时，在入口端由静止释放一质量为 $M=4m$ 的弹球 P。所有弹球的直径均略小于管道内径，不计管道内径、弹球大小及滚动、弹球与管道相互作用的能量损失和空气阻力，所有弹球之间的碰撞均视为对心弹性碰撞，重力加速度为 g。

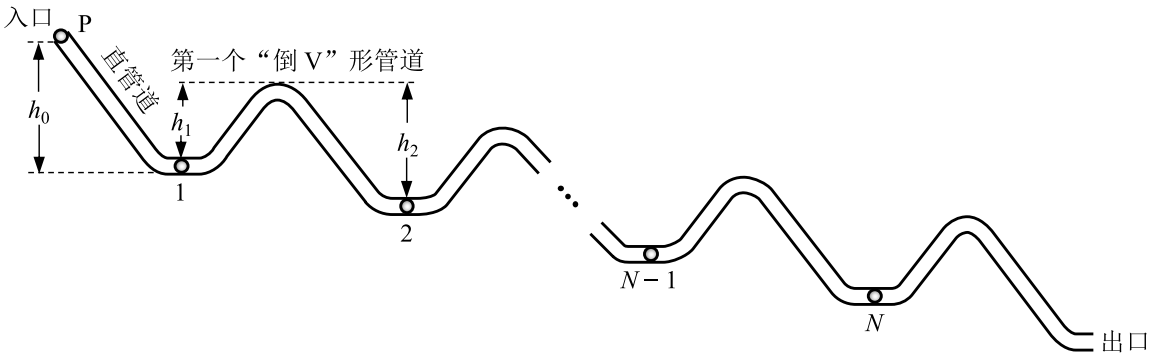
(1) 求弹球 P 与 1 号弹球第一次碰撞后瞬间，弹球 P 和 1 号弹球各自的速度大小；

(2) 已知：每个弹球在被上方弹球碰撞后，与下方弹球碰撞前不会被上方弹球再次碰撞，且所有弹球（包括 P）都能到达出口。

i. 求 1 号弹球与 2 号弹球第一次碰撞后瞬间，1、2 号弹球各自的速度大小；

ii. 求弹球 P 与 1 号弹球第 k（$k < N$）次碰撞后瞬间的速度大小；

iii. 若 N 足够大，且 $h_0 > \frac{25}{16}(h_2 - h_1)$，求 h_1 与 h_2 之间应满足的关系。



(1) $\frac{3}{5}\sqrt{2gh_0}$，$\frac{8}{5}\sqrt{2gh_0}$　(2) (i) 0，$\sqrt{\frac{128}{25}gh_0 + 2g(h_2 - h_1)}$

(ii) $\sqrt{\left(\frac{3}{5}\right)^{2k} \cdot 2gh_0 + \frac{9}{8}g(h_2 - h_1)\left[1 - \left(\frac{3}{5}\right)^{2k-2}\right]}$　(iii) $h_1 \le \frac{9}{25}h_2$

（1）P 球到达第 1 个平台时，由机械能守恒定律有 $Mgh_0 = \frac{1}{2}Mv_{P1}^2$

解得 $v_{P1} = \sqrt{2gh_0}$

P 球与 1 球碰撞，由动量守恒定律和机械能守恒定律有

$$Mv_{P1} = Mv'_{P1} + mv'_{11}, \quad \frac{1}{2}Mv_{P1}^2 = \frac{1}{2}Mv'^2_{P1} + \frac{1}{2}mv'^2_{11}$$

解得 $v'_{P1} = \frac{3}{5}v_{P1} = \frac{3}{5}\sqrt{2gh_0}$，$v'_{11} = \frac{8}{5}v_{P1} = \frac{8}{5}\sqrt{2gh_0}$

（2）（i）1 球到达第 2 个平台时，由动能定理有

$$mg(h_2 - h_1) = \frac{1}{2}m\left(v_1^2 - v'^2_{11}\right)$$

解得 $v_1 = \sqrt{\frac{128}{25}gh_0 + 2g(h_2 - h_1)}$

1 球与 2 球碰撞，由动量守恒定律和机械能守恒定律有

$$mv'_{11} = mv'_1 + mv'_2, \quad \frac{1}{2}mv'^2_{11} = \frac{1}{2}mv'^2_1 + \frac{1}{2}mv'^2_2$$

解得 $v_1'=0$，$v_2'=\sqrt{\frac{128}{25}gh_0+2g(h_2-h_1)}$

可知两球速度交换；

（ii）设 P 球到达第 k 个平台时的速度为 v_{Pk}，与第 k 个平台处的 1 球碰撞后的速度为 v_{Pk}'，则 P 球从第 $k-1$ 个平台发生第 $k-1$ 次碰撞后到第 k 个平台碰撞前，由动能定理 $Mg\left(h_2-h_1\right)=\frac{1}{2}M\left(v_{Pk}^2-v_{P(k-1)}'^2\right)$ ①

P 球在第 k 个平台与 1 球碰撞，由动量守恒、机械能守恒，由之前计算结果的规律，可知 $v_{Pk}'=\frac{3}{5}v_{Pk}$ ②

联立①②可得 $\frac{25}{9}v_{Pk}'^2-v_{P(k-1)}'^2=2g\left(h_2-h_1\right)$

由数学知识，可知 $v_{Pk}'^2-\frac{9}{8}g\left(h_2-h_1\right)$ 是等比数列，公比为 $q=\frac{9}{25}$

所以有 $v_{Pk}'^2-\frac{9}{8}g\left(h_2-h_1\right)=\left(\frac{9}{25}\right)^{k-1}\left[v_{P1}'^2-\frac{9}{8}g\left(h_2-h_1\right)\right]$

解得 $v_{Pk}'=\sqrt{\left(\frac{3}{5}\right)^{2k}\cdot 2gh_0+\frac{9}{8}g(h_2-h_1)\left[1-\left(\frac{3}{5}\right)^{2k-2}\right]}$

（iii）经分析，只需考虑 P 球，每次都要越过最高点，则对于任意 $k(k\le N)$，由能量关系有 $\frac{1}{2}Mv_{Pk}'^2>Mgh_1$

即

$$\left(\frac{9}{25}\right)^k\cdot 2gh_0+\frac{9}{8}g\left(h_2-h_1\right)\left[1-\left(\frac{9}{25}\right)^{k-1}\right]>2gh_1$$

变形为

$$\left(\frac{9}{25}\right)^{k-1}\left[\frac{18}{25}gh_0-\frac{9}{8}g\left(h_2-h_1\right)\right]+\frac{9}{8}g\left(h_2-h_1\right)>2gh_1$$

由 $h_0>\frac{25}{16}(h_2-h_1)$ 可知 $\frac{18}{25}gh_0-\frac{9}{8}g(h_2-h_1)>0$

则 $\left(\frac{9}{25}\right)^{k-1}\left[\frac{18}{25}gh_0-\frac{9}{8}g\left(h_2-h_1\right)\right]$ 是 k 的减函数，故 $k\to\infty$ 时，

$\left(\frac{9}{25}\right)^{k-1}\left[\frac{18}{25}gh_0-\frac{9}{8}g\left(h_2-h_1\right)\right]$ 趋近于零，

$\left(\frac{9}{25}\right)^{k-1}\left[\frac{18}{25}gh_0-\frac{9}{8}g\left(h_2-h_1\right)\right]+\frac{9}{8}g\left(h_2-h_1\right)>2gh_1$

化简为 $\frac{9}{8}g\left(h_2-h_1\right)\ge 2gh_1$

解得 $h_1\le\frac{9}{25}h_2$