逐光知理 · 高考物理参考答案与详解

2024年普通高中学业水平选择性考试（河北卷）物理试题

参考答案与详解（本站独立编撰）

单选7题×4分 + 多选3题×6分 + 非选择题5题共54分 · 满分100分 · 75分钟

本册答案与解析由逐光知理物理教研组独立编撰，仅依据原卷题面自行推导，未参照任何外部公布答案；数值均经回代核对，若与原卷印刷细节不符，以卷面为准。

答案速查

1 **D**	2 **C**	3 **D**	4 **A**	5 **A**	6 **C**
7 **A**	8 **ABD**	9 **ACD**	10 **AD**		

题号	主考点	答案摘要
11	双缝干涉测波长	绿光
12	探究平抛运动的特点	（1）相同 （2）见解析（平滑曲线） （3）0.44 m/s（按本站对卷面印迹的读数给出，若与原卷印刷值不符以卷面为准）
13	光敏电阻伏安特性与光强报警器	（1）负极 （2）①C（或D）、A、B ②减小 （3）减小
14	竖直圆周运动与电场中的功能关系	（1）$E=\dfrac{U}{L}$ （2）$v_A=\sqrt{\dfrac{qU}{m}-gL}$，$v_B=\sqrt{3\left(\dfrac{qU}{m}-gL\right)}$
15	转动切割电磁感应与导体棒平衡	（1）$F_{\max}=\dfrac{B^2L^3\omega}{R}$，$F_{\min}=\dfrac{B^2L^3\omega}{2R}$ （2）$\mu=\tan\theta-\dfrac{ma+\dfrac{B^2L^3\omega}{R}}{mg\cos\theta}$
16	人船模型、斜抛最少做功与动量守恒	（1）1.5 m （2）$W=90\,\mathrm{J}$，$\tan\alpha=2$ （3）$s_{AC}=\dfrac{7}{4}L_B$（A、C 两木板间距为 B 木板长度的 $\dfrac{7}{4}$ 倍）

一、单项选择题

1. 选择题 · 4分

答案 D

详解

A. × A项 ${}^{1}_{0}\mathrm{n}$

若 X 为中子，反应后电荷数为 $3+2+0=5$，而反应前电荷数为 $6+1=7$，电荷不守恒，排除。

B. × B项 ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$

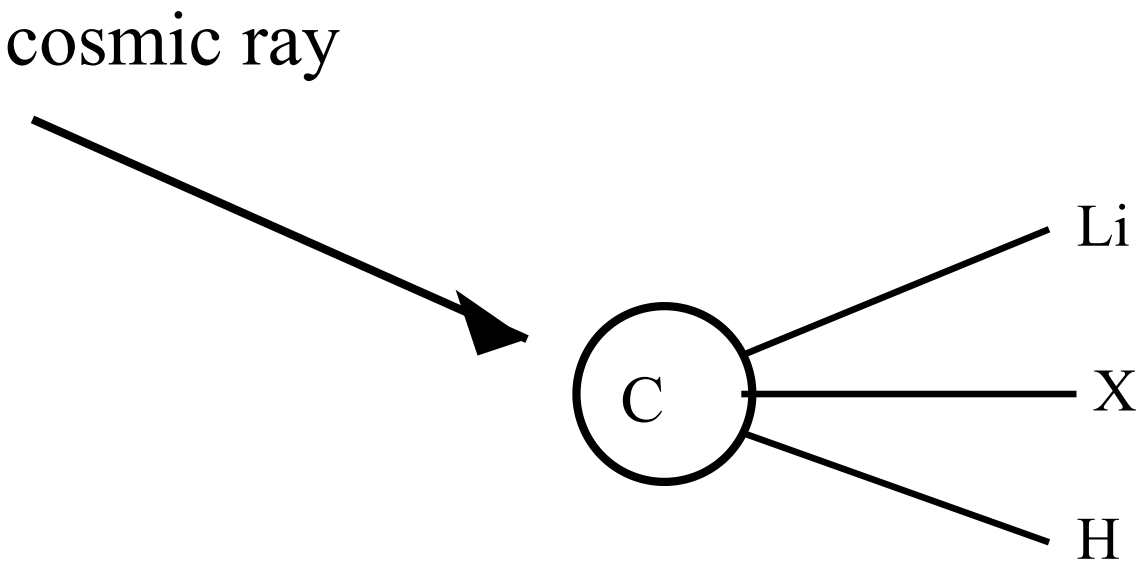
若 X 为电子，反应后电荷数 $3+2-1=4\neq7$，质量数 $7+2+0=9\neq13$，均不守恒，排除。

C. × C项 ${}^{0}_{+1}\mathrm{e}$

若 X 为正电子，反应后电荷数 $3+2+1=6\neq 7$，质量数 $9\neq 13$，不守恒，排除。

D. √ D项 ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$

反应 ${}^{12}_{6}\mathrm{C}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}\rightarrow{}^{7}_{3}\mathrm{Li}+2\,{}^{1}_{1}\mathrm{H}+X$ 中，质量数守恒：$13=7+2+A_X\Rightarrow A_X=4$；电荷数守恒：$7=3+2+Z_X\Rightarrow Z_X=2$，故 X 为 ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$，D 正确。



Q1 figure: cosmic ray proton striking carbon-12 nucleus (schematic)

2. 选择题 · 4分

> **答案** C

详解

A. × A项 a 点

a 点位于等势线疏、弯曲平缓的外围区域，等势面间距大，由 $E\approx\dfrac{\Delta U}{\Delta x}$（相邻等势线电势差相等）可知场强较小。

B. × B项 b 点

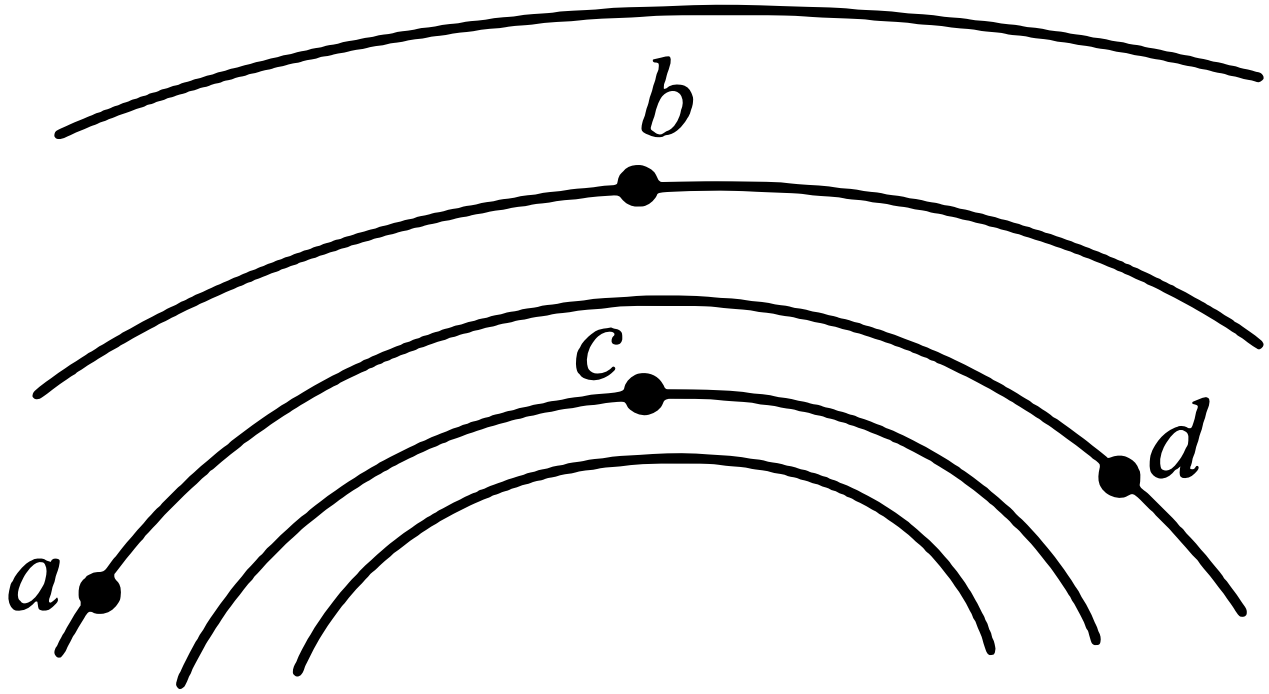
b 点处等势线虽为密集端附近，但其位于最外层等势线上，线间距比尖端附近大，场强不是最大。

C. √ C项 c 点

尖端（塔顶）附近等势面曲率大、分布最密。c 点紧邻“伞状”尖端，相邻等势线间距最小，由 $E=\dfrac{U}{d}$ 可知该处电场强度最大，C 正确。

D. × D项 d 点

d 点位于同一等势线的外侧弯曲段，等势线间距较 c 点大，场强小于 c 点，排除。



Q2 figure: equipotential lines near pagoda top with points a,b,c,d (source paper)

3. 选择题 · 4分

> **答案** D

详解

A. × A项 a 点

a 点是下落段图线穿越 t 轴的点（速度由负变正的触地反弹时刻附近），此时篮球位于最低点附近，不是最高。

B. × B项 b 点

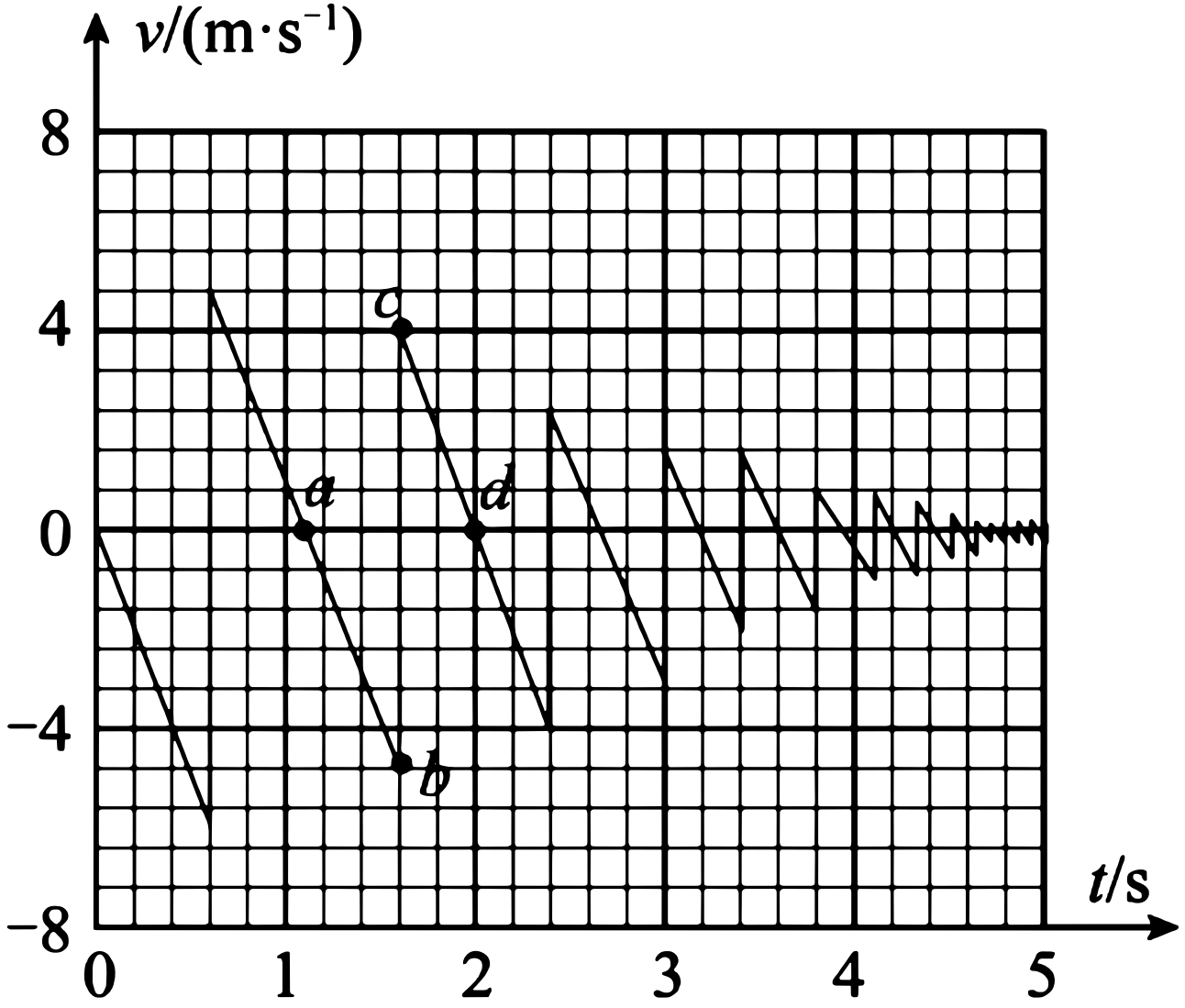
b 点速度为负（约 $-4\,\mathrm{m/s}$），篮球正处于下落阶段，位置在下降，排除。

C. × C项 c 点

c 点速度为正向最大（约 $+4\,\mathrm{m/s}$），篮球刚离开地面向上运动，之后减速上升，位置还在继续升高，故 c 点不是最高点。

D. √ D项 d 点

d 点是反弹后上升段图线回到 $v=0$ 的时刻（速度由正减为零），此后篮球转为下落，故 d 点对应上升的最高点，即 a、b、c、d 中篮球位置最高的是 d 点，D 正确。



Q3 figure: v-t graph of bouncing basketball with points a,b,c,d (source paper)

4. 选择题 · 4分

> **答案** A

详解

A. √ 求 R_1 的电压有效值

题干给出三角形脉冲交流电压的峰值是有效值的 $\sqrt{3}$ 倍，故 R_1 两端电压有效值 $U_1=\dfrac{U_0}{\sqrt{3}}$，一个周期内产生的热量 $Q_1=\dfrac{U_1^2}{R}T=\dfrac{U_0^2}{3R}T$。

B. × 求 R_2 的电压有效值

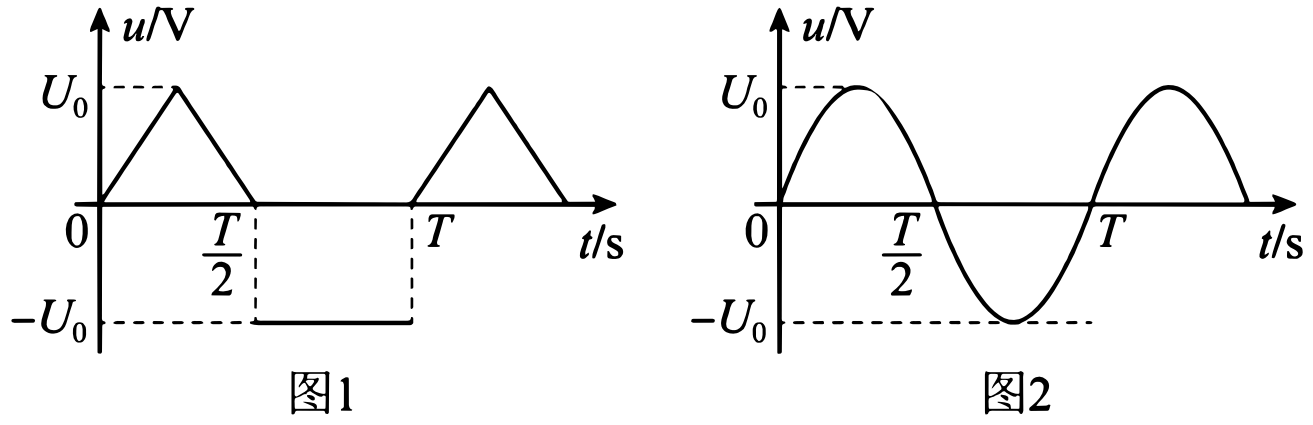
R_2 两端电压按正弦规律变化，峰值为 U_0，有效值 $U_2=\dfrac{U_0}{\sqrt{2}}$，一个周期内产生的热量 $Q_2=\dfrac{U_2^2}{R}T=\dfrac{U_0^2}{2R}T$。

C. × 求热量之比

$\frac{Q_1}{Q_2}=\frac{U_0^2/(3R)}{U_0^2/(2R)}=\frac{2}{3}$，即 $Q_1:Q_2=2:3$，A 正确。

D. × B、C、D 项

B 项 4 : 3、C 项 2 : $\sqrt{3}$、D 项 5 : 4 均与上述回代结果 2 : 3 不符，排除。



Q4 figure: triangular pulse and sinusoidal voltage waveforms (source paper)

5. 选择题 · 4分

> 答案 A

详解

A. √ 受力分析

球体光滑，受四个力：重力 $G=mg=0.20\times10=2.0\,\mathrm{N}$（竖直向下）、弹簧测力计拉力 $T=1.0\,\mathrm{N}$（竖直向上）、斜面支持力 N_1（垂直斜面，与竖直方向夹角 30°）、挡板支持力 N_2（垂直挡板）。由图，挡板与斜面夹角 60° 且球在挡板上方滚动接触，挡板面竖直，故 N_2 沿水平方向。

B. × 竖直方向平衡

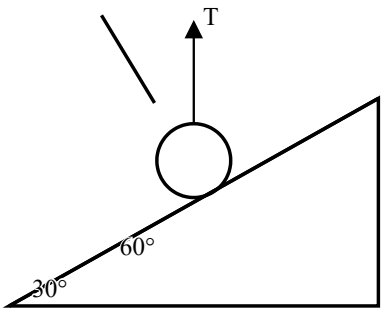
$T+N_1\cos30^\circ=mg$，即 $1.0+N_1\times\frac{\sqrt{3}}{2}=2.0$，解得 $N_1=\frac{2}{\sqrt{3}}\,\mathrm{N}$。

C. × 水平方向平衡并回代

$N_2=N_1\sin30^\circ=\frac{2}{\sqrt{3}}\times\frac{1}{2}=\frac{\sqrt{3}}{3}\,\mathrm{N}\approx0.577\,\mathrm{N}$。回代竖直方向：$1.0+\frac{2}{\sqrt{3}}\times\frac{\sqrt{3}}{2}=2.0\,\mathrm{N}=mg$，平衡成立。故挡板对球体支持力为 $\frac{\sqrt{3}}{3}\,\mathrm{N}$，A 正确。

D. × B、C、D 项

B 项 1.0 N、C 项 $\frac{2\sqrt{3}}{3}\,\mathrm{N}$、D 项 2.0 N 均与 $\frac{\sqrt{3}}{3}\,\mathrm{N}$ 不符，排除。



第5题受力示意（本站重绘）

6. 选择题 · 4分

答案 C

详解

A. × 求圆频率

电动机转速 $n = 12\,\text{r/min} = 0.2\,\text{r/s}$，周期 $T = \dfrac{1}{n} = 5\,\text{s}$，圆频率 $\omega = \dfrac{2\pi}{T} = 0.4\pi \approx 1.26\,\text{rad/s}$。

B. × 确定振幅

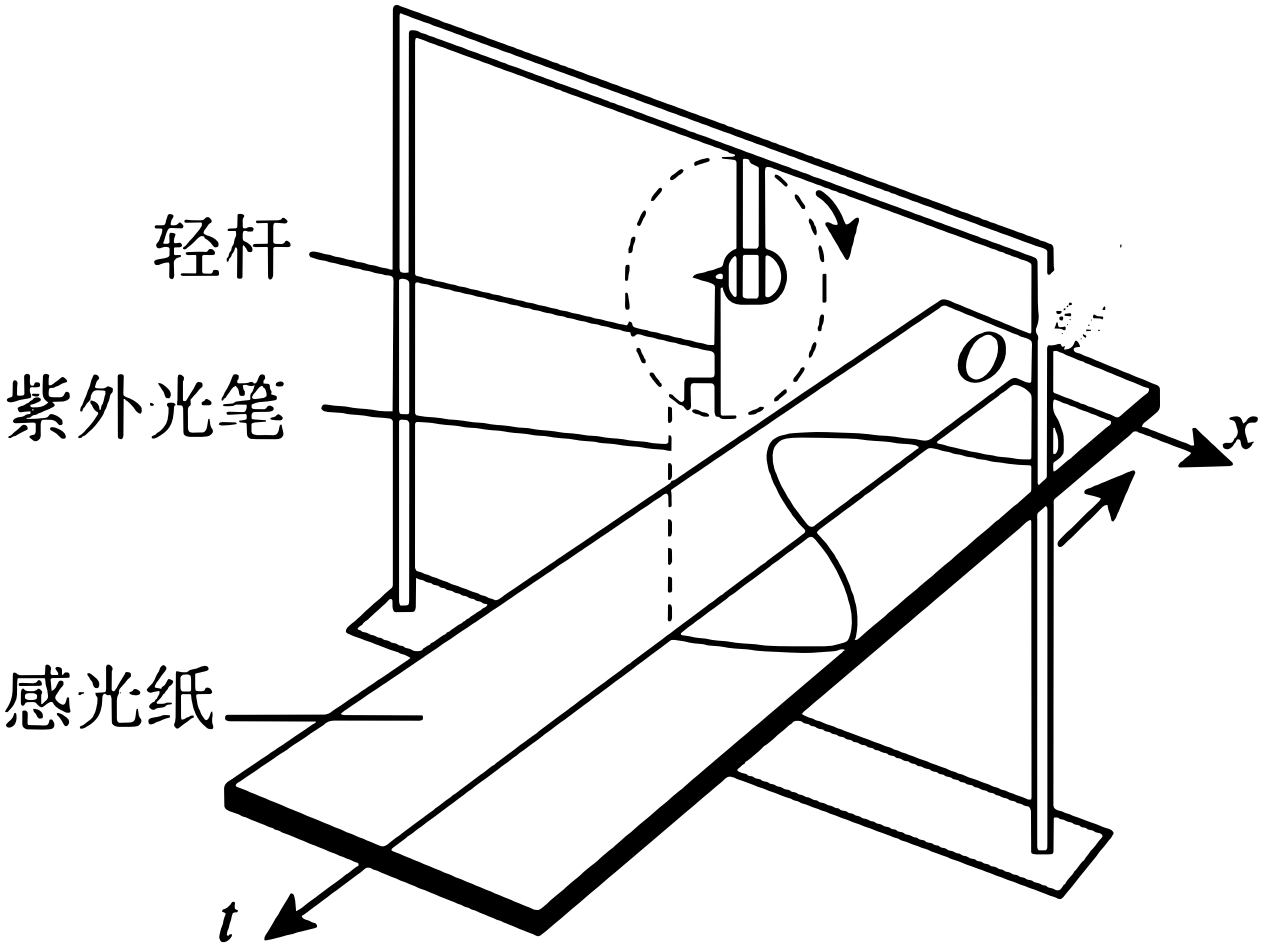
紫外光笔固定在轻杆末端随杆匀速转动，光始终竖直投射到感光纸上，光点在 x 方向的振动是杆端圆周运动的投影，振幅等于轻杆长度 $A = 0.1\,\text{m}$。

C. √ 求 12.5 s 内路程

$t = 12.5\,\text{s} = 2.5T$，每个周期光点通过 $4A = 0.4\,\text{m}$，故路程 $s = 2.5 \times 4A = 1.0\,\text{m}$。

D. × 选项判断

圆频率 1.26 rad/s、路程 1.0 m，C 正确；A、B 项 0.2 rad/s 误将 n（每秒转数）当作频率对应的角速度，D 项路程 1.25 m 为多算半个周期，均排除。



Q6 figure: rotating rod with UV pen and moving photosensitive paper (source paper)

$v-t$ 图线与 t 轴围成的面积（向上为正、向下为负）表示篮球相对抛出点的位移：下落段速度为负、面积向负积累，触地反弹后速度为正、面积向正积累，位移最大处即位置最高。

7. 选择题 · 4分

答案 A

详解

A. √ 几何关系

正三角形边长 a，中心 M 到顶点距离 $r=\dfrac{a}{\sqrt{3}}$，$AM=\dfrac{a}{\sqrt{3}}$。带电细杆（电荷量 $\dfrac{q}{2}$）沿 AM 的中垂线对称放置，杆与 AM 交于 AM 中点，该点到 M、到 A 的距离均为 $h=\dfrac{a}{2\sqrt{3}}$。

B. × 由 M 点场强为零求杆的场强

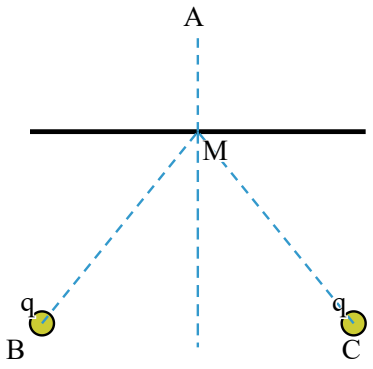
两电荷 q 在 M 点的合场强沿 MA 方向：$E_{2q}=2\cdot\dfrac{kq}{r^2}\cos 30^\circ=2\cdot\dfrac{3kq}{a^2}\cdot\dfrac{\sqrt{3}}{2}=\dfrac{3\sqrt{3}kq}{a^2}$。故细杆在 M 点场强等大反向，即杆在轴线上距杆中心 h 处场强 $E_{杆}=\dfrac{3\sqrt{3}kq}{a^2}$。

C. × 杆在 A 点的场强

A 点与 M 点到杆中心的距离相同（均为 h），均匀带电直杆在轴线上对称两位置的场强等大反向：杆在 A 点场强大小 $E_{杆A}=\dfrac{3\sqrt{3}kq}{a^2}$，方向由 A 指向 M。

D. × A 点总场强

两电荷 q 在 A 点合场强沿 AM 延长线（背离 BC）：$E_{2q,A}=2\cdot\dfrac{kq}{a^2}\cos 30^\circ=\dfrac{\sqrt{3}kq}{a^2}$。取背离 BC 方向为正，$E_A=\dfrac{\sqrt{3}kq}{a^2}-\dfrac{3\sqrt{3}kq}{a^2}=-\dfrac{2\sqrt{3}kq}{a^2}$，大小 $\dfrac{2\sqrt{3}kq}{a^2}$，方向由 A 指向 M。A 正确，B、C、D 排除。



第7题装置示意（本站重绘）

二、多项选择题

8. 选择题 · 6分

答案 ABD

详解

A. √ A项：从 C 经 B 到 D 的运动时间

CD 为短轴，椭圆关于长轴 AB 对称，弧 $\overset{\frown}{CBD}$ 是轨道的一半。周期 $T=24\,\mathrm{h}$，故运动时间为 $\dfrac{T}{2}=12\,\mathrm{h}$，A 正确。

B. √ B项：A、B 两点加速度之比

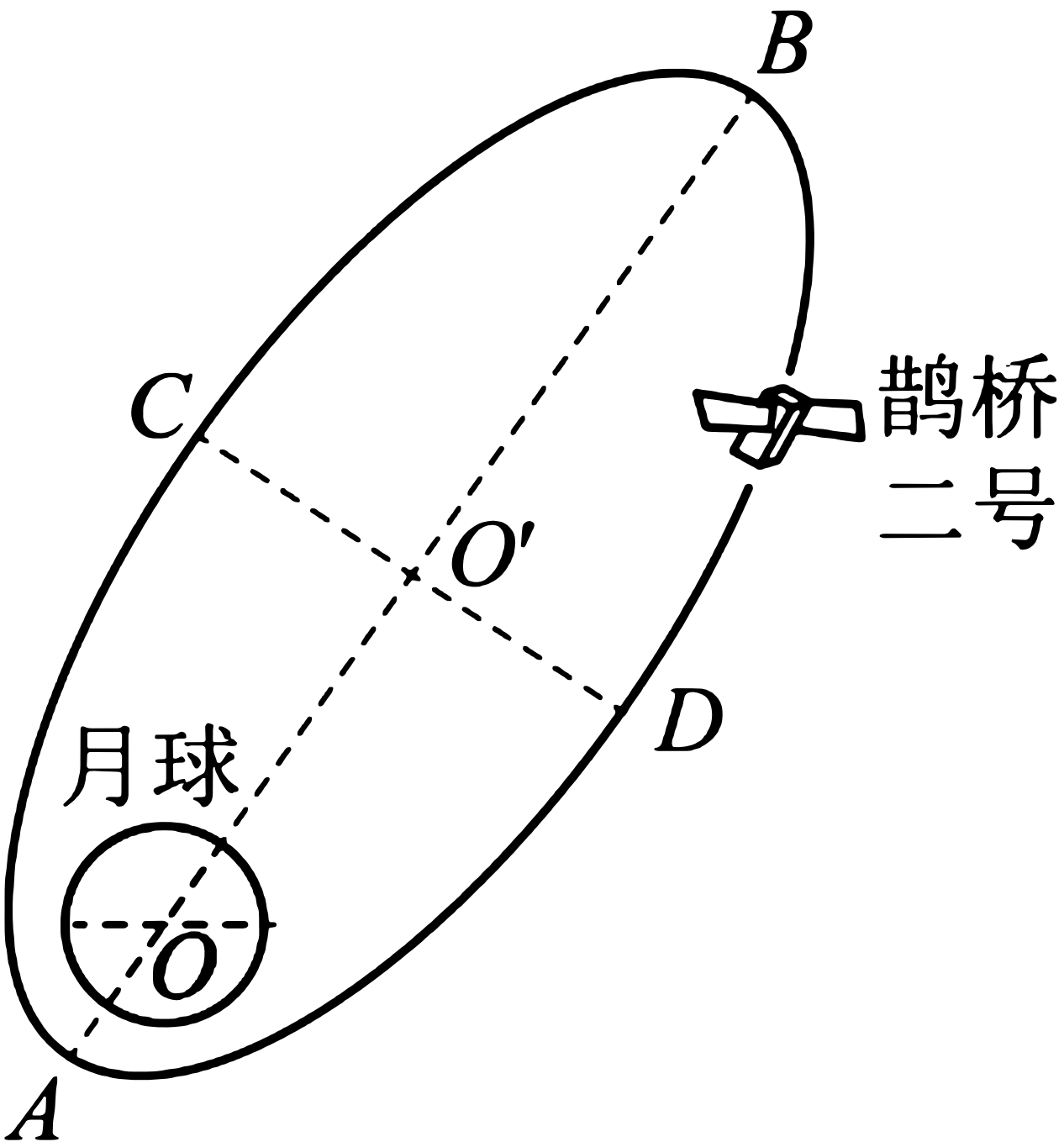
由万有引力 $G\dfrac{Mm}{r^2}=ma$ 得 $a\propto\dfrac{1}{r^2}$，$\dfrac{a_A}{a_B}=\dfrac{r_B^2}{r_A^2}=\left(\dfrac{1.8\times10^4}{2.0\times10^3}\right)^2=9^2=81$，即约 $81:1$，B 正确。

C. × C项：C、D 两点速度方向

速度垂直于与月心连线仅在近月点、远月点（长轴端点）成立；C、D 为短轴端点，速度方向不垂直于其与月心的连线，C 错误。

D. √ D项：发射速度

发射到环月轨道需脱离地球表面绕地球做高椭圆轨道运动，速度大于第一宇宙速度 $7.9\,\mathrm{km/s}$；鹊桥二号仍被地球引力束缚、未脱离地月系统，速度小于第二宇宙速度 $11.2\,\mathrm{km/s}$，D 正确。



Q8 figure: elliptical frozen orbit of relay satellite around Moon (source paper)

9. 选择题 · 6分

答案 ACD

详解

A. √ A项：弹簧恢复自然长度

活塞导热、缓慢移动，最终左右两侧气体压强、温度处处相同，设为 p。活塞受力平衡：左侧气体压力 pS 与右侧气体压力 pS 大小相等方向相反，弹簧弹力必为零，即弹簧恢复自然长度，A 正确。

B. × B项：两侧气体质量

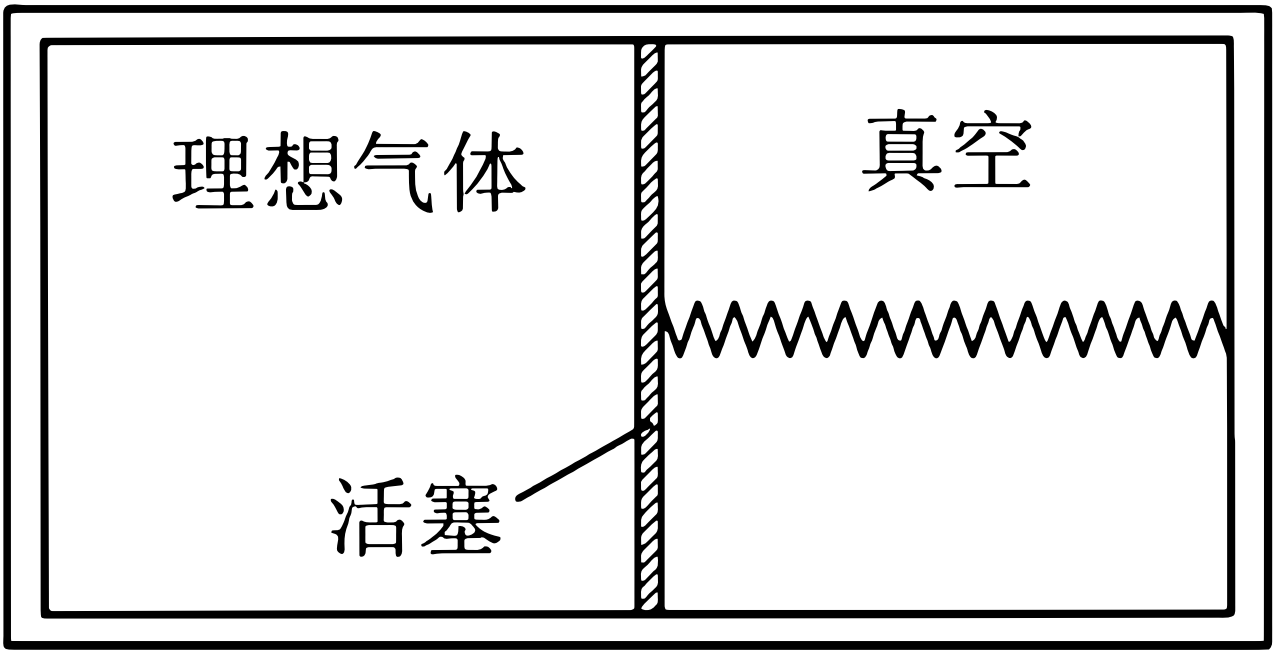
初始时活塞在正中间、弹簧处于压缩态；最终弹簧恢复自然长度，活塞位置比正中间更靠左（缸长大于弹簧自然长度），右侧体积小于初始值、左侧体积大于初始值。两侧压强、温度相同，气体质量之比等于体积之比，$V_{左} > V_{右}$，两侧质量不相等，B 错误。

C. √ C项：内能变化

对全部气体，初、末态弹簧弹性势能减少（压缩量归零），该能量通过活塞对气体做功转化为气体内能；汽缸绝热，$Q = 0$，由 $\Delta U = W$ 且外界对气体做正功，气体内能增加，C 正确。

D. √ D项：左侧分子数密度

左侧气体质量减少（经活塞漏到右侧）且体积增大，单位体积内分子数 $\dfrac{n_{左}}{V_{左}}$ 与初始相比明显减少，D 正确。



Q9 figure: sealed cylinder divided by piston with spring to right wall (source paper)

10. 选择题 · 6分

答案 AD

详解

A. √ 经 bc 边（内正方形右边缘）情形

粒子在无磁场内区直线飞行后经 bc 边进入右侧磁场带。要在 BC 边垂直射出（速度水平），该段圆弧的圆心必须恰在 $x = s$ 直线上：入射点横坐标 $s - d$，圆心横坐标 $s - d + r\cos\varphi$，故需 $r\cos\varphi = d$，与左带关系 $\cos\varphi = 1 - \dfrac{d}{r}$ 联立得 $\cos\varphi = \dfrac{d}{r} = \dfrac{1}{2}$，即 $\varphi = 60^{\circ}$、$r = 2d$。故经 bc 边垂直 BC 射出时夹角必为 60°，D 正确。

B. × 经 cd 边（内正方形上边缘）情形

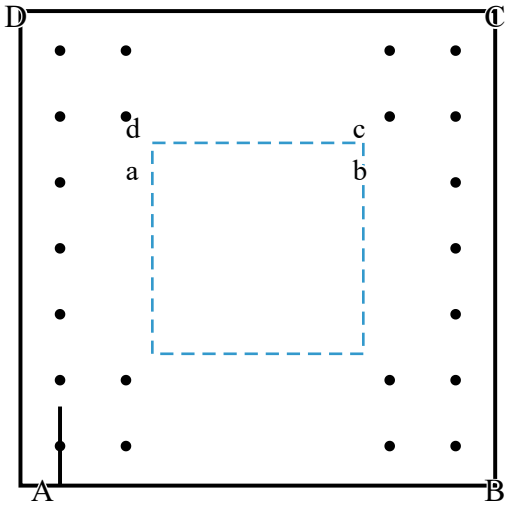
粒子经 cd 边进入上侧磁场带，圆心横坐标 $x_c = x_3 + r\cos\varphi$（x_3 为穿出 cd 边位置的横坐标）。垂直射出要求圆弧最高点恰在 BC 上：$x_c = s$，且出射点纵坐标 $y = s - d + r(1-\sin\varphi) \le s$，要求 $\sin\varphi \ge \cos\varphi$，即 $\varphi \ge 45^\circ$；再由 $d = r(1-\cos\varphi)$ 与圆心条件可解得 $r = \dfrac{s}{1+\sin\varphi}$，对 $45^\circ \le \varphi < 60^\circ$ 均可实现（如 $\varphi = 50^\circ$ 时各几何条件均满足）。故经 cd 边垂直射出的夹角不必为 45°，C 错误。

C. × A项：$\varphi = 45^\circ$ 的必然结果

$\varphi = 45^\circ$ 时 $d = r\left(1 - \dfrac{\sqrt{2}}{2}\right)$。粒子在直线段不可能经 bc 边出内区（可验证 y 越界），必经 cd 边，穿出点横坐标 $x_3 = s - r\sin 45^\circ$，圆心横坐标 $x_c = x_3 + r\cos 45^\circ = s$，即圆弧恰与 BC 边相切于顶点 C 处（$y_{\max} = s$），粒子必沿水平方向（垂直 BC）在 C 点射出，A 正确。

D. √ B项：$\varphi = 60^\circ$ 不必然垂直

$\varphi = 60^\circ$ 时 $d = r/2$。若 r 较大（如 $r = 0.6s$，此时 $d = 0.3s$，穿出 cd 边位置 $x_3 = 0.612s \le s - d$ 合法），圆心横坐标 $x_c = x_3 + r\cos 60^\circ = 0.912s < s$，圆弧在到达最高点之前即越过 $x = s$，粒子以与 BC 不垂直的方向（斜向下右）射出 BC 边，同样满足“经 ad 穿过、由 BC 射出”的条件。故 $\varphi = 60^\circ$ 不必然垂直射出，B 错误。



第10题同心正方形磁场区域（本站重绘）

设外正方形边长 s，磁场区宽度为 d，轨迹半径为 r。粒子自 A 沿 AD（竖直向上）进入左侧磁场带向右偏转；能穿过 ad 边（$x = d$）时，由圆的几何 $d = r(1-\cos\varphi)$，φ 为穿出 ad 边时速度与 ad 边（竖直）的夹角，$\varphi \in (0^\circ, 90^\circ)$。

三、实验题

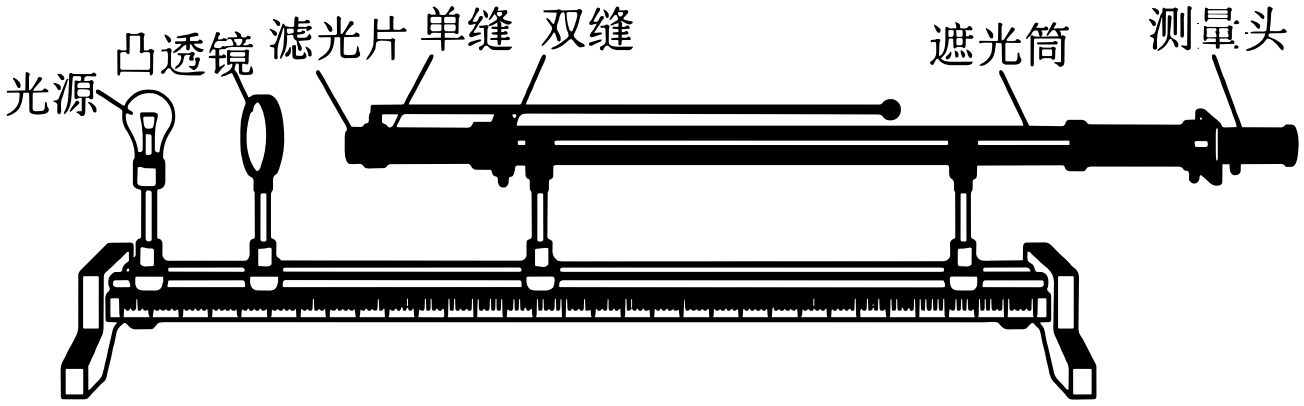
11. 实验题

> **答案** 绿光

详解

(1) 求条纹间距 第 1 条到第 6 条亮纹中心间含 5 个条纹间距：单色光 1 的 $\Delta x_1 = \dfrac{18.64 - 10.60}{5}\,\text{mm} = \dfrac{8.04}{5}\,\text{mm} = 1.608\,\text{mm}$；单色光 2 的 $\Delta x_2 = \dfrac{18.08 - 8.44}{5}\,\text{mm} = \dfrac{9.64}{5}\,\text{mm} = 1.928\,\text{mm}$。

(2) 判断光的类别 由双缝干涉条纹间距公式 $\Delta x = \dfrac{L}{d}\lambda$，装置中 L、d 相同，$\Delta x \propto \lambda$。$\Delta x_1 < \Delta x_2$，故单色光 1 波长较短，为绿光；单色光 2 波长较长，为红光。



Q11 figure: double-slit interference apparatus with optical bench (source paper)

12. 实验题

> **答案** （1）相同 （2）见解析（平滑曲线） （3）0.44 m/s（按本站对卷面印迹的读数给出，若与原卷印刷值不符以卷面为准）

详解

(1) 第①空：释放高度 为保证每次钢球飞出斜槽末端时的初速度相同、轨迹重合，每次必须由静止在斜槽上相同位置（相同高度）释放钢球。故填“相同”。

(2) 第②空：描绘轨迹 用平滑曲线将坐标纸上各印迹点连接起来（不能逐点连折线），即得钢球做平抛运动的轨迹，是一条开口向下的抛物线弧（y 轴竖直向下建立，轨迹满足 $y \propto x^2$）。

(3) 第③空：求初速度 平抛运动 $x = v_0 t$，$y = \dfrac{1}{2}gt^2$，消去 t 得 $y = \dfrac{g}{2v_0^2}x^2$，即 $y \propto x^2$。取轨迹上读数清晰的印迹点（如 $x = 8.0\,\text{cm}$，$y = 16.0\,\text{cm}$，各点均满足同一比例系数 $k = \dfrac{y}{x^2} = 0.25\,\text{cm}^{-1} = 25\,\text{m}^{-1}$），则 $v_0 = \sqrt{\dfrac{g}{2k}} = \sqrt{\dfrac{9.8}{50}}\,\text{m/s} \approx 0.44\,\text{m/s}$（保留 2 位有效数字）。

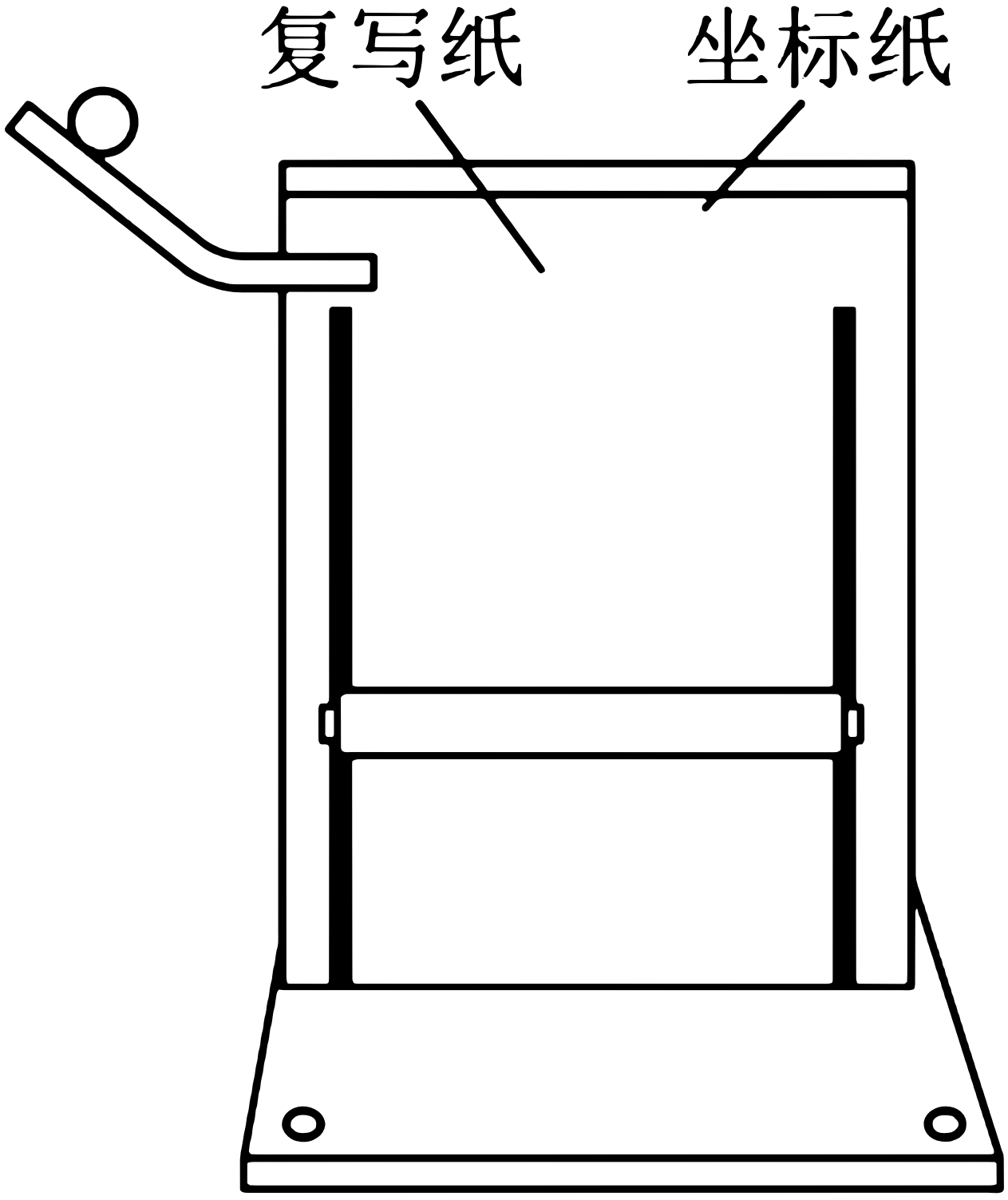
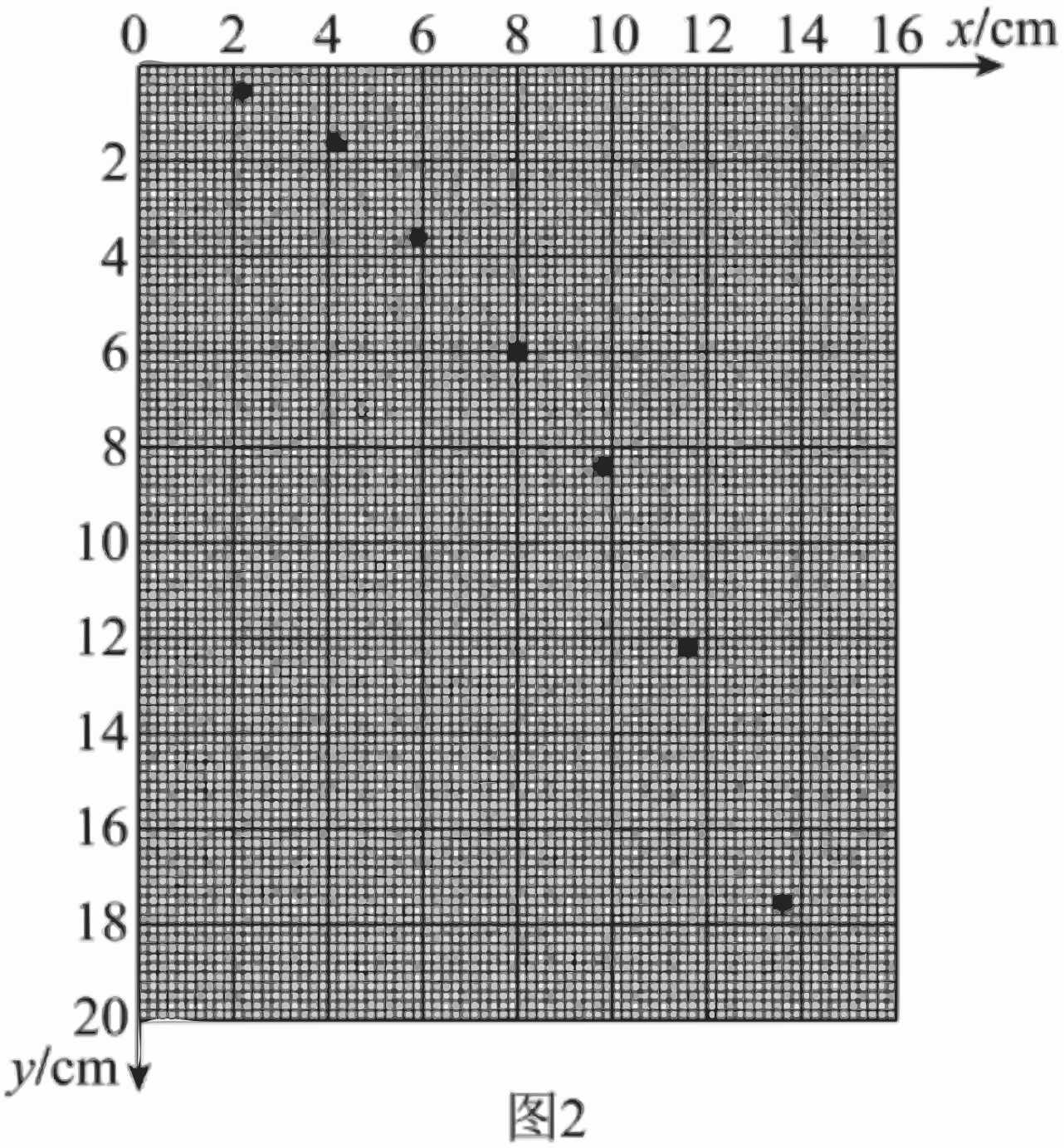


图1

Q12 figure: projectile motion apparatus with inclined board (source paper)



Q12 figure: trajectory points on coordinate grid (source paper)

印迹坐标以原卷图 2 网格读数为准；若读数与本站所取点不同，按 $v_0 = \sqrt{g/(2k)}$ 同法重算即可。

13. 实验题

答案　（1）负极　（2）①C（或D）、A、B ②减小　（3）减小

详解

(1) 第（1）问：判断二极管极性　欧姆挡内部电源从黑表笔流出电流。黑接 M、红接 N 时指针指 a（偏角小、阻值大），二极管不导通；对调后指针指 b（偏角大、阻值小），二极管正向导通，此时黑表笔（内部电源正极）接的是二极管正极，即 N 端为正极，M 端为负极。故填“负极”。

(2) 第（2）问①：滑动变阻器接线　要求电压表、电流表读数从 0 开始，滑动变阻器必须接成分压式：两个下接线柱 A、B 与电源回路相连（L_2 接 A、L_3 接 B），测量电路一端接上接线柱 C（或 D），即 L_1 接 C（或 D）。当滑片移至与 L_1 所接上接线柱同侧的末端时输出电压为零。按题问 L_1、L_2、L_3 顺序填：C（或D）、A、B。

(3) 第（2）问②：光照与阻值　图 4 中曲线 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 对应光照由弱到强，同一电压下曲线 Ⅲ 的电流最大，由 $R=\dfrac{U}{I}$ 知其阻值最小。故光敏电阻阻值随光照增强而减小。

(4) 第（3）问：调节 R_1　图 5 中 R_G 接 +3V 与三极管基极 b 之间，R_1 接在基极节点与 0V 之间，基极电压 $U_b=\dfrac{3R_1}{R_G+R_1}$（分压）。光照达到报警值时 R_G 减小，本应使 U_b 升高导通三极管点亮 LED，但实测 LED 不亮，说明 U_b 未达导通电压，需再提高 U_b，即减小 R_1 的阻值。故填“减小”。

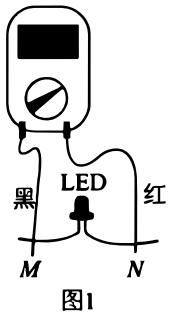


图1

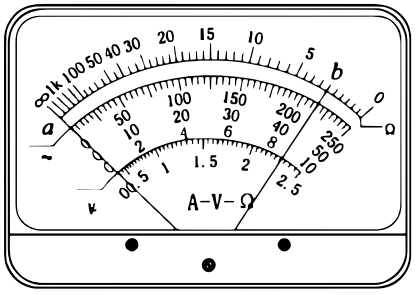


图2

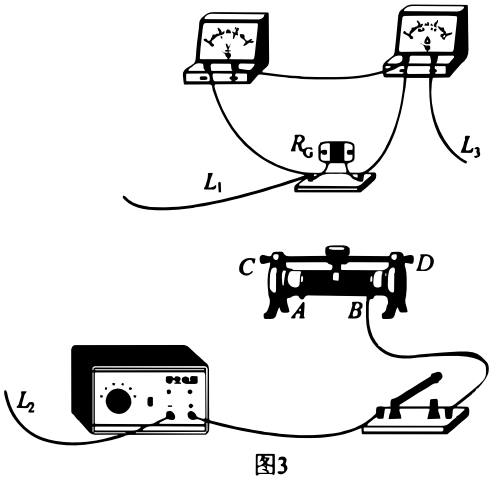


图3

Q13 figure: multimeter with LED connected to terminals M and N (source paper)

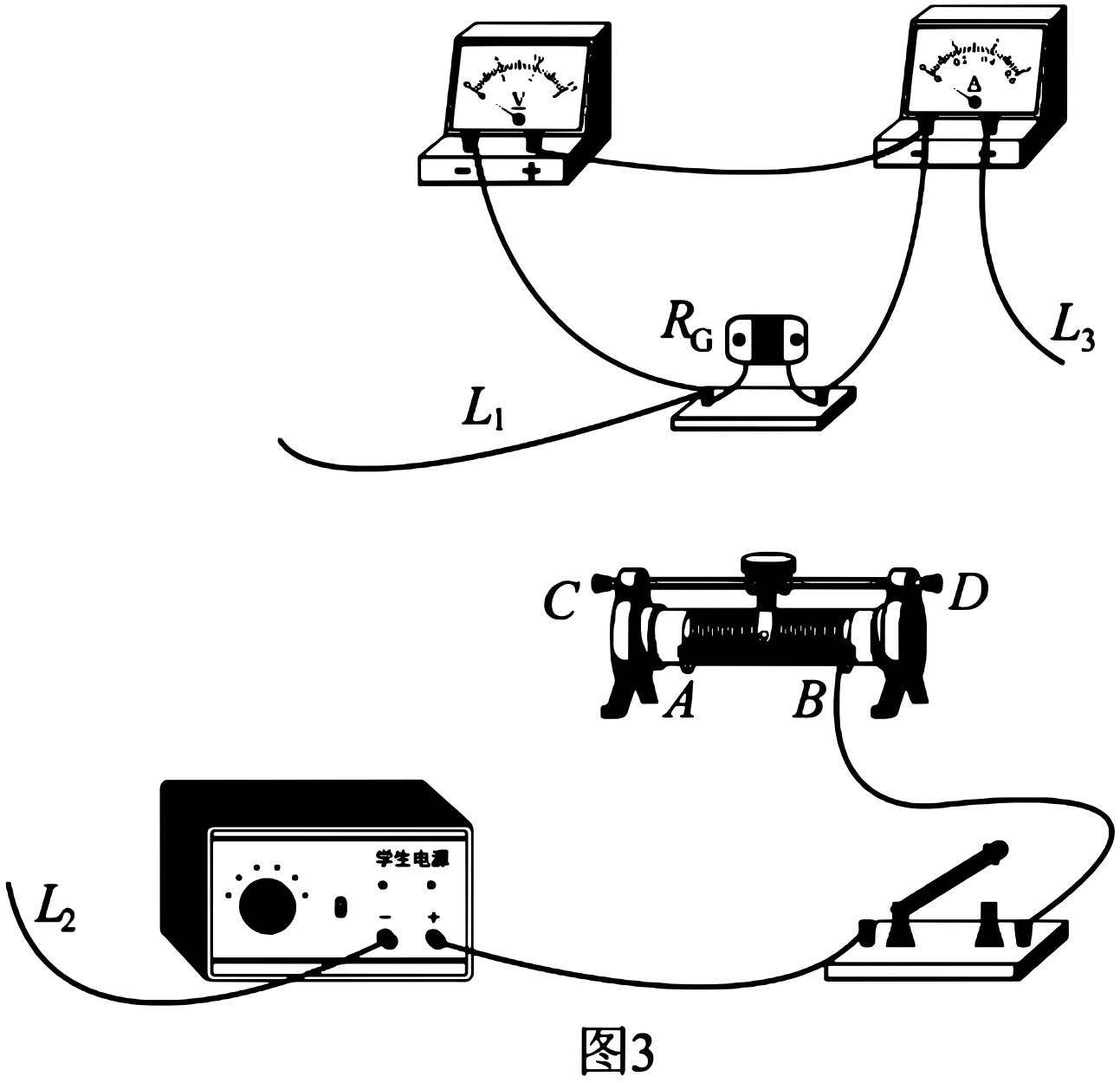


图3

Q13 figure: partial circuit connection with meter, rheostat and power supply (source paper)

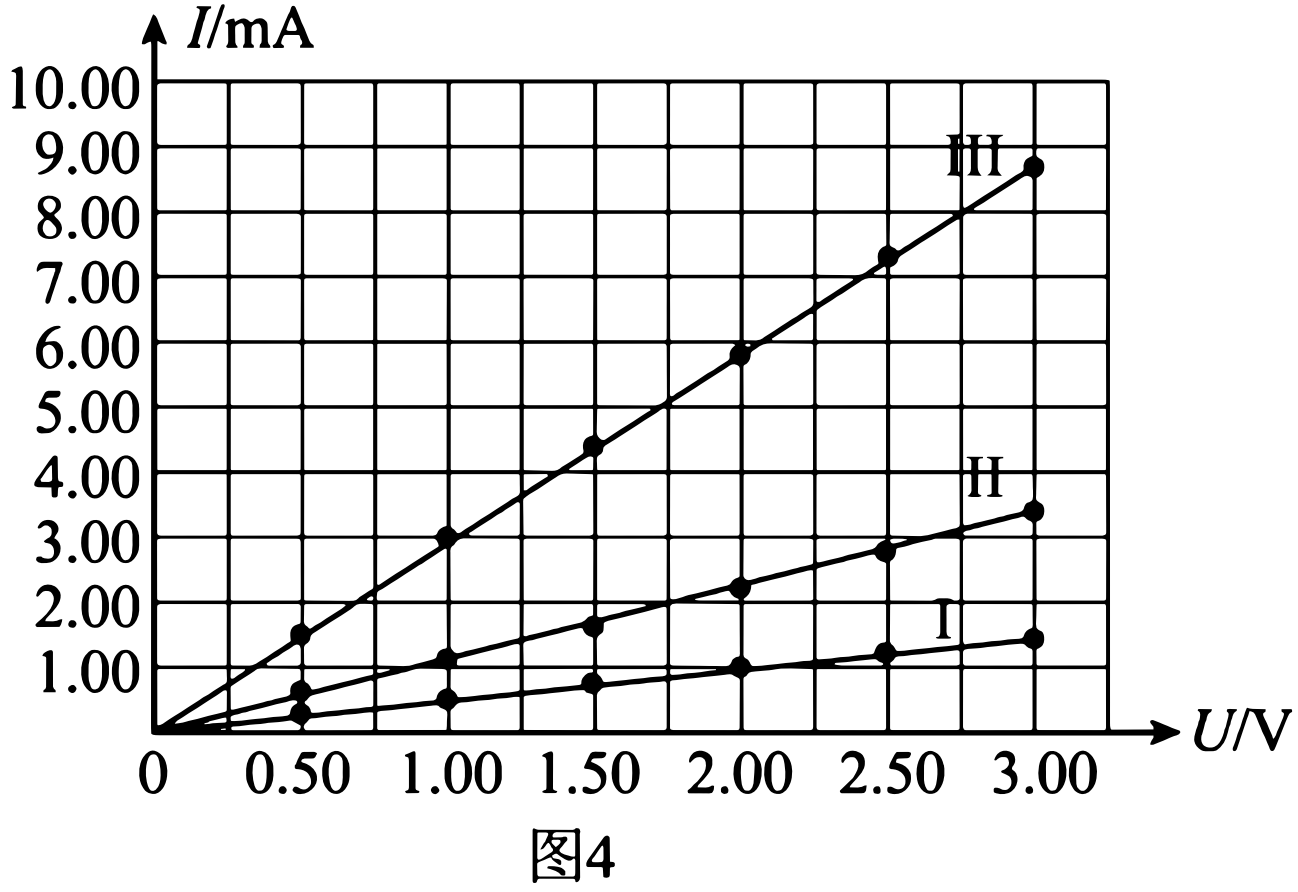


图4

Q13 figure: volt-ampere characteristic curves I, II, III (source paper)

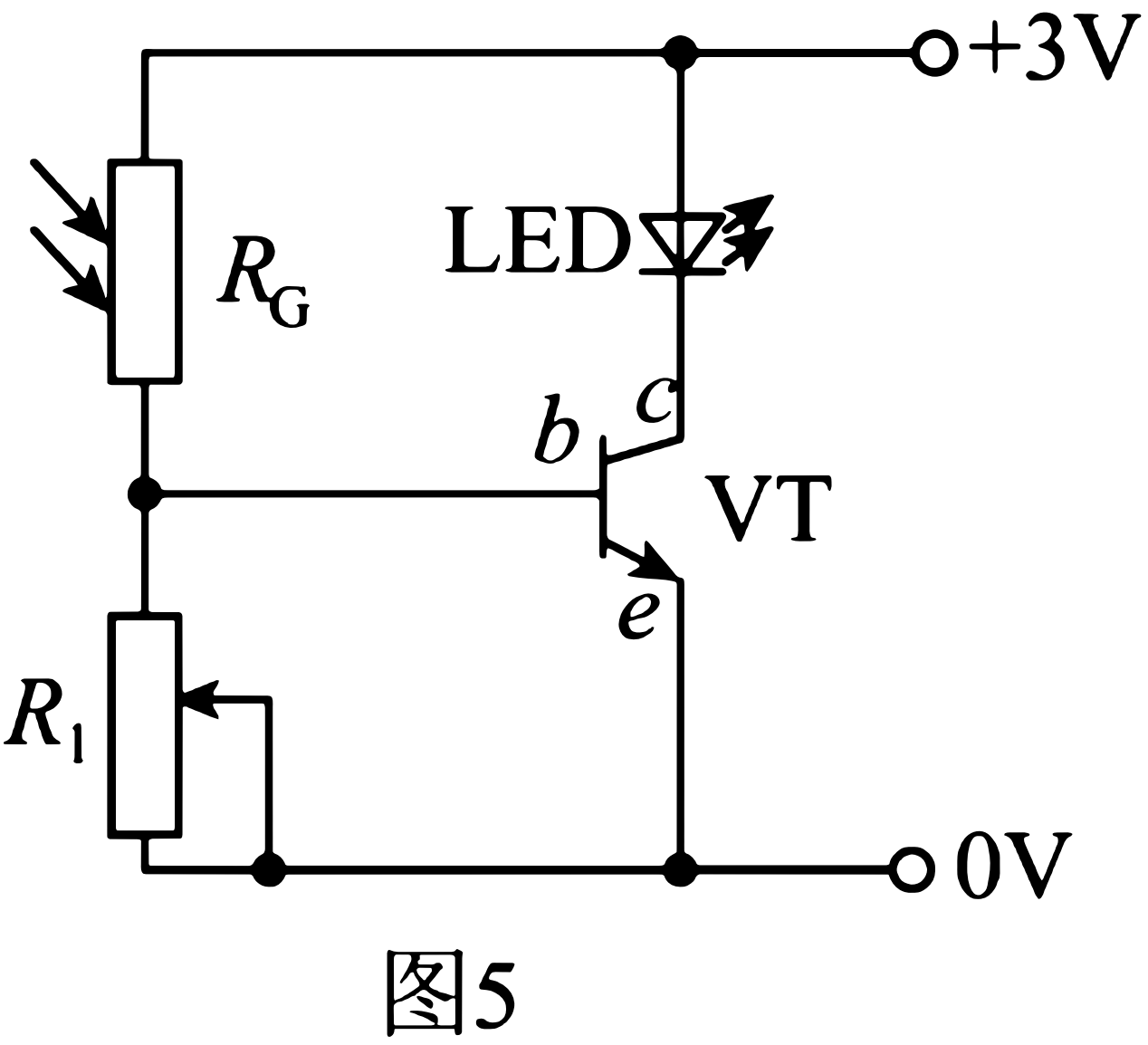


图5

Q13 figure: alarm circuit with RG, LED and transistor VT (source paper)

四、计算题

14. 计算题

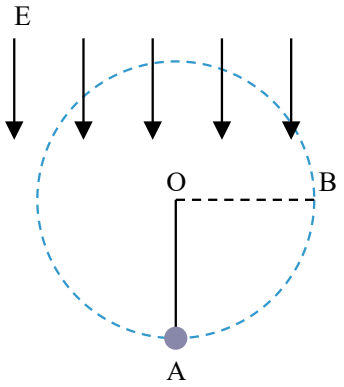
> 答案 （1）$E=\dfrac{U}{L}$ （2）$v_A=\sqrt{\dfrac{qU}{m}-gL}$，$v_B=\sqrt{3\left(\dfrac{qU}{m}-gL\right)}$

详解

(1) 第（1）问：求 E A 为最低点（在 O 正下方 L 处），B 与 O 等高，A、B 沿场强方向（竖直）相距 L。匀强电场中 $U_{AB}=E\cdot\ L=U$，解得 $E=\dfrac{U}{L}$。

(2) 第（2）问：A 点速度 小球在 A 点（最低点）受拉力 T、竖直向上的电场力 qE 和重力 mg，向心加速度方向竖直向上。由牛顿第二定律 $T+qE-mg=\dfrac{mv_A^2}{L}$，代入 $T=0$、$qE=\dfrac{qU}{L}$ 得 $\dfrac{mv_A^2}{L}=\dfrac{qU}{L}-mg$，即 $v_A=\sqrt{\dfrac{qU}{m}-gL}$（因能做圆周运动，$qE>mg$，根号内为正）。

(3) 第（2）问：B 点速度 从 A 到 B 由动能定理：$-mgL+qU=\frac{1}{2}mv_B^2-\frac{1}{2}mv_A^2$（电场力做功 $qU_{AB}=qU$）。代入 $v_A^2=\frac{qU}{m}-gL$ 得 $v_B^2=v_A^2-2gL+\frac{2qU}{m}=\frac{qU}{m}-gL-2gL+\frac{2qU}{m}=3(\frac{qU}{m}-gL)$，故 $v_B=\sqrt{3(\frac{qU}{m}-gL)}=\sqrt{3}\,v_A$。回代：$\frac{1}{2}m\times3(\frac{qU}{m}-gL)-\frac{1}{2}m(\frac{qU}{m}-gL)=m(\frac{qU}{m}-gL)=qU-mgL$，与 $-mgL+qU$ 一致，正确。



第14题装置示意（本站重绘）

15. 计算题

答案　（1）$F_{\max}=\frac{B^2L^3\omega}{R}$，$F_{\min}=\frac{B^2L^3\omega}{2R}$　（2）$\mu=\tan\theta-\frac{ma+\frac{B^2L^3\omega}{R}}{mg\cos\theta}$

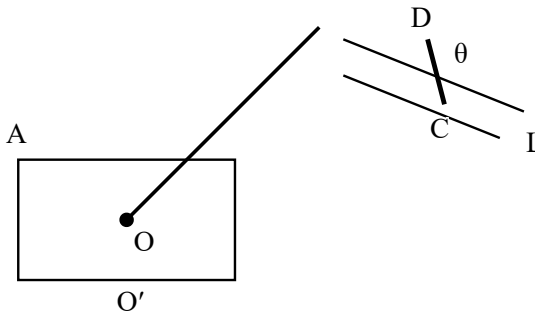
详解

(1) 第（1）问：感应电动势的取值范围 细棒 OA 绕竖直轴 OO' 在水平面内匀速转动，处在细框平面的竖直磁场 B 中，其外端沿细框滑动。杆上距轴 r 处线速度 $v=\omega r$，产生的动生电动势 $e=\int_0^r B\omega x\,\mathrm{d}x=\frac{1}{2}B\omega r^2$。接触点在细框边上滑动，$r$ 在“中心到框边距离 L”与“中心到框角距离 $\sqrt{2}L$”之间周期性变化，故 $e\in[\frac{1}{2}B\omega L^2,\ B\omega L^2]$。

(2) 第（1）问：安培力最大、最小值 回路总电阻为 R，电流 $I=\frac{e}{R}$。CD 棒长 L（等于导轨间距），处在与导轨平面垂直的磁场 B 中，所受安培力 $F=BIL=\frac{B^2Le}{R}$。回代得 $F_{\max}=\frac{B^2L\cdot B\omega L^2}{R}=\frac{B^2L^3\omega}{R}$，$F_{\min}=\frac{B^2L\cdot\frac{1}{2}B\omega L^2}{R}=\frac{B^2L^3\omega}{2R}$。

(3) 第（2）问：锁定 OA 后的运动分析 锁定 OA 后无感应电动势，推动 CD 下滑、撤去推力瞬间，CD 以速度 v 沿导轨下滑切割磁感线：$e'=BLv$，$I'=\frac{BLv}{R}$，安培力 $F'=\frac{B^2L^2v}{R}$，方向沿导轨向上（阻碍相对运动）。题设 $F'=F_{\max}$，得 $\frac{B^2L^2v}{R}=\frac{B^2L^3\omega}{R}$，即 $v=\omega L$。

(4) 第（2）问：求动摩擦因数 撤去推力瞬间，CD 沿导轨向下加速，受重力分量 $mg\sin\theta$（沿轨向下）、安培力 $F_{\max}$（沿轨向上）与滑动摩擦力 $\mu mg\cos\theta$（沿轨向上）。由牛顿第二定律：$mg\sin\theta-\mu mg\cos\theta-F_{\max}=ma$，解得 $\mu=\frac{mg\sin\theta-ma-F_{\max}}{mg\cos\theta}=\tan\theta-\frac{ma+\frac{B^2L^3\omega}{R}}{mg\cos\theta}$。



第15题装置示意（本站重绘）

16. 计算题

答案　（1）1.5 m　（2）$W=90\,\mathrm{J}$，$\tan\alpha=2$　（3）$s_{AC}=\dfrac{7}{4}L_B$（A、C 两木板间距为 B 木板长度的 $\dfrac{7}{4}$ 倍）

详解

(1) 第（1）问：A、B 板间水平距离　机器人与木板系统水平方向不受外力，动量守恒且总动量为零（人船模型）。机器人相对 A 向右走 2.0 m，A 向左退；B、C 不受水平力而保持静止。设 A 位移大小为 s_A，机器人对地位移为 $2.0-s_A$，由 $m_{机}(2.0-s_A)=m_As_A$：$6.0\times(2.0-s_A)=2.0\,s_A$，解得 $s_A=1.5\,\mathrm{m}$，即 A、B 木板间水平距离为 1.5 m。

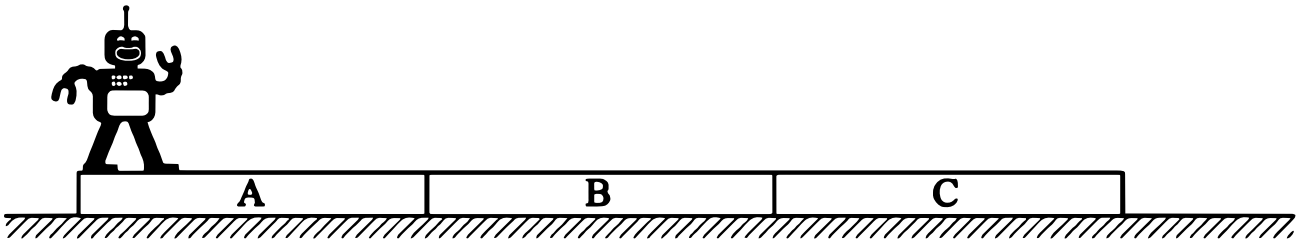
(2) 第（2）问：最少做功的起跳　起跳瞬间机器人与 A 水平动量守恒：$Mv_x=m_Au_A$，机器人做功等于系统动能增量 $W=\dfrac{1}{2}M(v_x^2+v_y^2)+\dfrac{1}{2}m_Au_A^2=\dfrac{1}{2}Mv_x^2+\dfrac{1}{2}Mv_y^2+\dfrac{M^2v_x^2}{2m_A}$。斜抛水平射程需覆盖 1.5 m：$\dfrac{2v_xv_y}{g}=1.5$，即 $v_xv_y=7.5\,\mathrm{m^2/s^2}$。代入 $M=6.0\,\mathrm{kg}$、$m_A=2.0\,\mathrm{kg}$ 得 $W=(3+\dfrac{36}{4})\,v_x^2+3v_y^2=12v_x^2+3v_y^2$，代入 $v_y=\dfrac{7.5}{v_x}$，对 v_x 求极值：$\dfrac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}v_x}=24v_x-\dfrac{3\times2\times7.5^2}{v_x^3}=0$，得 $v_x^2=3.75\,\mathrm{m^2/s^2}$、$v_y^2=15\,\mathrm{m^2/s^2}$，$\tan\alpha=\dfrac{v_y}{v_x}=2$。此时 $W_{\min}=12\times3.75+3\times15=45+45=90\,\mathrm{J}$。回代射程：$\dfrac{2\times1.94\times3.87}{10}\approx1.5\,\mathrm{m}$，满足条件。

(3) 第（2）问：结论　起跳过程机器人做的功为 90 J，跳离瞬间速度方向与水平方向夹角的正切值为 2。

(4) 第（3）问：落在 B 板左端后的共同速度　起跳时 $v_x=\sqrt{3.75}=\dfrac{\sqrt{15}}{2}\,\mathrm{m/s}$，$A$ 板反冲速度 $u_A=\dfrac{Mv_x}{m_A}=\dfrac{3\sqrt{15}}{2}\,\mathrm{m/s}$（向左）。飞行时间 $t=\dfrac{2v_y}{g}=\dfrac{\sqrt{15}}{5}\,\mathrm{s}\approx0.775\,\mathrm{s}$，期间 A 又左移 $\dfrac{3\sqrt{15}}{2}\times\dfrac{\sqrt{15}}{5}=4.5\,\mathrm{m}$，落至 B 左端时 A 右端与 B 左端相距 $1.5+4.5=6.0\,\mathrm{m}$。机器人落在 B 上与 B（及相贴的 C）达共同速度 $u_0=\dfrac{Mv_x}{M+m_B+m_C}=\dfrac{6\times\frac{\sqrt{15}}{2}}{10}=\dfrac{3\sqrt{15}}{10}\,\mathrm{m/s}$（向右）。

(5) 第（3）问：三次等间距跳过程中 B 板的运动　机器人每次相对 B 向右跳 $\dfrac{L_B}{3}$，起跳瞬间 B 后退：由动量守恒 $(M+m_B)u_0=Mw+m_Bu'$，飞行中机器人相对 B 的位移 $\rho\tau=\dfrac{L_B}{3}$，其中 $\rho=w-u'$。联立得 B 在一次飞行期间相对地后退 $\dfrac{M}{M+m_B}\times\dfrac{L_B}{3}=\dfrac{L_B}{4}$；机器人落回后机器人与 B 恢复共同速度 u_0（水平动量守恒）。三次跳共使 B 左端净后退 $3\times\dfrac{L_B}{4}=\dfrac{3L_B}{4}$，其余时间 B 以 u_0 向右运动。C 板自机器人落在 B 上起即以 u_0 匀速右移（第一次起跳后与 B 分离）。

(6) 第（3）问：B 恰好追上 A 时的 A、C 间距 设从机器人落在 B 左端到第三次落地（机器人到 B 右端）历时 T。以落地时 B 左端为原点：B 左端位置 $x_B = u_0 T - \dfrac{3L_B}{4}$；$A$ 右端位置 $x_A = -6.0 - u_A' T$（$u_A' = \dfrac{3\sqrt{15}}{2}$ m/s）。恰好追上即 $x_B = x_A$：$T(u_0 + u_A') = \dfrac{3L_B}{4} - 6.0$。$C$ 左端位置 $x_C = L_B + u_0 T$。故 A、C 间距 $s_{AC} = x_C - x_A = L_B + 6.0 + T(u_0 + u_A') = L_B + 6.0 + \dfrac{3L_B}{4} - 6.0 = \dfrac{7}{4}L_B$，与 u_0 无关。即该时刻 A、C 两木板间距为 B 木板长度的 $\dfrac{7}{4}$ 倍。



Q16 figure: robot on three boards A, B, C on smooth ground (source paper)

第（3）问中“恰好追上”的条件同时限定了三次跳跃的总时长与板长 L_B 的取值，但所求间距关系 $s_{AC} = \dfrac{7L_B}{4}$ 与之无关，仅由动量守恒与位移几何决定。