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（湖南卷）物理

参考答案与详解（本站独立编撰）

湖南卷 · 6 单选（每题4分）+ 4 多选（每题5分）+ 2 实验 + 3 计算/简答 · 满分100分，考试时间75分钟

本册答案与解析由逐光知理物理教研组独立编撰，依据原卷题目条件独立求解与核对，不依附任何外部评分口径，仅供参考。

答案速查

1 **B**	2 **D**	3 **D**	4 **C**	5 **C**	6 **A**
7 **BD**	8 **CD**	9 **C**	10 **C**		

题号	主考点	答案摘要
11	探究金属丝阻值随气压的变化（伏安法读数与误差分析）	（1）2.20 V；22.0 Ω　（4）右　（5）小于
12	气垫导轨上弹簧振子 T^2-m 图像测质量	（4）描点后用平滑直线连接（数据点近似共线，图略） （5）线性的　（6）0.122　（7）负方向
13	理想气体等温变化与浮力称量测气球内气体体积	（1）$V_0=\frac{p}{p_0}V$；（2）$V=5.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}^3$
14	圆筒内磁场中的螺旋线运动与筒外电场中的类抛体运动	（1）$B_{\min}=\frac{2\pi mv_0}{eL}$；（2）$\lvert\tan\theta\rvert=\frac{2\pi r}{L}$；（3）$y_{\max}=\frac{2\pi^2mr^2v_0^2}{eEL^2}$
15	圆环内一维弹性/非弹性碰撞序列（动量守恒、恢复系数与路程求和）	（1）$v=\frac{m_Av_0}{m_A+m_B}$，$F_N=\frac{m_A^2v_0^2}{(m_A+m_B)R}$；（2）$\frac{m_A}{m_B}=2$；（3）$s=\frac{2\pi Rm_A}{m_A+m_B}\cdot\frac{e^{-2n}-1}{1-e}$

一、单项选择题（本题共6小题，每小题4分，共24分）

1. 选择题 · 4分

答案 B

详解

A. × 普朗克认为黑体辐射的能量是连续的

错误。普朗克提出能量量子化假说，认为黑体辐射能量的吸收和发射是不连续的、只能取 $h\nu$ 的整数倍，故A的说法与史实相反。

B. √ 红光能使该金属逸出电子，改用紫光也可以

正确。发生光电效应的条件是入射光频率大于金属的极限频率。紫光频率大于红光频率，红光已能使电子从该金属表面逸出，则频率更高的紫光一定也能使电子逸出。

C. × 康普顿发现散射后仅有波长小于原波长的射线成分

错误。康普顿在研究石墨对X射线的散射时，发现散射光中既有波长变长（$\lambda' > \lambda$）的成分，也有波长与原射线相同的成分，“仅有波长变小成分”的说法不对。

D. × 德布罗意认为质子具有波动性，而电子不具有波动性

错误。德布罗意提出物质波假说，认为一切实物粒子（包括电子、质子等）都具有波动性，电子衍射实验也证实了电子具有波动性。

牢记：光电效应取决于频率是否超过极限频率；康普顿散射中波长变长与不变成分并存。

2. 选择题 · 4分

答案 D

详解

A. × 波长为 3m

错误。抖绳频率 $f = 60$ 次/分钟 $= 1\,\text{Hz}$，周期 $T = 1\,\text{s}$。t_0 时刻 A 位于波谷、B 位于波峰，且 A、B 之间还有一个波谷，则 A、B 间距离为 1.5λ（谷—谷为 λ，谷—峰为 $\lambda/2$），即 $1.5\lambda = 6\,\text{m}$，得 $\lambda = 4\,\text{m}$，不是 $3\,\text{m}$。

B. × 波速为 12m/s

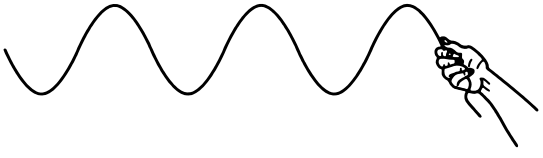
错误。由 $v = \lambda f = 4 \times 1 = 4\,\text{m/s}$，不是 $12\,\text{m/s}$。

C. × $t_0 + 0.25\text{s}$ 时刻，B点速度为0

错误。$0.25\,\text{s} = \dfrac{T}{4}$。$t_0$ 时刻 B 位于波峰，经 $\dfrac{T}{4}$ 后 B 到达平衡位置，此时速度最大，不为零。

D. √ $t_0 + 0.50\text{s}$ 时刻，A点速度为0

正确。$0.50\,\text{s} = \dfrac{T}{2}$。$t_0$ 时刻 A 位于波谷，经半个周期后 A 到达波峰，在最大位移处速度为零。



长绳上的简谐横波示意图

先由“谷—谷—峰”的波形结构确定 A、B 间距与波长的倍数关系，再按周期分数判断质点状态；质点不随波迁移。

3. 选择题 · 4分

> **答案** D

详解

A. × 剪断前各段力的分析

自下而上：D（质量 m）由 C、D 间轻弹簧悬挂，故该弹簧弹力 $T_{CD}=mg$；C（质量 $2m$）受重力和 T_{CD}，由 B、C 间细线拉住，$T_{BC}=2mg+mg=3mg$；B（质量 $3m$）由 A、B 间轻弹簧悬挂，$T_{AB}=3mg+3mg=6mg$。

B. × C 选项（含 $a_B=2g$ 的组合）

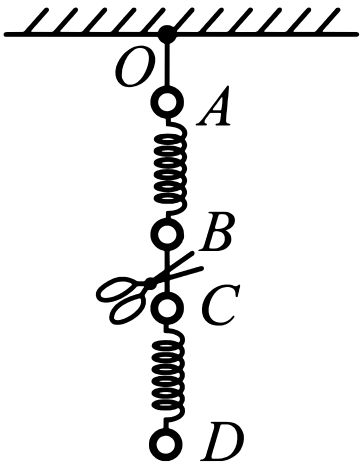
错误。剪断 B、C 间细线的瞬间，弹簧弹力不突变：B 受重力 $3mg$（向下）和弹簧弹力 $6mg$（向上），合力 $3mg$ 向上，$a_B=\dfrac{3mg}{3m}=g$，不是 $2g$。

C. × A 选项（g，$1.5g$ 的组合）

错误。剪断后 C 受重力 $2mg$（向下）和 C、D 间弹簧弹力 mg（向上，不突变），合力 mg 向下，$a_C=\dfrac{mg}{2m}=0.5g$，不是 $1.5g$。

D. √ D 选项（g，$0.5g$ 的组合）

正确。剪断瞬间 $a_B=\dfrac{6mg-3mg}{3m}=g$、$a_C=\dfrac{2mg-mg}{2m}=0.5g$，与选项D一致。



四球悬挂系统示意图

剪断瞬间：细线拉力突变为零，轻弹簧弹力保持不变——这是本题唯一要点。答案对应 g、$0.5g$，选D。

4. 选择题 · 4分

> **答案** C

详解

A. × 方法与几何关系

导线绕 O 点以角速度 ω 逆时针转动，磁场垂直纸面向里。在转动导体中，等效非静电力 $\vec{v}\times\vec{B}$ 指向沿径向指向 O（对逆时针转动、磁场向里），故正电荷向 O 端聚集，任意两点 P_1P_2 间电势差只与其到 O 的距离有关：$\varphi(P_2)-\varphi(P_1)=-\dfrac{1}{2}B\omega(r_2^2-r_1^2)$，离 O 越远电势越低。

B. × 比较 O 与 a

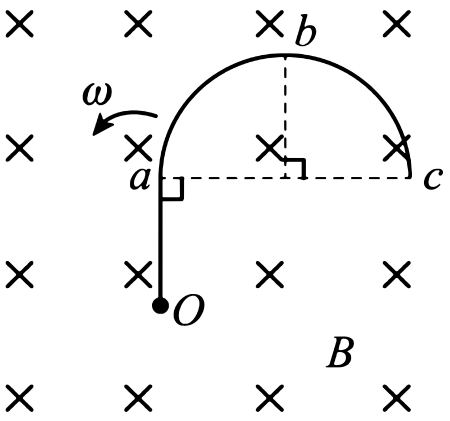
Oa 段长为 R，a 到 O 距离为 R，故 $\varphi_O>\varphi_a$。

C. √ 比较 a、b、c

半圆弧 abc 半径为 R、ac 为直径，O 在 a 下方距 a 为 R 处。以弧心为原点：$a=(-R,0)$，$c=(R,0)$，$b=(0,R)$，$O=(-R,-R)$。则 $r_a=R$，$r_b=\sqrt{R^2+(2R)^2}=\sqrt{5}R$，$r_c=\sqrt{(2R)^2+R^2}=\sqrt{5}R$。$b$、$c$ 到 O 距离相等，故 $\varphi_b=\varphi_c$；又 $r_a<r_b$，故 $\varphi_a>\varphi_b$。

D. × 结论

综上 $\varphi_O>\varphi_a>\varphi_b=\varphi_c$，选C。



导线Oabc绕O点在匀强磁场中转动

转动切割中电势差由 $\frac{1}{2}B\omega r^2$ 的差值决定，只看点到转轴的距离；曲线段与直线段结论相同。

5. 选择题 · 4分

> **答案** C

详解

A. × 写出电势表达式

$+4q$ 固定在 $x=-1$ 处，$-q$ 固定在 $x=0$ 处，取无穷远处电势为零，则 x 正半轴上 $\varphi(x)=k\left(\dfrac{4q}{x+1}-\dfrac{q}{x}\right)=kq\left(\dfrac{4}{x+1}-\dfrac{1}{x}\right)$。

B. × 判断 A、D（原点附近的极限行为）

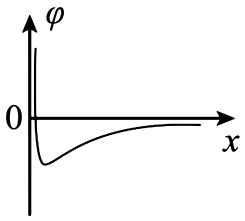
$x \to 0^+$ 时 $-\dfrac{1}{x} \to -\infty$，电势趋于负无穷，靠近原点处图线应陡峭下降到负无穷。A 图在原点附近为正尖峰、D 图恒为正，均与此矛盾，A、D 错误。

C. √ 判断 B（是否存在正电势区）

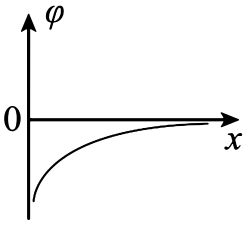
令 $\varphi = 0$ 得 $\dfrac{4}{x+1} = \dfrac{1}{x}$，即 $4x = x+1$，$x = \dfrac{1}{3}$；当 $x > \dfrac{1}{3}$ 时 $\varphi > 0$。再由 $\dfrac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}x} = kq\left(\dfrac{1}{x^2} - \dfrac{4}{(x+1)^2}\right) = 0$ 得极值点 $x = 1$，$\varphi(1) = kq > 0$ 为正的极大值，随后衰减趋于 0^+。即图线应先负、过零（$x = \dfrac{1}{3}$）、出现正的峰、再趋于零。B 图电势恒为负、无正峰，错误。

D. × C 选项

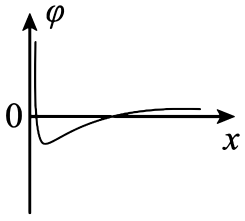
C 图在原点附近陡降为负、随后上穿零点出现正值峰并趋于零，与上述解析结果完全一致，正确。



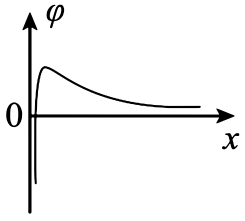
选项A的φ－x图像



选项B的φ－x图像



选项C的φ－x图像



选项D的φ－x图像

抓三个特征：近原点的 $-\infty$ 极限、零点位置 $x = \dfrac{1}{3}$、正峰位置 $x = 1$。

6. 选择题 · 4分

答案 A

详解

A. √ 转子角速度增加一倍

正确。发电机感应电动势 $E=NBS\omega$，故升压变压器输入电压 $U_1\propto\omega$，$U_2=\frac{n_2}{n_1}U_1$；设降压变比为 $k=\frac{n_3}{n_4}$，负载折算到输电侧为 k^2R，输电线电流 $I=\frac{U_2}{R_0+k^2R}$，$P=I^2R_0$。$\omega\to2\omega$ 时 $U_2\to2U_2$，负载与 R_0 均不变，则 $I\to2I$，$P\to4P$。

B. × 输电线电阻 R_0 增加一倍

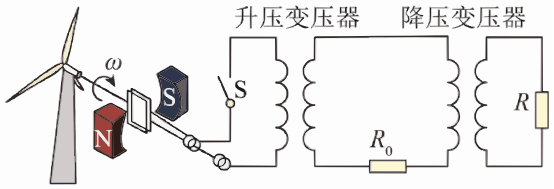
错误。此时 $I'=\frac{U_2}{2R_0+k^2R}$，R_0 上功率 $P'=I'^2\cdot 2R_0=\frac{2R_0U_2^2}{(2R_0+k^2R)^2}$，与原 $P=\frac{R_0U_2^2}{(R_0+k^2R)^2}$ 之比为 $\frac{2(R_0+k^2R)^2}{(2R_0+k^2R)^2}$，一般不等于4。

C. × 升压变压器副线圈匝数增加一倍

错误。$n_2\to2n_2$ 使 $U_2\to2U_2$，与A同理得 $P\to4P$，而非 $8P$。

D. × 用户端再并联一个相同电阻 R

错误。并联后负载电阻减半，$I'=\frac{U_2}{R_0+\frac{k^2R}{2}}$，$\frac{P'}{P}=\frac{(R_0+k^2R)^2}{(R_0+\frac{k^2R}{2})^2}\neq6$。



模拟风力发电厂输电网络装置图

抓住“电压变化→电流变化→$P=I^2R_0$”的链条；负载折算到输电侧是 k^2R。

二、多项选择题（本题共4小题，每小题5分，共20分。全部选对得5分，选对但不全得3分，有选错得0分）

7. 选择题 · 5分

答案 BD

详解

A. × 其相对于月球的速度大于地球第一宇宙速度

错误。近月圆轨道 $r\approx R_{月}$，$v=\sqrt{g_{月}R_{月}}$。代入 $g_{月}=\frac{1}{6}g_{地}$、$R_{月}=\frac{1}{4}R_{地}$：$v_{月}=\sqrt{\frac{1}{6}\cdot\frac{1}{4}g_{地}R_{地}}=\frac{v_{1地}}{\sqrt{24}}\approx0.20\,v_{1地}$，小于地球第一宇宙速度。

B. √ 其相对于月球的速度小于地球第一宇宙速度

正确。由上式 $v_{月}=\dfrac{v_{1地}}{\sqrt{24}}<v_{1地}$。

C. × 其绕月飞行周期约为地球上近地圆轨道卫星周期的 $\sqrt{\dfrac{2}{3}}$ 倍

错误。$T=2\pi\sqrt{\dfrac{r^3}{GM}}=2\pi\sqrt{\dfrac{R_{月}}{g_{月}}}=2\pi\sqrt{\dfrac{R_{地}/4}{g_{地}/6}}=\sqrt{\dfrac{3}{2}}\,T_{地}$，不是 $\sqrt{\dfrac{2}{3}}$ 倍。

D. √ 其绕月飞行周期约为地球上近地圆轨道卫星周期的 $\sqrt{\dfrac{3}{2}}$ 倍

正确。由上式 $T_{月}=\sqrt{\dfrac{3}{2}}\,T_{地}\approx 1.22\,T_{地}$。

近地（近月）圆轨道直接用 $v=\sqrt{gR}$、$T=2\pi\sqrt{R/g}$ 最简捷。

8. 选择题 · 5分

答案 CD

详解

A. × 金属杆经过 BB_1 的速度为 $\dfrac{v_0}{2}$

错误。光滑区 AA_1B_1B 内只有安培力：$m\,\mathrm{d}v=-\dfrac{B^2L^2v}{2R}\,\mathrm{d}t=-\dfrac{B^2L^2}{2R}\,\mathrm{d}x$（杆与外阻均为 R，总阻 $2R$），得 $\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}=-\dfrac{B^2L^2}{2Rm}$，速度随位移线性减小，$v_1=v_0-\dfrac{B^2L^2d}{2Rm}$。“恰好停在 CC_1”只能结合粗糙区约束确定 $\dfrac{B^2L^2}{2Rm}$ 与参数的整体关系，并不能普遍推出 $v_1=\dfrac{v_0}{2}$，A 不成立。

B. × 整个过程中定值电阻 R 产生的热量为 $\dfrac{1}{2}mv_0^2-\dfrac{1}{2}\mu mgd$

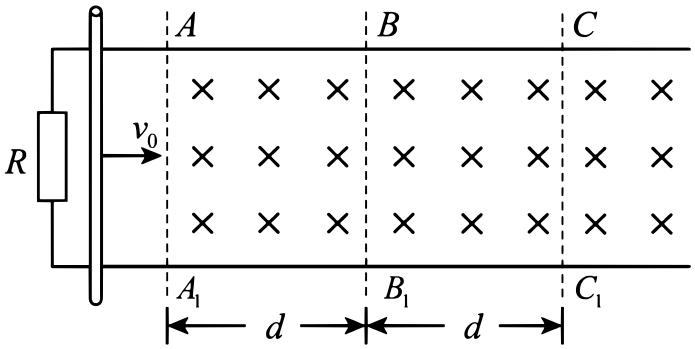
错误。全过程动能定理：$\dfrac{1}{2}mv_0^2=Q_{总}+W_f$，摩擦只在 BB_1C_1C 段（长 d）存在，$W_f=\mu mgd$，故总焦耳热 $Q_{总}=\dfrac{1}{2}mv_0^2-\mu mgd$。杆电阻与外阻均为 R、串联均分热量，外阻 R 上热量 $Q_R=\dfrac{Q_{总}}{2}=\dfrac{1}{4}mv_0^2-\dfrac{1}{2}\mu mgd$，与选项给的不符。

C. √ 经过 AA_1B_1B 与 BB_1C_1C 区域，安培力的冲量相同

正确。安培力 $F_A=\dfrac{B^2L^2v}{2R}$，其冲量 $I_A=\int F_A\,\mathrm{d}t=\dfrac{B^2L^2}{2R}\int v\,\mathrm{d}t=\dfrac{B^2L^2}{2R}\Delta x$。两区域杆的位移都是 d，故安培力冲量都等于 $\dfrac{B^2L^2d}{2R}$，相同。

D. √ 初速度加倍，杆在磁场中运动的距离大于原来的2倍

正确。对全程用动量定理：$mv_0=\dfrac{B^2L^2}{2R}x_{总}+\mu mg\,t_{粗}$。初速度加倍后 $2mv_0=\dfrac{B^2L^2}{2R}x'_{总}+\mu mg\,t'_{粗}$。因速度更大、通过同样路程用时更短，$t'_{粗}<2t_{粗}$，故 $\dfrac{B^2L^2}{2R}x'_{总}=\dfrac{B^2L^2}{2R}\cdot\ 4d+\mu mg(2t_{粗}-t'_{粗})>\dfrac{B^2L^2}{2R}\cdot\ 4d$，即 $x'_{总}>4d=2x_{总}$。



电磁缓冲装置：导轨、磁场区域与粗糙段分布

关键结论：$I_A=\dfrac{B^2L^2}{2R}\Delta x$ 只看位移；总焦耳热要在杆电阻与外阻间平分。

9. 选择题 · 5分

答案 C

详解

A. × 沿 AO 向左略微平移平面镜，干涉条纹不移动

错误。当镜面倾斜（$\theta\neq0$）时，沿 AO 平移会改变镜面相对光源 S 的位置，S 的镜像 S' 随之移动，两相干光源的几何关系改变，干涉条纹将移动，不是“不移动”。

B. × 沿 AO 向右略微平移平面镜，干涉条纹间距减小

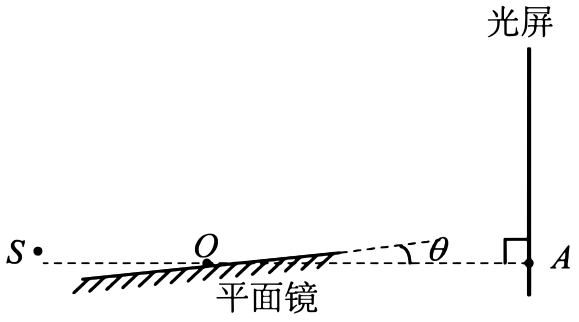
错误。条纹间距 $\Delta x=\dfrac{\lambda L_{eff}}{d_{eff}}$ 由 S 与镜像 S' 的间距及到屏的距离决定；平移倾斜的镜面会同时改变这些量，间距一般会变化，但不能笼统断定“减小”，该说法没有普遍依据。

C. √ 若 $\theta=0^\circ$，沿 OA 向右略微平移平面镜，干涉条纹间距不变

正确。$\theta=0$ 时镜面与 OA 平行，沿 OA（即沿镜面自身方向）平移镜子，镜面所在平面没有变化，S' 位置不变，相干光几何关系完全不变，条纹间距不变。

D. × 若 $\theta=0^\circ$，沿 AO 向左略微平移平面镜，干涉条纹向 A 处移动

错误。$\theta=0$ 时沿 AO 平移与沿镜面平移等价，镜面位置不变，条纹不移动，谈不上“向 A 处移动”。



洛埃镜实验：平面镜倾斜微小角度θ

把平面镜的作用等效为“造出一个镜像光源 S'”；镜面本身平移是否改变 S' 位置是判断核心。

10. 选择题 · 5分

答案 C

详解

A. × 建立相遇条件

A 球沿 x 轴匀速运动，轨迹是 x 轴；故 B 球经挡板 L 反射后必须穿过 x 轴上某点 P，且 A 与 B 同时到达：$\dfrac{x_P}{v_1}\le t_B$，得 $v_1\le\dfrac{x_P}{t_B}\equiv f$，$v_1$ 的最大值即 f 的最大值。

B. × A、D（$\theta=15^\circ,\alpha=15^\circ$ 与 $\theta=30^\circ,\alpha=15^\circ$ 的可行性）

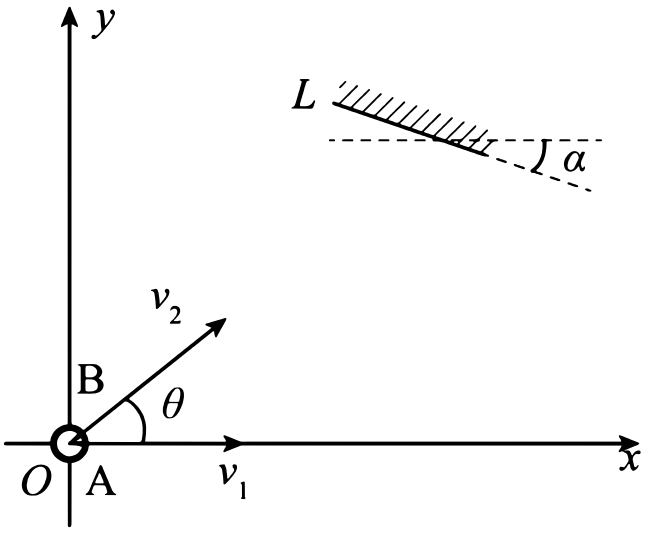
挡板方向 $\hat{m}=(\cos\alpha,\sin\alpha)$，法线 $\hat{n}=(-\sin\alpha,\cos\alpha)$，入射方向 $\vec{d}_1=(\cos\theta,\sin\theta)$ 与法线点积为 $\sin(\theta-\alpha)$。当 $\theta=\alpha=15^\circ$ 时入射方向与挡板平行（掠射），不发生有效反射，A 错误。当 $\theta=30^\circ,\alpha=15^\circ$ 时反射方向 $\vec{d}_2=\vec{d}_1-2(\vec{d}_1\cdot\hat{n})\hat{n}=(\cos30^\circ+2\sin^2 15^\circ,\ \sin30^\circ-2\sin15^\circ\cos15^\circ)=(1,0)$，即碰后 B 以 1 m/s 沿平行 x 轴方向在 x 轴上方运动，永远不再回到 x 轴，无法与 A 相遇，D 错误。

C. √ B（$\theta=15^\circ,\alpha=0^\circ$ 的最大值）

$\alpha=0$ 时挡板平行 x 轴（设其高度为 h）。B 以 2 m/s 沿与 x 轴成 θ 角运动：上程 $\dfrac{h}{\sin\theta}$；碰后速率变为 1 m/s、与 x 轴成 θ 角向下，落至 x 轴的水平位移为 $\dfrac{h}{\tan\theta}$，落点 $x_P=\dfrac{2h}{\tan\theta}$；总时间 $t_B=\dfrac{h}{2\sin\theta}+\dfrac{h}{\sin\theta}=\dfrac{3h}{2\sin\theta}$。故 $v_{1\max}=\dfrac{x_P}{t_B}=\dfrac{4\cos\theta}{3}=\dfrac{4\cos15^\circ}{3}\approx1.29\ \text{m/s}\in\dfrac{2\sqrt{3}}{3}\ \text{m/s}$，B 错误。

D. × C（$\theta=30^\circ,\alpha=0^\circ$）

正确。同上推导 $v_{1\max}=\dfrac{4\cos\theta}{3}$，代入 $\theta=30^\circ$：$v_{1\max}=\dfrac{4\times\frac{\sqrt{3}}{2}}{3}=\dfrac{2\sqrt{3}}{3}\ \text{m/s}$，且 $\alpha=0^\circ$，与选项表述一致。



光滑水平面内A、B两球与挡板L的示意图

先用“A 的轨迹是 x 轴”锁定相遇点必须在 x 轴上；再检验每组 θ,α 下 B 反射后能否回到 x 轴。

三、非选择题（本大题共5题，共56分）

11. 实验题

答案　（1）2.20 V；22.0 Ω　（4）右　（5）小于

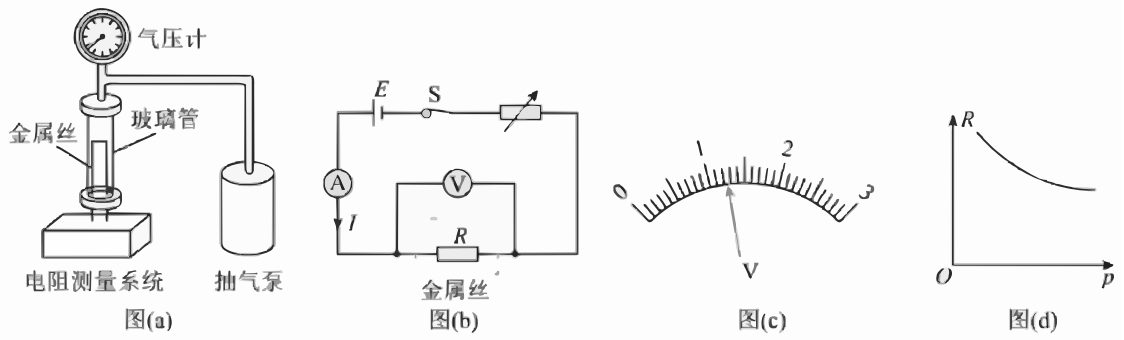
详解

(1) 第（1）空：电压表示数　电压表量程 3 V，最小分度对应 0.1 V。对原卷图（c）表盘刻度与指针位置的判读：指针位于“2”刻度后约第2小格处，读数为 2.20 V（按刻度估读到 0.01 V 位）。

(2) 第（2）空：金属丝阻值测量值　电流表示数 $I=100\,\text{mA}=0.100\,\text{A}$，由欧姆定律 $R=\dfrac{U}{I}=\dfrac{2.20}{0.100}=22.0\,\Omega$（保留3位有效数字）。

(3) 第（4）空：0.5个标准大气压时指针位置　由图（d）的 $R-p$ 图线可知，气压 p 越低金属丝阻值 R 越大。气压降为 0.5 个标准大气压时 R 增大，保持 $I=100\,\text{mA}$ 不变，由 $U=IR$ 知电压表示数增大，指针应偏转到原图（c）指针位置的右侧。

(4) 第（5）空：非理想电压表的系统误差　电压表并联在金属丝两端，存在分流 I_V。电流表读数 $I_{测}=I_R+I_V>I_R$，而电压读数 U 准确，则测量值 $R_{测}=\dfrac{U}{I_{测}}<\dfrac{U}{I_R}=R_{真}$，即测量值小于真实值。



图(a)实验装置、图(b)测量电路、图(c)电压表盘、图(d)R－p图线

表盘读数按原卷图（c）判读约为 2.2 V（指针位于 2.2 刻线附近），若按不同估读口径取 2.19－2.21 V，对应 R 在 21.9－22.1 Ω 之间；本册按 2.20 V、22.0 Ω 给出。

12. 实验题

答案　（4）描点后用平滑直线连接（数据点近似共线，图略）　（5）线性的　（6）0.122　（7）负方向

详解

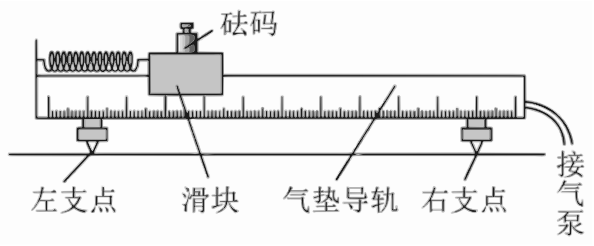
(1) 关于周期测量（步骤(2)的口径说明）　振子每相邻两次经过平衡位置间隔 $\dfrac{T}{2}$。从第1次到第21次经过平衡位置共经历 20 个半周期，即 $t=20\times\dfrac{T}{2}=10T$，故 $T=\dfrac{t}{10}$。

(2) 第（4）空：绘制 T^2-m 图线 将表中各组 (m, T^2) 数据描在坐标纸上：$(0, 0.399)$、$(0.050, 0.601)$、$(0.100, 0.797)$、$(0.150, 1.002)$、$(0.200, 1.221)$、$(0.250, 1.381)$，用平滑直线连接（让数据点均匀分布在直线两侧），图线为一条倾斜直线（本站为文字版答案，绘图从略）。

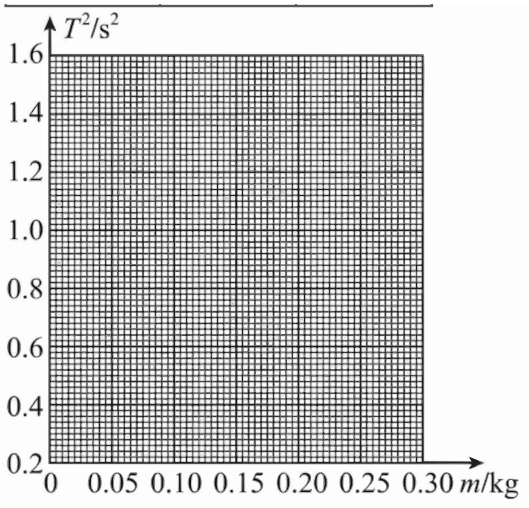
(3) 第（5）空：T^2 与 m 的关系 各点几乎严格落在同一条直线上（如 $\dfrac{1.381-0.399}{0.250}=3.93\ \mathrm{s^2/kg}$ 与相邻数据组的斜率基本一致），故弹簧振子振动周期的平方与砝码质量的关系是线性的。这与理论 $T^2=\dfrac{4\pi^2}{k}(M+m)=\dfrac{4\pi^2}{k}m+\dfrac{4\pi^2M}{k}$ 一致。

(4) 第（6）空：待测物体质量 由图线斜率 $\dfrac{4\pi^2}{k}=\dfrac{1.381-0.399}{0.250}=3.93\ \mathrm{s^2/kg}$，纵轴截距（$m=0$）$\dfrac{4\pi^2M}{k}=0.399\ \mathrm{s^2}$。取下砝码、固定待测物体后 $T^2=0.880\ \mathrm{s^2}$，则 $m_{测}=\dfrac{0.880-0.399}{3.93}\approx 0.122\ \mathrm{kg}$（保留3位有效数字）。

(5) 第（7）空：换质量较小的滑块 图线为 $T^2=\dfrac{4\pi^2}{k}m+\dfrac{4\pi^2M}{k}$，换用质量较小的滑块时斜率 $\dfrac{4\pi^2}{k}$ 不变、纵轴截距 $\dfrac{4\pi^2M}{k}$ 变小，图线沿纵轴负方向（向下）平移。



气垫导轨弹簧振子实验装置



T^2-m 关系绘图坐标纸

第（6）空斜率也可由 $k\approx 10\ \mathrm{N/m}$（$4\pi^2/k\approx 3.93$）反推；不同连线口径下结果在 0.121 – 0.123 kg 间均合理。

13. 计算题

答案　（1）$V_0=\dfrac{p}{p_0}V$；　（2）$V=5.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}^3$

详解

(1) 第（1）问 气球内空气视为理想气体，等温膨胀过程由玻意耳定律：

$$pV=p_0V_0$$

解得此时气体的体积

$$V_0=\frac{p}{p_0}V$$

(2) 第（2）问：建立天平示数与 V 的关系 气球置于电子天平上，天平示数对应的支持力等于（气球壳重 + 球内气体重 − 所受空气浮力）。球内气体压强为 p，等温条件下密度与压强成正比，故球内气体密度 $\rho_{内}=\rho_0\dfrac{p}{p_0}$，球内气体质量 $\rho_0\dfrac{p}{p_0}V$；气球排开外界空气所受浮力对应质量 ρ_0V。于是示数

$$m=m_0+\rho_0\frac{p}{p_0}V-\rho_0V=m_0+\frac{\rho_0(p-p_0)}{p_0}V$$

(3) 第（2）问：求 $(p-p_0)V$ 代入数据：$m-m_0=8.66\times10^{-3}-8.40\times10^{-3}=0.26\times10^{-3}\,\mathrm{kg}$，得

$$(p-p_0)V=\frac{(m-m_0)p_0}{\rho_0}=\frac{0.26\times10^{-3}\times1.0\times10^5}{1.3}=20\,\mathrm{J}$$

(4) 第（2）问：联立气球张力关系求 V 题目给定 $(p-p_0)(V-V_{B0})=C=18\,\mathrm{J}$，展开得 $(p-p_0)V-(p-p_0)V_{B0}=18$，代入 $(p-p_0)V=20$、$V_{B0}=0.5\times10^{-3}\,\mathrm{m}^3$：

$$(p-p_0)\times0.5\times10^{-3}=2\Rightarrow p-p_0=4.0\times10^3\,\mathrm{Pa}$$

故

$$V=\frac{20}{4.0\times10^3}=5.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}^3$$

即气球内气体体积为 $5.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}^3$（此时 $p=1.04\times10^5\,\mathrm{Pa}>p_0$，$V>V_{B0}$，自洽）。

浮力的对象是气球整体（壳+内含气体）排开的空气；球内气体密度要按其压强 p 折算，不能直接用 ρ_0。

14. 计算题

答案　（1）$B_{\min}=\dfrac{2\pi mv_0}{eL}$；　（2）$|\tan\theta|=\dfrac{2\pi r}{L}$；　（3）$y_{\max}=\dfrac{2\pi^2mr^2v_0^2}{eEL^2}$

详解

(1) 第（1）问：磁感应强度的最小值 电子（电量 $-e$）在 $x\le 0$ 的匀强磁场 $\vec{B}=B\hat{x}$ 中：x 方向不受力，$v_x=v_0$ 保持不变，渡越时间 $t=\dfrac{L}{v_0}$；横向（$y-z$ 平面）受洛伦兹力做匀速圆周运动，回旋周期 $T_c=\dfrac{2\pi m}{eB}$，横向速率为 $|v_{y0}|$（守恒）。电子从轴线上的 O' 出发，要求到达 O 时仍在轴线上，横向圆周运动须返回出发点，即 $t=nT_c$（$n=1,2,\ldots$）：

$$\frac{L}{v_0}=n\frac{2\pi m}{eB}\Rightarrow B=\frac{2\pi nmv_0}{eL}$$

取 $n=1$ 得最小值

$$B_{\min}=\frac{2\pi mv_0}{eL}$$

此时所有电子（无论横向初速度多大）都恰好在筒内完成一次回旋并同时会聚于 O。

(2) 第（2）问：速度方向与 x 轴最大夹角 取 $B=B_{\min}$。电子横向圆周半径 $\rho=\dfrac{m|v_{y0}|}{eB}$，圆心到轴线距离为 ρ，运动中横向离轴最大距离为 2ρ。电子不与筒壁（内半径 $2r$）碰撞要求 $2\rho\le 2r$，即 $\rho\le r$，故

$$|v_{y0}|\le\frac{eBr}{m}=\frac{2\pi rv_0}{L}$$

速度与 x 轴夹角满足 $\tan\theta=\dfrac{v_\perp}{v_x}=\dfrac{|v_{y0}|}{v_0}$，最大值

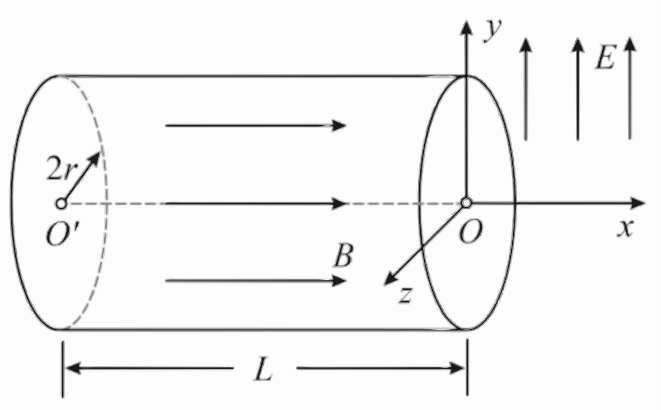
$$|\tan\theta|=\frac{2\pi r}{L}$$

(3) 第（3）问：电场中 y 轴正方向的最大位移 由（1），电子在磁场中横向恰好转过一整圈，到达 O 时横向速度回复到初值：进入电场时速度为 $(v_0,v_{y0},0)$，其中 $|v_{y0}|\le\dfrac{2\pi rv_0}{L}$。筒外 $x\ge 0$ 区域电场 E 沿 $+y$，电子受恒力 $-eE$ 沿 $-y$：x 方向仍以 v_0 匀速，y 方向做匀减速类竖直上抛运动。对 $v_{y0}>0$ 的电子，最大位移在 $v_y=0$ 时：

$$y_{\max}=\frac{mv_{y0}^2}{2eE}$$

取最大入射横向速度 $v_{y0}=\dfrac{2\pi rv_0}{L}$，得

$$y_{\max}=\frac{m}{2eE}\left(\frac{2\pi rv_0}{L}\right)^2=\frac{2\pi^2mr^2v_0^2}{eEL^2}$$



圆筒、磁场（x≤0）与电场（x≥0）区域示意图

磁场中电子运动是“x 向匀速 + 横向回旋”的合成；会聚条件是渡越时间等于整数个回旋周期，而非半个周期（半周期时横向位置在对侧，不在轴上）。

15. 计算题

答案　（1）$v=\dfrac{m_Av_0}{m_A+m_B}$，$F_N=\dfrac{m_A^2v_0^2}{(m_A+m_B)R}$；　（2）$\dfrac{m_A}{m_B}=2$；　（3）$s=\dfrac{2\pi Rm_A}{m_A+m_B}\cdot\dfrac{e^{-2n}-1}{1-e}$

详解

(1) 第（1）问：完全非弹性碰撞 碰前 A 速度 v_0、B 静止，沿切线方向动量守恒：

$$m_Av_0=(m_A+m_B)v\Rightarrow v=\frac{m_Av_0}{m_A+m_B}$$

组合体做圆周运动所需向心力由环提供：

$$F_N=\frac{(m_A+m_B)v^2}{R}=\frac{m_A^2v_0^2}{(m_A+m_B)R}$$

(2) 第（2）问：弹性碰撞且碰撞点位于等边三角形顶点 一维弹性碰撞公式：$v_1'=\dfrac{(m_1-m_2)v_1+2m_2v_2}{m_1+m_2}$，$v_2'=\dfrac{(m_2-m_1)v_2+2m_1v_1}{m_1+m_2}$。设 $\dfrac{m_A}{m_B}=2$ 验证：第1次碰撞（A 碰静止的 B）后 $v_A=\dfrac{m_A-m_B}{m_A+m_B}v_0=\dfrac{1}{3}v_0$，$v_B=\dfrac{2m_A}{m_A+m_B}v_0=\dfrac{4}{3}v_0$，$B$ 在前且更快，相对速度 v_0，经过 $\dfrac{2\pi R/3}{v_0}$ 时间在下一个顶点（相对弧长 $\dfrac{2\pi R}{3}$）发生第2次碰撞；碰前 $v_A=\dfrac{1}{3}v_0$、$v_B=\dfrac{4}{3}v_0$，碰后 $v_A'=\dfrac{(2m_B-m_B)\cdot\frac{1}{3}v_0+2m_B\cdot\frac{4}{3}v_0}{3m_B}=v_0$，$v_B'=\dfrac{(m_B-2m_B)\cdot\frac{4}{3}v_0+4m_B\cdot\frac{1}{3}v_0}{3m_B}=0$，即 A 以 v_0 运动、B 静止，系统回到与初始等价的状态（角色互换）；第3次碰撞后再现第1次碰后的速度分布。如此碰撞依次发生在等边三角形的三个顶点且循环继续，故

$$\frac{m_A}{m_B}=2$$

（该条件也是唯一使“每次碰后回到等价初态”成立的解。）

(3) 第（3）问：恢复系数为 e 的非弹性碰撞序列 每次碰撞沿切向满足恢复系数定义（碰后相对速度大小为碰前的 e 倍、方向相反）与动量守恒 $m_A v_A + m_B v_B = m_A v_0$。碰后第 k 次碰撞的相对速度大小为 $e^k v_0$（逐次乘 e）。由于（3）中无顶点约束，较快者须相对落后者转过一整圈 $2\pi R$ 才发生下一次碰撞，故第 k 次与第 $k+1$ 次碰撞的时间间隔

$$\Delta t_k = \frac{2\pi R}{e^k v_0}$$

碰后 B 的速度：对奇数 k（B 在前更快）$b_k - a_k = e^k v_0$，联立动量守恒得 $b_k = \dfrac{m_A v_0(1+e^k)}{m_A+m_B}$；对偶数 k（A 反超）$a_k - b_k = e^k v_0$，得 $b_k = \dfrac{m_A v_0(1-e^k)}{m_A+m_B}$。统一写为 $b_k = \dfrac{m_A v_0\left[1+(-1)^{k+1}e^k\right]}{m_A+m_B}$。

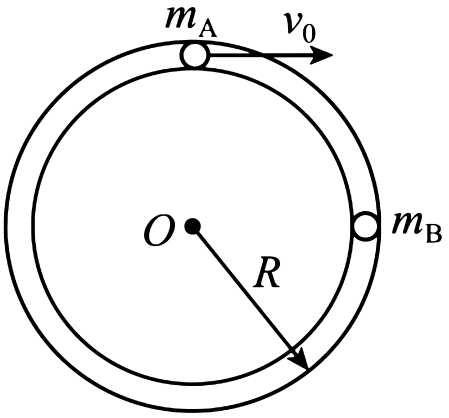
(4) 第（3）问：路程求和 第1次到第 $2n+1$ 次碰撞之间 B 通过的路程

$$s = \sum_{k=1}^{2n} b_k\,\Delta t_k = \frac{2\pi R m_A}{m_A+m_B}\sum_{k=1}^{2n}\left[(-1)^{k+1}+e^{-k}\right]$$

其中 $\sum_{k=1}^{2n}(-1)^{k+1}=0$（$n$ 对正负相消），$\sum_{k=1}^{2n} e^{-k} = \dfrac{e^{-2n}-1}{1-e}$（等比数列求和），故

$$s = \frac{2\pi R m_A}{m_A+m_B}\cdot\frac{e^{-2n}-1}{1-e} = \frac{2\pi R m_A\,(1-e^{2n})}{(m_A+m_B)\,e^{2n}(1-e)}$$

（$0<e<1$，$e^{2n}<1$，结果为正；$e\to 1$ 时极限为 $\dfrac{2\pi R m_A}{m_A+m_B}\cdot\ 2n$，与弹性情形逐段核算一致。）



水平圆环内小球A、B碰撞示意图

（3）中易错点：无顶点约束时每次碰撞间隔为相对一整圈 $2\pi R$，且碰后“谁快”逐次交替；级数 $\sum(-1)^{k+1}$ 恰好相消是结果简洁的原因。