第40届全国中学生物理竞赛预赛试题

物　　理

2023 年 9 月 2 日 9:00-12:00 | 共 16 题 | 选择题 5 题 | 填空题 5 题 | 计算题 6 题

考生须知

1. 考生考试前务必认真阅读本须知。
2. 本试题共 5 页，总分为 400 分。
3. 需要阅卷老师评阅的内容一定要写在答题纸相应题号后面的空白处；阅卷老师只评阅答题纸上的内容；选择题和填空题也必须在答题纸上作答；写在试题纸和草稿纸上的解答一律无效。

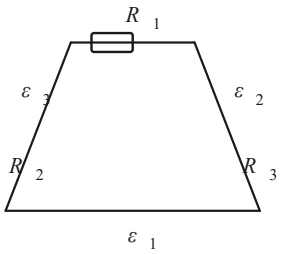
一、 选择题　本题 60 分，含 5 小题，每小题 12 分。在每小题给出的 4 个选项中，有的小题只有一项符合题意，有的小题有多项符合题意。将符合题意的选项前面的英文字母写在答题纸对应小题后面的括号内。全部选对的得 12 分，选对但不全的得 6 分，有选错或不答的得 0 分。

1. 氢原子中基态电子的结合能 E_H 与氦离子（He^+）中基态电子的结合能 E_{He^+} 的比值最接近于（　）

A. 1　　**B.** $\frac{1}{2}$

C. $\frac{1}{3}$　　**D.** $\frac{1}{4}$

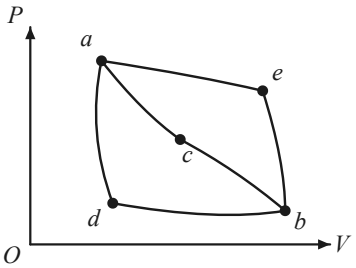
2. 一电路如图 2a 所示，其中三个电池的电动势之比 $\varepsilon_1:\varepsilon_2:\varepsilon_3=1:2:3$，三个电阻的阻值之比 $R_1:R_2:R_3=1:2:3$。导线电阻均忽略不计。流过 R_1、R_2、R_3 的电流大小之比为（　）



A. 1:1:2　　**B.** 1:2:1

C. 2:1:1　　**D.** 1:2:3

3. 如图 3a，一定量的理想气体经历的三个过程分别如 *P-V* 图象中 *bca*、*bda*、*bea* 所示。已知 *bca* 是绝热过程。下列说法正确的是：（　）



A. *bda* 是系统从外界吸热的过程；

B. *bda* 是系统对外界做负功的过程；

C. *bea* 是系统从外界吸热的过程；

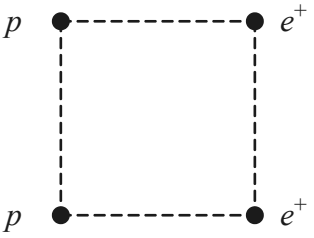
D. *bea* 是系统对外界做负功的过程。

4. 如图 4a，边长为 a 的正方形的四个顶点上固定着两个质子 p 和两个正电子 e^+。某时刻由静止释放这四个粒子，仅考虑它们在彼此间电场力的作用下运动，不考虑电磁辐射。已知电子电量为 e，真空介电常量为

ε_0。经过足够长的时间后，单个质子、单个正电子的动能最接近的结果分别是：（　）

A. $\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 a}$、$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a}(\frac{3}{2}+\frac{\sqrt{2}}{2})$　　**B.** $\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a}$、$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a}(1+\frac{\sqrt{2}}{2})$

C. $\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a}(2+\sqrt{2})$、$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a}(2+\sqrt{2})$　　**D.** $\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a}$、$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a}$



5. 对于一个导体空腔内部电场的场强和电势，下列说法正确的是：（　）

A. 电势的值和场强都不受腔外电荷的影响；

B. 电势的值和场强都会受到腔外电荷的影响；

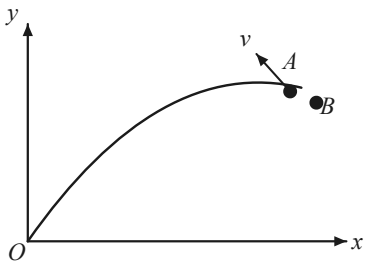
C. 场强不受腔外电荷的影响，但电势的值会受到腔外电荷的影响；

D. 电势的值不受腔外电荷的影响，但场强会受到腔外电荷的影响。

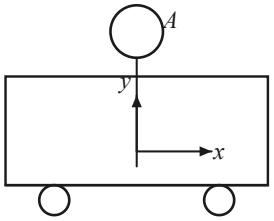
二、 填空题　本题 100 分，每小题 20 分，每空 10 分。请把答案填在答题纸对应题号后面的横线上。只需给出结果，不需写出求得结果的过程。

6. 国际标准音 A-la 的频率为 f=440 Hz。当发音频率为这个频率的音叉振动时，产生的声波的波长为 _____ cm；一个观测者站在两个这样的音叉之间以 $\frac{34}{11}$ m/s 的速度沿着这两音叉的连线跑向其中某个音叉，同时这两个音叉均振动发声，则该观测者听到的拍频是 _____ Hz。已知声速为 340 m/s。

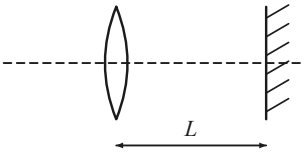
7. 如图 7a，一质量为 $2M$ 的小球，以 20.0 m/s 的速率从水平地面上坐标原点 O 出射，初速度方向斜向上，与 x 轴（水平）正方向的夹角为 $\frac{\pi}{3}$。当小球到达最高点时，瞬间炸裂为质量均为 M 的两小块 A、B；在小球爆炸后的瞬间，A 的速度与 x 轴正方向的夹角为 $\frac{3\pi}{4}$，此后，它恰好落到坐标原点 O，整个运动过程均在 xy 平面内。由此可知，A 在爆炸后的瞬间的速率为 _____ m/s，B 落到地面时的 x 坐标为 _____ m。保留三位有效数字，不计空气阻力，重力加速度大小为 9.80 m/s^2。



8. 如图 8a，初始时在水平地面上静止的密闭车厢内的空气中悬浮一个充满氦气的气球 A，它通过柔软长轻绳固定在车厢底板上，绳长远大于气球半径。若车厢沿水平方向从静止开始以大小为 $\frac{g}{2}$（g 为重力加速度大小）的加速度做匀加速直线运动，则气球的位置相对于车厢稳定后，拉气球的轻绳将沿车厢运动方向 _____（填“前倾”、“后仰”或“保持竖直向上”），且轻绳相对于竖直向上方向的夹角大小为 _____。



9. 如图 9a，在凸透镜右侧距离 L=4 cm（L 大于凸透镜的焦距）处放置一块垂直于光轴的平面镜。某同学在凸透镜左侧光轴上放置一点光源 S，当将 S 沿着光轴左右移动有限距离时，发现存在两个特殊的位置，可使得每个位置上的点光源 S 与它的像点重合。测得这两个特殊位置之间的间距为 9 cm。该凸透镜的焦距为 _____ cm，两个特殊位置中离透镜较远的那一点与透镜光心相距 _____ cm。



10. 气体分子的平均热运动动能约为 $\frac{3}{2}k_BT$，其中 T 是气体的绝对温度，k_B=1.38×10^{-23} J/K 为玻尔兹曼常量。一般而言，如果气体中粒子的物质波波长接近于粒子平均间距，则粒子的量子效应就会变得显著。考虑粒子数密度 n=8×10^{22} cm^{-3} 的气体。若该气体为金属中的自由电子气，则其温度在 _____ K 以下时量子效应显著；若假想该气体由氢原子组成，则其温度在 _____ K 以下时量子效应显著。已知电子质量约为 9.11×10^{-31} kg，质子质量约为 1.67×10^{-27} kg，普朗克常量约为 6.626×10^{-34} J·s。（结果保留一位有效数字）

三、 计算题　本题 240 分，共 6 小题，每小题 40 分。计算题的解答应写出必要的文字说明、方程式和重要的演算步骤，只写出最后结果的不能得分。有数值计算的，答案中必须明确写出数

值，有单位的必须写出单位。

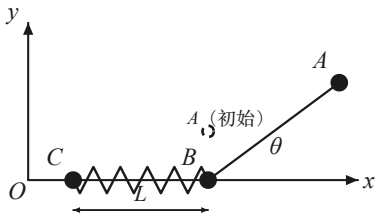


图 11a

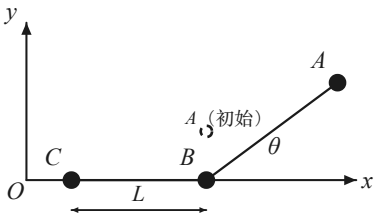


图 11b

11. （40 分）

如图 11a 和图 11b，在光滑的水平面上建立 xOy 直角坐标系。A、B、C 三个小球（视为质点）质量均为 m。初始时小球均静止，C、B 连线沿 x 方向，间距为 L；A、B 用长为 L、不可伸长、完全没有弹性的柔软轻绳连接，B、A 连线方向与 C、B 连线方向垂直，A 与 B、C 连线的距离为 $0.6L$。现使 A 以大小为 v_0 的速率沿 x 轴正方向运动。试在下述两种情形下，求在 A、B 间软绳刚刚被拉紧后的瞬间 A、B、C 三球各自的速度：

(1) B、C 间由原长为 L、劲度系数为 k 的轻质弹簧连接（见图 11a）；

(2) B、C 间由长度为 L 的柔软轻绳（材质跟 A、B 间的软绳相同）连接（见图 11b）。

12. （40 分）

已知重力加速度大小为 g。假设空气阻力可忽略。

(1) 将一个质量为 m_2 的小球 B 放在一个质量为 m_1 的大球 A 的上表面上，初始时 A 的下底离地面高度为 h_0，如图 12a 所示；现让它们同时从静止开始自由下落，当 A 的下端落到水平硬地（硬地质量 $m_0 \gg m_1$）上之后，可发现 B 反弹上升的最大高度 h 比 h_0 大许多倍。不考虑运动相对于竖直方向的偏离，忽略大、小球的线度。假设地面与 A、A 与 B 之间的碰撞依次发生，且两两间碰撞的恢复系数都相等，求此恢复系数 e。

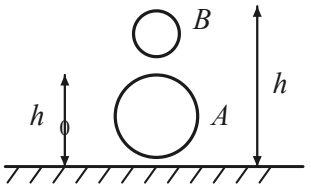


图 12a

(2) 如图 12b，一个儿童玩具由一组大小和质量各不相同的小球 A、B、C 和 D 组成，其中 A 上面固定有一根圆柱形光滑细轻杆，其余 3 个小球都有过其中心的一个圆柱形孔道，孔道的直径略大于细杆的直径。将 B、C 和 D 依次穿在细杆上，将 4 个小球构成的体系移至一定高度后，使之由静止开始下落，已知下落过程中杆始终处于竖直状态。A、B、C 和 D 的质量分别为 m_1、m_2、m_3 和 m_4，设地面与 A、A 与 B、B 与 C、C 与 D 之间的碰撞依次发生，相碰的两两物体间的恢复系数均相等，h_0 为系统初始下落高度，h 为 D 弹起后上升的最大高度，忽略各球的线度。求恢复系数 e 的表达式；并根据表 12a 给出的数据，求恢复系数 e 的数值。

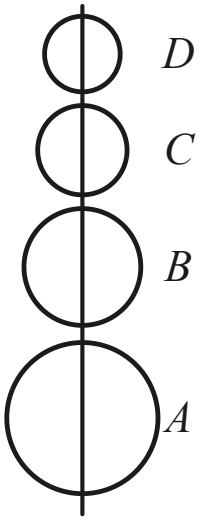


图 12b 示意

图待补

彩色叠球照片，详见原卷

图 12b 实物

m_1(g)	m_2(g)	m_3(g)	m_4(g)	h/h_0
76.7	32.5	11.3	5.80	11.2

(3) 若恢复系数 e 取第（2）问求得的数值，m_1、m_4 取表 12a 中的数值。当 m_2 与 m_3 取何值时，可使 $\frac{h}{h_0}$ 达到最大值？该最大值是多少？

13. （40 分）

一厚度可忽略的球形肥皂泡，其外表面上均匀带电，当半径为 1.0 mm 时，其电势为 100 V（取无穷远处的电势为零）；此时，肥皂泡并未处于力学平衡状态。当其半径增大至 1.0 cm 时，肥皂泡达到力学平衡状态，且此时肥皂泡内外气压恰好相等。静电力常量 $k_e=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}=9.0\times10^9\,\mathrm{Nm^2/C^2}$，不考虑重力作用。求（结果保留两位有效数字）：

(1) 肥皂泡所带电荷的种类及电荷量；

(2) 肥皂泡膨胀前后的静电能的变化（已知半径为 r、带电量为 Q 的均匀带电球面的静电能为 $\frac{1}{8\pi\varepsilon_0 r}Q^2$）；

(3) 肥皂泡表面张力系数的大小。

14. （40 分）

一厚度为 h 的均质金属圆盘在半径为 $r\pm\frac{a}{2}$ 的两圆环面之间的部分，被镂空成均匀分布的薄金属片，薄金属片长为 a（沿径向），宽为 h（垂直于盘面），厚为 d（沿圆环切向），在离盘心 r 处相邻的两薄金属片间距为 b，其俯视示意图如图 14a 所示。金属电阻率为 ρ，且 $r\gg a\gg b\gg d$（金属圆盘在半径为 $r\pm\frac{a}{2}$ 的两圆环面之外的两部分完全看作为理想导体）。在圆盘中心垂直圆盘方向上设置转轴，盘面上离转轴 r 处，面积

为 a^2 的小方块（其相对的两弧或对边中点连线长均为 a，且相对的两弧中点的连线通过盘心）内施加垂直于盘面的匀强磁场 B，如图 14b 所示，小方块外面的磁场可忽略。假设 $\frac{a}{b+d}$ 恰好为整数。当圆盘以角速度 ω 转动时，求

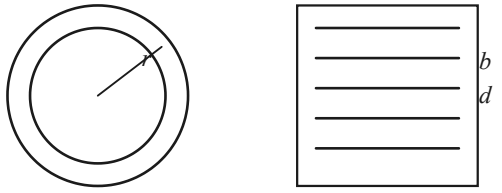


图 14a

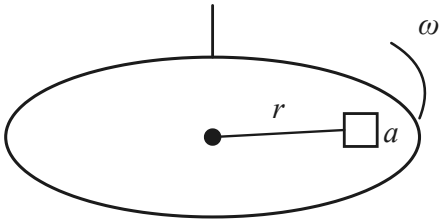


图 14b

(1) 小方块上产生的电动势；

(2) 小方块内金属片的总电阻的严格表达式（用 h、b、d、ρ 表出）；

(3) 小方块外金属片的总电阻的严格表达式（用 r、a、h、b、d、ρ 表出）；

(4) 通过小方块的电流的表达式（用 r、a、h、b、d、ρ、B、ω 表出）；

(5) 相对于圆盘转轴，阻碍圆盘转动的电磁力矩（用 r、a、h、b、d、ρ、B、ω 表出）。

15. （40 分）

真空中有一个锌质小球，半径 $R=1.0\,\mathrm{cm}$，远离其它物体。使锌球初始时带一定量的负电荷，其电势 $\varphi_0=-0.50\,\mathrm{V}$（取无穷远处的电势为零）。某时刻开始，用波长 $\lambda=290\,\mathrm{nm}$ 的紫外线照射锌球；假设光强足够弱，以至于单位时间逸出的光电子很少。

(1) 求光电子从锌球逸出时的最大运动速度?

(2) 开始时以最大速率从锌球逸出的电子，运动到离锌球无穷远处时的速度大小为多少?

(3) 计算用紫外线连续照射锌球足够长的时间之后，锌球的电势 φ_1 是多少?

(4) 从开始照射到足够长的时间后，整个照射过程中从锌球跑出的光电子的数目大约是多少?

已知

锌的截止波长 $\lambda_c=332\,\mathrm{nm}$，真空中的光速 $c=3.0\times10^8\,\mathrm{m/s}$，普朗克常量 $h=6.63\times10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}$，真空介电常量 $\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}\,\mathrm{C^2/(N\cdot m^2)}$，电子电量 $e=-1.60\times10^{-19}\,\mathrm{C}$，电子质量 $m_e=9.11\times10^{-31}\,\mathrm{kg}\approx0.511\,\mathrm{MeV}/c^2$。

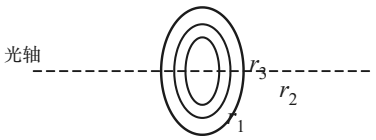


图 16a

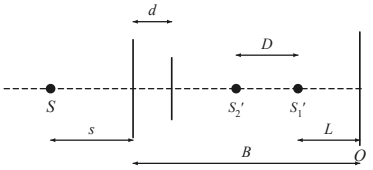


图 16b

16. （40 分）

如图 16a，将焦距为 $f=10.00\,\mathrm{cm}$、半径为 $r_3=2.001\,\mathrm{cm}$ 的薄透镜从正中间切割出一个半径为 $r_2=1.497\,\mathrm{cm}$ 的圆形小透镜；切割出的小透镜通过打磨其边缘将其半径缩小为 $r_1=1.390\,\mathrm{cm}$。如图 16b（剖面示意图）所示，将切割出来的小透镜沿着光轴向右平移一小段距离 $d=2.000\,\mathrm{cm}$；光轴上一个点光源 S 位于大透镜左侧，与大透镜距离为 $s=15.00\,\mathrm{cm}$，S 发出波长为 $\lambda=500.0\,\mathrm{nm}$ 的单色光，在透镜右侧出现 S 的两个像点 S_1' 和 S_2'；在大透镜右侧距离为 $B=50.00\,\mathrm{cm}$ 处有一垂直于光轴的屏幕，光轴与屏幕交点为 O；点光源 S 发出的光在屏幕上形成干涉条纹。

(1) 求 S 的两个像点 S_1' 和 S_2' 之间的距离 D，以及像点 S_1' 到屏幕的距离 L。

(2) 描述屏幕上能够观测到干涉条纹的区域的形状，并计算该区域的范围。

(3) 描述上述区域范围内干涉条纹的形状，导出第 k 级亮纹在屏幕上的位置公式；总共能看到多少条亮纹？

提示

由于透镜尺寸很小，使得屏幕上干涉区域内的点到 O 点距离远小于两个像点 S_1' 和 S_2' 到 O 点的距离。计算中可利用近似展开式，即当 $x\ll 1$ 时，有 $\sqrt{1+x}\approx 1+\dfrac{x}{2}$。