

物理试卷

注意事项:

1. 答题前, 考生务必用黑色碳素笔将自己的姓名、准考证号、考场号、座位号在答题卡上填写清楚。
2. 每小题选出答案后, 用2B铅笔把答题卡上对应题目的答案标号涂黑。如需改动, 用橡皮擦干净后, 再选涂其他答案标号。在试题卷上作答无效。
3. 考试结束后, 请将本试卷和答题卡一并交回。满分100分, 考试用时75分钟。

一、单项选择题: 本大题共7小题, 每小题4分, 共28分。在每小题给出的四个选项中, 只有一项符合题目要求。

1. “物理”一词最早源于我国《庄子·天下》中的“判天地之美, 析万物之理”。关于物理思想与方法, 下列说法正确的是
 - A. 用点电荷来代替带电体的方法运用了假设法
 - B. 借助激光笔及平面镜观察桌面的微小形变的实验中, 用到了理想模型法
 - C. 加速度 $a = \frac{F}{m}$ 用到了比值定义法
 - D. 重心的概念体现了等效思想
2. 在火星上太阳能电池板发电能力有限, 因此科学家们用放射性材料—— PuO_2 作为发电能源为火星车供电 (PuO_2 中的 Pu 是 ${}^{238}_{94}\text{Pu}$)。已知 ${}^{238}_{94}\text{Pu}$ 衰变后变为 ${}^{234}_{92}\text{U}$ 和 X 粒子, 衰变过程放出高能量的射线使电池内部温度升高, 在热电元件中将内能转化为电能。下列说法正确的是
 - A. X 粒子是由原子核内中子转变而成
 - B. ${}^{238}_{94}\text{Pu}$ 比 ${}^{234}_{92}\text{U}$ 的比结合能大
 - C. 为保证电池的长寿命应选用半衰期更短的放射性材料
 - D. ${}^{238}_{94}\text{Pu}$ 衰变过程, 生成物所有原子核的结合能之和比反应物原子核的结合能大
3. 如图1所示, 两根完全相同的轻质弹性绳 OA 、 OB 一端分别固定于 A 、 B 两点, 另一端与轻绳 OC 、 OD 连结。用力拉轻绳, 使 OA 水平, OA 与 OB 夹角为 120° , 此时两弹性绳长度相同, A 、 O 、 C 在一条直线上, B 、 O 、 D 也在一条直线上。现保持 O 点不动且 OC 方向不变, 将 OD 逆时针方向旋转 30° 。则下列说法正确的是
 - A. OA 与 OB 的拉力始终相等并一直减小
 - B. OA 与 OB 的拉力始终相等并一直增大
 - C. OC 上的拉力一直减小
 - D. OD 上的拉力先减小后增大

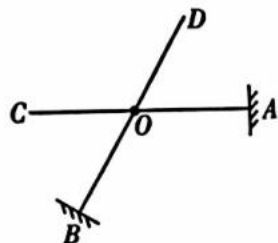


图1

4. 如图2所示, 水平面上方有水平向左的匀强电场, 电场强度 $E = \frac{mg}{q}$, 一个质量为 m 、电量为 q 的带正电微粒从距离水平面 5m 处水平抛出, 抛出速度 $v_0 = 10\text{m/s}$, 不计空气阻力, 重力加速度 $g = 10\text{m/s}^2$. 微粒运动过程中下列说法正确的是

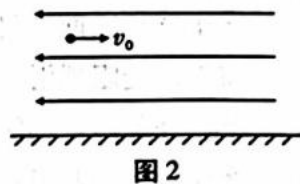


图2

5. 如图3所示, 理想变压器原、副线圈的匝数比 $n_1 : n_2 = 5 : 1$, 原线圈的电压 $u = 50\sqrt{2}\sin(50\pi t)\text{V}$, 副线圈中接有 $R_1 = 10\Omega$ 、 $R_2 = 10\Omega$ 、可变电阻 R_3 , 所用电表均为理想电表。断开开关 S , 在 R_3 增大的过程中, 电流表 A 、电压表 V_1 、电压表 V_2 示数的变化量分别为 ΔI 、 ΔU_1 、 ΔU_2 。下列说法正确的是

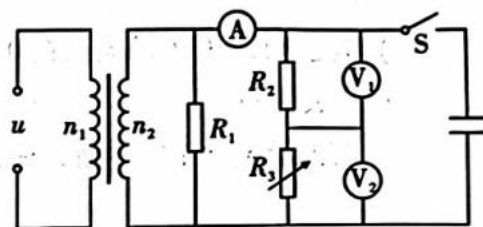


图3

- A. $|\Delta U_1|$ 小于 $|\Delta U_2|$
 B. $\left| \frac{\Delta U_1}{\Delta I} \right|$ 与 $\left| \frac{\Delta U_2}{\Delta I} \right|$ 均不变
 C. 闭合开关 S , R_3 调为 0 , 变压器的输入电流为 0.4A
 D. 闭合开关 S , 保证电容器不损坏, 电容器的耐压值至少为 10V

6. 在恒星形成后的演化过程中, 一颗恒星可能在运动中接近并捕获另外两颗恒星, 逐渐形成稳定的三星系统。如图4所示是由三颗星体构成的系统, 星体 B 、 C 的质量均为 m , 星体 A 的质量是星体 B 的 4 倍, 忽略其他星体对它们的作用, 三颗星体在相互之间的万有引力作用下, 分别位于等边三角形的三个顶点上, 绕某一共同的圆心在三角形所在的平面内做圆周运动。星体 A 、 B 、 C 的向心加速度大小之比为

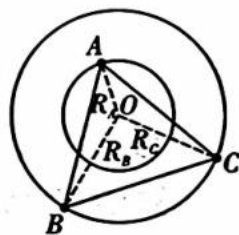


图4

- A. $\sqrt{7} : 7 : 7$ B. $4 : 7 : 7$
 C. $1 : 4 : 4$ D. $1 : 7 : 7$
7. 如图5所示, 小木块 a 和 b (可视为质点) 用轻绳连接置于水平圆盘上, 开始时轻绳处于伸直状态但无拉力, a 的质量为 $3m$, b 的质量为 m 。它们分居圆心两侧, 与圆心的距离分别为 r 和 $2r$, a 、 b 与盘间的动摩擦因数相同 (最大静摩擦力等于滑动摩擦力)。圆盘从静止开始绕转轴极缓慢地加速转动, 木块和圆盘始终保持相对静止, a 、 b 所受摩擦力大小随 ω^2 变化的图像正确的是

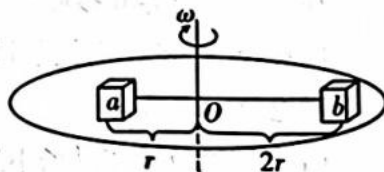
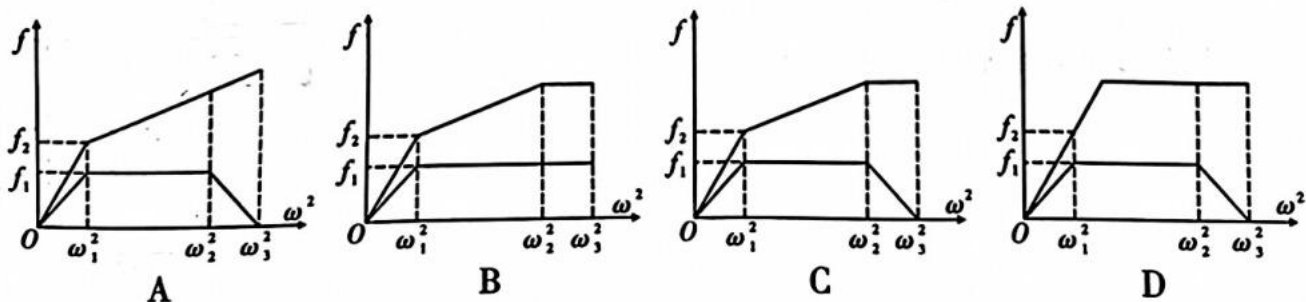


图5



二、多项选择题：本大题共 3 小题，每小题 5 分，共 15 分。在每小题给出的四个选项中，有多项符合题目要求。全部选对的得 5 分，选对但不全的得 3 分，有选错的得 0 分。

8. 一个电子无初速度地注入电子感应加速器的真空室中，加速器的磁极在半径为 R 的圆形区域内产生磁感应强度大小为 $B_1 = kt (k > 0)$ 、方向如图 6 所示的变化磁场，真空室内存在另一个变化的磁场 B_2 “约束” 电子在真空室内做半径为 R 的圆周运动，不考虑电子的重力和相对论效应。下列说法正确的是

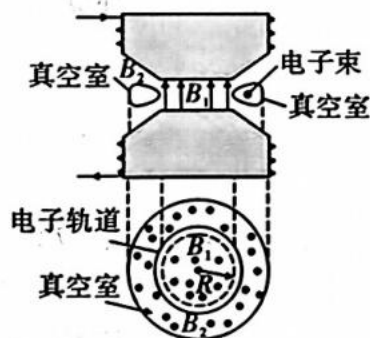


图 6

- A. 电子感应加速器是利用感生电场对电子进行加速的
- B. 俯视真空管道电子沿顺时针方向加速运动
- C. 电子所受到的洛伦兹力一定不断增大
- D. 洛伦兹力对电子一直做正功

9. 一乘客在候车室座椅上看手机，手机屏幕处于水平面内，此手机屏幕用防窥屏制作成。这种防窥屏由透明介质和对光完全吸收的屏障构成，其中屏障垂直于屏幕平行排列，可实现对像素单元可视角度 θ 的控制（可视角度 θ 定义为某像素单元发出的光在图 7 所示平面内折射到空气后最大折射角的 2 倍）。

透明介质的折射率 $n = \frac{4}{3}$ ，屏障高度 $d = \frac{\sqrt{111}}{15} \text{ mm}$ ，屏障间隙 $L = 1.2 \text{ mm}$ ，发光像素单元紧贴屏下并位于相邻屏障正中央，下列说法正确的是

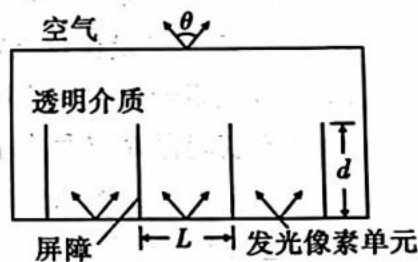


图 7

- A. 防窥屏实现防窥效果是因为光发生了全反射
- B. 此防窥屏的可视角度 $\theta = 120^\circ$
- C. 若减小透明介质的折射率，则可增强防窥效果
- D. 若增大 d ，则可视角度 θ 减小

10. 如图 8 所示，一轻质弹簧竖直放置在水平地面上，其下端固定，上端拴接一个质量为 $2m$ 、厚度可忽略不计的薄板。薄板静止时，弹簧的压缩量为 a ，现有一个质量为 m 的物块从距薄板正上方某高度处自由下落，与薄板碰撞后立即粘连在一起，碰撞时间极短。之后，物块与薄板一起在竖直方向上运动，在这个过程中，弹簧的最大形变量为 $2.5a$ ，从刚粘连到第一次运动到最高点用时为 t ，弹簧始终在弹性限度内，不计空气阻力。下列说法正确的是（本题可能用到弹性势能公式 $E_p = \frac{1}{2} kx^2$ ， k 为弹簧劲度系数， x 为弹簧形变量）

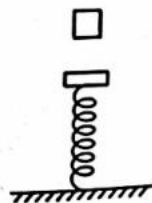


图 8

- A. 物块与薄板粘在一起之后在竖直方向上做简谐运动
- B. 物块与薄板在最低点加速度大小大于重力加速度
- C. 物块与薄板运动的周期为 $\frac{6}{5}t$
- D. 物块从距离薄板 $\frac{9}{4}a$ 处自由下落

三、非选择题：共 5 小题，共 57 分。

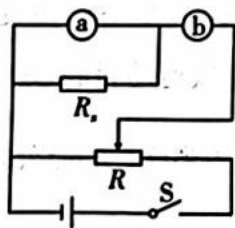
11. (7 分) 小巴同学用铝制易拉罐和粗细均匀的透明薄吸管制作温度计，实验装置如图 9 所示。向一个空的铝制易拉罐中插入一根透明吸管，接口用蜡密封，在吸管内引入一小段油柱，并将吸管水平放置。不计环境大气压的变化，罐内气体视为理想气体。



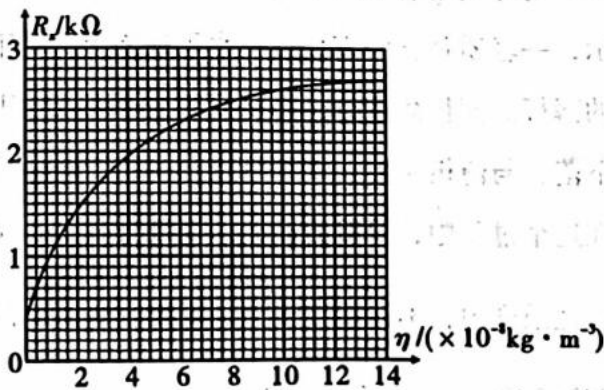
图 9

- (1) 环境温度由 27°C 缓慢上升至 30°C 过程中，罐内气体 _____ (填“吸热”或“放热”)。
 (2) 给吸管上标刻温度值时，刻度 _____ (填“是”或“不是”) 均匀的。
 (3) 将制作好的温度计竖直放置在某环境中 (吸管在易拉罐上方)，所测温度读数 _____ (填“大于”“小于”或“等于”) 实际温度。
12. (9 分) 人们对室内空气质量和环境健康问题十分重视，已知国家室内甲醛浓度标准是 $\eta \leq 0.1 \text{mg}/\text{m}^3$ 。某探究小组准备利用一个对甲醛气体非常敏感的气敏电阻 R_x ，制作一个甲醛检测仪，用于检测室内甲醛是否超标。正常情况下该气敏电阻阻值为几百欧，当甲醛浓度升高时，其阻值可以增大到几千欧。供选择的器材如下：

- A. 蓄电池 (电动势 $E=6\text{V}$ ，内阻不计)
 B. 电流表 A_1 (量程 60mA ，内阻 R_{A1} 为 100Ω)
 C. 电流表 A_2 (量程 80mA ，内阻 R_{A2} 约为 20Ω)
 D. 滑动变阻器 R_1 (最大阻值 20Ω)
 E. 滑动变阻器 R_2 (最大阻值 6000Ω)
 F. 电阻箱 R_3 (最大阻值 9999.9Ω)
 G. 红色发光二极管
 H. 开关、导线若干



甲

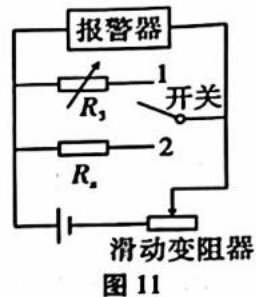


乙

图 10

- (1) 该组同学设计了如图 10 甲所示的电路图研究气敏电阻阻值随甲醛浓度变化的规律，为了方便测量气敏电阻的阻值，则图中滑动变阻器应选择 _____ (填“ R_1 ”或“ R_2 ”)。
 (2) 按图甲连接好电路，将电流表连接到恰当位置后，把气敏电阻放置于不同浓度甲醛中测量其电阻的阻值，某次测量时读出两电流表 A_1 、 A_2 的示数分别为 I_1 、 I_2 ，则此次电阻阻值 $R_x =$ _____ (用题目所给字母表示)。最终得到如图乙所示图像。

(3) 利用该气敏电阻，探究小组设计的甲醛检测仪的测试电路如图 11 所示。当报警器两端的电压大于 2V 时将报警，报警器对电路电阻的影响不计，实验要求当室内甲醛浓度超过标准时，报警器报警。按电路图连接好电路，按照下列步骤调节甲醛检测仪，使其能正常使用。



①电路接通前需将电阻箱 R_1 调到某一恰当数值，这一恰当数值为 _____ Ω ，将滑动变阻器滑片置于右端；

②将开关向 1 端闭合，缓慢移动滑动变阻器的滑片，直至报警器开始报警；

③保持滑动变阻器滑片位置不动，将开关向 2 端闭合，甲醛检测仪即可正常使用。

(4) 某些环境对甲醛浓度标准有更高要求，按 (3) 调节好甲醛检测仪后，为了使甲醛检测仪能够在 $\eta \geq 0.08 \text{mg/m}^3$ 时就能报警，应将滑动变阻器的滑片向 _____ (填“左”或“右”) 移动。

13. (10 分) 一列简谐横波沿 x 轴传播，如图 12 所示，实线为 $t_1 = 0$ 时刻的波形图，虚线为 $t_2 = 1 \text{s}$ 时刻的波形图。

(1) 若已知 $x = 0$ 处的质点在 $0 \sim 1 \text{s}$ 内运动的路程为 25cm ，求 $x = 0$ 处的质点的振动方程 (用正弦函数形式表达)；

(2) 若波沿 x 轴正向传播，求波的传播速度大小。

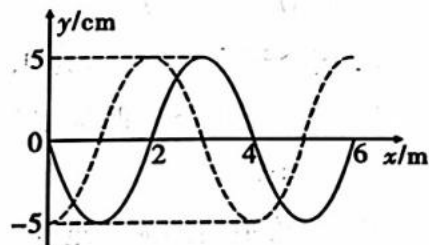


图 12

14. (13 分) 如图 13，在平面直角坐标系 xOy 上， $0 < x < \sqrt{3}L$ 区域有垂直于纸面 (xOy 平面) 向里、磁感应强度大小为 B 的匀强磁场； $-L < x < 0$ 区域有沿 x 轴负向的匀强电场，电场强度大小为 E 。一带电粒子从坐标为 $(-L, 0)$ 的 A 点处由静止释放，由 O 点入射到磁场中，在磁场另一侧的 S 点射出，粒子离开磁场后，沿直线运动打在垂直于 x 轴的接收屏上的 P 点， $SP = L$ ， S 与屏的距离为 $\frac{1}{2}L$ 。若在磁场右边界和接收屏之间再加上电场强度大小为 $2E$ 的匀强电场，方向垂直于 SP 且与 x 轴负方向夹角为 30° ，则粒子将在 xOy 平面运动并垂直打在接收屏上的 Q 点。粒子的重力不计，不考虑相对论效应。求：

(1) 带电粒子在磁场中运动的轨迹半径 r ；

(2) 求带电粒子比荷的绝对值 $\frac{q}{m}$ ；

(3) 从释放到运动至 Q 点所用的时间。

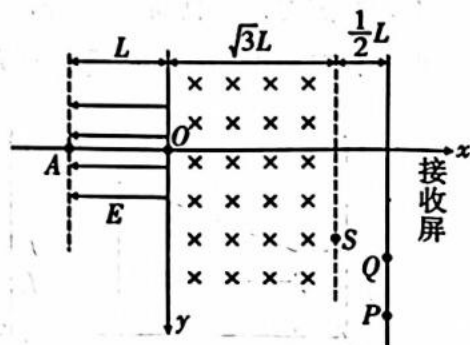


图 13

15. (18分) 半径为 R (内外半径之差可忽略) 的光滑圆管水平放置并固定, 俯视图如图 14 所示。圆心为 O , 圆管内有质量分别为 $2m$ 、 $3m$ 、 $15m$ 的 A 、 B 、 C 三个小球, 静止在图示位置, 对应刻度盘上的角度分别是 0° 、 120° 、 240° , 不计小球碰撞的时间, 重力加速度为 g 。

(1) 现给 A 一个初速度 v_0 , 让其沿圆管切线方向逆时针运动, 若 A 、 B 、 C 三个小球中任意两球之间的碰撞为弹性碰撞, 但三球同时碰撞时会结合在一起, 求:

①第 2 次碰撞发生时, A 球的位置;

②第 3 次碰撞后瞬间, 小球 A 的速度大小;

③第 3 次碰撞后瞬间, 三球对圆管压力的合力大小;

(2) 现撤去 C 球, 给 B 一个初速度 v_0 , 让其沿圆管切线方向顺时针运动, 若 B 与 A 球之间的碰撞为非弹性碰撞, 每次碰撞后的相对速度大小为碰撞前的相对速度大小的 k 倍, 其中 $k = \frac{1}{2}$, 求第 1

次碰撞到第 2025 次碰撞之间小球 A 通过的路程。

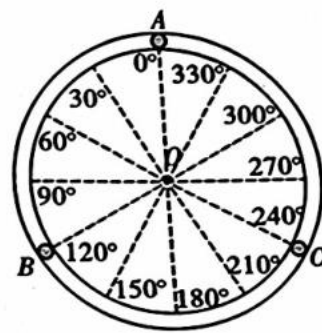


图 14

物理参考答案

选择题：共 10 小题，共 43 分。在每小题给出的四个选项中，第 1~7 题只有一项符合题目要求，每小题 4 分；第 8~10 题有多项符合题目要求，每小题 5 分，全部选对的给 5 分，选对但不全的给 3 分，有选错的给 0 分。

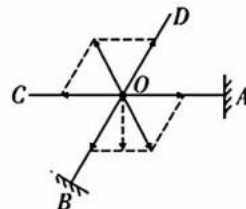
题号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
答案	D	D	C	D	B	A	C	AC	BCD	ACD

【解析】

1. 用点电荷来代替带电体采用了理想化的物理模型的方法，故 A 错误。借助激光笔及平面镜观察桌面的微小形变的实验中，用到了放大法，故 B 错误。加速度定义式是速度的变化量与时间的比值，应用了比值定义法，故 C 错误。重心、合力和分力都采用了等效替代的思想，故 D 正确。

2. α 衰变方程为 ${}_{94}^{238}\text{Pu} \rightarrow {}_{92}^{234}\text{U} + {}_2^4\text{He}$ ， α 粒子由两个质子和两个中子组成；故 A 错误。 ${}_{94}^{238}\text{Pu}$ 比 ${}_{92}^{234}\text{U}$ 的结合能大，比结合能小；故 B 错误。应该选用半衰期更长的材料保证电池的长寿命；故 C 错误。核反应质量数守恒，由题意知该核反应为放能反应，所以生成物结合能更大，故 D 正确。

3. 由题意知 OA 、 OB 段拉力相等且始终不变，由动态分析图可得， OC 、 OD 的拉力均始终减小。



4. 微粒做匀变速运动，故 A 错误。落地时间为 1s，故 B 错误。从抛出

点到动能最小位置所用时间 $t = \frac{v_0 \sin 45^\circ}{\sqrt{2}g} = 0.5\text{s}$ ，此过程微粒在竖直方向下落高度为

$h = \frac{1}{2}gt^2 = 1.25\text{m}$ ，此时距离地面的高度为 3.75m；故选 D。

5. R_3 增大，副线圈两端电压不变，电流表示数变小， R_2 电压变小， R_3 电压变大， $|\Delta U_1|$ 等于 $|\Delta U_2|$ ；故 A 错误。 $\left| \frac{\Delta U_1}{\Delta I} \right| = R_2$ 不变， $\left| \frac{\Delta U_2}{\Delta I} \right|$ 等于除 R_3 之外等效电源的内阻，也不变；故 B 正确。电容器通交流，闭合开关 S，变压器的输入电流大于 0.4A；故 C 错误。电容器的耐压值至少为 $10\sqrt{2}\text{V}$ ；故 D 错误。

6. 由几何关系知 $F_{BA} = F_{CA}$ ， $F_{BA} = G \frac{4m^2}{d^2}$ ， $F_A = 2F_{BA} \cos 30^\circ$ ， $F_A = \frac{4\sqrt{3}Gm^2}{d^2}$ ；由几何对称性



可知星体 B 、 C 受力大小相等, $F_{AB} = F_{BA} = G \frac{4m^2}{d^2}$, $F_{CB} = G \frac{m^2}{d^2}$; 设星体 B 所受的合力为 F_B ,

正交分解 F_B , 有 $F_{Bx} = F_{AB} \cos 60^\circ + F_{CB} = \frac{3Gm^2}{d^2}$, $F_{By} = F_{AB} \sin 60^\circ = \frac{2\sqrt{3}Gm^2}{d^2}$, 则

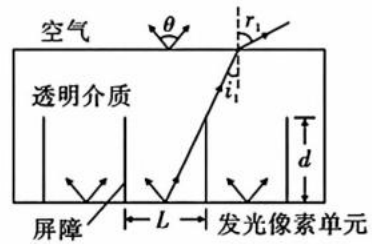
$F_B = \sqrt{F_{Bx}^2 + F_{By}^2} = \frac{\sqrt{21}Gm^2}{d^2}$, 则 $a_{nA} : a_{nB} : a_{nC} = \frac{F_A}{4m} : \frac{F_B}{m} : \frac{F_C}{m}$, 解得为 $\sqrt{7} : 7 : 7$; 故选 A。

7. $f_a = 3m\omega^2 r$, $f_b = m\omega^2 2r$, 第一段图像斜率大的为 a , 斜率小的为 b , b 先达到最大静摩擦力 f_{bm} , 此时 $f_a - f_{bm} = m\omega^2 r$, ω 增大, f_{bm} 不变, f_a 增大; 直到 a 的摩擦力增加到最大静摩擦力 f_{am} 时, $f_{am} - f_{bm} = m\omega^2 r$, ω 增大, f_{am} 不变, f_b 减小; 故选 C。

8. 电子感应加速器是利用变化的磁场激发感生电场, 从而进行加速; 故 A 正确。根据楞次定律判断感生电场方向为顺时针, 电子运动方向为逆时针; 故 B 错误。由 $R = \frac{mv}{qB_2}$ 知电子在真空室中的半径不变, v 增加, B_2 也在增加, $F_{洛} = qvB_2$ 不断增加; 故 C 正确。洛伦兹力对电子不做功; 故 D 错误。

9. 防窥屏实现防窥效果是因为有吸光屏障, 故 A 错误。如图

根据几何关系得 $\sin i_1 = \frac{\frac{L}{2}}{\sqrt{d^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}} = \frac{3\sqrt{3}}{8}$, 根据光的折射



率 $n = \frac{\sin r_1}{\sin i_1} = \frac{4}{3}$, 联立得 $r_1 = 60^\circ$, 则可视角度为 120° , 故选 BCD。

10. 物块与薄板在竖直方向上满足 $F_{合} = -kx$, 故 A 正确。根据简谐运动的对称性判断, 物块与薄板在最低点加速度小于重力加速度。从位移 $0.5A$ 的位置运动至第一次到达最高点的时间 $t = \frac{1}{12}T + \frac{3}{4}T$, 解得简谐运动的周期 $T = \frac{6}{5}t$ 。从物块与薄板开始做简谐运动至运动到

最低点过程, 对简谐运动系统由机械能守恒定律有 $3mg \times 1.5a + \frac{3m}{2}v^2 = \frac{1}{2}k(2.5a)^2 - \frac{1}{2}ka^2$,

碰撞过程: $mv_0 = 3mv$, m 下落过程: $mgh = \frac{1}{2}mv_0^2$, 开始静止时, 有 $ka = 2mg$, 联立解

得 $h = \frac{9}{4}a$ 。



非选择题：共 5 小题，共 57 分。

11. (除特殊标注外，每空 2 分，共 7 分)

(1) 吸热

(2) 是

(3) 小于 (3 分)

【解析】(1) 一定质量的理想气体，温度升高时，内能增大 $\Delta U > 0$ ，体积变大，气体对外做功， $W < 0$ ，由 $\Delta U = W + Q$ 可知 $Q > 0$ ，所以该过程罐内气体吸热。

(2) 一定质量的理想气体，压强不变时，由 $\frac{pV}{T} = C$ ， $V = Sl$ ，得 $T = \frac{pS}{C} \cdot l$ ，所以吸管上温度值标刻是均匀的。

(3) 若将温度计竖直放置，则气体实际压强增大，所以实际温度大于所测温度。

12. (除特殊标注外，每空 2 分，共 9 分)

(1) R_1

(2) $\frac{I_1 R_{A1}}{I_2 - I_1}$

(3) 2600

(4) 左 (3 分)

【解析】(1) 为了便于调节，分压式接法要选用最大值较小的滑动变阻器。

(2) A_1 内阻已知，且 A_2 量程大于 A_1 ，所以 a 应选择 A_1 作为电压表，b 应选 A_2 作为电流表，由 $(I_2 - I_1)R_x = I_1 R_{A1}$ 得 $R_x = \frac{I_1 R_{A1}}{I_2 - I_1}$ 。

(3) 由图乙得当 $\eta = 0.1 \text{ mg/m}^3$ 时， $R_x = 2600 \Omega$ ，为了使报警器在 $R_x = 2600 \Omega$ 时报警，需将 R_3 调到 2600Ω 。

(4) 浓度降低时，气敏电阻变小，为使气敏电阻两端电压仍为 2V，需减小滑动变阻器阻值，向左滑动。

13. (10 分)

解：(1) 设 $x = 0$ 处质点的振动方程为 $y = A \sin(\omega t + \varphi)$

由题知该质点在 0 时刻向 y 轴负向运动

$\varphi = \pi$

①



$$\Delta t = T + \frac{T}{4}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{5\pi}{2}$$

由图知 $A = 5\text{cm}$

所以 $x = 0$ 处质点的振动方程为 $y = 5\sin(\frac{5\pi}{2}t + \pi)\text{cm}$

(2) 由图知 $\lambda = 4\text{m}$

若波沿 x 轴正向传播, 则

$$\Delta t = \frac{3T}{4} + nT$$

$$v = \frac{\lambda}{T} = 4n + 3(\text{m/s})(n \in \mathbb{N})$$

评分标准: 本题共 10 分。正确得出④、⑥、⑦式各给 2 分, 其余各式各给 1 分。

14. (13 分)

解: (1) $O \rightarrow S$: 粒子做匀速圆周运动, 轨迹如图所示

$$\cos \alpha = \frac{\frac{1}{2}L}{L} = \frac{1}{2}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

由几何关系可得粒子做圆周运动半径 $r = \frac{\sqrt{3}L}{\sin \alpha} = 2L$

$$(2) A \rightarrow O: qEL = \frac{1}{2}mv_0^2$$

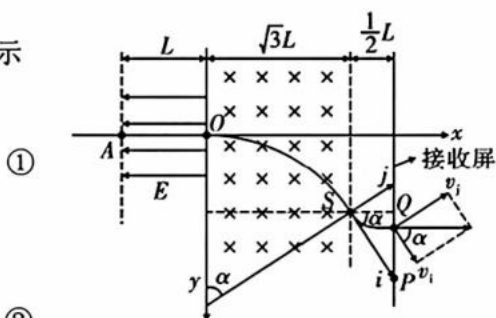
$$\text{在磁场中: } qv_0B = m\frac{v_0^2}{r}$$

$$\text{得 } v_0 = \frac{2qBL}{m}$$

$$\text{所以 } \frac{q}{m} = \frac{E}{2LB^2}$$

$$(3) A \rightarrow O: a_1 = \frac{qE}{m}$$

$$t_1 = \frac{v_0}{a_1}$$





$$\text{得 } t_1 = \frac{2BL}{E}$$

$$O \rightarrow S: T = \frac{2\pi r}{v_0} = \frac{4\pi LB}{E} \quad \text{⑧}$$

$$\alpha = 60^\circ, \text{ 所以 } t_2 = \frac{T}{6} \quad \text{⑨}$$

$$\text{得 } t_2 = \frac{2\pi BL}{3E}$$

S → Q: 粒子做类平抛运动, 如图

$$\tan \alpha = \frac{a_2 t_3}{v_0} \quad \text{⑩}$$

$$a_2 = \frac{2qE}{m}$$

$$\text{得 } t_3 = \frac{\sqrt{3}BL}{E}$$

$$t = t_1 + t_2 + t_3 = \left(2 + \frac{2\pi}{3} + \sqrt{3}\right) \frac{BL}{E} \quad \text{⑪}$$

评分标准: 本题共 13 分。正确得出②、⑤式各给 2 分, 其余各式各给 1 分。

15. (18 分)

解: (1) ①A 球与 B 球在 120° 处的弹性碰撞是第 1 次碰撞, 设 A 与 B 球碰撞后的速度分别是 v_1 和 v_2 , 则有

$$m_A v_0 = m_A v_1 + m_B v_2 \quad \text{①}$$

$$\frac{1}{2} m_A v_0^2 = \frac{1}{2} m_A v_1^2 + \frac{1}{2} m_B v_2^2 \quad \text{②}$$

$$\text{解得 } v_1 = -\frac{1}{5} v_0, v_2 = \frac{4}{5} v_0$$

即第 1 次碰后, A 球顺时针转动, 速度大小为 $\frac{1}{5} v_0$, B 球逆时针转动, 速度大小为 $\frac{4}{5} v_0$

B 逆时针从 120° 转到 240° 位置, 转过 120° 过程, A 顺时针转过的角度是

$$\theta_A = \left| \frac{v_1}{v_2} \right| \times 120^\circ = 30^\circ$$

故当第 2 次碰撞发生时, A 球在圆环内刻度盘上 90° 位置 ③



② B 球与 C 球在 240° 处的弹性碰撞是第 2 次碰撞, 设 B 与 C 球碰后的速度分别是 v_3 和 v_4 , 则有

$$m_B v_2 = m_B v_3 + m_C v_4 \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} m_B v_2^2 = \frac{1}{2} m_B v_3^2 + \frac{1}{2} m_C v_4^2 \quad (5)$$

$$\text{解得 } v_3 = -\frac{8}{15} v_0, \quad v_4 = \frac{4}{15} v_0$$

即第 2 次碰后, B 球顺时针转动, 速度大小为 $\frac{8}{15} v_0$, C 球逆时针转动, 速度大小为 $\frac{4}{15} v_0$

经分析, 三个球将在圆管内刻度盘上 0° 位置处同时碰撞 (即第 3 次碰撞) (6)

依题意, 三球将结合在一起, 结合体的质量为 $20m$, 设该结合体的速度为 v , 则有

$$m_A |v_1| + m_B |v_3| - m_C v_4 = (m_A + m_B + m_C) v \quad (7)$$

$$\text{解得 } v = -\frac{1}{10} v_0 \quad \text{即第 3 次碰后, 结合体将逆时针转动, 速度大小为 } \frac{1}{10} v_0 \quad (8)$$

故第 3 次碰撞后瞬间 A 的速度大小为 $\frac{1}{10} v_0$

$$\textcircled{3} \text{ 对结合体, 水平面内有 } F_n = 20m \frac{v^2}{R} = \frac{mv_0^2}{5R} \quad (9)$$

$$\text{竖直方向上有 } F_y = 20mg \quad (10)$$

$$\text{由勾股定理得 } F_N = \sqrt{F_y^2 + F_n^2} = \sqrt{400m^2 g^2 + \frac{m^2 v_0^4}{25R^2}}$$

$$\text{由牛顿第三定律得 } F_N' = F_N = \sqrt{400m^2 g^2 + \frac{m^2 v_0^4}{25R^2}} \quad (11)$$

(2) 设 B 与 A 球第 1 次碰撞后的速度分别是 v_{B1} 和 v_{A1} , 则有

$$v_{A1} - v_{B1} = kv_0$$

$$m_A v_{A1} + m_B v_{B1} = m_B v_0$$

$$\text{解得 } v_{A1} = \frac{(1+k)m_B v_0}{m_A + m_B}, \quad v_{B1} = \frac{(m_B - km_A)v_0}{m_A + m_B} \quad (12)$$

第 1 次碰撞和第 2 次碰撞之间时间间隔为 t_1 , 此过程 A 球比 B 球多运动一圈, 有

$$t_1 = \frac{2\pi R}{v_{A1} - v_{B1}} = \frac{2\pi R}{kv_0} \quad (13)$$



$$\text{此过程中, A 球运动的路程为 } s_1 = v_{A1} \cdot t_1 = \frac{2\pi R m_B}{m_A + m_B} \left(\frac{1}{k} + 1\right) = \frac{6\pi R}{5} \left(\frac{1}{k} + 1\right) \quad (14)$$

设 B 与 A 球第 2 次碰撞后的速度分别是 v_{B2} 和 v_{A2} , 则有

$$\begin{aligned} v_{B2} - v_{A2} &= k(v_{A1} - v_{B1}) = k^2 v_0 \\ m_A v_{A2} + m_B v_{B2} &= m_A v_{A1} + m_B v_{B1} = m_B v_0 \end{aligned} \quad (15)$$

第 2 次碰撞和第 3 次碰撞之间时间间隔为 t_2 , 此过程 B 球比 A 球多运动一圈, 有

$$t_2 = \frac{2\pi R}{v_{B2} - v_{A2}} = \frac{2\pi R}{k^2 v_0} \quad (16)$$

$$\text{此过程中, A 球运动的路程为 } s_2 = v_{A2} \cdot t_2 = \frac{2\pi R m_B}{m_A + m_B} \left(\frac{1}{k^2} - 1\right) = \frac{6\pi R}{5} \left(\frac{1}{k^2} - 1\right) \quad (17)$$

设 B 与 A 球第 3 次碰撞后的速度分别是 v_{B3} 和 v_{A3} , 第 3 次碰撞和第 4 次碰撞之间时间间隔为 t_3 , A 球运动的路程为 s_3 , 同理可得

$$\begin{aligned} v_{A3} &= \frac{(1+k^3)m_B v_0}{m_A + m_B}, \quad v_{B3} = \frac{(m_B - k^3 m_A)v_0}{m_A + m_B}, \quad t_3 = \frac{2\pi R}{k^3 v_0} \\ s_3 &= \frac{2\pi R m_B}{m_A + m_B} \left(\frac{1}{k^3} + 1\right) = \frac{6\pi R}{5} \left(\frac{1}{k^3} + 1\right) \end{aligned}$$

同理可以分析接下来的两球的各次碰撞过程

则从第 1 次碰撞到第 2025 次碰撞共有 2024 个间隔过程, 小球 A 通过的路程为

$$\begin{aligned} s &= s_1 + s_2 + s_3 + \cdots + s_{2024} = \frac{6\pi R}{5} \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k^2} + \frac{1}{k^3} + \cdots + \frac{1}{k^{2024}}\right) \\ \text{化简得 } s &= \frac{12\pi R}{5} (2^{2024} - 1) \end{aligned} \quad (18)$$

评分标准: 本题共 18 分。正确得出①~⑱式各给 1 分。

(其他解法正确, 同理参照评分细则给分)