

2023 年普通高等学校招生全国统一考试（重庆卷）

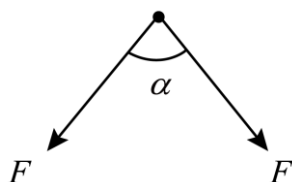
物 理

注意事项：

1. 答卷前，考生务必将自己的姓名、准考证号填写在答题卡上。
2. 回答选择题时，选出每小题答案后，用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。回答非选择题时，将答案书写在答题卡上，写在本试卷上无效。
3. 考试结束后，将本试卷和答题卡一并交回。

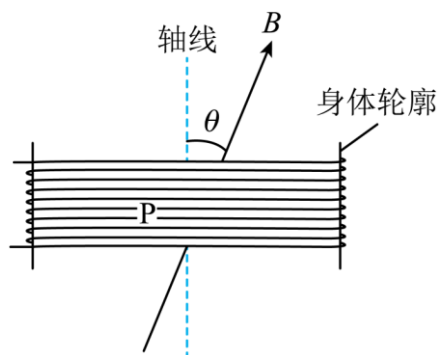
一、单项选择题

1. 矫正牙齿时，可用牵引线对牙施加力的作用。若某颗牙齿受到牵引线的两个作用力大小均为 F ，夹角为 α （如图），则该牙所受两牵引力的合力大小为（ ）



- A. $2F \sin \frac{\alpha}{2}$
 B. $2F \cos \frac{\alpha}{2}$
 C. $F \sin \alpha$
 D. $F \cos \alpha$

2. 某小组设计了一种呼吸监测方案：在人身上缠绕弹性金属线圈，观察人呼吸时处于匀强磁场中的线圈面积变化产生的电压，了解人的呼吸状况。如图所示，线圈 P 的匝数为 N ，磁场的磁感应强度大小为 B ，方向与线圈轴线的夹角为 θ 。若某次吸气时，在 t 时间内每匝线圈面积增加了 S ，则线圈 P 在该时间内的平均感应电动势为（ ）



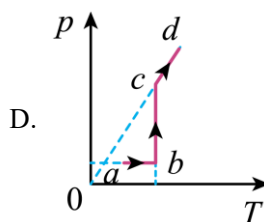
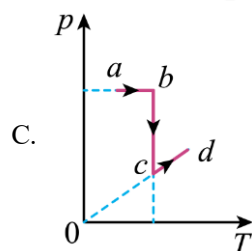
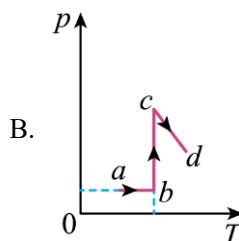
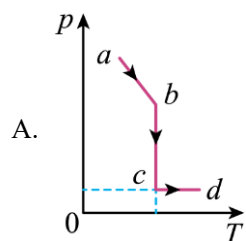
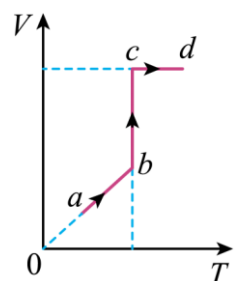
- A. $\frac{NBS \cos \theta}{t}$
 B. $\frac{NBS \sin \theta}{t}$
 C. $\frac{BS \sin \theta}{t}$
 D. $\frac{BS \cos \theta}{t}$

3. 真空中固定有两个点电荷，负电荷 Q_1 位于坐标原点处，正电荷 Q_2 位于 x 轴上， Q_2 的电荷量大小为 Q_1 的 8 倍。

若这两点电荷在 x 轴正半轴的 $x=x_0$ 处产生的合电场强度为 0，则 Q_1 、 Q_2 相距 ()

- A. $\sqrt{2}x_0$
- B. $(2\sqrt{2}-1)x_0$
- C. $2\sqrt{2}x_0$
- D. $(2\sqrt{2}+1)x_0$

4. 密封于气缸中的理想气体，从状态 a 依次经过 ab 、 bc 和 cd 三个热力学过程达到状态 d 。若该气体的体积 V 随热力学温度 T 变化的 V - T 图像如图所示，则对应的气体压强 p 随 T 变化的 p - T 图像正确的是 ()

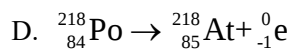


5. 某实验小组利用双缝干涉实验装置分别观察 a 、 b 两单色光的干涉条纹，发现在相同的条件下光屏上 a 光相邻两亮条纹的间距比 b 光的小。他们又将 a 、 b 光以相同的入射角由水斜射入空气，发现 a 光的折射角比 b 光的大，则 ()

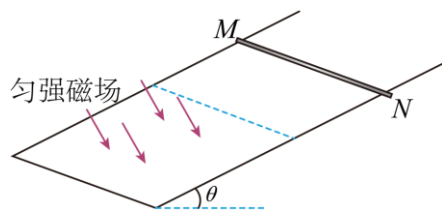
- A. 在空气中传播时， a 光的波长比 b 光的大
- B. 在水中传播时， a 光的速度比 b 光的大
- C. 在水中传播时， a 光的频率比 b 光的小
- D. 由水射向空气时， a 光的全反射临界角比 b 光的小

6. 原子核 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 可以经过多次 α 和 β 衰变成为稳定原子核 ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ ，在该过程中，可能发生的 β 衰变是 ()

- A. ${}_{87}^{223}\text{Fr} \rightarrow {}_{88}^{223}\text{Ra} + {}_{-1}^0\text{e}$
- B. ${}_{84}^{213}\text{Bi} \rightarrow {}_{83}^{213}\text{Po} + {}_{-1}^0\text{e}$
- C. ${}_{88}^{225}\text{Ra} \rightarrow {}_{89}^{225}\text{Ac} + {}_{-1}^0\text{e}$



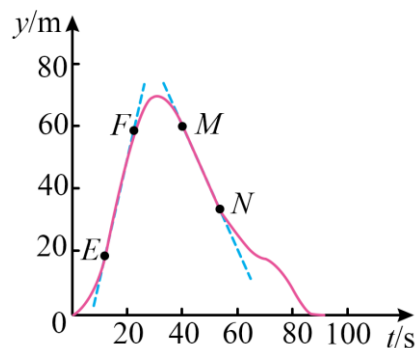
7. 如图所示,与水平面夹角为 θ 的绝缘斜面上固定有光滑 U 型金属导轨。质量为 m 、电阻不可忽略的导体杆 MN 沿导轨向下运动,以大小为 v 的速度进入方向垂直于导轨平面向下的匀强磁场区域,在磁场中运动一段时间 t 后,速度大小变为 $2v$ 。运动过程中杆与导轨垂直并接触良好,导轨的电阻忽略不计,重力加速度为 g 。杆在磁场中运动的此段时间内 ()



- A. 流过杆的感应电流方向从 N 到 M
- B. 杆沿轨道下滑的距离为 $\frac{3}{2}vt$
- C. 流过杆感应电流的平均电功率等于重力的平均功率
- D. 杆所受安培力的冲量大小为 $mgt \sin \theta - mv$

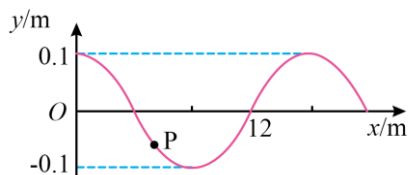
二、多项选择题

8. 某实验小组测得在竖直方向飞行 无人机飞行高度 y 随时间 t 的变化曲线如图所示, E 、 F 、 M 、 N 为曲线上的点, EF 、 MN 段可视为两段直线,其方程分别为 $y = 4t - 26$ 和 $y = -2t + 140$ 。无人机及其载物的总质量为 2kg ,取竖直向上为正方向。则 ()



- A. EF 段无人机的速度大小为 4m/s
- B. FM 段无人机的货物处于失重状态
- C. FN 段无人机和装载物总动量变化量大小为 $4\text{kg}\cdot\text{m/s}$
- D. MN 段无人机机械能守恒

9. 一列简谐横波在介质中沿 x 轴传播,波速为 2m/s , $t=0$ 时的波形图如图所示, P 为该介质中的一质点。则 ()



- A. 该波的波长为 14m

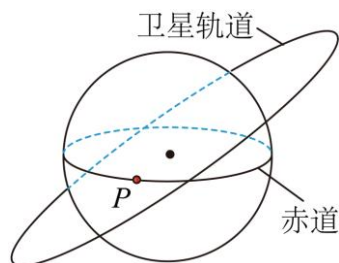
B. 该波的周期为 8s

C. $t=0$ 时质点 P 的加速度方向沿 y 轴负方向

D. 0~2 s 内质点 P 运动路程有可能小于 0.1m

10. 某卫星绕地心的运动视为匀速圆周运动, 其周期为地球自转周期 T 的 $\frac{3}{10}$, 运行的轨道与地球赤道不共面 (如图)。

t_0 时刻, 卫星恰好经过地球赤道上 P 点正上方。地球的质量为 M , 半径为 R , 引力常量为 G 。则 ()



A. 卫星距地面的高度为 $\left(\frac{GMT^2}{4\pi^2}\right)^{\frac{1}{3}} - R$

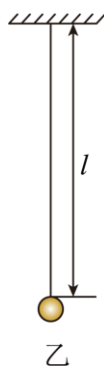
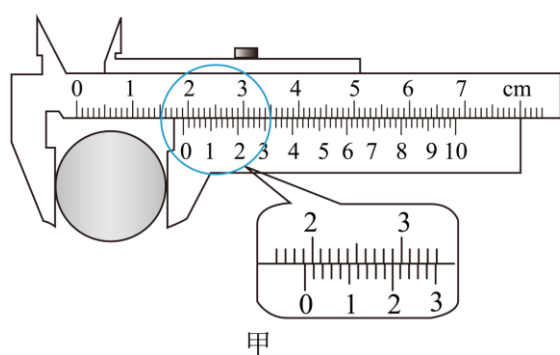
B. 卫星与位于 P 点处物体的向心加速度大小比值为 $\frac{5}{9\pi R}(180\pi GMT^2)^{\frac{1}{3}}$

C. 从 t_0 时刻到下一次卫星经过 P 点正上方时, 卫星绕地心转过的角度为 20π

D. 每次经最短时间实现卫星距 P 点最近到最远的行程, 卫星绕地心转过的角度比地球的多 7π

三、实验题

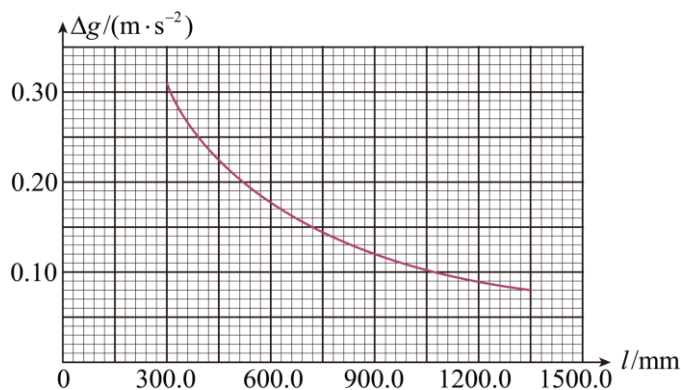
11. 某实验小组用单摆测量重力加速度。所用实验器材有摆球、长度可调的轻质摆线、刻度尺、50 分度的游标卡尺、摄像装置等。



(1) 用游标卡尺测量摆球直径 d 。当量爪并拢时, 游标尺和主尺的零刻度线对齐。放置摆球后游标卡尺示数如图甲所示, 则摆球的直径 d 为 _____ mm。

(2) 用摆线和摆球组成单摆, 如图乙所示。当摆线长度 $l=990.1\text{mm}$ 时, 记录并分析单摆的振动视频, 得到单摆的振动周期 $T=2.00\text{ s}$, 由此算得重力加速度 g 为 _____ m/s^2 (保留 3 位有效数字)。

(3) 改变摆线长度 l , 记录并分析单摆的振动视频, 得到相应的振动周期。他们发现, 分别用 l 和 $l + \frac{d}{2}$ 作为摆长, 这两种计算方法得到的重力加速度数值的差异大小 Δg 随摆线长度 l 的变化曲线如图所示。由图可知, 该实验中, 随着摆线长度 l 的增加, Δg 的变化特点是 _____, 原因是 _____。

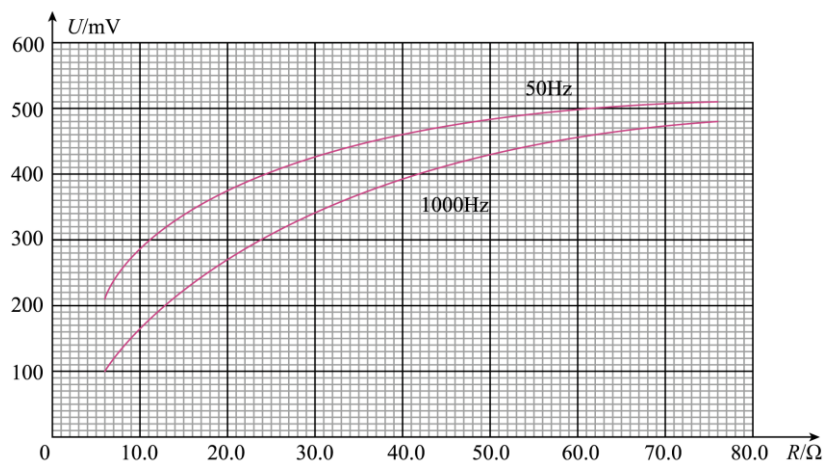
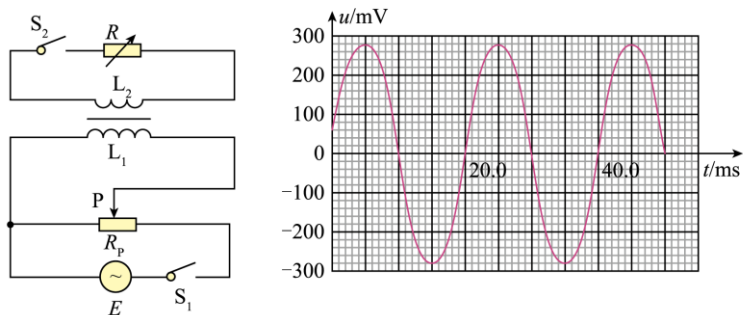


12. 一兴趣小组拟研究某变压器的输入和输出电压之比, 以及交流电频率对输出电压的影响。题图 1 为实验电路图, 其中 L_1 和 L_2 为变压器的原、副线圈, S_1 和 S_2 为开关, P 为滑动变阻器 R_p 的滑片, R 为电阻箱, E 为正弦式交流电源 (能输出电压峰值不变、频率可调的交流电)。

(1) 闭合 S_1 , 用多用电表交流电压挡测量线圈 L_1 两端的电压。滑片 P 向右滑动后, 与滑动前相比, 电表的示数 _____ (选填 “变大” “不变” “变小”)。

(2) 保持 S_2 断开状态, 调整 E 输出的交流电频率为 50 Hz , 滑动滑片 P , 用多用电表交流电压挡测得线圈 L_1 两端的电压为 2500 mV 时, 用示波器测得线圈 L_2 两端电压 u 随时间 t 的变化曲线如图所示, 则线圈 L_1 两端与 L_2 两端的电压比值为 _____ (保留 3 位有效数字)。

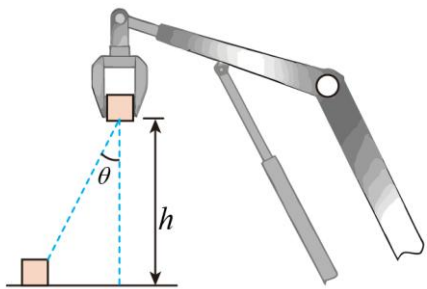
(3) 闭合 S_2 , 滑动 P 到某一位置并保持不变。分别在 E 输出的交流电频率为 50 Hz 、 1000 Hz 的条件下, 改变 R 的阻值, 用多用电表交流电压挡测量线圈 L_2 两端的电压 U , 得到 U - R 关系曲线如图 3 所示。用一个阻值恒为 $20\ \Omega$ 的负载 R_0 替换电阻箱 R , 由图可知, 当频率为 1000 Hz 时, R_0 两端的电压为 _____ mV ; 当频率为 50 Hz 时, 为保持 R_0 两端的电压不变, 需要将 R_0 与一个阻值为 _____ Ω 的电阻串联。(均保留 3 位有效数字)



四、计算题

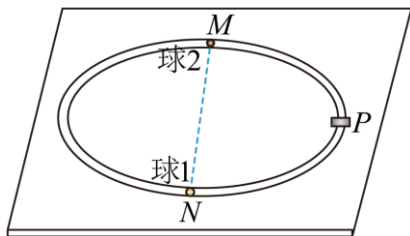
13. 机械臂广泛应用于机械装配。若某质量为 m 工件（视为质点）被机械臂抓取后，在竖直平面内由静止开始斜向上做加速度大小为 a 的匀加速直线运动，运动方向与竖直方向夹角为 θ ，提升高度为 h ，如图所示。求：

- (1) 提升高度为 h 时，工件的速度大小；
- (2) 在此过程中，工件运动的时间及合力对工件做的功。



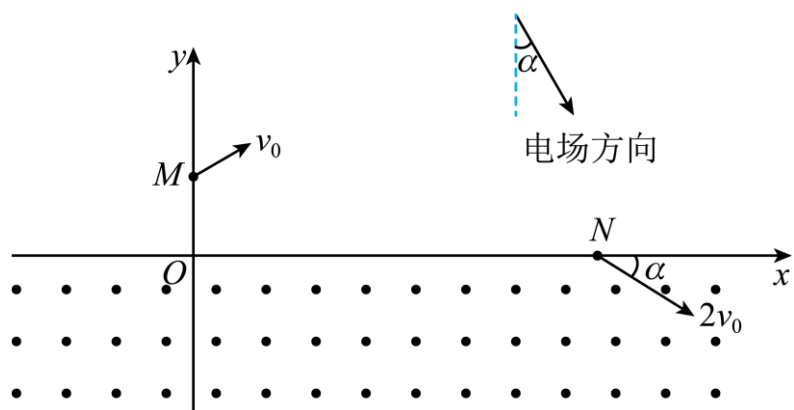
14. 如图所示，桌面上固定有一半径为 R 的水平光滑圆轨道， M 、 N 为轨道上的两点，且位于同一直径上， P 为 MN 段的中点。在 P 点处有一加速器（大小可忽略），小球每次经过 P 点后，其速度大小都增加 v_0 。质量为 m 的小球 1 从 N 处以初速度 v_0 沿轨道逆时针运动，与静止在 M 处的小球 2 发生第一次弹性碰撞，碰后瞬间两球速度大小相等。忽略每次碰撞时间。求：

- (1) 球 1 第一次经过 P 点后瞬间向心力的大小；
- (2) 球 2 的质量；
- (3) 两球从第一次碰撞到第二次碰撞所用时间。



15. 某同学设计了一种粒子加速器的理想模型。如图所示， xOy 平面内， x 轴下方充满垂直于纸面向外的匀强磁场， x 轴上方被某边界分割成两部分，一部分充满匀强电场（电场强度与 y 轴负方向成 α 角），另一部分无电场，该边界与 y 轴交于 M 点，与 x 轴交于 N 点。只有经电场到达 N 点、与 x 轴正方向成 α 角斜向下运动的带电粒子才能进入磁场。从 M 点向电场内发射一个比荷为 $\frac{q}{m}$ 的带电粒子 A，其速度大小为 v_0 、方向与电场方向垂直，仅在电场中运动时间 T 后进入磁场，且通过 N 点的速度大小为 $2v_0$ 。忽略边界效应，不计粒子重力。

- (1) 求角度 α 及 M 、 N 两点的电势差。
- (2) 在该边界上任意位置沿与电场垂直方向直接射入电场内、比荷为 $\frac{q}{m}$ 的带电粒子，只要速度大小适当，就能通过 N 点进入磁场，求 N 点横坐标及此边界方程。
- (3) 若粒子 A 第一次在磁场中运动时磁感应强度大小为 B_1 ，以后每次在磁场中运动时磁感应强度大小为上一次的一半，则粒子 A 从 M 点发射后，每次加速均能通过 N 点进入磁场。求磁感应强度大小 B_1 及粒子 A 从发射到第 n 次通过 N 点的时间。



参考答案

1. 【答案】B

【解析】

【详解】根据平行四边形定则可知，该牙所受两牵引力的合力大小为

$$F_{\text{合}} = 2F \cos \frac{\alpha}{2}$$

故选 B。

2. 【答案】A

【解析】

【详解】根据法拉第电磁感应定律有

$$\overline{E} = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = NB \cos \theta \frac{S}{t} = \frac{NBS \cos \theta}{t}$$

故选 A。

3. 【答案】B

【解析】

【详解】依题意，两点电荷电性相反，且 Q_2 的电荷量较大，根据题意，正电荷 Q_2 位于 x 轴负半轴，设两点电荷相距 L ，根据点电荷场强公式可得

$$\frac{kQ_1}{x_0^2} = \frac{kQ_2}{(x_0 + L)^2}$$

又

$$Q_2 = 8Q_1$$

解得

$$L = (2\sqrt{2} - 1)x_0$$

故选 B。

4. 【答案】C

【解析】

【详解】由 V - T 图像可知，理想气体 ab 过程做等压变化， bc 过程做等温变化， cd 过程做等容变化。根据理想气体状态方程，有

$$\frac{pV}{T} = C$$

可知 bc 过程理想气体的体积增大，则压强减小。

故选 C。

5. 【答案】D

【解析】

【详解】A. 根据相邻两条亮条纹的间距计算公式

$$\Delta x = \frac{L}{d} \lambda$$

由此可知

$$\lambda_a < \lambda_b$$

故 A 错误；

B. 根据折射定律

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}$$

a 、 b 光以相同的入射角由水斜射入空气， a 光的折射角比 b 光的大，则

$$n_a > n_b$$

根据光在介质中的传播速度与折射率的关系

$$n = \frac{c}{v}$$

可得在水中传播时， a 光的速度比 b 光的小，故 B 错误；

C. 在水中传播时， a 光的折射率比 b 光的大，所以 a 光的频率比 b 光的大，故 C 错误；

D. 根据临界角与折射率的关系

$$n = \frac{1}{\sin C}$$

可得在水中传播时， a 光的折射率比 b 光的大， a 光的全反射临界角比 b 光的小，故 D 正确。

故选 D。

6. 【答案】A

【解析】

【详解】原子核 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 衰变成为稳定的原子核 ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ 质量数减小了 28，则经过了 7 次 α 衰变，中间生成的新核的质量数可能为 231，227，223，219，215，211，则发生 β 衰变的原子核的质量数为上述各数，则 BCD 都不可能，根据核反应的质量数和电荷数守恒可知，选项 A 反应正确。

故选 A。

7. 【答案】D

【解析】

【详解】A. 根据右手定则，判断知流过杆的感应电流方向从 M 到 N ，故 A 错误；

B. 依题意，设杆切割磁感线的有效长度为 L ，电阻为 R 。杆在磁场中运动的此段时间内，杆受到重力，轨道支持力及沿轨道向上的安培力作用，根据牛顿第二定律可得

$$mg \sin \theta - F_{\text{安}} = ma$$

$$F_{\text{安}} = BIL$$

$$I = \frac{BLv}{R}$$

联立可得杆的加速度

$$a = g \sin \theta - \frac{B^2 L^2 v}{mR}$$

可知，杆在磁场中运动的此段时间内做加速度逐渐减小的加速运动；若杆做匀加速直线运动，则杆运动的距离为

$$s = \frac{v + 2v}{2} \cdot t = \frac{3}{2}vt$$

根据 $v-t$ 图像围成的面积表示位移，可知杆在时间 t 内速度由 v 达到 $2v$ ，杆真实运动的距离大于匀加速情况发生的距离，即大于 $\frac{3}{2}vt$ ，故 B 错误；

C. 由于在磁场中运动的此段时间内，杆做加速度逐渐减小的加速运动，杆的动能增大。由动能定理可知，重力对杆所做的功大于杆克服安培力所做的功，根据 $\bar{P} = \frac{W}{t}$ 可得安培力的平均功率小于重力的平均功率，也即流过杆感应电流的平均电功率小于重力的平均功率，故 C 错误；

D. 杆在磁场中运动的此段时间内，根据动量定理，可得

$$mgt \sin \theta - I_{\text{安}} = m \cdot 2v - mv$$

得杆所受安培力的冲量大小为

$$I_{\text{安}} = mgt \sin \theta - mv$$

故 D 正确。

故选 D。

8. 【答案】AB

【解析】

【详解】A. 根据 EF 段方程

$$y = 4t - 26$$

可知 EF 段无人机的速度大小为

$$v = \frac{\Delta y}{\Delta t} = 4 \text{ m/s}$$

故 A 正确；

B. 根据 $y-t$ 图像的切线斜率表示无人机的速度，可知 FM 段无人机先向上做减速运动，后向下做加速运动，加速度方向一直向下，则无人机的货物处于失重状态，故 B 正确；

C. 根据 MN 段方程

$$y = -2t + 140$$

可知 MN 段无人机的速度为

$$v' = \frac{\Delta y'}{\Delta t'} = -2 \text{ m/s}$$

则有

$$\Delta p = mv' - mv = 2 \times (-2) \text{ kg} \cdot \text{m/s} - 2 \times 4 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = -12 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

可知 FN 段无人机和装载物总动量变化量大小为 $12 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，故 C 错误；

D. MN 段无人机向下做匀速直线运动，动能不变，重力势能减少，无人机的机械能不守恒，故 D 错误。

故选 AB。

9. 【答案】BD

【解析】

【详解】A. 由图可知

$$\frac{3}{4}\lambda = 12 \text{ m}$$

解得

$$\lambda = 16 \text{ m}$$

A 错误；

B. 由

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

得

$$T = \frac{\lambda}{v} = \frac{16}{2} \text{ s} = 8 \text{ s}$$

B 正确；

C. 简谐运动的加速度总指向平衡位置，P 点位于 y 轴负半轴，加速度方向沿 y 轴正方向，C 错误；

D. P 点位于 y 轴的负半轴，经过

$$2 \text{ s} = \frac{T}{4}$$

若波向 x 轴负方向传播，P 向远离平衡位置方向振动，在 $0 \sim 2 \text{ s}$ 内质点 P 运动的路程有可能小于 0.1 m ，D 正确；

故选 BD。

10. 【答案】BCD

【解析】

【详解】A. 由题意，知卫星绕地球运转的周期为

$$T' = \frac{3}{10} T$$

设卫星的质量为 m ，卫星距地面的高度为 h ，有

$$G \frac{Mm}{(R+h)^2} = m(R+h) \left(\frac{2\pi}{T'} \right)^2$$

联立，可求得

$$h = \left(\frac{9GMT^2}{400\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}} - R$$

故 A 错误；

B. 卫星的向心加速度大小

$$a_1 = (R+h)\omega'^2 = (R+h) \left(\frac{2\pi}{T'} \right)^2$$

位于 P 点处物体的向心加速度大小

$$a_2 = R\omega^2 = R \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2$$

可得

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{R+h}{R} \left(\frac{T}{T'} \right)^2 = \frac{5}{9\pi R} (180\pi GMT^2)^{\frac{1}{3}}$$

故 B 正确；

C. 从 t_0 时刻到下一次卫星经过 P 点正上方时，设卫星转了 m 圈、 P 点转了 n 圈（ m 、 n 为正整数），则有

$$\frac{3T}{10} \cdot m = nT$$

可得

$$m = 10, \quad n = 3$$

则卫星转过的角度为

$$m \cdot 2\pi = 20\pi$$

故 C 正确；

D. 卫星距 P 点最近或最远时，一定都在赤道正上方。每次经最短时间实现卫星距 P 点最近到最远，需分两种情况讨论，第一种情况：卫星转了 x 圈再加半圈、 P 点转了 y 圈（ x 、 y 为正整数），则有

$$\frac{3T}{10} \cdot x + \frac{3T}{20} = yT$$

x 、 y 无解，所以这种情况不可能；第二种情况：卫星转了 x 圈、 P 点转了 y 圈再加半圈，则有

$$\frac{3T}{10} \cdot x = yT + \frac{T}{2}$$

可得

$$x = 5, \quad y = 1$$

则卫星绕地心转过的角度与地球转过的角度差为

$$x \cdot 2\pi - (y \cdot 2\pi + \pi) = 7\pi$$

故 D 正确。

故选 BCD。

11. 【答案】 ①. 19.20 ②. 9.86 ③. 随着摆线长度 l 的增加, Δg 逐渐减小 ④. 随着摆线长度 l 的

增加, 则 $l + \frac{d}{2}$ 越接近于 l , 此时计算得到的 g 的差值越小

【解析】

详解】(1) [1]用游标卡尺测量摆球直径 $d=19\text{mm}+0.02\text{mm}\times 10=19.20\text{mm}$

(2) [2]单摆的摆长为

$$L=990.1\text{mm}+\frac{1}{2}\times 19.20\text{mm}=999.7\text{mm}$$

根据

$$T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

可得

$$g=\frac{4\pi^2 L}{T^2}$$

带入数据

$$g=\frac{4\times 3.14^2\times 0.9997}{2^2}\text{m/s}^2=9.86\text{m/s}^2$$

(3) [3][4]由图可知, 随着摆线长度 l 的增加, Δg 逐渐减小, 原因是随着摆线长度 l 的增加, 则 $l + \frac{d}{2}$ 越接近于 l , 此时计算得到的 g 的差值越小。

12. 【答案】 ①. 变大 ②. 12.6 ③. 272 ④. 12

【解析】

【详解】(1) [1]闭合 S_1 , 滑动变阻器 R_p 是分压接法, 滑片 P 向右滑动后, 用多用电表交流电压挡测量线圈 L_1 两端的电压。线圈 L_1 两端的电压增大, 因此与滑动前相比, 电表的示数变大。

(2) [2]保持 S_2 断开状态, 调整 E 输出的交流电频率为 50Hz , 多用电表交流电压挡测得线圈 L_1 两端的电压为 $U_1=2500\text{mV}$ 。线圈 L_2 两端电压 u 随时间 t 的变化曲线如图所示, 由 $u-t$ 图像可得, 线圈 L_2 两端电压为

$$U_2=\frac{U_m}{\sqrt{2}}=\frac{280}{\sqrt{2}}\text{mV}$$

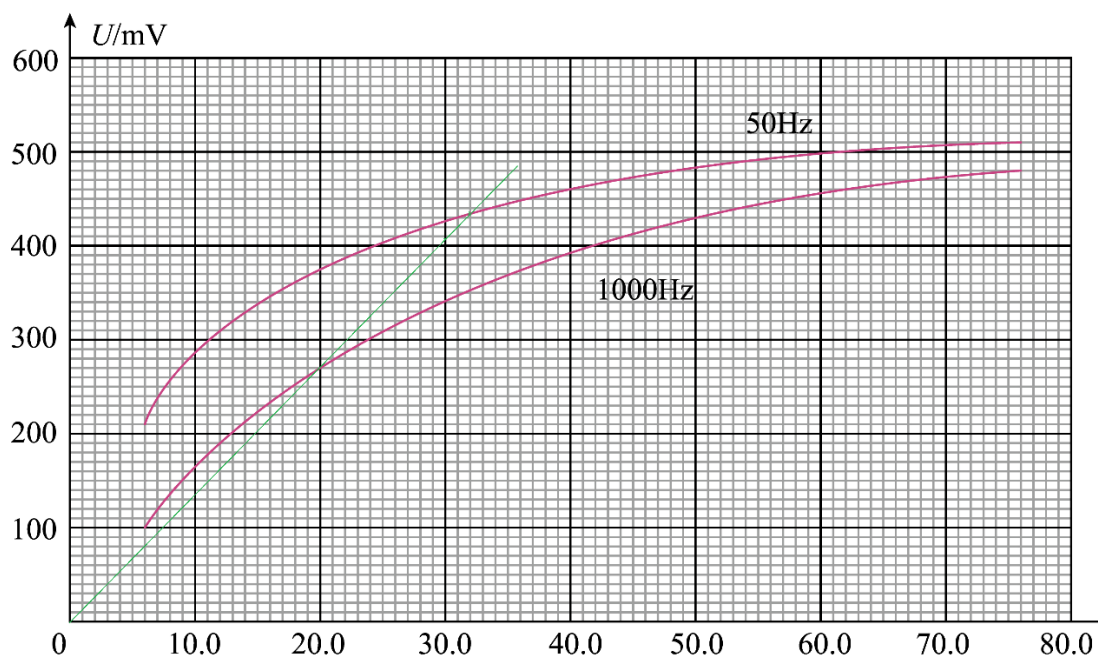
则线圈 L_1 两端与 L_2 两端的电压比值为

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{2500}{\frac{280}{\sqrt{2}}}=12.6$$

(3) [3]闭合 S_2 , 滑动 P 到某一位置并保持不变。由 $U-R$ 关系曲线可得, 当频率为 1000Hz 时, 当负载电阻 $R_0=20\Omega$ 时, R_0 两端的电压为 $U_{R0}=272\text{mV}$ 。

[4]当频率为 50Hz 时, 由 $U-R$ 关系曲线

$$\frac{U}{R} = \frac{272}{20}$$



两线交点可知 $R = 32\Omega$ ，故

需给 R_0 串联一电阻，此串联电阻值为

$$R_{\text{串}} = R - R_0 = 12\Omega$$

13. 【答案】(1) $\sqrt{\frac{2ah}{\cos\theta}}$ ；(2) $\sqrt{\frac{2h}{a\cos\theta}}$ ， $\frac{mah}{\cos\theta}$

【解析】

【详解】(1) 根据匀变速直线运动位移与速度关系有

$$v_0^2 = 2a \frac{h}{\cos\theta}$$

解得

$$v_0 = \sqrt{\frac{2ah}{\cos\theta}}$$

(2) 根据速度公式有

$$v_0 = at$$

解得

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a\cos\theta}}$$

根据动能定理有

$$W_{\text{合}} = \frac{1}{2}mv_0^2$$

解得

$$W_{\text{合}} = \frac{mah}{\cos \theta}$$

14. 【答案】(1) $4m \frac{v_0^2}{R}$; (2) $3m$; (3) $\frac{5\pi R}{6v_0}$

【解析】

【详解】(1) 球 1 第一次经过 P 点后瞬间速度变为 $2v_0$, 所以

$$F_n = m \frac{(2v_0)^2}{R} = 4m \frac{v_0^2}{R}$$

(2) 球 1 与球 2 发生弹性碰撞, 且碰后速度大小相等, 说明球 1 碰后反弹, 则

$$m \cdot 2v_0 = -mv + m'v$$

$$\frac{1}{2}m(2v_0)^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}m'v^2$$

联立解得

$$v = v_0, \quad m' = 3m$$

(3) 设两球从第一次碰撞到第二次碰撞所用时间为 Δt , 则

$$t_1 = \frac{\pi R}{2v_0}$$

$$v_0 t_2 + 2v_0 t_2 = \pi R$$

所以

$$\Delta t = t_1 + t_2 = \frac{5\pi R}{6v_0}$$

15.

【答案】(1) 30° , $\frac{3mv_0^2}{2q}$; (2) $\frac{3\sqrt{3}v_0 T}{4}$, $y = \frac{v_0 T}{4} - \frac{\sqrt{3}}{9}x$; (3) $B_1 = \frac{\sqrt{3}m}{6qT}$,

$$t = \left(3 + \frac{10\sqrt{3}\pi}{3}\right)2^{n-1}T - \left(2 + \frac{10\sqrt{3}\pi}{3}\right)T$$

【解析】

【详解】(1) 粒子 M 点垂直于电场方向入射, 粒子在电场中做类平抛运动, 沿电场方向做匀加速直线运动, 垂直于电场方向做匀速直线运动, 在 N 点将速度沿电场方向与垂直于电场方向分解, 在垂直于电场方向上有

$$2v_0 \cos 2\alpha = v_0$$

解得

$$\alpha = 30^\circ$$

粒子从 $M \rightarrow N$ 过程，根据动能定理有

$$qU_{MN} = \frac{1}{2}m(2v_0)^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

解得

$$U_{MN} = \frac{3mv_0^2}{2q}$$

(2) 对于从 M 点射入的粒子，沿初速度方向的位移为

$$x_0 = v_0 T$$

沿电场方向的位移为

$$y_0 = \frac{2v_0 \sin 2\alpha}{2} T$$

令 N 点横坐标为 x_N ，根据几何关系有

$$x_N = x_0 \cos \alpha + y_0 \sin \alpha$$

解得

$$x_N = \frac{3\sqrt{3}v_0 T}{4}$$

根据上述与题意可知，令粒子入射速度为 v ，则通过 N 点进入磁场的速度为 $2v$ ，令边界上点的坐标为 (x, y)

则在沿初速度方向上有

$$(x_N - x - y \tan \alpha) \cos \alpha = vt$$

在沿电场方向有

$$\frac{y}{\cos \alpha} + (x_N - x - y \tan \alpha) \sin \alpha = \frac{2v \sin 2\alpha}{2} t$$

解得

$$y = \frac{v_0 T}{4} - \frac{\sqrt{3}}{9} x$$

(3) 由上述结果可知电场强度

$$E = \frac{U_{MN}}{y_0}$$

解得

$$E = \frac{\sqrt{3}mv_0}{qT}$$

设粒子 A 第 n 次在磁场中做圆周运动的线速度为 v_n ，可得第 $n+1$ 次在 N 点进入磁场的速度为

$$v_{n+1} = \frac{v_n}{\cos 2\alpha} = 2v_n$$

第一次在 N 点进入磁场的速度大小为 $2v_0$ ，可得

$$v_n = 2^n v_0, (n=1, 2, 3 \cdots)$$

设粒子 A 第 n 次在磁场中运动时的磁感应强度为 B_n ，由题意可得

$$B_n = \frac{B_1}{2^{n-1}}, (n=1, 2, 3 \cdots)$$

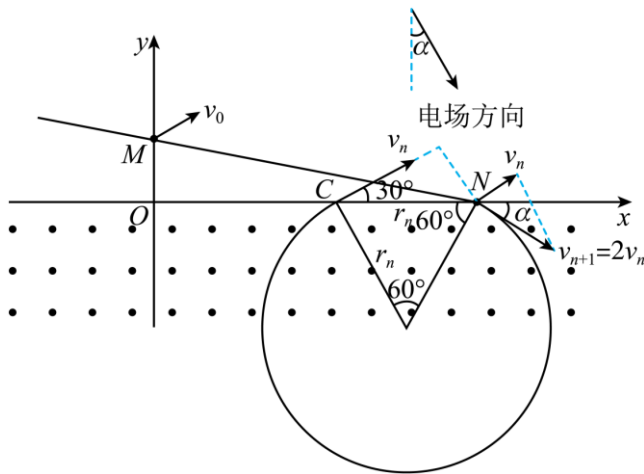
由洛伦兹力提供向心力得

$$qv_n B_n = m \frac{v_n^2}{r_n}$$

联立解得

$$r_n = \frac{4^n m v_0}{2qB_1}$$

粒子 A 第 n 次在磁场中 运动轨迹如图所示



粒子每次在磁场中运动轨迹 圆心角均为 300° ，第 n 次离开磁场的位置 C 与 N 的距离等于 r_n ，由 C 到 N 由动能定理得

$$qEr_n \sin 30^\circ = \frac{1}{2} m v_{n+1}^2 - \frac{1}{2} m v_n^2$$

联立上式解得

$$B_1 = \frac{\sqrt{3}m}{6qT}$$

由类平抛运动沿电场方向的运动可得，粒子 A 第 n 次在电场中运动的时间为

$$t_{1n} = \frac{2^n v_0 \sin 60^\circ}{\frac{qE}{m}} = 2^{n-1} T$$

粒子 A 第 n 次在磁场中运动的周期为

$$T' = \frac{2\pi r_n}{v_n} = 2^{n+1} \sqrt{3} \pi T$$

粒子 A 第 n 次在磁场中运动的时间为

$$t_{2n} = \frac{300^\circ}{360^\circ} T' = \frac{5}{6} \cdot 2^{n+1} \sqrt{3} \pi T$$

设粒子 A 第 n 次在电场边界 MN 与 x 轴之间 无场区域的位移为 x_n ，边界与 x 轴负方向的夹角为 β ，则根据边界方程可得

$$\tan \beta = \frac{\sqrt{3}}{9}, \quad \sin \beta = \frac{1}{2\sqrt{7}}$$

由正弦定理可得

$$\frac{x_n}{\sin \beta} = \frac{r_n}{\sin(180^\circ - 30^\circ - \beta)}$$

解得

$$x_n = \frac{4^n v_0 T}{2}$$

粒子 A 第 n 次在电场边界 MN 与 x 轴之间运动的时间为

$$t_{3n} = \frac{x_n}{v_n} = 2^{n-1} T$$

粒子 A 从发射到第 n 次通过 N 点的过程，在电场中运动 n 次，在磁场和无场区域中均运动 $n-1$ 次，则所求时间

$$t = (2^0 + 2^1 + \cdots + 2^{n-1}) T + \frac{5}{6} \cdot \sqrt{3} \pi T (2^2 + 2^3 + \cdots + 2^n) + (2^0 + 2^1 + \cdots + 2^{n-2}) T$$

由等比数列求和得

$$t = (2^n - 1) T + \frac{5}{6} \cdot \sqrt{3} \pi T [4(2^{n-1} - 1)] + (2^{n-1} - 1) T$$

解得

$$t = \left(3 + \frac{10\sqrt{3}\pi}{3} \right) 2^{n-1} T - \left(2 + \frac{10\sqrt{3}\pi}{3} \right) T$$