

# 2023 年普通高等学校招生全国统一考试（新课标卷）

## 理科综合物理学科

1. 船上的人和水下的潜水员都能听见轮船的鸣笛声。声波在空气中和在水中传播时的（ ）

- A. 波速和波长均不同  
B. 频率和波速均不同  
C. 波长和周期均不同  
D. 周期和频率均不同

【答案】A

【解析】

【详解】声波的周期和频率由振源决定，故声波在空气中和在水中传播的周期和频率均相同，但声波在空气和水中传播的波速不同，根据波速与波长关系  $v = \lambda f$  可知，波长也不同。故 A 正确，BCD 错误。

故选 A。

2. 无风时，雨滴受空气阻力的作用在地面附近会以恒定的速率竖直下落。一质量为  $m$  的雨滴在地面附近以速率  $v$  下落高度  $h$  的过程中，克服空气阻力做的功为（重力加速度大小为  $g$ ）（ ）

- A. 0  
B.  $mgh$   
C.  $\frac{1}{2}mv^2 - mgh$   
D.  $\frac{1}{2}mv^2 + mgh$

【答案】B

【解析】

【详解】在地面附近雨滴做匀速运动，根据动能定理得

$$mgh - W_f = 0$$

故雨滴克服空气阻力做功为  $mgh$ 。

故选 B。

3. 铯原子基态的两个超精细能级之间跃迁发射的光子具有稳定的频率，铯原子钟利用的两能级的能量差量级为  $10^{-5}\text{eV}$ ，跃迁发射的光子的频率量级为（普朗克常量  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ，元电荷  $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）

（ ）

- A.  $10^3\text{Hz}$   
B.  $10^6\text{Hz}$   
C.  $10^9\text{Hz}$   
D.  $10^{12}\text{Hz}$

【答案】C

【解析】

【详解】铯原子利用的两能级的能量差量级对应的能量为

$$\varepsilon = 10^{-5} \text{ eV} = 10^{-5} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.6 \times 10^{-24} \text{ J}$$

由光子能量的表达式  $\varepsilon = h\nu$  可得，跃迁发射的光子的频率量级为

$$\nu = \frac{\varepsilon}{h} = \frac{1.6 \times 10^{-24}}{6.63 \times 10^{-34}} \text{ Hz} \approx 2.4 \times 10^9 \text{ Hz}$$

跃迁发射的光子的频率量级为  $10^9 \text{ Hz}$ 。故选 C。

4. 2023 年 5 月，世界现役运输能力最大的货运飞船天舟六号，携带约 5800kg 的物资进入距离地面约 400km（小于地球同步卫星与地面的距离）的轨道，顺利对接中国空间站后近似做匀速圆周运动。对接后，这批物资（ ）

- A. 质量比静止在地面上时小  
B. 所受合力比静止在地面上时小  
C. 所受地球引力比静止在地面上时大  
D. 做圆周运动的角速度大小比地球自转角速度大

【答案】D

【解析】

【详解】A. 物体在低速（速度远小于光速）宏观条件下质量保持不变，即在空间站和地面质量相同，故 A 错误；

BC. 设空间站离地面的高度为  $h$ ，这批物质在地面上静止合力为零，在空间站所受合力为万有引力即

$$F = \frac{GMm}{(R+h)^2}$$

在地面受地球引力为

$$F_1 = \frac{GMm}{R^2}$$

因此有  $F_1 > F$ ，故 BC 错误；

D. 物体绕地球做匀速圆周运动万有引力提供向心力

$$\frac{GMm}{r^2} = m\omega^2 r$$

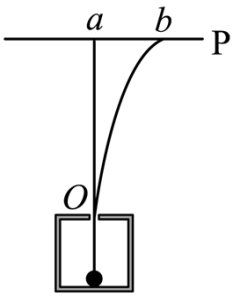
解得

$$\omega = \sqrt{\frac{GM}{r^3}}$$

这批物质在空间站内的轨道半径小于同步卫星的轨道半径，因此这批物质的角速度大于同步卫星的角速度，同步卫星的角速度等于地球自转的角速度，即这批物质的角速度大于地球自转的角速度，故 D 正确。

故选 D。

5. 一电子和一  $\alpha$  粒子从铅盒上的小孔  $O$  竖直向上射出后，打到铅盒上方水平放置的屏幕  $P$  上的  $a$  和  $b$  两点， $a$  点在小孔  $O$  的正上方， $b$  点在  $a$  点的右侧，如图所示。已知  $\alpha$  粒子的速度约为电子速度的  $\frac{1}{10}$ ，铅盒与屏幕之间存在匀强电场和匀强磁场，则电场和磁场方向可能为（ ）



- A. 电场方向水平向左、磁场方向垂直纸面向里
- B. 电场方向水平向左、磁场方向垂直纸面向外
- C. 电场方向水平向右、磁场方向垂直纸面向里
- D. 电场方向水平向右、磁场方向垂直纸面向外

【答案】C

【解析】

【详解】A. 带电粒子在电场和磁场中运动，打到  $a$  点的粒子电场力和洛伦兹力平衡，当电场向左磁场垂直直面向里时， $\alpha$  粒子受到向左的电场力和洛伦兹力，电子受到向右的电场力和洛伦兹力均不能满足受力平衡打到  $a$  点，A 错误；

B. 电场方向向左，磁场方向向外，此时如果  $\alpha$  粒子打在  $a$  点则受到向左的电场力和向右的洛伦兹力平衡

$$qE = qvB$$

$$v = \frac{E}{B}$$

则电子速度大，受到向左的洛伦兹力大于向右的电场力向左偏转，同理如果电子打在  $a$  点，则  $\alpha$  粒子向左的电场力大于向右的洛伦兹力则向左偏转，均不会打在  $b$  点，B 错误；

CD. 电场方向向右，磁场垂直纸面向里，如果  $\alpha$  粒子打在  $a$  点，即向右的电场力和向左的洛伦兹力平衡

$$qE = qvB$$

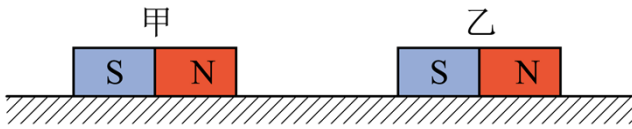
$$v = \frac{E}{B}$$

电子速度大，受到向右的洛伦兹力大于向左的电场力向右偏转，同理如果电子打在  $a$ ，则  $\alpha$  粒子向右的电场力大于向左的洛伦兹力向右偏转，均会打在  $b$  点；同理电场向右磁场垂直纸面向外时， $\alpha$  粒子受到向右的电场力和洛伦兹力，电子受到向左的电场力和洛伦兹力不能受力平衡打到  $a$  点，故 C 正确 D 错误；

故选 C。

6. 使甲、乙两条形磁铁隔开一段距离，静止于水平桌面上，甲的 N 极正对着乙的 S 极，甲的质量大于乙的质量，两者与桌面之间的动摩擦因数相等。现同时释放甲和乙，在它们相互接近过程中的任一时刻

( )

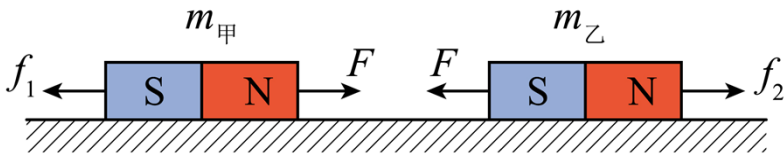


- A. 甲的速度大小比乙的大
- B. 甲的动量大小比乙的小
- C. 甲的动量大小与乙的相等
- D. 甲和乙的动量之和不为零

【答案】BD

【解析】

【详解】对甲、乙两条形磁铁分别做受力分析，如图所示



- A. 根据牛顿第二定律有

$$a_{甲} = \frac{F - \mu m_{甲} g}{m_{甲}}$$

$$a_{乙} = \frac{F - \mu m_{乙} g}{m_{乙}}$$

由于

$$m_{甲} > m_{乙}$$

所以

$$a_{甲} < a_{乙}$$

由于两物体运动时间相同，且同时由静止释放，可得

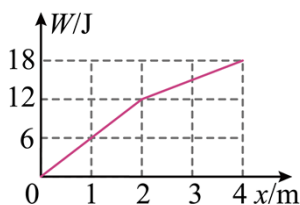
$$v_{甲} < v_{乙}$$

A 错误；

BCD. 对于整个系统而言，由于  $\mu m_{甲} g > \mu m_{乙} g$ ，合力方向向左，合冲量方向向左，所以合动量方向向左，显然甲的动量大小比乙的小，BD 正确、C 错误。

故选 BD。

7. 一质量为 1kg 的物体在水平拉力的作用下，由静止开始在水平地面上沿  $x$  轴运动，出发点为  $x$  轴零点，拉力做的功  $W$  与物体坐标  $x$  的关系如图所示。物体与水平地面间的动摩擦因数为 0.4，重力加速度大小取  $10\text{m/s}^2$ 。下列说法正确的是 ( )



- A. 在  $x = 1\text{m}$  时，拉力的功率为  $6\text{W}$
- B. 在  $x = 4\text{m}$  时，物体的动能为  $2\text{J}$
- C. 从  $x = 0$  运动到  $x = 2\text{m}$ ，物体克服摩擦力做的功为  $8\text{J}$
- D. 从  $x = 0$  运动到  $x = 4$  的过程中，物体的动量最大为  $2\text{kg}\cdot\text{m/s}$

【答案】BC

【解析】

【详解】由于拉力在水平方向，则拉力做的功为

$$W = Fx$$

可看出  $W-x$  图像的斜率代表拉力  $F$ 。

AB. 在物体运动的过程中根据动能定理有

$$W - \mu mgx = \frac{1}{2}mv^2$$

则  $x = 1\text{m}$  时物体的速度为

$$v_1 = 2\text{m/s}$$

$x = 1\text{m}$  时，拉力为

$$F = \frac{\Delta W}{\Delta x} = 6\text{N}$$

则此时拉力的功率

$$P = Fv_1 = 12\text{W}$$

$x = 4\text{m}$  时物体的动能为

$$E_k = 2\text{J}$$

A 错误、B 正确；

C. 从  $x = 0$  运动到  $x = 2\text{m}$ ，物体克服摩擦力做的功为

$$W_f = \mu mgx = 8\text{J}$$

C 正确；

D. 根据  $W-x$  图像可知在  $0-2\text{m}$  的过程中  $F_1 = 6\text{N}$ ， $2-4\text{m}$  的过程中  $F_2 = 3\text{N}$ ，由于物体受到的摩擦力恒为  $f = 4\text{N}$ ，则物体在  $x = 2\text{m}$  处速度最大，且根据选项 AB 分析可知此时的速度

$$v_2 = \sqrt{8}\text{m/s}$$

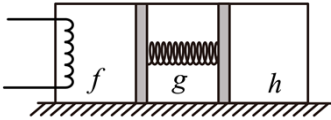
则从  $x = 0$  运动到  $x = 4$  的过程中，物体的动量最大为

$$p = mv = 2\sqrt{2}\text{kg} \cdot \text{m/s}$$

D 错误。

故选 BC。

8. 如图，一封闭着理想气体的绝热汽缸置于水平地面上，用轻弹簧连接的两绝热活塞将汽缸分为  $f$ 、 $g$ 、 $h$  三部分，活塞与汽缸壁间没有摩擦。初始时弹簧处于原长，三部分中气体的温度、体积、压强均相等。现通过电阻丝对  $f$  中的气体缓慢加热，停止加热并达到稳定后（ ）



- A.  $h$  中的气体内能增加
- B.  $f$  与  $g$  中的气体温度相等
- C.  $f$  与  $h$  中的气体温度相等
- D.  $f$  与  $h$  中的气体压强相等

【答案】AD

【解析】

【详解】A. 当电阻丝对  $f$  中的气体缓慢加热时， $f$  中的气体内能增大，温度升高，根据理想气体状态方程可知  $f$  中的气体压强增大，会缓慢推动左边活塞，可知  $h$  的体积也被压缩压强变大，对活塞受力分析，根据平衡条件可知，弹簧弹力变大，则弹簧被压缩。与此同时弹簧对右边活塞有弹力作用，缓慢向右推动左边活塞。故活塞对  $h$  中的气体做正功，且是绝热过程，由热力学第一定律可知， $h$  中的气体内能增加，A 正确；  
 B. 未加热前，三部分中气体的温度、体积、压强均相等，当系统稳定时，活塞受力平衡，可知弹簧处于压缩状态，对左边活塞分析

$$p_f S = F_{\text{弹}} + p_g S$$

则

$$p_f > p_g$$

分别对  $f$ 、 $g$  内的气体分析，根据理想气体状态方程有

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_f V_f}{T_f}$$

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_g V_g}{T_g}$$

由题意可知，因弹簧被压缩，则  $V_f > V_g$ ，联立可得

$$T_f > T_g$$

B 错误；

C. 在达到稳定过程中  $h$  中的气体体积变小，压强变大， $f$  中的气体体积变大。由于稳定时弹簧保持平衡状态，故稳定时  $f$ 、 $h$  中的气体压强相等，根据理想气体状态方程对  $h$  气体分析可知

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_h V_h}{T_h}$$

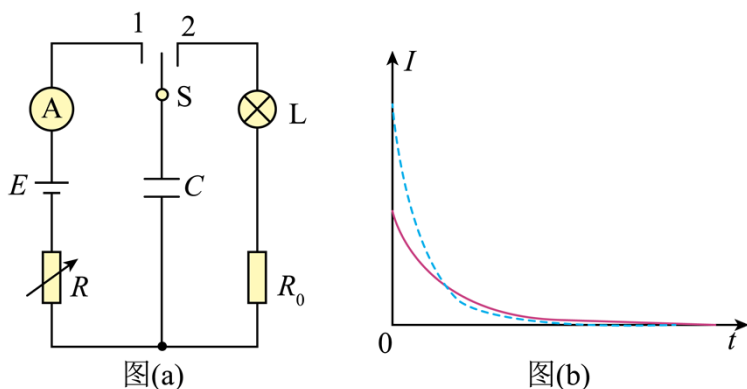
联立可得

$$T_f > T_h$$

C 错误；

D. 对弹簧、活塞及  $g$  中的气体组成的系统分析，根据平衡条件可知， $f$  与  $h$  中的气体压强相等，D 正确。故选 AD。

9. 在“观察电容器的充、放电现象”实验中，所用器材如下：电池、电容器、电阻箱、定值电阻、小灯泡、多用电表、电流表、秒表、单刀双掷开关以及导线若干。



(1) 用多用电表的电压挡检测电池的电压。检测时，红表笔应该与电池的\_\_\_\_\_（填“正极”或“负极”）接触。

(2) 某同学设计的实验电路如图 (a) 所示。先将电阻箱的阻值调为  $R_1$ ，将单刀双掷开关 S 与“1”端相接，记录电流随时间的变化。电容器充电完成后，开关 S 再与“2”端相接，相接后小灯泡亮度变化情况可能是\_\_\_\_\_。（填正确答案标号）

- A. 迅速变亮，然后亮度趋于稳定
- B. 亮度逐渐增大，然后趋于稳定
- C. 迅速变亮，然后亮度逐渐减小至熄灭

(3) 将电阻箱的阻值调为  $R_2 (R_2 > R_1)$ ，再次将开关 S 与“1”端相接，再次记录电流随时间的变化情况。两次得到的电流  $I$  随时间  $t$  变化如图 (b) 中曲线所示，其中实线是电阻箱阻值为\_\_\_\_\_（填“ $R_1$ ”或“ $R_2$ ”）时的结果，曲线与坐标轴所围面积等于该次充电完成后电容器上的\_\_\_\_\_（填“电

压”或“电荷量”。

【答案】 ①. 正极 ②. C ③.  $R_2$  ④. 电荷量

【解析】

【详解】(1) [1]多用电表红表笔流入电流，黑表笔流出电流，故电流表红表笔应该与电池的正极接触；

(2) [2]电容器充电完成后，开始时两极板电量较多，电势差较大，当闭合“2”接入小灯泡，回路立即形成电流，灯泡的迅速变亮；随着时间的积累，两极板电量变少，电势差变小，流过灯泡的电流减小，直至两极板电荷量为零不带电，则无电流流过小灯泡即熄灭，故选 C。

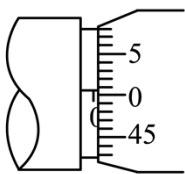
(3) [3]开始充电时两极板的不带电，两极板电势差为零，设电源内阻为  $r$ ，则开始充电时有

$$E = I(R+r)$$

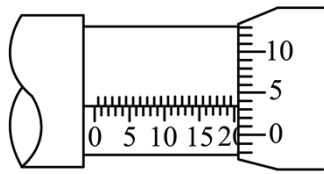
由图像可知开始充电时实线的电流较小，故电路中的电阻较大，因此电阻箱阻值为  $R_2$ ；

[4]图像的物理意义为充电过程中电流随时间的变化图线，故曲线与坐标轴所围面积等于该次充电完成后电容器上的电荷量。

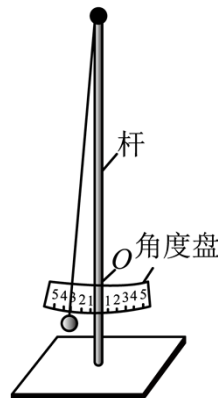
10. 一学生小组做“用单摆测量重力加速度的大小”实验。



图(a)



图(b)



图(c)

(1) 用实验室提供的螺旋测微器测量摆球直径。首先，调节螺旋测微器，拧动微调旋钮使测微螺杆和测砧相触时，发现固定刻度的横线与可动刻度上的零刻度线未对齐，如图 (a) 所示，该示数为

\_\_\_\_\_ mm；螺旋测微器在夹有摆球时示数如图 (b) 所示，该示数为\_\_\_\_\_ mm，则摆球的直径为\_\_\_\_\_ mm。

\_\_\_\_\_ mm。

(2) 单摆实验的装置示意图如图 (c) 所示，其中角度盘需要固定在杆上的确定点  $O$  处，摆线在角度盘上所指的示数为摆角的大小。若将角度盘固定在  $O$  点上方，则摆线在角度盘上所指的示数为  $5^\circ$  时，实际摆角

\_\_\_\_\_  $5^\circ$  (填“大于”或“小于”)。

(3) 某次实验所用单摆的摆线长度为  $81.50\text{cm}$ ，则摆长为\_\_\_\_\_ cm。实验中观测到从摆球第 1 次经过最低点到第 61 次经过最低点的时间间隔为  $54.60\text{s}$ ，则此单摆周期为\_\_\_\_\_ s，该小组测得的重力加

速度大小为\_\_\_\_\_m/s<sup>2</sup> (结果均保留3位有效数字,  $\pi^2$ 取9.870)

【答案】 ①. 0.006##0.007##0.008 ②. 20.034##20.033##20.035##20.032 ③.  
20.027##20.028##20.029 ④. 大于 ⑤. 82.5 ⑥. 1.82 ⑦. 9.83

【解析】

【详解】(1) [1]测量前测微螺杆与和测砧相触时, 图(a)的示数为

$$d_0 = 0\text{mm} + 0.7 \times 0.01\text{mm} = 0.007\text{mm}$$

[2]螺旋测微器读数是固定刻度读数(0.5mm的整数倍)加可动刻度(0.5mm以下的小数)读数, 图中读数为

$$d_1 = 20\text{mm} + 3.4 \times 0.01\text{mm} = 20.034\text{mm}$$

[3]则摆球的直径为

$$d = d_1 - d_0 = 20.027\text{mm}$$

(2) [4]角度盘的大小一定, 即在规定的位位置安装角度盘, 测量的摆角准确, 但将角度盘固定在规定位置上方, 即角度盘到悬挂点的距离变短, 同样的角度, 摆线在刻度盘上扫过的弧长变短, 故摆线在角度盘上所指的示数为 $5^\circ$ 时, 实际摆角大于 $5^\circ$ ;

(3) [5]单摆的摆线长度为81.50 cm, 则摆长为

$$l = l_0 + \frac{d}{2} = 81.50\text{cm} + \frac{2.0027}{2}\text{cm} = 82.5\text{cm}$$

结果保留三位有效数字, 得摆长为82.5cm;

[6]一次全振动单摆经过最低点两次, 故此单摆的周期为

$$T = \frac{2t}{N} = \frac{54.60}{30}\text{s} = 1.82\text{s}$$

[7]由单摆的周期表达式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 得, 重力加速度

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} = 9.83\text{m/s}^2$$

11. 将扁平的石子向水面快速抛出, 石子可能会在水面上一跳一跳地飞向远方, 俗称“打水漂”。要使石子从水面跳起产生“水漂”效果, 石子接触水面时的速度方向与水面的夹角不能大于 $\theta$ 。为了观察到“水漂”, 一同学将一石子从距水面高度为 $h$ 处水平抛出, 抛出速度的最小值为多少? (不计石子在空中飞行时的空气阻力, 重力加速度大小为 $g$ )

【答案】  $\frac{\sqrt{2gh}}{\tan \theta}$

【解析】

【详解】石子做平抛运动，竖直方向做自由落体运动，则有

$$2gh = v_y^2$$

可得落到水面上时的竖直速度

$$v_y = \sqrt{2gh}$$

由题意可知

$$\frac{v_y}{v_0} \leq \tan \theta$$

即

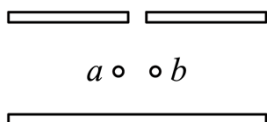
$$v_0 \geq \frac{\sqrt{2gh}}{\tan \theta}$$

石子抛出速度的最小值为  $\frac{\sqrt{2gh}}{\tan \theta}$ 。

12. 密立根油滴实验的示意图如图所示。两水平金属平板上下放置，间距固定，可从上板中央的小孔向两板间喷入大小不同、带电量不同、密度相同的小油滴。两板间不加电压时，油滴  $a$ 、 $b$  在重力和空气阻力的作用下竖直向下匀速运动，速率分别为  $v_0$ 、 $\frac{v_0}{4}$ ；两板间加上电压后（上板为正极），这两个油滴很快达到相同的速率  $\frac{v_0}{2}$ ，均竖直向下匀速运动。油滴可视为球形，所受空气阻力大小与油滴半径、运动速率成正比，比例系数视为常数。不计空气浮力和油滴间的相互作用。

(1) 求油滴  $a$  和油滴  $b$  的质量之比；

(2) 判断油滴  $a$  和油滴  $b$  所带电荷的正负，并求  $a$ 、 $b$  所带电荷量的绝对值之比。



【答案】(1) 8:1；(2) 油滴  $a$  带负电，油滴  $b$  带正电；4:1

【解析】

【详解】(1) 设油滴半径  $r$ ，密度为  $\rho$ ，则油滴质量

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$$

则速率为  $v$  时受阻力

$$f = krv$$

则当油滴匀速下落时

$$mg = f$$

解得

$$r = \sqrt{\frac{3kv}{4\pi\rho g}} \propto \sqrt{v}$$

可知

$$\frac{r_a}{r_b} = \sqrt{\frac{v_0}{\frac{1}{4}v_0}} = 2$$

则

$$\frac{m_a}{m_b} = \frac{r_a^3}{r_b^3} = \frac{8}{1}$$

(2) 两板间加上电压后 (上板为正极), 这两个油滴很快达到相同的速率  $\frac{v_0}{2}$ , 可知油滴  $a$  做减速运动, 油滴  $b$  做加速运动, 可知油滴  $a$  带负电, 油滴  $b$  带正电; 当再次匀速下落时, 对  $a$  由受力平衡可得

$$|q_a|E + f_a = m_a g$$

其中

$$f_a = \frac{v_0}{2} m_a g = \frac{1}{2} m_a g$$

对  $b$  由受力平衡可得

$$f_b - q_b E = m_b g$$

其中

$$f_b = \frac{v_0}{1} m_b g = 2m_b g$$

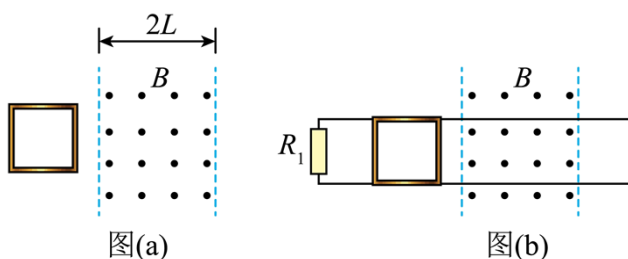
联立解得

$$\left| \frac{q_a}{q_b} \right| = \frac{m_a}{2m_b} = \frac{4}{1}$$

13. 一边长为  $L$ 、质量为  $m$  的正方形金属细框，每边电阻为  $R_0$ ，置于光滑的绝缘水平桌面（纸面）上。宽度为  $2L$  的区域内存在方向垂直于纸面的匀强磁场，磁感应强度大小为  $B$ ，两虚线为磁场边界，如图（a）所示。

（1）使金属框以一定的初速度向右运动，进入磁场。运动过程中金属框的左、右边框始终与磁场边界平行，金属框完全穿过磁场区域后，速度大小降为它初速度的一半，求金属框的初速度大小。

（2）在桌面上固定两条光滑长直金属导轨，导轨与磁场边界垂直，左端连接电阻  $R_1 = 2R_0$ ，导轨电阻可忽略，金属框置于导轨上，如图（b）所示。让金属框以与（1）中相同的初速度向右运动，进入磁场。运动过程中金属框的上、下边框处处与导轨始终接触良好。求在金属框整个运动过程中，电阻  $R_1$  产生的热量。



【答案】（1） $\frac{B^2 L^3}{m R_0}$ ；（2） $\frac{3 B^4 L^6}{25 m R_0^2}$

【解析】

【详解】（1）金属框进入磁场过程中有

$$\bar{E} = BL \frac{L}{t}$$

则金属框进入磁场过程中流过回路的电荷量为

$$q_1 = \frac{\bar{E}}{4R_0} t = \frac{BL^2}{4R_0}$$

则金属框完全穿过磁场区域的过程中流过回路的电荷量为

$$q = \frac{BL^2}{2R_0}$$

且有

$$-BqL = \frac{mv_0}{2} - mv_0$$

联立有

$$v_0 = \frac{B^2 L^3}{mR_0}$$

(2) 设金属框的初速度为  $v_0$ ，则金属框进入磁场时的末速度为  $v_1$ ，向右为正方向。由于导轨电阻可忽略，此时金属框上下部分被短路，故电路中的总电

$$R_{\text{总}} = R_0 + \frac{2R_0 \cdot R_0}{2R_0 + R_0} = \frac{5R_0}{3}$$

再根据动量定理有

$$-\frac{B^2 L^3}{R_{\text{总}}} = mv_1 - mv_0$$

解得

$$v_1 = \frac{2B^2 L^3}{5mR_0}$$

则在此过程中根据能量守恒有

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = Q_1 + \frac{1}{2}mv_1^2$$

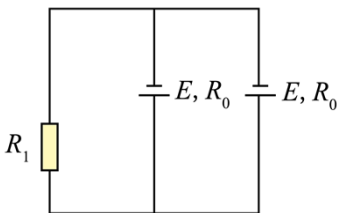
解得

$$Q_1 = \frac{21B^4 L^6}{50mR_0^2}$$

其中

$$Q_{R_1} = \frac{2}{15}Q_1 = \frac{7B^4 L^6}{125mR_0^2}$$

此后线框完全进入磁场中，则线框左右两边均作为电源，且等效电路图如下



则此时回路的总电阻

$$R'_{\text{总}} = 2R_0 + \frac{R_0}{2} = \frac{5R_0}{2}$$

设线框刚离开磁场时的速度为  $v_2$ ，再根据动量定理有

$$-\frac{B^2 L^3}{R'_{\text{总}}} = mv_2 - mv_1$$

解得

$$v_2 = 0$$

则说明线框刚离开磁场时就停止运动了，则再根据能量守恒有

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = Q_2$$

其中

$$Q'_{R_1} = \frac{4}{5}Q_2 = \frac{8B^4L^6}{125mR_0^2}$$

则在金属框整个运动过程中，电阻  $R_1$  产生的热量

$$Q_{R_1\text{总}} = Q_{R_1} + Q'_{R_1} = \frac{3B^4L^6}{25mR_0^2}$$

