



专题 4 电磁感应

模型 1 ▶ 感生模型

1. **C** 【解析】根据法拉第电磁感应定律可得 $e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B \cdot S}{\Delta t} =$

$\pi r^2 B_0 \omega \cos \omega t$, 则当 $t = \frac{\pi}{2\omega}$ 时, 硅钢片中感应电动势最小, **A、B**

错误; 根据电阻定律得 $R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{2\pi r}{hd}$, 硅钢片中感应电流的

有效值为 $I_{\text{有}} = \frac{E_{\text{有}}}{R} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} \pi r^2 B_0 \omega}{\rho \frac{2\pi r}{hd}} = \frac{\sqrt{2} r \omega B_0 h d}{4\rho}$, **C 正确**; 硅钢片的发

热功率为 $P = I_{\text{有}}^2 R = \left(\frac{\sqrt{2} r \omega B_0 h d}{4\rho} \right)^2 \cdot \frac{2\pi r \rho}{hd} = \frac{\pi h d r^3 B_0^2 \omega^2}{4\rho}$, **D 错误**.

2. **BD** 【解析】小球带正电, 其沿逆时针方向运动, 所以电流方向为逆时针, 由楞次定律和安培定则可知, 磁场的磁感应强度增加, **A 错误**; 设细管所处位置的场强大小为 E , 由动能定理有 $qE \cdot \theta R = E_k - 0$, 整理有 $E_k = qER\theta$, 结合题图乙可知,

知, $E_k - \theta$ 图像的斜率 $k = \frac{E_0}{\pi} = qER$, 解得 $E = \frac{E_0}{\pi qR}$, **B 正确**; 感生

电动势 $E_{\text{感}} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$, $\Delta \Phi = \Delta B \cdot S = \Delta B \cdot \pi R^2$, 由题图乙可知, 当

$\theta = 2\pi$ 时, 小球的动能 $E_{k1} = 2E_0$, 小球转过的圆心角 θ 从 0 到

2π 过程中由动能定理有 $qE_{\text{感}} = E_{k1} - 0$, 整理有 $\frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{2E_0}{q\pi R^2}$, **C**

错误; 小球在运动一圈过程中其受到的电场力大小不变, 有

$qE = ma$, 结合之前的分析有 $a = \frac{E_0}{m\pi R}$, 则运动一圈过程中对小

球有 $2\pi R = \frac{1}{2}at^2$, 解得 $t = 2\pi R \sqrt{\frac{m}{E_0}}$, **D 正确**.

3. **AC** 【解析】由题图乙可知, $0 \sim 1$ s 内只有 B_2 随时间均匀减小, 根据楞次定律和安培定则可知, 线框中的感应电流为逆时针方向, 根据左手定则可知, 左右两边受到的安培力方向均向右, 而上下两个边受到的安培力恰好等大反向, 如图所示, 故整个线框受到的安培力的合力水平向右, 由受力平衡可知, $t = 0.5$ s 时, 线框受到水平向左的摩擦力, **A 正确**; 由题图乙可知, $0 \sim 1$ s 内只有 B_2 随时间均匀减小, 根据法拉第电

磁感应定律可得电动势为 $E_1 = \left| \frac{\Delta B_2}{\Delta t_1} \right| \times \frac{3}{4} L^2 = \frac{0.4 - 0.3}{1} \times \frac{3}{4} \times$

$2^2 \text{ V} = 0.3 \text{ V}$ (关键: 面积应该为有磁场变化的有效面积), 则

线框中的感应电流为 $I_1 = \frac{E_1}{R} = 0.03 \text{ A}$, **B 错误**; 根据楞次定律

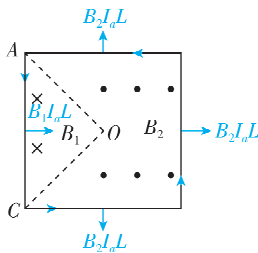
的推论增反减同, 线框内感应电流的磁场方向始终为垂直纸

面向外, 可得 $1 \sim 4$ s 内线框中的感应电流方向 (逆时针) 始终

不变, 根据左手定则可知, 线框左右两边受到的安培力均水平



向右,且两个磁场都是均匀变化,产生的电动势不变,故感应电流也不变,而线框受到的安培力大小为 $F = (B_1 + B_2)IL$,由图像可得任意时刻 $B_1 + B_2 = 0.4 \text{ T}$,恒定不变,可知 $t = 2.5 \text{ s}$ 和 $t = 3.5 \text{ s}$ 时线框受到的安培力大小相等、方向相同, **C 正确**; $0 \sim 1 \text{ s}$ 内线框中产生的焦耳热为 $Q_1 = I_1^2 R t_1 = 0.03^2 \times 10 \times 1 \text{ J} = 0.009 \text{ J}$, $1 \sim 4 \text{ s}$ 内根据法拉第电磁感应定律可得电动势为 $E_2 = \frac{\Delta B_1}{\Delta t_2} \times \frac{1}{4} L^2 + \left| \frac{\Delta B_2'}{\Delta t_2} \right| \times \frac{3}{4} L^2 = \frac{0.3}{3} \times \frac{1}{4} \times 2^2 \text{ V} + \frac{0.3}{3} \times \frac{3}{4} \times 2^2 \text{ V} = 0.4 \text{ V}$, 线框中的感应电流为 $I_2 = \frac{E_2}{R} = 0.04 \text{ A}$, $1 \sim 4 \text{ s}$ 内线框中产生的焦耳热为 $Q_2 = I_2^2 R t_2 = 0.04^2 \times 10 \times 3 \text{ J} = 0.048 \text{ J}$, 则 $0 \sim 4 \text{ s}$ 内线框中产生的焦耳热为 $Q = Q_1 + Q_2 = 0.057 \text{ J}$, **D 错误**.



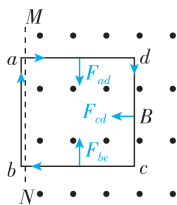
4. (1) $\frac{kL^2}{R}$, 沿顺时针方向 ($a \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$)

$$(2) F = (B_0 + kt) \frac{kL^3}{R} \quad (3) \frac{n(B_0 + kt_0)kL^3}{R(nm + M)}$$

试题解构

a. 感应电流分析: 磁感应强度随时间均匀增大, 根据楞次定律和安培定则, 线框内产生顺时针感应电流.

b. 受力分析: 第(2)问, 线框保持静止, 受到随时间变化的安培力, 如图所示, 安培力的合力水平向左, 水平外力与安培力的合力等大反向.



第(3)问中线框为 n 匝, 撤去外力时, 线框只受到安培力的作用.

【解析】(1) 线框中的感应电动势 $E = \frac{\Delta B}{\Delta t} L^2 = kL^2$, 1分

感应电流 $I = \frac{E}{R} = \frac{kL^2}{R}$, 1分

根据楞次定律和安培定则可知感应电流沿顺时针方向, 即 $a \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 1分

(2) 设水平外力大小为 F , 由于线框静止, 则所加的水平外力与安培力平衡, 有 $F = F_B$, 1分

安培力 $F_B = BIL$, 1分

解得 $F = (B_0 + kt) \frac{kL^3}{R}$ 1分

(3) n 匝线框 $t = t_0$ 时刻产生的感应电动势



$$E_{\text{总}} = n \frac{\Delta B}{\Delta t} L^2 = nkL^2, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{线框中的电流 } I' = \frac{E_{\text{总}}}{nR} = \frac{kL^2}{R}, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$t=t_0 \text{ 时刻线框受到的安培力 } F_{Bn} = nBI'L = n(B_0 + kt_0) \frac{kL^3}{R},$$

$\dots\dots\dots 1 \text{ 分}$

设线框的加速度大小为 a' , 根据牛顿第二定律有

$$F_{Bn} = (nm + M)a', \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{解得 } a' = \frac{n(B_0 + kt_0)kL^3}{R(nm + M)}. \dots\dots\dots 2 \text{ 分}$$

$$5. (1) \pi(B_{10}r^2 + B_{20}R^2 - B_{20}r^2) \quad (2) \frac{k_1r^2 + k_2R^2 - k_2r^2}{2R}$$

$$(3) k_2 = \frac{r^2}{R^2 + r^2} k_1$$

试题解构

a. 磁通量分析: 电子轨道内部的磁通量为匀强磁场 B_1 和匀强磁场 B_2 的磁通量的叠加, $\Phi = B_1S_1 + B_2S_2$.

b. 运动分析: 电子沿着半径为 R 的圆轨道运动时, 径向由洛伦兹力提供向心力, 切向加速度大小不变, 速率随时间均匀增加.

【解析】 (1) 由电子轨道方向结合左手定则可知, 匀强磁场 B_2 方向垂直纸面向外, 则 $t=0$ 时刻, 磁通量 $\Phi = B_{10}S_1 + B_{20}S_2$,

$\dots\dots\dots 1 \text{ 分}$

$$\text{其中 } S_1 = \pi r^2, S_2 = \pi R^2 - \pi r^2, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{解得 } \Phi = \pi(B_{10}r^2 + B_{20}R^2 - B_{20}r^2). \dots\dots\dots 2 \text{ 分}$$

(2) 由法拉第电磁感应定律得感生电动势

$$\varepsilon = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \pi(k_1r^2 + k_2R^2 - k_2r^2), \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

由题中已知电动势的定义得感生电动势 $\varepsilon = E \cdot 2\pi R$,

$$\dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{联立可得电场强度的大小 } E = \frac{k_1r^2 + k_2R^2 - k_2r^2}{2R}. \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

(3) 电子在同一轨道运动时, 洛伦兹力提供向心力, 有

$$evB_2 = m \frac{v^2}{R}, \dots\dots\dots 2 \text{ 分}$$

$$\text{解得 } B_2 = \frac{mv}{eR},$$

$$\text{则 } \Delta B_2 = \frac{\Delta(mv)}{eR} = \frac{m}{eR} \frac{\Delta v}{\Delta t} \cdot \Delta t = \frac{ma}{eR} \cdot \Delta t = \frac{F}{eR} \cdot \Delta t, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

电子沿固定轨道运动时, 电场力提供电子沿切线方向的加速度, 即 $F = ma = eE$,

$$\text{变形得 } \frac{\Delta B_2}{\Delta t} = k_2 = \frac{k_1r^2 + k_2R^2 - k_2r^2}{2R^2}, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$



解得 $k_2 = \frac{r^2}{R^2 + r^2} k_1$ 1 分

模型 2 ▶ 动生模型

考点 1 单杆问题

6. **D** 【解析】由 $P = Fv$ 可知 $F = P \cdot \frac{1}{v}$, 结合图乙可知拉力的功率恒为 4 W, **A 错误**; 杆匀速时, 根据受力平衡, 拉力大小等于安培力大小, 有 $F = BIL$, $I = \frac{E}{R+r}$, $E = BLv_m$, $P = Fv_m$, 联立解得 $v_m = 4 \text{ m/s}$, **B 错误**; 当速度大小为 3 m/s 时, 由牛顿第二定律有 $F_1 - F_{\text{安}} = ma$, 结合 $P = F_1 v_1$, $F_{\text{安}} = BI_1 L$, $I_1 = \frac{E_1}{R+r}$, $E_1 = BLv_1$, 解得 $a = \frac{35}{12} \text{ m/s}^2 < 3 \text{ m/s}^2$, **C 错误**; 由动能定理有 $Pt - W_{\text{安}} = \frac{1}{2}mv_m^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$, $2Q_R = W_{\text{安}}$, 解得 $Q_R = 3.25 \text{ J}$, **D 正确**.

7. **B** 【解析】根据右手定则可知, 通过定值电阻的电流方向由 a 到 b , **A 错误**; 整个金属棒都在磁场中切割磁感线, 故棒两端产生的感应电动势大小不变, 为 $E = \frac{1}{2}B(2l)^2\omega = 2Bl^2\omega$, **B 正确**; 当金属棒两端都接触到导轨时, 回路的电动势最大, 则有 $E_m = \frac{1}{2}B(2l)^2\omega = 2Bl^2\omega$, 则最大电流为 $I_m = \frac{E_m}{R} = \frac{2Bl^2\omega}{R}$, **C 错误**; 金属棒转过 60° 的过程中, 通过定值电阻

的电荷量为 $q = \bar{I}\Delta t = \frac{\bar{E}}{R}\Delta t = \frac{\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}{R}\Delta t = \frac{B\Delta S}{R}$, 又 $\Delta S = \frac{1}{2}l \cdot \sqrt{3}l = \frac{\sqrt{3}}{2}l^2$, 联立解得 $q = \frac{\sqrt{3}Bl^2}{2R}$, **D 错误**.

8. **BD** 【解析】洛伦兹力始终与电荷的运动方向垂直, 所以洛伦兹力永不做功, **A 错误**; 第 1 根导体棒刚进入磁场时, 切割磁感线产生的感应电动势 $E = BLv_0$, 此时外电路仅有定值电阻 R , 且导体棒的电阻也为 R , 根据闭合电路欧姆定律, 定值电阻 R 两端的电压 $U = \frac{R}{R+R}E = \frac{BLv_0}{2}$ (关键: 导体棒是电源, 定值电阻 R 两端的电压是路端电压), **B 正确**; 第 n 根导体棒进入磁场到速度减为零的过程中, 根据动量定理有 $-BIL\Delta t = 0 - mv_0$, 解得流过第 n 根导体棒的总电荷量 $q_n = \bar{I}\Delta t = \frac{mv_0}{BL}$, 可知, 每根导体棒进入磁场到速度减为零的过程

中, 流经此导体棒的电荷量均为 $\frac{mv_0}{BL}$, 当第 n 根导体棒运动时, 已有 $n-1$ 根相同的导体棒锁定在导轨上, 此时外电路相当于 n 个阻值为 R 的支路并联, 由于并联电路的分流作

用,流过定值电阻 R 的电荷量 $q_{Rn} = \frac{1}{n}q_n = \frac{mv_0}{nBL}$ (关键:并联电

路各支路电阻相等,电流均分,则电荷量均分),因此,从第 1 根导体棒进入磁场到第 4 根导体棒速度减为零的过程中,定值电阻 R 上通过的总电荷量 $q_R = q_{R1} + q_{R2} + q_{R3} + q_{R4} =$

$\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4}\right) \frac{mv_0}{BL} = \frac{25mv_0}{12BL}$, C 错误;第 n 根导体棒运动的过

程中,系统动能减少,转化为焦耳热,总热量 $Q_n = \frac{1}{2}mv_0^2$,此时

外电路的总电阻 $R_{\text{总}} = \frac{R}{n}$,外电路产生的热量 $Q_{\text{总}} = \frac{R_{\text{总}}}{R_{\text{总}} + R}Q_n =$

$\frac{1}{n+1}Q_n$,由于外电路是由 n 个阻值为 R 的支路并联构成,各

个支路产生的热量相等,所以定值电阻 R 上产生的热量

$Q_{Rn} = \frac{1}{n}Q_{\text{总}} = \frac{1}{n(n+1)}Q_n = \frac{1}{2}mv_0^2 \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right)$,从第 1 根导体

棒进入磁场到第 2 026 根导体棒速度减为零的过程中,定值

电阻 R 上产生的总热量 $Q_R = \sum_{n=1}^{2026} Q_{Rn} = \frac{1}{2}mv_0^2 \left(1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \right.$

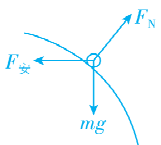
$\left. \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{2026} - \frac{1}{2027} \right) = \frac{1}{2}mv_0^2 \left(1 - \frac{1}{2027} \right) = \frac{1013mv_0^2}{2027}$, D

正确.

9. (1) 4.2 m/s 14.7 V (2) 26.4 J (3) 5.4 C

试题解构

- a. 受力分析: 开关断开时,导体棒在运动中只受到重力,与导轨间没有弹力作用;在闭合开关后,导体棒在导轨上运动受重力、弹力和安培力,受力示意图如图所示.



- b. 运动分析: 开关断开时,导体棒做平抛运动,轨迹恰好与导轨重合;在闭合开关后,导体棒在导轨上运动,做变速曲线运动,但不是平抛运动.

- c. 功能分析: 开关断开时,只有重力对导体棒做功;在闭合开关后,导体棒在导轨上运动,有重力和安培力做功,可利用动能定理或者能量守恒定律来分析此过程.

【解析】(1) 开关断开时,导体棒做平抛运动,设导体棒到达

EH 时速度与水平方向的夹角为 θ ,则有 $\cos \theta = \frac{v_0}{v_1} = \frac{3}{5}$,

..... 1 分

开关闭合时,导体棒仍然沿导轨运动,到达 EH 位置时其水平分速度大小为 $v_x = v_2 \cos \theta = 4.2 \text{ m/s}$,

故导体棒运动到 EH 时产生的感应电动势大小为

$E = BLv_x = 21 \text{ V}$,

导体棒两端的电势差为 $U = \frac{ER}{R+r} = 14.7 \text{ V}$ 1 分

(2) 开关断开时,导体棒运动到 EH 时,竖直方向的分速度大



小为 $v_y = \sqrt{v_1^2 - v_0^2} = 12 \text{ m/s}$, 1 分

故导体棒下落高度为 $h = \frac{v_y^2}{2g} = 7.2 \text{ m}$, 1 分

开关闭合时,导体棒运动到 EH 过程中,由能量守恒定律可得

$$mgh + \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + Q, \text{ 1 分}$$

解得回路产生的焦耳热为 $Q = 88 \text{ J}$, 1 分

导体棒中产生的焦耳热为 $Q_r = \frac{r}{R+r}Q = 26.4 \text{ J}$ 1 分

(3) 开关断开时,导体棒运动到 EH 过程中下落高度为

$$h = \frac{1}{2}gt^2 = 7.2 \text{ m}, \text{ 1 分}$$

可得 $t = 1.2 \text{ s}$, 1 分

导体棒的水平位移为 $x = v_0 t = 10.8 \text{ m}$, 1 分

则开关闭合,导体棒运动到 EH 过程中,通过导体棒的总电荷

$$\text{量为 } q = \bar{I}\Delta t = \frac{\bar{E}}{r+R}\Delta t = \frac{\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}{r+R}\Delta t = \frac{BLx}{R+r} = 5.4 \text{ C}. \text{ 2 分}$$

10. (1) 20 V (2) 1 C (3) $(5\pi - 0.2) \text{ J}$ (3) 1 m/s

试题解构

a. 受力分析: 金属棒在圆弧导轨上时, 受到竖直向下的重力, 沿半径指向圆心的弹力, 水平向左的安培力, 还有外力; 在直导轨上时, 金属棒水平方向只受到水平向左的安培力的作用, 且安培力逐渐减小, 竖直方向上受力平衡.

b. 运动分析: 金属棒在圆弧导轨上做匀速圆周运动; 在直导轨上, S 接通 2 时, 金属棒先做加速度逐渐减小的减速运动, 最后做匀速运动.

c. 电路分析: 金属棒在圆弧导轨上运动时, 金属棒为无内阻电源, 外电路仅为定值电阻; 在直导轨上, 金属棒相当于电源给电容器充电, 当金属棒切割磁感线产生的电动势与电容器两端电压相等时, 金属棒开始做匀速运动, 电路达到稳定时, 金属棒上无电流.

d. 功能分析: 金属棒在圆弧导轨上运动时, 动能不变, 总功之和为 0.

【解析】(1) 金属棒 MN 运动至 bb' 时, 电动势 $E_1 = BLv_0$,

..... 1 分

解得 $E_1 = 20 \text{ V}$ 1 分

(2) 金属棒 MN 从 aa' 运动至 bb' 的过程中, 平均电动势

$$\bar{E} = \frac{\Delta\Phi}{t}, \text{ 1 分}$$

平均电流 $\bar{I} = \frac{\bar{E}}{R}$, 1 分

通过定值电阻 R 的电荷量 $q = \bar{I}t = \frac{\Delta\Phi}{R} = \frac{BLr}{R} = 1 \text{ C}$, 1 分



设下滑过程中金属棒速度方向与竖直方向夹角为 θ , 瞬时感应电动势为 $E = BLv_0 \sin \theta$, 1 分

由动能定理有 $mgr - W_{\text{安}} + W = 0$, 2 分

其中 $W_{\text{安}} = \frac{\left(\frac{E_m}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} \cdot \frac{2\pi r}{4v_0}$ (关键: 电动势瞬时值表达式符合正

弦交流电特征, 其最大值是有效值的 $\sqrt{2}$ 倍), $E_m = BLv_0$,

..... 2 分

解得 $W = (5\pi - 0.2) \text{ J}$ 1 分

(3) 金属棒在水平光滑足够长的直导轨运动过程中, 先对电容器充电, 最终金属棒两端电动势大小等于电容器两端电压, 即 $BLv = U$, 1 分

又 $U = \frac{q'}{C}$, 1 分

对金属棒, 由动量定理有 $-BI'Lt' = -BLq' = mv - mv_0$, ... 2 分

解得 $v = \frac{mv_0}{m + B^2 L^2 C} = 1 \text{ m/s}$ 1 分

11. (1) $\frac{mgR}{EL}$ (2) (i) $\frac{2E^2}{mgR}$ (ii) $\frac{2E^2 t}{R} - \frac{10E^4}{mg^2 R^2}$

试题解构

a. 受力分析: 开关接“1”时 ab 静止, 处于磁场中受安培力, 受轻绳拉力, 拉力大小等于重物的重力大小.

b. 运动分析: 开关接“2”后, 重物通过轻绳拉着 ab 运动, 切割磁感线, 产生感应电动势, 与电阻构成闭合回路, 速度逐渐增大, 安培力逐渐增大, 加速度减小, 直到安培力与重物重力大小相等, 电流稳定.

c. 做功分析: 轻绳对重物和 ab 做功的大小相等, 一个正功一个负功, 分析重物运动过程的功能关系可计算做功.

【解析】(1) 开关 S 接到“1”, 设电流为 I , 有 $E = IR$, ... 1 分

ab 静止不动, 满足 $BIL = mg$, 1 分

解得 $B = \frac{mgR}{EL}$ 1 分

(2) (i) 开关 S 接到“2”, 设稳定时电流为 I_1 , ab 速度大小为 v , ab 切割磁感线产生的电动势为 $E_1 = BLv$, 1 分

又 $E_1 = 2I_1 R$, 1 分

安培力大小等于重物重力大小, 即 $BI_1 L = mg$, 1 分

解得 $v = \frac{2E^2}{mgR}$ 1 分

(ii) 设轻绳拉力大小为 F , 时间 t 内 ab 的位移大小为 s , 在位移 x 处速度大小为 v_x , 对 ab 由动量定理得

$\left(F - \frac{B^2 L^2 v_x}{2R}\right) \Delta t = m \Delta v_x$, 2 分

对重物由动量定理得 $(mg - F) \Delta t = m \Delta v_x$, 1 分

又 $s = \sum v_x \Delta t$, $\sum \Delta t = t$, $v = \sum \Delta v_x$, 1 分

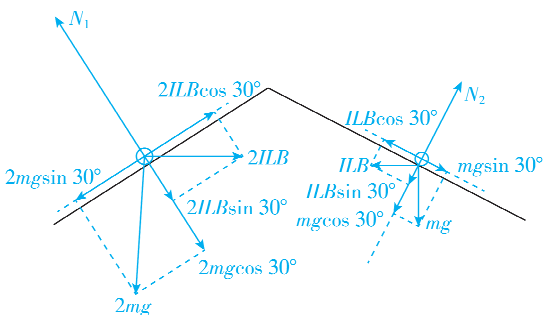
可得 $mgt - \frac{B^2 L^2 s}{2R} = 2mv$, 2 分

时间 t 内, 轻绳对 ab 做的功为 W , 轻绳对重物做的功为 $-W$, 对重物由动能定理得 $mgs - W = \frac{1}{2}mv^2$, 2 分

解得 $W = \frac{2E^2 t}{R} - \frac{10E^4}{mg^2 R^2}$ 1 分

考点 2 双杆问题

12. **AB** 【解析】两导体棒均向下运动, 穿过闭合回路的磁通量增加, 根据楞次定律和安培定则可知回路中的电流方向为 $abcd$, **A 正确**; 如图, 对两导体棒受力分析, 对 ab 有 $2mg \cdot \sin 30^\circ - 2ILB \cos 30^\circ = 2ma_1$, 对 cd 有 $mg \sin 30^\circ - ILB \cdot \cos 30^\circ = ma_2$, 初始时两导体棒均加速, 闭合回路的电动势增大, 电流增大, 导体棒受到的安培力增大, 导体棒的加速度减小, 最终加速度为零, 此时 $I = \frac{mg \sin 30^\circ}{LB \cos 30^\circ} = \frac{\sqrt{3}mg}{3LB}$, **B 正确**; 由 B 项分析可知两导体棒加速阶段加速度大小之比为 $a_1 : a_2 = 1 : 1$, 最终加速度均为零, **C 错误**; 由前面分析可知, 两导体棒的速度大小始终相等, 但两部分磁场的磁感应强度大小为两倍的关系, 根据公式 $E = BLv$ 可知, 两导体棒产生的电动势应为两倍的关系, **D 错误**.



13. **AC** 【解析】设磁感应强度大小为 B , 导轨宽为 L , 电路中的总电阻为 R , 则根据法拉第电磁感应定律有 $E = BLv$, 所以电路中感应电流的表达式为 $I = \frac{E}{R} = \frac{BLv}{R}$, 从 $I-t$ 图像分析可知, 从 PQ 棒进入磁场开始计时, $0 \sim t_1$ 时间内回路中电流不变, 说明 PQ 棒进入磁场后先做匀速直线运动, 其加速度为 0, **A 正确**; 由于两个导体棒从同一位置由静止释放, 所以 MN 棒进入磁场时的速度与 PQ 棒进入磁场时的速度相同 (关键: 同位置释放, 同样的运动过程), 若 MN 棒刚进入磁场时, PQ 棒已经离开磁场, 则从 t_2 时刻开始电流应该为反向的 I_0 且保持不变, 与题图 (b) 不符, 若 MN 棒刚进入磁场时, PQ 棒还在磁场中, 由于两个导体棒共速, 此时回路中无感应电流, 导体棒不受安培力作用, 所以加速度相同, 均为 $g \sin \alpha$, 所以两个导体棒同时加速, 速度保持相同, 当 PQ 棒离开磁场后, 此时 MN 棒的速度大于刚进入磁场时的速

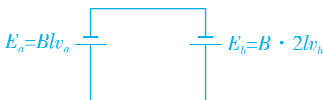


度,受到的安培力大于重力沿导轨平面向下的分力,所以开始减速,则电流逐渐减小,与题图(b)相符合,所以 MN 棒刚进入磁场时,仍处于加速过程,即加速度不为 0, **B 错误**; $I-t$ 图像与横轴围成的面积表示通过导体横截面的电荷量 q ,根据法拉第电磁感应定律有 $q = \bar{I} \cdot t = \frac{\bar{E}}{R} \cdot t = \frac{\Delta\Phi}{R}$, 由于两棒均在磁场内时,保持相对静止,所以 $0 \sim t_1$ 和 $t_2 \sim t_3$ 时间段内,磁通量的增加量和减少量相等(关键: $\Delta\Phi = B\Delta S$), 所以通过导体横截面的电荷量也相等,所以有 $S_1 = S_2$, **C 正确**; 将 $0 \sim t_1$ 、 $t_2 \sim t_3$ 两段时间分别进行微元分割,对应的每一小段时间内,回路产生的热量为 $\Delta Q = I^2 R \Delta t = IR \Delta q$, 由于两段时间内电荷量 q 相同,而 $t_2 \sim t_3$ 时间内有超过 I_0 的电流,所以整个过程中 Q_2 更大, **D 错误**.

14. BD

试题解构

a. 电路分析: 两个导体棒均切割磁感线,都可以看作电源,但是 b 的初速度大于 a 的初速度,且 b 的切割长度大于 a 的切割长度,则 b 产生的电动势大于 a 产生的电动势,等效电路如图所示,回路中总电动势为 $E = 2Blv_b - Blv_a$.



b. 受力及运动分析: 两个导体棒受到的安培力大小不相等, b 做减速运动, a 做加速运动.

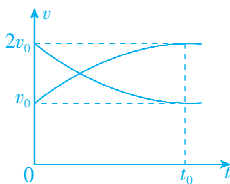
c. 临界分析: 当两个导体棒产生的电动势相等时,两个导体棒均做匀速运动,电路中没有电流.

d. 能量分析: 两个导体棒损失的动能,全部转化为电能,再转化为内能.

【解析】 由于两棒在同样的磁场内,流过的电流大小相等,但是长度不同,所以两棒受到的安培力的合力并不是 0,所以系统合外力不为 0,系统动量不守恒,运动过程中部分机械能转化为电能,机械能也不守恒, **A 错误**; 以向右为正方向,从开始运动到稳定过程,根据动量定理,对导体棒 a 有 $B\bar{I}l \cdot \Delta t = mv_1 - mv_0$, 对导体棒 b 有 $-B\bar{I} \cdot 2l \cdot \Delta t = 2mv_2 - 2m \cdot 2v_0$, 当最终稳定时满足 $B \cdot 2lv_2 = Blv_1$, 联立解得 $v_1 = 2v_0$, $v_2 = v_0$, 在此过程中产生的总焦耳热为 $Q = \frac{1}{2}mv_0^2 + \frac{1}{2} \times 2m(2v_0)^2 - \left(\frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2} \times 2mv_2^2 \right) = \frac{3}{2}mv_0^2$, **B 正确**; 根据牛顿第二定律,对导体棒 a 有 $B\bar{I}l = ma_a$, 对导体棒 b 有 $B\bar{I} \cdot 2l = 2ma_b$, 由此可知 $a_a = a_b$, 且 $I = \frac{2Blv_b - Blv_a}{R}$, 由于 a 加速, b 减速,则电流减小, a 做加速度减小的加速运动, b 做加速度减小的减速运动,速度一时间图像如图所示,由图像可知加速



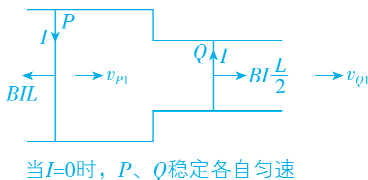
的位移大于减速的位移(关键: $v-t$ 图像与 t 轴围成的面积表示位移),因此平均速度不相等,**C 错误**;以向右为正方向,在此过程中,根据动量定理,对导体棒 a 有 $Bl\bar{I}\Delta t = m \cdot 2v_0 - mv_0$,又 $q = \bar{I}\Delta t$,解得 $q = \frac{mv_0}{Bl}$,回路中的平均感应电动势 $\bar{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B\Delta S}{\Delta t}$,又 $q = \bar{I}\Delta t = \frac{\bar{E}}{R}\Delta t = \frac{B\Delta S}{R}$,联立可得 $\Delta S = \frac{qR}{B} = \frac{mv_0 R}{B^2 l}$,**D 正确**.



15. (1) $3mg$ (2) $\frac{4m\sqrt{2gR}}{5BL}$ (3) $\frac{1}{50}mgR$

试题解构

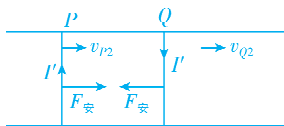
a. 受力分析: P 运动到 **I** 上时,两棒在水平轨道上运动水平方向的受力如图甲所示.



甲

P 进入 **II** 后,两棒水平方向的受力如图乙所示.

初始 $v_{P2} < v_{Q2}$, 电流为顺时针方向



当 P 、 Q 共速时, P 、 Q 稳定

乙

b. 运动分析:双棒的运动应该分为三步讨论,第一, P 棒在圆弧上运动时, Q 棒保持静止状态;第二, P 棒在 **I** 上运动时, P 棒做加速度逐渐减小的减速运动, Q 棒做加速度逐渐减小的加速运动,二者可以达到匀速;第三,两棒均在 **II** 上运动时, P 棒做加速度逐渐减小的加速运动,而 Q 棒做加速度逐渐减小的减速运动,直到共速.

c. 动量和能量分析:在运动的第二部分,系统不满足动量守恒,但是可以对双棒分别列动量定理来处理;而运动的第三部分,系统满足动量守恒,系统损失的动能转化为系统的电能(焦耳热).

【解析】(1) 设 P 棒到达轨道最低点时速度大小为 v_0 ,

根据机械能守恒定律得 $mgR = \frac{1}{2}mv_0^2$, 1 分

在轨道最低点,根据牛顿第二定律可得 $F_N - mg = m \frac{v_0^2}{R}$,

..... 1 分

联立解得 $v_0 = \sqrt{2gR}$, $F_N = 3mg$, 1 分

根据牛顿第三定律可得, P 棒到达轨道最低点瞬间对轨道压力的大小为 $3mg$ 1 分

(2) 设 Q 棒第一次稳定运动时的速度为 v_Q , 此时 P 棒的速度为 v_P , 则有 $BLv_P = B \frac{L}{2} v_Q$, 1 分

Q 棒从开始运动到第一次速度达到稳定过程中, 分别对 P 、 Q 棒, 根据动量定理可得

$$-B\bar{I}L \cdot t = mv_P - mv_0, B\bar{I} \frac{L}{2} \cdot t = mv_Q, \dots\dots\dots 2 \text{ 分}$$

通过 P 棒的电荷量为 $q = \bar{I} \cdot t$, 1 分

$$\text{联立解得 } v_P = \frac{\sqrt{2gR}}{5}, v_Q = \frac{2\sqrt{2gR}}{5}, q = \frac{4m\sqrt{2gR}}{5BL}. \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

(3) P 棒进入 II 运动后, 稳定时两棒速度相同, 设稳定速度为 v , 由动量守恒定律得 $mv_P + mv_Q = 2mv$, 1 分

由能量守恒定律得, P 、 Q 棒中产生的总热量为

$$Q = \frac{1}{2}mv_P^2 + \frac{1}{2}mv_Q^2 - \frac{1}{2} \cdot 2mv^2 = \frac{1}{50}mgR. \dots\dots\dots 2 \text{ 分}$$

16. (1) $\frac{B^2 L^2 v_0}{2mR}$ (2) $\frac{3}{32}mv_0^2$ (3) $\frac{v_0 t}{4} + \frac{mv_0 R}{4B^2 L^2}$

试题解构

a. 受力及运动分析: 棒 ab 从开始运动到经过分界线 ef 的过程中在向左的安培力的作用下做减速运动, 棒 cd 做加速运动; 两棒切割磁感线产生动生电动势, 两棒内电流大小相同, 则两棒所受安培力大小相等, 方向相反, 系统动量守恒.

b. 能量分析: 棒 ab 从开始运动到经过分界线 ef 的过程中系统能量守恒, 棒 ab 的动能转化为两棒产生的焦耳热及两棒的动能, 两棒均有电阻, 则棒 ab 产生的焦耳热根据电阻占比划分.

【解析】(1) 棒 ab 刚开始运动时, 感应电动势 $E_0 = BLv_0$,

..... 1 分

$$\text{电流 } I_0 = \frac{E_0}{R+R}, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

棒 ab 受到的安培力 $F = BI_0 L$, 1 分

由牛顿第二定律有 $F = ma$, 1 分

$$\text{加速度大小为 } a = \frac{B^2 L^2 v_0}{2mR}. \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

(2) 设棒 ab 经过分界线时, 棒 cd 的速度为 v_1 , 由动量守恒定律得 $mv_0 = m \cdot \frac{3}{4}v_0 + mv_1$, 1 分

$$\text{解得 } v_1 = \frac{1}{4}v_0,$$



设此过程两棒产生的焦耳热为 Q , 由能量守恒定律有

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}m\left(\frac{3}{4}v_0\right)^2 + \frac{1}{2}mv_1^2 + Q, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{棒 } ab \text{ 产生的焦耳热 } Q_{ab} = \frac{R}{R+R}Q, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{解得 } Q_{ab} = \frac{3}{32}mv_0^2. \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

(3) 从棒 ab 通过分界线到棒 cd 速度减为 0 前的某时刻, 由动量定理得

$$\text{棒 } ab: -\sum BIL\Delta t = mv_{ab} - m \cdot \frac{3}{4}v_0, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{棒 } cd: -\sum BIL\Delta t = mv_{cd} - mv_1, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{由以上两式可得, 两棒速度差始终为 } v_{ab} - v_{cd} = \frac{1}{2}v_0, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{经时间 } t, \text{ 两棒位移差 } x_{ab} - x_{cd} = \frac{1}{2}v_0t, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

从棒 ab 通过分界线到棒 cd 速度减为 0 过程, 对棒 cd 根据动量定理有 $-\bar{B}ILt = 0 - mv_1$, $\dots\dots\dots 1 \text{ 分}$

$$\text{回路平均电流 } \bar{I} = \frac{BL\bar{v}_{ab} + BL\bar{v}_{cd}}{2R}, \bar{I}t = \frac{BLx_{ab} + BLx_{cd}}{2R}, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{由以上可得 } x_{ab} = \frac{v_0t}{4} + \frac{mv_0R}{4B^2L^2}. \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

17. (1) 1 N (2) 0.6 m (3) 2 m/s 0.2 J

试题解构

a. 等效电路: b 是超导材料, 初始电阻为 0, a 、 b 碰撞前, 相当于只有 a 棒和 b 棒组成回路. 第(2)问中, a 、 b 两棒粘在一起后, 相当于一个没有内阻的电源, 和 R 组成闭合电路.

第(3)问中, b 棒有了电阻, a 、 b 碰撞后, 开关是断开的, a 棒和 b 棒组成回路.

b. 动量分析: 第(2)问中, 碰撞瞬间满足动量守恒, 需要利用动量定理求出碰后两者的路程. 第(3)问中, a 、 b 碰撞后至 b 与弹性装置碰撞前, 两个导体棒组成的系统满足动量守恒, 且总动量为 0.

c. 能量分析: 第(3)问中, 系统损失的动能转化为系统的电能(焦耳热).

【解析】(1) 初始 a 棒受力平衡, 所以 $F = F_{\text{安}} = BIL$, $\dots\dots\dots 1 \text{ 分}$

$$a \text{ 棒切割磁感线, } a \text{ 棒中的电流大小为 } I = \frac{BLv_0}{R_{\text{总}}}, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

超导材料将 R 短路, 则 $R_{\text{总}} = R_a = 1 \Omega$,

$$\text{联立解得 } F = 1 \text{ N}. \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$(2) \text{ 根据动量守恒定律, 碰撞瞬间有 } m_a v_0 = (m_a + m_b) v_{\text{共}}, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

碰撞后, 两者粘合在一起运动直至停止, 根据动量定理有

$$-B \frac{BL\bar{v}}{R'_{\text{总}}} L \cdot t = 0 - (m_a + m_b) v_{\text{共}}, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$



其中 $R'_{\text{总}} = R$, 又因为 $s = \bar{v} \cdot t$, 解得 $s = 0.8 \text{ m}$,

故最终停在 $x = 1.2 \text{ m} - (0.8 \text{ m} + 1.0 \text{ m} - 1.2 \text{ m}) = 0.6 \text{ m}$ 处.

..... 1 分

(3) 以向右为正方向, 发生弹性碰撞, 则有

$$m_a v_0 + m_b v_{b1} = m_a v_{a2} + m_b v_{b2}, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\frac{1}{2} m_a v_0^2 + \frac{1}{2} m_b v_{b1}^2 = \frac{1}{2} m_a v_{a2}^2 + \frac{1}{2} m_b v_{b2}^2, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{其中 } v_{b1} = -2 \text{ m/s, 解得 } v_{a2} = -4 \text{ m/s, } v_{b2} = 2 \text{ m/s, } \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

有 $m_a v_{a2} + m_b v_{b2} = 0$, 又由于两棒受到的安培力等大反向, 故系统总动量始终为 0, 在 b 棒运动至弹性装置前, 两棒的速度大小之比始终为 2:1, 通过的位移大小之比也始终为 2:1, 即 b 棒撞上弹性装置前, a 棒滑行了 0.4 m, 此过程中, 仍取水平向右为正方向, 根据电磁感应定律, 安培力大

$$\text{小为 } F_{\text{安1}} = B \frac{BL(v_b - v_a)}{R_a + R_b} L, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{根据动量定理, 对 } a \text{ 棒有 } \sum F_{\text{安1}} \cdot \Delta t = m_a v_{a3} - m_a v_{a2}, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{对 } b \text{ 棒有 } -\sum F_{\text{安1}} \cdot \Delta t = m_b v_{b3} - m_b v_{b2}, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{其中 } \sum -v_a \Delta t = 0.4 \text{ m, } \sum v_b \Delta t = 0.2 \text{ m,}$$

$$\text{解得 } v_{a3} = -3 \text{ m/s, } v_{b3} = 1.5 \text{ m/s, } \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

与弹性装置碰撞后, 导体棒 b 速度反向, 大小不变, 向左运动过程中, 系统动量守恒, 有

$$m_a v_{a3} + m_b (-v_{b3}) = (m_a + m_b) v_{\text{稳}}, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{解得 } v_{\text{稳}} = -2 \text{ m/s, 即两棒稳定后, 最终的速度方向向左, 大小为 } 2 \text{ m/s, } \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{该过程中, 根据能量守恒定律有 } Q_{\text{总}} = E_{\text{机损}} = \frac{1}{2} m_a v_{a2}^2 +$$

$$\frac{1}{2} m_b v_{b2}^2 - \frac{1}{2} (m_a + m_b) v_{\text{稳}}^2 = 0.6 \text{ J, } \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{而 } Q_b = \frac{R_b}{R_a + R_b} Q_{\text{总}} = 0.2 \text{ J. } \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

考点 3 线框问题

18. **B** 【解析】当线框刚进入磁场时, 边 MN 切割磁感线, 相当于电源, 因此 MN 两端的电压为路端电压. 对于线框 a , U_a 为除竖直边外的两边的分压, 则由串联分压规律有 $U_a =$

$$Blv \times \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}+2}; \text{ 对于线框 } b, U_b \text{ 为除竖直边外的两边的分压, 则}$$

$$\text{由串联分压规律有 } U_b = Blv \times \frac{\sqrt{5}+2}{\sqrt{5}+3}; \text{ 对于线框 } c, U_c \text{ 为除竖}$$

$$\text{直边外的两边的分压, 则由串联分压规律有 } U_c = 2Blv \times \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}+2}; \text{ 对于线框 } d, U_d \text{ 为除竖直边外的两边的分压, 则由}$$

$$\text{串联分压规律有 } U_d = 2Blv \times \frac{\sqrt{5}+1}{\sqrt{5}+3}. \text{ 综上所述可知 } U_a < U_b < U_d <$$

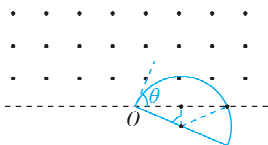


U_c , B 正确.

快解

定性比较: 利用闭合电路欧姆定律, 当电源相同时, 接的负载阻值越大, 路端电压也就越大, 可得 $U_a < U_b$, $U_d < U_c$, B 正确.

19. **D** 【解析】如图所示,



在 $0 \sim \frac{\pi}{2\omega}$ 时间内, 穿过线框的磁通量向外增加, 根据楞次定律和安培定则可知, 线框中的感应电流方向为顺时针方向 (正方向), 线框切割磁感线的有效长度为 $L = 2R \sin \theta =$

$2R \sin \omega t$, 则线框转动切割磁感线产生的电动势为 $e =$

$\frac{1}{2}BL^2\omega = 2BR^2\omega \cdot \sin^2\omega t = BR^2\omega(1 - \cos 2\omega t)$, 线框中的感应

电流为 $i = \frac{e}{r} = \frac{BR^2\omega}{r}(1 - \cos 2\omega t)$; 在 $\frac{\pi}{2\omega} \sim \frac{\pi}{\omega}$ 时间内, 整个线

框都在磁场中, 线框中的感应电流为 0; 在 $\frac{\pi}{\omega} \sim \frac{3\pi}{2\omega}$ 时间

内, 穿过线框的磁通量向外减小, 根据楞次定律和安培定则

可知, 线框中的感应电流方向为逆时针方向 (负方向), 线框

切割磁感线的有效长度为 $L' = 2R \sin(\omega t - \pi)$, 则线框转动切

割磁感线产生的电动势为 $e' = -\frac{1}{2}BL'^2\omega = -BR^2\omega[1 -$

$\cos 2(\omega t - \pi)]$, 线框中的感应电流为 $i' = \frac{e'}{r} = -\frac{BR^2\omega}{r}[1 -$

$\cos 2(\omega t - \pi)] = -\frac{BR^2\omega}{r}(1 - \cos 2\omega t)$, 在 $\frac{3\pi}{2\omega} \sim \frac{2\pi}{\omega}$ 时间内, 整个

线框都在磁场外, 线框中的感应电流为 0. **D 正确, A、B、C**

错误.

20. **BD** 【解析】线框进入区域 I 的过程中产生的感应电动

势为 $E_1 = 2BLv$, 感应电流 $I_1 = \frac{E_1}{R}$, 受到的安培力大小为 $F_1 =$

$2BI_1L = \frac{4B^2L^2v}{R}$, **A 错误**. 线框刚进入区域 II 到完全进入区域

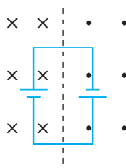
II 的过程中, 左侧边切割磁感线产生的感应电动势为 $E_{2左} =$

$2BLv$, 右侧边切割磁感线产生的感应电动势为 $E_{2右} = BLv$, 根

据右手定则得, 左侧边切割磁感线产生的电流为顺时针方

向, 右侧边切割磁感线产生的电流为顺时针方向, 等效电路

如图所示,





两侧边感应电动势叠加,得 $E_2 = E_{2左} + E_{2右} = 3BLv$, **C 错误**. 线框刚进入区域 II 到完全进入区域 II 的过程中,做匀速直线运动,运动时间 $t_2 = \frac{L}{v}$,感应电流 $I_2 = \frac{E_2}{R} = \frac{3BLv}{R}$,通过线框的电荷量为 $q = I_2 t_2 = \frac{3BL^2}{R}$, **B 正确**. 线框从开始进入区域 I 到刚进入区域 II,只有右侧边切割磁感线,根据 A 选项分析得,感应电流 $I_1 = \frac{2BLv}{R}$,运动时间 $t_1 = \frac{L}{v}$,产生的焦耳热为 $Q_1 = I_1^2 R t_1 = \frac{4B^2 L^3 v}{R}$;线框刚进入区域 II 到完全进入区域 II 的过程中,根据 B 选项分析得,产生的焦耳热为 $Q_2 = I_2^2 R t_2 = \frac{9B^2 L^3 v}{R}$;线框完全进入区域 II 到完全离开区 II 过程中,只有左侧边切割磁感线,产生的感应电动势为 $E_3 = BLv$,感应电流 $I_3 = \frac{E_3}{R} = \frac{BLv}{R}$,运动时间 $t_3 = \frac{L}{v}$,产生的焦耳热为 $Q_3 = I_3^2 R t_3 = \frac{B^2 L^3 v}{R}$,所以线框从开始进入区域 I 到完全离开区 II 过程中产生的总焦耳热为 $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \frac{14B^2 L^3 v}{R}$, **D 正确**.

21. (1) $B_1 = 0.1t$ (T) (2) 0.32 J (3) $\frac{\sqrt{6}}{30}$ T

试题解构

a. 审读题干:由题中“ $t=0$ 时刻区域 I 的磁感应强度从 0 开始均匀增大,此过程中金属框在水平外力 F 作用下处于静止状态”可知,金属框产生感生电动势,金属框受力平衡,安培力同步增大.由题中“在 $t=1$ s 时,撤去外力 F 且区域 I 的磁感应强度 B_1 保持该时刻的大小不再变化,同时使金属框以 2 m/s 的初速度开始向右运动, MN 边运动到 $x=6a$ 处恰好停止”可知,金属框在两个磁场区域分别切割磁感线.

b. 受力及运动分析:前两问,金属框处于静止状态时,安培力与外力平衡.第(3)问, $t=1$ s 后,金属框全部处在 $2a < x < 5a$ 处时无磁通量的变化,做匀速运动, PQ 边或 MN 边处在 $0 \leq x \leq 2a$ 或 $5a \leq x \leq 6a$ 处时切割磁感线,受到向左的安培力做减速运动,直到 MN 边运动到 $x=6a$ 处停止.

c. 能量分析:前两问,金属框静止过程中回路电流恒定,焦耳热由 $Q = I^2 R t$ 计算.

【解析】(1) 由于 $t=0$ 时刻区域 I 的磁感应强度从 0 开始均匀增大,故磁感应强度的大小与时间成正比,设比例系数为 k ,则有 $B_1 = kt$, 1 分

根据法拉第电磁感应定律有 $E = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = n \frac{\Delta B_1}{\Delta t} S = 4nka^2$,

..... 1 分

则金属框中的感应电流为 $I = \frac{E}{R} = \frac{4nka^2}{R}$, 1 分

由分析可知,金属框 MN 、 PQ 两边所受的安培力等大反向,相互抵消,所以 NQ 边所受的安培力就是金属框所受安培力的合力,则有 $F_{\text{安}} = nB_1 Il = nktI \cdot 2a$, 1 分

由图(b)可知外力 F 的表达式为 $F = \frac{F_0}{t_0} t = 0.16t \text{ (N)}$, ... 1 分

由于在 $0 \sim 10 \text{ s}$ 的时间内,金属框静止不动,则由平衡关系有 $F_{\text{安}} = F$, 1 分

联立解得 $k = 0.1 \text{ T/s}$,

所以 $0 \sim 10 \text{ s}$ 的时间内区域 I 磁场的磁感应强度 B_1 随时间 t 变化的规律为 $B_1 = 0.1t \text{ (T)}$ 1 分

(2) $0 \sim 10 \text{ s}$ 的时间内金属框中的感应电流为

$I = \frac{E}{R} = \frac{4nka^2}{R} = 0.08 \text{ A}$, 1 分

所以 $0 \sim 10 \text{ s}$ 的时间内回路产生的焦耳热为

$Q = I^2 R t_0 = 0.32 \text{ J}$ 1 分

(3) $t = 1 \text{ s}$ 时,区域 I 的磁感应强度大小为

$B'_1 = 0.1 \times 1 \text{ T} = 0.1 \text{ T}$, 1 分

所以金属框穿越区域 I 的过程,区域 I 的磁感应强度大小始终为 $B'_1 = 0.1 \text{ T}$,设当金属框 MN 边运动到 $x = 2a$ 处时,其速度为 v_1 ,则根据动量定理有 $-\sum nB'_1 i \cdot 2a \Delta t = mv_1 - mv_0$,

..... 1 分

其中 $q = \sum i \Delta t = \frac{n \Delta \Phi_1}{R} = \frac{nB'_1 \times 4a^2}{R}$, 1 分

联立解得 $v_1 = 1.2 \text{ m/s}$,同理对金属框穿越区域 II 的过程,

由动量定理有 $-\sum nB_2 i' \cdot 3a \Delta t' = 0 - mv_1$, 1 分

其中 $q' = \sum i' \Delta t' = \frac{n \Delta \Phi'}{R} = \frac{nB_2 \times 6a^2}{R}$, 1 分

联立解得区域 II 磁场的磁感应强度大小为 $B_2 = \frac{\sqrt{6}}{30} \text{ T}$.

..... 1 分

22. (1) $\frac{3Blv_0}{4r}$ (2) $\frac{3Bl^2}{2r}$ 3 : 2 : 2 : 3 (3) $\frac{v-v_0}{g \sin \theta} + \frac{5B^2 l^3}{2mg r \sin \theta}$



试题解构

a. 审读题干: 由题中“足够长的光滑斜面与水平面的夹角为 θ ”“虚线下方有磁感应强度大小为 B 、方向垂直斜面向上的匀强磁场”可知, 斜面无摩擦, 金属框进入磁场时会切割磁感线产生感应电动势. 由题中“ ab 、 cd 、 ef 、 gh 都与虚线 MN 平行且电阻均为 r , 金属框的其他电阻不计”可计算回路中的总电阻.

b. 受力及运动分析: 金属框下滑进入磁场的过程中, 沿斜面方向受到沿斜面向下的重力的分力和沿斜面向上的安培力, 随着速度的增大, 安培力增大, 加速度减小, 完全进入磁场后磁通量不变, 无感应电流, 受力只剩重力的分力, 做匀加速运动.

c. 电荷量分析: 电流时刻发生变化, 电荷量由 $q = \bar{I}t = \frac{\bar{E}}{R_{\text{总}}}t = \frac{\Delta\Phi}{R_{\text{总}}}$ 计算.

【解析】(1) ab 边刚进入磁场时感应电动势 $E_0 = Blv_0$,

..... 1 分

回路总电阻 $R_{\text{总}1} = \frac{r}{3} + r = \frac{4r}{3}$, 1 分

则流过 ab 边的电流大小 $I_{ab} = \frac{E_0}{R_{\text{总}1}} = \frac{3Blv_0}{4r}$ 1 分

(2) 第一个正方形金属框进入磁场过程, 流过 ab 的电荷量

$q_1 = q_{ab1} = \bar{I}_1 t_1 = \frac{\bar{E}_1}{R_{\text{总}1}} t_1 = \frac{\Delta\Phi}{R_{\text{总}1}} = \frac{3Bl^2}{4r}$, 1 分

此过程中流过 cd 、 ef 、 gh 三边的电荷量均为

$q_{cd1} = q_{ef1} = q_{gh1} = \frac{1}{3} q_{ab1} = \frac{Bl^2}{4r}$, 1 分

同理, 第二个正方形金属框进入磁场过程, 流过 ab 、 cd 的总

电荷量 $q_2 = \frac{\Delta\Phi}{R_{\text{总}2}} = \frac{Bl^2}{r}$, 1 分

此过程中流过 ab 、 cd 的电荷量 $q_{ab2} = q_{cd2} = \frac{Bl^2}{2r}$,

流过 ef 、 gh 边的电荷量为 $q_{ef2} = q_{gh2} = \frac{Bl^2}{2r}$,

同理, 第三个正方形金属框进入磁场过程, 流过 ab 、 cd 、 ef 的

总电荷量 $q_3 = \frac{\Delta\Phi}{R_{\text{总}3}} = \frac{3Bl^2}{4r}$, 1 分

此过程中流过 ab 、 cd 、 ef 的电荷量 $q_{ab3} = q_{cd3} = q_{ef3} = \frac{1}{3} q_3 = \frac{Bl^2}{4r}$,

流过 gh 边的电荷量为 $q_{gh3} = \frac{3Bl^2}{4r}$,

可知流过 ab 的总电荷量为 $q_{ab} = q_{ab1} + q_{ab2} + q_{ab3} = \frac{3Bl^2}{2r}$,

..... 1 分



流过 cd 的总电荷量为 $q_{cd} = q_{cd1} + q_{cd2} + q_{cd3} = \frac{Bl^2}{r}$, 1 分

流过 ef 的总电荷量为 $q_{ef} = q_{ef1} + q_{ef2} + q_{ef3} = \frac{Bl^2}{r}$, 1 分

流过 gh 的总电荷量为 $q_{gh} = q_{gh1} + q_{gh2} + q_{gh3} = \frac{3Bl^2}{2r}$, 1 分

通过 ab 、 cd 、 ef 、 gh 四个边的电荷量之比为 $3 : 2 : 2 : 3$.

..... 1 分

(3) ab 进入磁场过程, 由动量定理有

$-Bl\bar{I}_1 t_1 + mgt_1 \sin \theta = -Blq_1 + mgt_1 \sin \theta = mv_1 - mv_0$, 1 分

cd 进入磁场过程, 由动量定理有 $-Blq_2 + mgt_2 \sin \theta = mv_2 - mv_1$,

..... 1 分

ef 进入磁场过程, 由动量定理有 $-Blq_3 + mgt_3 \sin \theta = mv - mv_2$,

..... 1 分

三式相加可得 $-Bl(q_1 + q_2 + q_3) + mg(t_1 + t_2 + t_3) \sin \theta = mv - mv_0$,

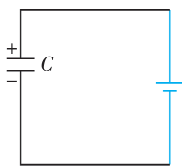
解得 $t = t_1 + t_2 + t_3 = \frac{v - v_0}{g \sin \theta} + \frac{5B^2 l^3}{2mgr \sin \theta}$ 1 分

考点 4 含容问题

23. (1) $\frac{B_1 L Q}{mrC}$ (2) $\frac{B_1 L Q}{m + CB_1^2 L^2}$ (3) $\frac{(mv_{\max} - mv_1)(r + R)}{B_2^2 L^2} + \sqrt{\frac{m}{k}} v_1$

试题解构

a. 受力和运动分析: 箭体在加速区, 开关闭合瞬间, 箭体受到的安培力最大, 箭体运动后产生感应电动势, 等效电路如图所示,



可知, 随着箭体的速度增大, 合电动势逐渐减小, 所以箭体受到的安培力逐渐减小, 箭体做加速度逐渐减小的加速运动, 最后做匀速运动; 在电磁阻尼段箭体受到逐渐减小的安培力作用, 做加速度逐渐减小的减速运动; 在机械制动段, 箭体受到逐渐增大的阻力作用, 做加速度逐渐增加的减速运动, 最终静止.

b. 功能分析: 箭体在加速区, 电容器的电场能转化为箭体运动的动能和焦耳热; 在电磁阻尼段, 箭体的动能转化为箭体和定值电阻上的焦耳热; 在机械制动段, 箭体的动能转化为内能. 阻力为变力, 但随位移均匀变化, 可以利用平均力做功求解阻力做的功.



c. 临界分析: 在加速区, 闭合开关的瞬间, 回路中的电流最大, 箭体受到的安培力最大, 加速度最大, 当箭体切割磁感线产生的感应电动势等于电容器两端电压时, 箭体中无电流, 开始做匀速运动.

【解析】(1) 闭合开关瞬间, 箭体有最大加速度, 则

$$F_{\text{安}} = ma_{\text{max}} = B_1 IL, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{因为导轨电阻不计, 则有 } I = \frac{U}{r} = \frac{Q}{Cr}, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{综上可得 } a_{\text{max}} = \frac{B_1 LQ}{mrC}. \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$(2) \text{ 达到最大速度时有 } U_c = B_1 L v_{\text{max}}, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

又因电容器释放的电荷量等于流过箭体的电荷量, 则有

$$Q - CU_c = \Delta q, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{根据动量定理有 } B_1 \bar{I} L t = B_1 L \Delta q = m v_{\text{max}}, \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{综上可得 } v_{\text{max}} = \frac{B_1 LQ}{m + CB_1^2 L^2}. \quad \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

(3) 设箭体在电磁阻尼段运动位移大小为 d , 则在电磁阻尼段

$$\text{由动量定理有 } -B_2 \frac{\bar{E}}{R+r} L t' = -B_2 \frac{B_2 L \bar{v}}{R+r} L t' = -\frac{B_2^2 L^2 d}{r+R} = m v_1 - m v_{\text{max}},$$

$$\dots\dots\dots 2 \text{ 分}$$

$$\text{在机械制动段由动能定理有 } -\bar{f} x = -\frac{1}{2} k x^2 = 0 - \frac{1}{2} m v_1^2,$$

$$\dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{综上可得 } L_1 = d + x = \frac{(m v_{\text{max}} - m v_1)(r+R)}{B_2^2 L^2} + \sqrt{\frac{m}{k}} v_1. \quad \dots\dots 2 \text{ 分}$$

$$24. (1) \frac{v_0}{4} \quad \frac{5mv_0^2}{24} \quad (2) x_0 + \frac{3mRv_0}{2B^2 L^2} \quad \frac{3x_0}{v_0} + \frac{3mR}{2B^2 L^2}$$

$$(3) \frac{CBLmv_0}{2CB^2 L^2 + 6m}$$

试题解构

a. 审读题干: 由题中“导轨在分界线 MN 处用两段极短(长度忽略不计)的绝缘材料平滑连接”可知, 金属棒 a 开始运动后只有 a 、 b 构成闭合回路, 水平方向动量守恒.

b. 能量分析: 金属棒 b 到达 MN 前, 金属棒损失的动能转化为系统的热量, 金属棒 b 产生的热量按电阻比例分配.

c. 电荷量分析: 电路中有电流时, 电容器就会充电, 所以稳定状态时, 两棒速度相等, 无相对切割, 电容器停止充电, 电荷量稳定, 两端电压等于金属棒产生的动生电动势.

【解析】(1) 金属棒 a 、 b 在 MN 左侧运动时, a 、 b 组成的系统水平方向合力为零, 动量守恒, 由动量守恒定律有



$$mv_0 = m \cdot \frac{v_0}{2} + 2m \cdot v_1, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{解得 } v_1 = \frac{v_0}{4}, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

系统产生的总焦耳热等于损失的动能,由能量守恒定律有

$$Q_{\text{总}} = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}m\left(\frac{v_0}{2}\right)^2 - \frac{1}{2} \cdot 2mv_1^2 = \frac{5mv_0^2}{16}, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{串联电路中产生的热量按电阻比例分配,则 } Q_b = \frac{2R}{R+2R}Q_{\text{总}} = \frac{5mv_0^2}{24}. \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

(2) 金属棒 a 在 MN 左侧运动过程中,对 a 由动量定理有

$$-B\bar{I}L \cdot t = m \cdot \frac{v_0}{2} - mv_0, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{其中 } \bar{I} = \frac{\bar{E}}{R+2R} = \frac{\Delta\Phi}{3Rt} = \frac{BL(x_a - x_0)}{3Rt}, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{联立解得 } x_a = x_0 + \frac{3mRv_0}{2B^2L^2}, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{由动量守恒定律有 } mv_a + 2mv_b = mv_0, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{取极短时间 } \Delta t, \text{ 可得 } \sum mv_a \cdot \Delta t + \sum 2mv_b \cdot \Delta t = \sum mv_0 \cdot \Delta t, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{则 } mx_a + 2mx_0 = mv_0t, \text{ 解得 } t = \frac{3x_0}{v_0} + \frac{3mR}{2B^2L^2}. \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

(3) 设金属棒 b 进入 MN 右侧后,整个系统达到稳定时金属棒 b 、 c 的速度大小为 v ,对金属棒 b 由动量定理得

$$-\sum BI_b L \Delta t' = \sum 2m \Delta v_b,$$

$$\text{可得 } -BLq_b = 2mv - 2m \cdot \frac{v_0}{4}, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{对金属棒 } c \text{ 由动量定理得 } \sum BI_c L \Delta t' = \sum m \Delta v_c,$$

$$\text{积累得 } BLq_c = mv, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

$$\text{电容器中电荷量 } q = CBLv, \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$

对 MN 右侧的电路有 $q = q_b - q_c$ (关键: b 、 c 两棒运动方向相同,则两棒产生的电动势方向相反,各自的电荷量会相互抵消一部分), $\dots\dots\dots 1 \text{ 分}$

$$\text{解得 } q = \frac{CBLmv_0}{2CB^2L^2 + 6m}. \dots\dots\dots 1 \text{ 分}$$