

第十二章 电磁感应

第1讲 电磁感应现象 楞次定律

课标要求

收集资料，了解电磁感应现象的发现过程，体会科学探索中科学思想和科学态度的重要作用；通过实验，了解产生感应电流的条件；通过实验，探究影响感应电流方向的因素，理解楞次定律。

必备知识·强基固本

一、电磁感应现象

1. 磁通量

(1) 概念：在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，与磁场方向___的面积 S 与 B 的乘积。

(2) 公式： $\Phi = \underline{\hspace{2cm}}$ 。单位：韦伯(Wb)。

(3) 标矢性：磁通量是___量，但有正、负。

(4) 磁通量的变化量： $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ 。

(5) 磁通量的变化率（磁通量变化的快慢）：磁通量的___与所用时间的比值。

【答案】 (1) 垂直

(2) BS

(3) 标

(5) 变化量

2. 电磁感应

(1) 概念：当穿过闭合电路的磁通量_____时，电路中有_____产生的现象。

(2) 产生感应电流的条件：___电路、磁通量___。

(3) 电磁感应现象的实质：电路中产生感应电动势，如果电路闭合则有感应电流产生。

(4) 能量转化：发生电磁感应现象时，机械能或其他形式的能转化为电能。

二、感应电流方向的判断

1. 楞次定律

(1) 内容：感应电流具有这样的方向，即感应电流的磁场总要___引起感应电流的_____的变化。

(2) 适用范围：一切电磁感应现象。

【答案】阻碍；磁通量

2. 右手定则

(1) 内容：伸开右手，使拇指与其余四个手指垂直，并且都与手掌在同一个平面内；让_____从掌心进入，并使拇指指向_____的方向，这时四指所指的方向就是_____的方向。

(2) 适用情况：导体_____产生感应电流。

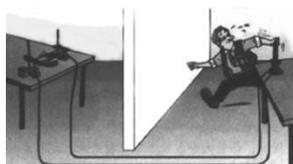
【答案】 (1) 磁感线；导线运动；感应电流

(2) 切割磁感线

自主评价

1. 依据下面小情境，判断下列说法对错。

1825年，科拉顿做了这样一个实验，如图所示，他将一个条形磁铁插入连有灵敏电流计的螺旋线圈，来观察在线圈中是否有电流产生。实验时，科拉顿为了排除磁铁移动时对灵敏电流计的影响，他通过很长的导线把接在螺旋线圈上的灵敏电流计放到另一间房里。科拉顿开始实验，插入磁铁后，跑到另一间房里观察灵敏电流计，然而无论他跑得多快，看到的电流计指针都是指在“0”刻度的位置。



(1) 在科拉顿整个操作过程中，电流计不发生偏转。()

(2) 将磁铁插入螺旋线圈瞬间，电流计发生偏转，但科拉顿跑到房间观察时，电流计已不再偏转。()

(3) 科拉顿无法观察到电流计偏转的原因是当时电流计灵敏度不够。()

(4) 科拉顿无法观察到电流计偏转的原因是导线过长。()

(5) 科拉顿无法观察到电流计偏转的原因是电流过小。()

【答案】 (1) ×

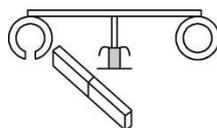
(2) ✓

(3) ×

(4) ×

(5) ×

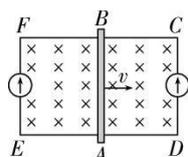
2. 多选 (人教版选择性必修第二册改编) 如图所示, 一轻质绝缘横杆两侧各固定一金属环, 横杆可绕中心点自由转动, 老师拿一条形磁体插向其中一个小环, 后又取出插向另一个小环, 下列关于同学们看到的现象及对现象的分析说法正确的是 ()



- A. 磁体插向左环, 横杆发生转动
- B. 磁体插向右环, 横杆发生转动
- C. 磁体插向左环, 左环中不产生感应电动势和感应电流
- D. 磁体插向右环, 右环中产生感应电动势和感应电流

【答案】BD

3. (人教版选择性必修第二册改编) 如图所示, $CDEF$ 是金属框, 框内存在着垂直纸面向里的匀强磁场。当导体 AB 向右移动时, 金属框中 CD 、 EF 边的感应电流的方向为 ()



- A. $C \rightarrow D$, $E \rightarrow F$
- B. $D \rightarrow C$, $E \rightarrow F$
- C. $C \rightarrow D$, $F \rightarrow E$
- D. $D \rightarrow C$, $F \rightarrow E$

【答案】C

关键能力·核心突破

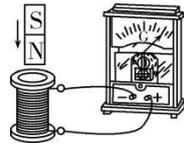
考点一 实验: 探究影响感应电流方向的因素

一、实验原理

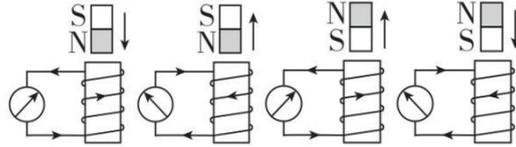
只要穿过闭合导体回路的磁通量发生变化, 闭合导体回路中就有感应电流。感应电流的有无和方向可通过连接在电路中的电流表的指针是否偏转和偏转方向来判定。

二、实验操作

向线圈中插入磁铁, 把磁铁从线圈中拔出: 如图所示, 把磁铁的某一个磁极向线圈中插入、从线圈中拔出或静止放在线圈中。观察电流表的指针偏转情况, 作出表格并把观察到的现象记录在表中。



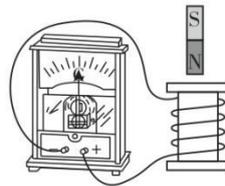
三、实验现象



例 1 [2024·河南信阳模拟]某兴趣小组利用如图装置探究感应电流的产生条件和影响感应电流方向的因素。

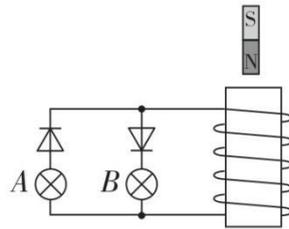
(1) 如图甲，磁铁的 N 极向下运动时，电流表指针发生偏转。若要探究线圈中产生感应电流的方向，除了要知道线圈上导线的绕向外，还必须知道

_____。



甲

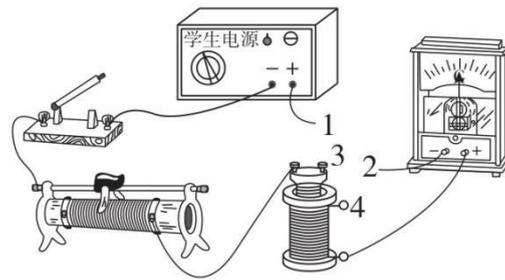
(2) 图乙中，将条形磁铁从图示位置先向上后向下移动一小段距离，出现的现象是_____。



乙

- A. 灯泡A短暂发光、灯泡B不发光 B. 灯泡A、B均不发光
C. 灯泡A不发光、灯泡B短暂发光 D. 灯泡A、B交替短暂发光

(3) 为进一步探究影响感应电流方向的因素，该小组设计了如图丙的电路，下列接线方法正确的是_____。



丙

- A. 1 接 4, 2 接 3 B. 1 接 2, 3 接 4 C. 1 接 3, 2 接 4

【答案】 (1) 电流从电流表的“+”接线柱流入时，指针向哪个方向偏转（电流方向与指针偏转方向的关系）

(2) D

(3) C

【解析】

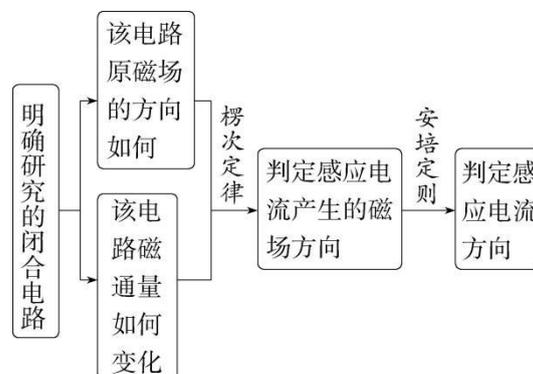
(1) 磁铁的 N 极向下运动时，电流表指针发生偏转。若要探究线圈中产生感应电流的方向，除了要知道线圈上导线的绕向外，还必须知道电流从电流表的“+”接线柱流入时，指针向哪个方向偏转（电流方向与指针偏转方向的关系），以便于和后面的实验做对比。

(2) 条形磁铁向上移动一小段距离，穿过螺线管的磁感线减少，向下移动一小段距离，穿过螺线管的磁感线增加，移动方向不同，产生的感应电流方向不同，根据二极管具有单向导电性可知，灯泡 A、B 交替短暂发光。故选 D。

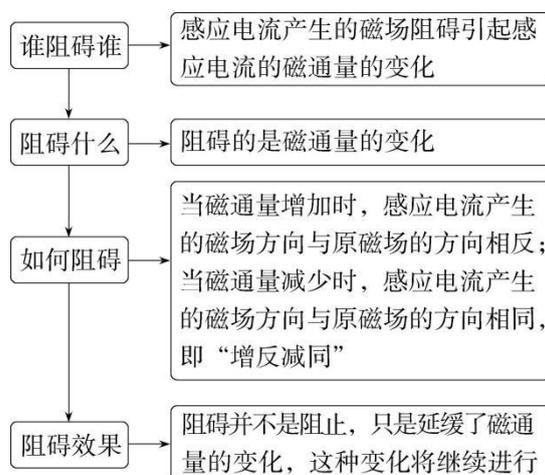
(3) 根据感应电流产生的条件可知，要想进一步探究影响感应电流方向的因素，需要组成一个闭合回路，还需要一个含有电源的电路形成一个电磁铁，所以 1 接 3，2 接 4。故选 C。

考点二 楞次定律、右手定则的理解及应用

1. 用楞次定律判断感应电流方向



2.楞次定律中“阻碍”的含义



3.右手定则的理解和应用

(1) 右手定则适用于闭合电路的部分导体切割磁感线产生感应电流的情况。

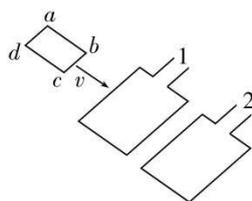
(2) 右手定则是楞次定律的一种特殊形式，用右手定则能解决的问题，用楞次定律也能解决。

(3) 右手定则应用“三注意”：

- ①磁感线必须垂直穿入掌心；
- ②拇指指向导体运动的方向；
- ③四指所指的方向为感应电流的方向。

考向 1 楞次定律的应用

例 2 [2023·海南卷·6, 3分]汽车测速利用了电磁感应现象，汽车可简化为一个矩形线圈 $abcd$ ，埋在地下的线圈分别为 1、2，通上顺时针（俯视）方向电流，当汽车经过线圈时（ ）

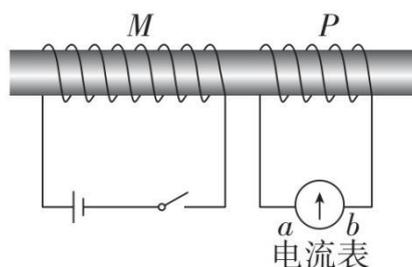


- 线圈 1、2 产生的磁场方向竖直向上
- 汽车进入线圈 1 过程产生感应电流方向为 $abcd$
- 汽车离开线圈 1 过程产生感应电流方向为 $abcd$
- 汽车进入线圈 2 过程受到的安培力方向与速度方向相同

【答案】C

【解析】线圈1、2中所通电流方向为顺时针（俯视），产生的磁场方向都垂直地面向下，A 错误。由楞次定律推论可知，汽车进入线圈1过程，通过汽车的磁通量增大，则感应电流方向与线圈1中电流反向，为 $adcb$ ；离开线圈1过程通过汽车的磁通量减小，则感应电流方向为 $abcd$ ，B 错误，C 正确。汽车进入线圈2过程，通过汽车的磁通量增大，感应电流方向为逆时针（俯视），汽车受到的安培力方向与速度方向相反，D 错误。

迁移应用 1. [2024·北京卷·6, 3分]如图所示，线圈M和线圈P绕在同一个铁芯上，下列说法正确的是（ ）



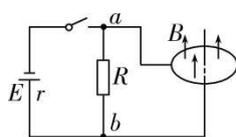
- A. 闭合开关瞬间，线圈M和线圈P相互吸引
- B. 闭合开关，达到稳定后，电流表的示数为0
- C. 断开开关瞬间，流过电流表的电流方向由a到b
- D. 断开开关瞬间，线圈P中感应电流的磁场方向向左

【答案】B

【解析】闭合开关瞬间，由楞次定律可得线圈M和线圈P相互排斥，A 错误。闭合开关，达到稳定后，穿过线圈P的磁通量不变，线圈P中不会产生感应电动势，电流表的示数为0，B 正确。断开开关瞬间，线圈P中向右的磁通量减小，由楞次定律可得线圈P中感应电流产生的磁场方向向右；由安培定则可得流过电流表的电流方向由b到a，C、D 错误。

考向 2 右手定则的应用

例 3 多选 如图所示，铜圆盘安装在竖直的铜轴上，圆盘处于方向竖直向上的匀强磁场中。电路通过电刷与圆盘的边缘和铜轴接触良好，电源电动势为 E 、内阻为 r ，定值电阻为 R 。先将开关闭合，待圆盘转速稳定后再断开开关，不计一切摩擦，下列说法正确的是（ ）



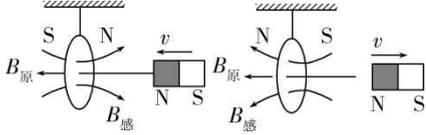
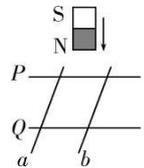
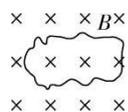
- A. 闭合开关时，从上往下看圆盘逆时针转动
- B. 闭合开关转速稳定时，流过圆盘的电流为零
- C. 断开开关时， a 点电势低于 b 点电势
- D. 断开开关后，流过电阻 R 上的电流方向与原电流方向相反

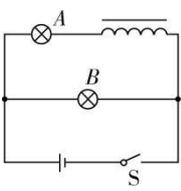
【答案】BC

【解析】闭合开关时，铜圆盘中有电流经过，圆盘中电流方向沿半径向外，根据左手定则可知，从上往下看圆盘顺时针转动，故A错误；闭合开关转速稳定时，圆盘不受安培力作用，根据 $F = BIL$ 可知流过圆盘的电流为零，故B正确；断开开关时，从上往下看，圆盘顺时针转动，圆盘的半径切割磁感线产生感应电动势，由右手定则知，圆盘中电流方向沿半径向里，所以 a 点电势低于 b 点电势，故C正确；闭合开关时，流过电阻 R 上的电流方向从 b 点经电阻 R 到 a 点，断开开关时， a 点电势低于 b 点电势，流过电阻 R 上的电流方向从 b 点经电阻 R 到 a 点，所以断开开关后，流过电阻 R 上的电流方向与原电流方向相同，故D错误。

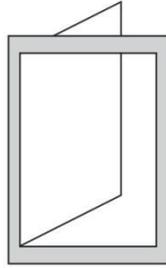
考点三 楞次定律推论的应用

楞次定律中“阻碍”的含义可以推广为电磁感应的效果总要阻碍引起电磁感应的原 因，列表举例说明。

内容	例证
阻碍相对运动——“来拒去留”	磁铁靠近，是斥力；磁铁远离，是引力 
使回路面积有扩大或缩小的趋势——“增缩减扩”	P 、 Q 是光滑固定导轨， a 、 b 是可动金属棒。磁铁下移，面积应减小， a 、 b 靠近 
	B 减小，线圈扩张 

阻碍原电流的变化——“增反减同”	合上 S, B 灯先亮 
------------------	---

例 4 [2024 · 安徽淮北模拟] 如图所示, 某教室墙上有一朝南的钢窗, 将钢窗右侧向外打开, 以推窗人的视角来看, 窗框中产生 ()

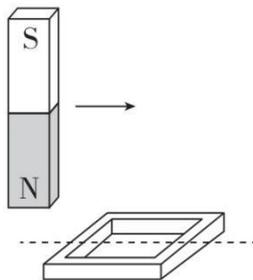


- A. 顺时针电流, 且有收缩趋势 B. 顺时针电流, 且有扩张趋势
 C. 逆时针电流, 且有收缩趋势 D. 逆时针电流, 且有扩张趋势

【答案】D

【解析】 磁场方向由南指向北, 将钢窗右侧向外打开, 则向北穿过钢窗的磁通量减少, 根据楞次定律知, 感应电流产生的磁场方向由南指向北, 则以推窗人的视角来看, 感应电流方向为逆时针, 同时根据“增缩减扩”可知, 窗框有扩张趋势, 故 D 正确。

迁移应用 2. 如图所示, 质量为 m 的铜质闭合线圈静置于粗糙水平桌面上。当一个竖直放置的条形磁铁贴近线圈, 沿线圈中线由左至右从线圈正上方等高、匀速经过时, 线圈始终保持不动。线圈在此过程中受到的支持力为 N 、摩擦力为 f 。以下判断正确的是 (重力加速度为 g) ()



- A. N 先大于 mg , 后小于 mg B. N 一直大于 mg
 C. f 方向先向左, 后向右 D. 线圈中的电流方向始终不变

【答案】A

【解析】根据“来拒去留”可知，磁铁靠近线圈时受到斜向上的斥力作用，由牛顿第三定律知，线圈受到斜向下的斥力，所以它受到的支持力 N 大于重力 mg ，磁铁远离线圈时受到斜向下的引力作用，线圈受到斜向上的引力，所以它受到的支持力 N 小于重力 mg ，故A正确，B错误；整个过程中磁铁对线圈的作用力都有向右的分量，即线圈有向右运动的趋势，摩擦力的方向始终向左，故C错误；由于线圈中的磁通量先变大后变小，方向不变，所以线圈中电流的方向发生变化，故D错误。

考点四 “三定则、一定律”的综合应用

1.安培定则、左手定则、右手定则、楞次定律应用的比较

基本现象		应用的定则或定律
运动电荷、电流产生磁场		安培定则
磁场对运动电荷、电流的作用力		左手定则
电磁感应	部分导体做切割磁感线运动，有感应电流产生	右手定则
	闭合电路磁通量发生变化，有感应电流产生	楞次定律

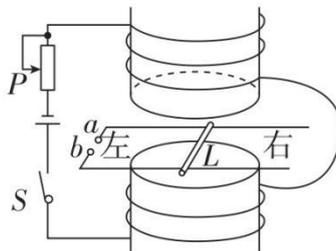
2.右手定则与左手定则的区别

“因电而动”——用左手定则，“因动而电”——用右手定则。

3.安培定则与楞次定律的区别

“因电生磁”——用安培定则，“因磁生电”——用楞次定律（或右手定则）。

例5 [2024·河南名校联考] 多选 如图所示，两条水平光滑金属导轨固定在电磁铁两磁极之间，导轨两端 a 、 b 断开，金属杆 L 垂直导轨放置。闭合开关 S ，下列判断正确的是（ ）



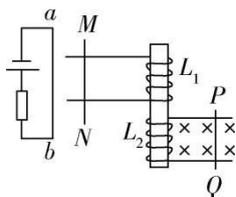
- A. 电磁铁两磁极之间的磁场方向向下
- B. 若给金属杆向左的初速度，则 a 点电势高于 b 点
- C. 若 a 、 b 间接导线，向下移动滑片 P ，则金属杆向左运动

D. 若 a 、 b 间接直流电源， a 接正极、 b 接负极，则金属杆向左运动

【答案】 AC

【解析】 闭合开关 S ，根据右手螺旋定则可知，电磁铁两磁极之间的磁场方向向下，A 正确；根据右手定则可知，若给金属杆向左的初速度，则 a 点电势低于 b 点电势，B 错误；若 a 、 b 间接导线，向下移动滑片 P ，则螺线管中的电流变大，磁场增强，由于穿过闭合回路的磁通量增加，由楞次定律可知，金属杆向左运动，C 正确；若 a 、 b 间接直流电源， a 接正极、 b 接负极，由左手定则可知，金属杆向右运动，D 错误。

迁移应用 3. **多选** 如图所示，水平放置的两条光滑轨道上有可自由移动的金属棒 PQ 、 MN ， MN 的左边有一闭合电路，当 PQ 在一外力的作用下运动时， MN 由静止开始向右运动，则 PQ 所做的运动可能是（ ）



- A. 向右加速运动
- B. 向左加速运动
- C. 向右减速运动
- D. 向左减速运动

【答案】 BC

【解析】 MN 由静止开始向右运动，说明 MN 受到向右的安培力，因为导线 ab 在 MN 处产生的磁场方向垂直纸面向里 $\xrightarrow{\text{左手定则}}$ MN 中的感应电流方向为 $M \rightarrow N \xrightarrow{\text{安培定则}}$ L_1 中感应电流的磁场方向向上 $\xrightarrow{\text{楞次定律}}$ $\begin{cases} L_2 \text{中磁场方向向上减弱} \\ L_2 \text{中磁场方向向下增强} \end{cases}$ 。若 L_2 中磁场方向向上减弱 $\xrightarrow{\text{安培定则}}$ PQ 中电流方向为 Q 到 P 且减小 $\xrightarrow{\text{右手定则}}$ 向右减速运动；若 L_2 中磁场方向向下增强 $\xrightarrow{\text{安培定则}}$ PQ 中电流方向为 P 到 Q 且增大 $\xrightarrow{\text{右手定则}}$ 向左加速运动。

温馨提示 请完成《分层突破训练》课时作业 61

第 2 讲 法拉第电磁感应定律 自感 涡流

课标要求

通过实验，理解法拉第电磁感应定律；通过实验，了解自感现象和涡流现象；能举例说明自感现象和涡流现象在生产生活中的应用。

必备知识·强基固本

一、法拉第电磁感应定律

1. 感应电动势

- (1) 概念：在电磁感应现象中产生的电动势。
- (2) 产生条件：穿过电路的_____发生了变化，与电路是否闭合_____。
- (3) 方向判断：感应电动势的方向用_____或_____判断。
- (4) 感应电流与感应电动势的关系：遵循_____，即 $I = \frac{E}{R+r}$ 。

【答案】磁通量；无关；楞次定律；右手定则；闭合电路欧姆定律； $\frac{E}{R+r}$

2. 法拉第电磁感应定律

- (1) 内容：闭合电路中感应电动势的大小，跟穿过这一电路的_____成正比。
- (2) 公式： $E = n \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ ，其中 n 为线圈匝数， $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ 为磁通量的_____。

【答案】磁通量的变化率；变化率

3. 导体切割磁感线的情形

- (1) 若 B 、 l 、 v 相互垂直，则 $E = Blv$ 。
- (2) 若 $B \perp l$ ， $l \perp v$ ， v 与 B 夹角为 θ ，则 $E = Blv \sin\theta$ 。

【答案】 Blv ； $Blv \sin\theta$

二、自感与涡流

1. 自感

- (1) 定义：由于导体本身的_____变化而产生的电磁感应现象称为自感。
- (2) 自感电动势
 - a. 定义：在自感现象中产生的感应电动势叫作自感电动势。
 - b. 表达式： $E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ 。
- (3) 自感系数 L
 - a. 相关因素：与线圈的大小、形状、匝数以及是否有铁芯等有关。
 - b. 单位：亨利(H)。1mH = 10^{-3} H，1 μ H = 10^{-6} H。

【答案】电流

2. 涡流

(1) 涡流：块状金属放在变化磁场中，或者让它在磁场中运动时，金属块内产生的旋涡状感应电流。

(2) 产生原因：金属块内_____变化→感应电动势→感应电流。

【答案】磁通量

3. 电磁阻尼

导体在磁场中运动时，感应电流会使导体受到安培力，安培力的方向总是_____导体的运动。

【答案】阻碍

4. 电磁驱动

如果磁场相对于导体运动，在导体中会产生_____使导体受到安培力而运动起来。

【答案】感应电流

自主评价

1. 依据下面小情境，判断下列说法对错。

(人教版选择性必修第二册改编) 如图所示，两根长 1m 的空心铝管甲、乙竖直放置，其中乙管上有一条竖直的裂缝。某同学把一块圆柱形的强磁体先后从甲、乙两管的上端由静止放入管口，磁体在甲、乙两管中运动的时间分别为 3s 和 1s。磁体的直径略小于铝管的内径，不计磁体与铝管内壁的摩擦。



甲



乙

- (1) 磁体在乙管内下落的过程中，乙管中没有产生感应电动势。()
- (2) 磁体在甲管内下落的过程中，所受合外力的冲量可能为 0。()
- (3) 磁体在乙管内下落的过程中，其重力势能的减少量等于动能的增加量。()
- (4) 磁体在甲管内下落的过程中，其克服磁场力做的功小于重力势能的减少量。()

【答案】(1) ×

(2) ×

(3) ×

(4) ✓

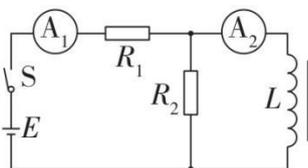
2. (人教版选择性必修第二册改编) A 、 B 两个闭合线圈用同样的导线制成, 匝数均为 10 匝, 半径 $r_A = 2r_B$, 分别按图甲、乙两种方式放入匀强磁场中, 且匀强磁场的磁感应强度随时间均匀减小, 则甲、乙图中, A 、 B 两线圈中电动势之比分别为 ()



- A. 1:11:1 B. 4:11:1 C. 1:14:1 D. 4:14:1

【答案】C

3. (人教版选择性必修第二册改编) 如图, E 是电源, S 是开关, R_1 和 R_2 是定值电阻, L 可视为电阻为零的电感线圈, 电流表 A_1 和 A_2 可视为理想电流表。在开关 S 闭合后的很短时间内 ()



- A. A_1 示数减小, A_2 示数增大 B. A_1 示数增大, A_2 示数增大
C. A_1 示数增大, A_2 示数减小 D. A_1 示数减小, A_2 示数减小

【答案】B

关键能力·核心突破

考点一 法拉第电磁感应定律的理解及应用

1. 感应电动势的决定因素

感应电动势的大小由穿过电路的磁通量的变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 和线圈的匝数 n 共同决定, 而与磁通量 Φ 、磁通量的变化量 $\Delta\Phi$ 的大小没有必然联系。

2. 法拉第电磁感应定律的三种应用情况

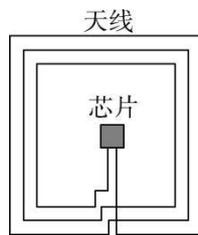
(1) 磁通量的变化是由面积变化引起时, $\Delta\Phi = B \cdot \Delta S$, 则 $E = \frac{nB \cdot \Delta S}{\Delta t}$ 。

(2) 磁通量的变化是由磁场变化引起时, $\Delta\Phi = \Delta B \cdot S$, 则 $E = \frac{n\Delta B \cdot S}{\Delta t}$ 。

(3) 磁通量的变化是由面积和磁场共同变化引起时, 则根据定义求, $\Delta\Phi = \Phi_{末} - \Phi_{初}$, $E = n \frac{B_2 S_2 - B_1 S_1}{\Delta t} \neq n \frac{\Delta B \cdot \Delta S}{\Delta t}$ 。

3. 在 $\Phi - t$ 图像中, 磁通量的变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 是 $\Phi - t$ 图线上某点切线的斜率, 利用斜率和线圈匝数可以确定该点对应感应电动势的大小。

例 1 [2023 · 湖北卷 · 5, 4 分] 近场通信(NFC)器件应用电磁感应原理进行通讯, 其天线类似一个压平的线圈, 线圈尺寸从内到外逐渐变大。如图所示, 一正方形 NFC 线圈共 3 匝, 其边长分别为 1.0cm、1.2cm 和 1.4cm, 图中线圈外线接入内部芯片时与内部线圈绝缘。若匀强磁场垂直通过此线圈, 磁感应强度变化率为 10^3T/s , 则线圈产生的感应电动势最接近 ()

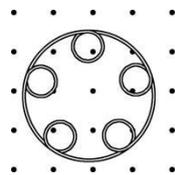


- A. 0.30V B. 0.44V C. 0.59V D. 4.3V

【答案】B

【解析】 根据法拉第电磁感应定律可知 $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B}{\Delta t} S = 10^3 \times (1.0^2 + 1.2^2 + 1.4^2) \times 10^{-4} \text{V} = 0.44 \text{V}$, 故 B 正确。

迁移应用 1. [2022 · 河北卷 · 5, 4 分] 将一根绝缘硬质细导线顺次绕成如图所示的线圈, 其中大圆面积为 S_1 , 小圆面积均为 S_2 , 垂直线圈平面方向有一随时间 t 变化的磁场, 磁感应强度大小 $B = B_0 + kt$, B_0 和 k 均为常量, 则线圈中总的感应电动势大小为 ()



- A. kS_1 B. $5kS_2$ C. $k(S_1 - 5S_2)$ D. $k(S_1 + 5S_2)$

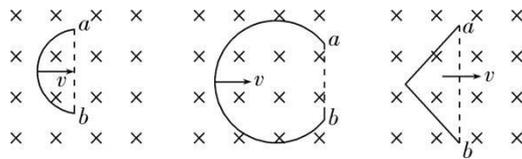
【答案】D

【解析】根据楞次定律可知，题图所示的1个大圆与5个小圆中的感应电动势方向相同，即可等效成1个大圆与5个小圆串联，故线圈中总的感应电动势大小为 $E = E_{\text{大}} + 5E_{\text{小}}$ ，根据法拉第电磁感应定律，有 $E_{\text{大}} = \frac{\Delta B}{\Delta t} S_1$ ， $E_{\text{小}} = \frac{\Delta B}{\Delta t} S_2$ ，将 $B = B_0 + kt$ 代入，可解得 $E = k(S_1 + 5S_2)$ ，故D正确。

考点二 导体切割磁感线产生的感应电动势

1. $E = Blv$ 的特性

- (1) 正交性：磁场为匀强磁场，而且 B 、 l 、 v 三者互相垂直。
- (2) 有效性： l 为导体切割磁感线的有效长度。如图中所示，导体的有效长度为 a 、 b 间的距离。



- (3) 相对性： v 是导体相对磁场的速度，若磁场也在运动，应注意速度间的相对关系。

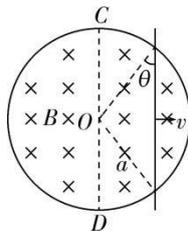
2. 导体转动切割磁感线产生感应电动势的情况

若长为 L 的导体棒在磁感应强度为 B 的匀强磁场中以角速度 ω 匀速转动，则：（导体棒与磁场方向垂直）

- (1) 以中点为轴时， $E = 0$ 。
- (2) 以端点为轴时， $E = \frac{1}{2}B\omega L^2$ 。
- (3) 以任意点为轴时， $E = \frac{1}{2}B\omega(L_1^2 - L_2^2)$ （其中 $L_1 > L_2$ ）。

考向 1 导体平动切割磁感线

例 2 多选 半径为 a 、右端开小口的导体圆环和长为 $2a$ 的导体直杆，单位长度电阻均为 R_0 。圆环水平固定放置，整个内部区域分布着垂直于圆环所在平面向下的匀强磁场，磁感应强度为 B 。杆在圆环上以速度 v 平行于直径 CD 向右做匀速直线运动，杆始终有两点与圆环接触良好，从圆环中心 O 开始，杆的位置由 θ 确定，如图所示。则（ ）



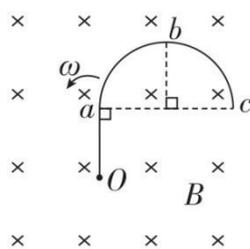
- A. $\theta = 0$ 时，杆产生的电动势为 $2Bav$
- B. $\theta = \frac{\pi}{3}$ 时，杆产生的电动势为 $\sqrt{3}Bav$
- C. $\theta = 0$ 时，杆受的安培力大小为 $\frac{2B^2av}{(\pi+2)R_0}$
- D. $\theta = \frac{\pi}{3}$ 时，杆受的安培力大小为 $\frac{3B^2av}{(5\pi+3)R_0}$

【答案】AD

【解析】 $\theta = 0$ 时，感应电动势 $E = 2Bav$ ，故 A 项正确； $\theta = \frac{\pi}{3}$ 时， $E = B \cdot 2a \cos \frac{\pi}{3} \cdot v = Bav$ ，故 B 项错误；由 $L = 2a \cos \theta$ ， $E = BLv$ ， $I = \frac{E}{R}$ ， $R = R_0[2a \cos \theta + (\pi + 2\theta)a]$ 得，当 $\theta = 0$ 时， $F = \frac{B^2 L^2 v}{R} = \frac{4B^2 av}{R_0(2+\pi)}$ ，故 C 项错误；当 $\theta = \frac{\pi}{3}$ 时， $F = \frac{3B^2 av}{R_0(5\pi+3)}$ ，故 D 项正确。

考向 2 导体转动切割磁感线

例 3 [2024·湖南卷·4，4分]如图，有一硬质导线 $Oabc$ ，其中 \widehat{abc} 是半径为 R 的半圆弧， b 为圆弧的中点，直线段 Oa 长为 R 且垂直于直径 ac 。该导线在纸面内绕 O 点逆时针转动，导线始终在垂直纸面向里的匀强磁场中。则 O 、 a 、 b 、 c 各点电势关系为 ()

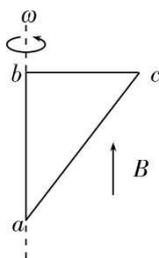


- A. $\varphi_O > \varphi_a > \varphi_b > \varphi_c$
- B. $\varphi_O < \varphi_a < \varphi_b < \varphi_c$
- C. $\varphi_O > \varphi_a > \varphi_b = \varphi_c$
- D. $\varphi_O < \varphi_a < \varphi_b = \varphi_c$

【答案】C

【解析】根据几何关系可知 $Ob = Oc$ ，根据 $v = \omega r$ 、 $E = Brv$ 及右手定则可知， $U_{Ob} = U_{Oc} > U_{Oa}$ ，且 O 点的电势最高，即 $\varphi_O > \varphi_a > \varphi_b = \varphi_c$ ，C 正确。

迁移应用 2. 如图，直角三角形金属框 abc 放置在匀强磁场中，磁感应强度大小为 B ，方向平行于 ab 边向上。当金属框绕 ab 边以角速度 ω 逆时针转动时， a 、 b 、 c 三点的电势分别为 φ_a 、 φ_b 、 φ_c 。已知 bc 边的长度为 l 。下列判断正确的是 ()



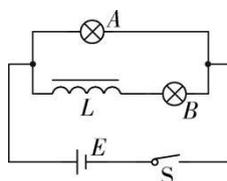
- A. $\varphi_a > \varphi_c$, 金属框中无电流
- B. $\varphi_b > \varphi_c$, 金属框中电流方向为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow a$
- C. $U_{bc} = -\frac{1}{2}Bl^2\omega$, 金属框中无电流
- D. $U_{ac} = \frac{1}{2}Bl^2\omega$, 金属框中电流方向为 $a \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$

【答案】C

【解析】在三角形金属框中，有两条边切割磁感线，其中一条为 bc 边，根据 $E = Blv$ 可得电动势大小为 $\frac{1}{2}Bl^2\omega$ ；另一条为 ac 边， ac 边的有效切割长度为 l ，根据 $E = Blv$ 可得电动势大小也为 $\frac{1}{2}Bl^2\omega$ ；由右手定则可知金属框内无电流，且 $\varphi_c > \varphi_b = \varphi_a$ ，A、B、D 错误。 $U_{bc} = U_{ac} = -\frac{1}{2}Bl^2\omega$ ，C 正确。

考点三 自感 涡流 电磁阻尼和电磁驱动

1. **通、断电自感现象的分析** 多选 如图所示，电源的电动势为 E ，内阻忽略不计。A、B 是两个相同的小灯泡， L 是一个自感系数相当大的线圈。以下说法正确的是（ ）



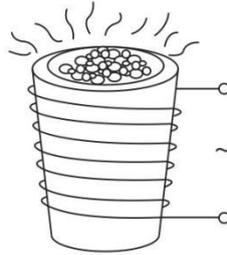
- A. 从开关闭合到电路中电流稳定的时间内，A 灯立刻亮，且亮度保持稳定
- B. 从开关闭合到电路中电流稳定的时间内，B 灯立刻亮，且亮度保持稳定
- C. 开关断开后瞬间，A 灯闪亮一下再熄灭
- D. 开关断开后瞬间，电流自右向左通过 A 灯

【答案】AD

【解析】开关闭合时，A 灯立刻亮，因为电源内阻忽略不计，所以 A 灯两端的电压保持不变，灯泡亮度稳定，故 A 正确。因为 L 是一个自感系数相当大的线圈，所以开关闭合后瞬间 B 灯不亮，然后逐渐变亮，最后亮度稳定，故 B 错误。两个灯泡电阻一样，若 L 电阻忽略不计，则开关断开前后流经 A 灯的电流相

同， A 灯不会闪亮；若 L 有电阻，则电路稳定时通过 B 灯的电流小于 A 灯的电流，所以开关断开后瞬间 A 灯也不会闪亮一下，故 C 错误。开关断开后瞬间， L 产生感应电动势，在回路中通过 A 灯的电流方向为从右向左，故 D 正确。

2. [2024·甘肃卷·6, 4分] **涡流**工业上常利用感应电炉冶炼合金，装置如图所示。当线圈中通有交变电流时，下列说法正确的是（ ）

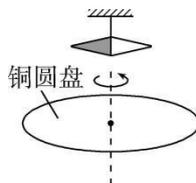


- A. 金属中产生恒定感应电流
- B. 金属中产生交变感应电流
- C. 若线圈匝数增加，则金属中感应电流减小
- D. 若线圈匝数增加，则金属中感应电流不变

【答案】B

【解析】当线圈中通有交变电流时，感应电炉金属中的磁通量也随之变化，金属中产生交变感应电流， A 错误， B 正确；若线圈匝数增加，根据法拉第电磁感应定律可知，感应电动势增大，则金属中感应电流变大， C 、 D 错误。

3. **电磁阻尼与电磁驱动**多选 著名的“圆盘实验”如下：将一铜圆盘水平放置，在其中心正上方用柔软细线悬挂一枚可以自由旋转的磁针，如图所示。实验中发现，当圆盘在磁针的磁场中绕过圆盘中心的竖直轴旋转时，磁针也随着一起转动起来，但略有滞后。下列说法正确的是（ ）



- A. 圆盘上产生了感应电动势
- B. 圆盘内的涡电流产生的磁场导致磁针转动
- C. 在圆盘转动的过程中，穿过整个圆盘的磁通量发生了变化
- D. 圆盘中的自由电子随圆盘一起运动形成电流，此电流产生的磁场导致磁针转动

【答案】 AB

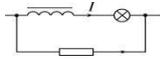
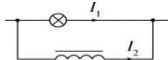
【解析】 当圆盘在磁针的磁场中绕过圆盘中心的竖直轴旋转时，圆盘的半径切割磁感线产生感应电动势，A 正确；圆盘内的涡电流产生的磁场对磁针施加磁场力作用，导致磁针转动，B 正确；由于圆盘中心正上方悬挂小磁针，在圆盘转动过程中，根据磁针磁场分布的对称性可知，穿过整个圆盘的磁通量一直为零，C 错误；圆盘中的电流并不是自由电子随圆盘一起运动产生的，而是切割磁感线产生了感应电动势，从而出现涡电流，涡电流的磁场导致磁针转动，D 错误。

核心提炼

1. 自感现象的四大特点

- (1) 自感电动势总是阻碍导体中原电流的变化。
- (2) 通过线圈中的电流不能发生突变，只能缓慢变化。
- (3) 电流稳定时，自感线圈就相当于普通导体。
- (4) 线圈的自感系数越大，自感现象越明显。自感电动势只是延缓了过程的进行，但它不能使过程停止，更不能使过程反向。

2. 自感现象中灯泡“闪亮”与“不闪亮”问题

项目	与线圈串联的灯泡	与线圈并联的灯泡
电路图		
通电时	流经灯泡的电流逐渐增大，灯泡逐渐变亮	通常情况下，流经灯泡的电流突然增大，然后逐渐减小达到稳定
断电时	流经灯泡的电流逐渐减小，灯泡逐渐变暗，电流方向不变	电路中稳态电流为 I_1 、 I_2 ： ①若 $I_2 \leq I_1$ ，灯泡逐渐变暗； ②若 $I_2 > I_1$ ，灯泡“闪亮”后逐渐变暗； ③两种情况下灯泡中电流方向均改变

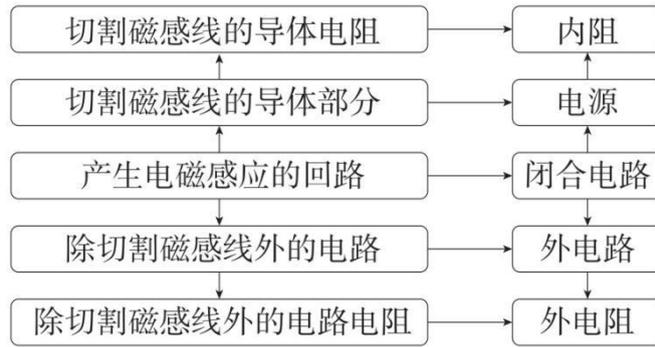
温馨提示 请完成《分层突破训练》课时作业 62

专题突破 20 电磁感应中的电路与图像问题

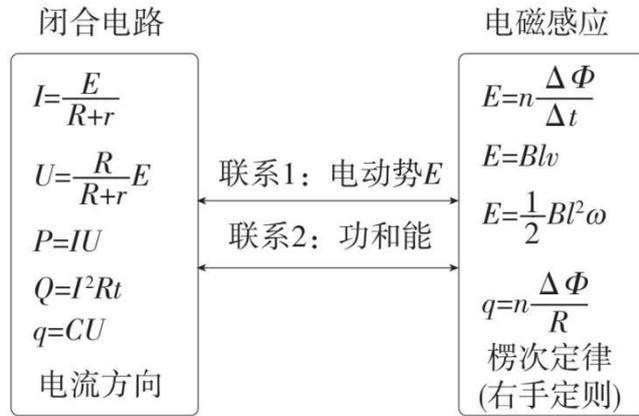
关键能力·核心突破

题型一 电磁感应中的电路问题

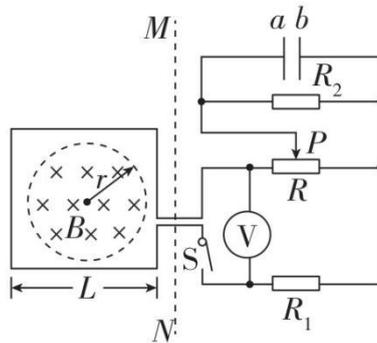
1. 电磁感应电路中的五个等效问题



2.电磁感应中电路知识的关系图



例 1 [2024 · 湖北宜昌模拟] 多选 如图所示，边长为 L 、不可形变的正方形导线框内有半径为 r 的圆形磁场区域，其磁感应强度 B 随时间 t 的变化关系为 $B = kt$ （常量 $k > 0$ ）。回路中滑动变阻器 R 的最大阻值为 R_0 ，滑片 P 位于滑动变阻器中央，定值电阻 $R_1 = R_0$ 、 $R_2 = \frac{R_0}{2}$ 。闭合开关 S ，电压表的示数为 U ，不考虑虚线 MN 右侧导体的感应电动势，则（ ）

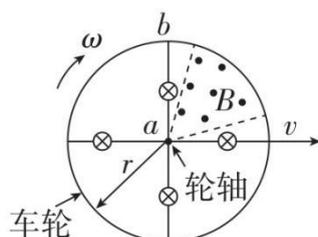


- A. R_2 两端的电压为 $\frac{U}{7}$
- B. 电容器的 a 极板带正电
- C. 滑动变阻器 R 的热功率为电阻 R_2 的 5 倍
- D. 正方形导线框中的感应电动势为 kL^2

【答案】AC

【解析】线框内产生的感应电动势 $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B}{\Delta t} \pi r^2 = k\pi r^2$ ，D 错误；电压表的示数 U 是外电压，外电路电阻的串、并联关系是 R_2 与滑动变阻器滑片 P 右侧电阻并联，之后与滑片 P 左侧电阻以及 R_1 串联，外电路总电阻 $R_{总} = R_1 + R_{左} + R_{并} = \frac{7}{4}R_0$ ，而 $R_{并} = \frac{R_0}{4}$ ，故 $R_{并}$ 两端的电压为 $\frac{U}{7}$ ，即 R_2 两端的电压为 $\frac{U}{7}$ ，A 正确；根据楞次定律及安培定则，线框中感应电流的方向为逆时针，电容器 b 极板带正电，B 错误；设滑动变阻器右半部分的电流为 I ，则 R_2 上的电流为 I ，滑动变阻器左半部分的电流为 $2I$ ，滑动变阻器上的功率 $P = I^2 \frac{R_0}{2} + (2I)^2 \frac{R_0}{2} = \frac{5}{2}I^2 R_0$ ， R_2 上的功率 $P_2 = I^2 \frac{R_0}{2}$ ，所以滑动变阻器的热功率为电阻 R_2 的 5 倍，C 正确。

迁移应用 1. [2024·山西忻州模拟] 多选 一种带有闪烁灯的自行车后轮结构如图所示，车轮与轮轴之间均匀地连接 4 根金属条，每根金属条中间都串接一个小灯，每个小灯阻值恒为 $R = 0.3\Omega$ ，金属条与车轮金属边框构成闭合回路，车轮半径 $r = 0.4\text{m}$ ，轮轴半径可以忽略。车架上固定一个强磁体，可形成圆心角 $\theta = 60^\circ$ 的扇形匀强磁场区域，磁感应强度 $B = 2.0\text{T}$ ，方向如图所示。若自行车正常前进时，后轮顺时针转动的角速度恒为 $\omega = 10\text{rad/s}$ ，不计其他电阻和车轮厚度，下列说法正确的是（ ）



- A. 金属条 ab 进入磁场时， a 端电势高于 b 端电势
- B. 金属条 ab 进入磁场时， a 、 b 间的电压为 0.4V
- C. 运动过程中流经灯泡的电流方向一直不变
- D. 自行车正常前进时，4 个小灯总功率的平均值为 $\frac{64}{15}\text{W}$

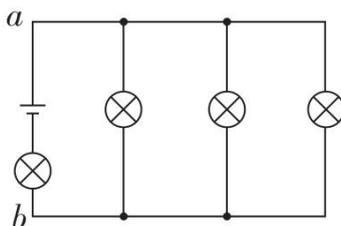
【答案】ABD

【解析】当金属条 ab 进入磁场时，金属条 ab 相当于电源，由右手定则可知，电流方向从 b 端流向 a 端，故 a 端电势高于 b 端电势，等效电路图如图，可知 $L =$

$$r = 0.4\text{m}, E = \frac{1}{2}BL^2\omega = 1.6\text{V}, R_{总} = \frac{R}{3} + R = \frac{4}{3}R = 0.4\Omega,$$

$$U_{ab} = \frac{E}{R_{总}} \cdot \frac{R}{3} = 0.4\text{V}, \text{ 通过 } ab \text{ 的电流 } I = \frac{E}{R_{总}} = \frac{1.6}{0.4}\text{A} = 4\text{A}。 \text{ 设车轮运动一周的时间}$$

为 T ，则每根金属条充当电源的时间 $t = \frac{\theta}{360^\circ} T = \frac{T}{6}$ ，则车轮运动一周电路中有电源的时间 $t' = 4t = \frac{2T}{3}$ 。可知一个周期内4个小灯总功率的平均值 $P = EI \cdot \frac{t'}{T} = \frac{64}{15} W$ ，故A、B、D正确。当某一金属条在磁场中运动时，该金属条中流经灯泡的电流方向为从车轮边框流向轮轴，当其他金属条在磁场中运动时，该金属条中电流方向由轮轴流向车轮边框，故C错误。



题型二 电磁感应中的电荷量问题

电磁感应过程中的电荷量公式： $q = \frac{n\Delta\Phi}{R_{\text{总}}}$

(1) 推导：在产生感应电流的电路中，设电路的总电阻为 $R_{\text{总}}$ ，在时间 Δt 内通过导体横截面的电荷量为 q 。

由法拉第电磁感应定律得 $\bar{\varepsilon} = \frac{n\Delta\Phi}{\Delta t}$

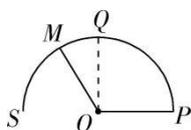
由闭合电路欧姆定律得 $\bar{i} = \frac{\bar{\varepsilon}}{R_{\text{总}}}$

由电流定义式得 $q = \bar{i}\Delta t$

联立解得 $q = n \frac{\Delta\Phi}{R_{\text{总}}}$ 。

(2) 结论：电磁感应过程中产生的感应电荷量由线圈的匝数、磁通量的变化量及电路的总电阻共同决定，与时间 Δt 无关。

例2 如图，导体轨道 $OPQS$ 固定，其中 PQS 是半圆， Q 为半圆的中点， O 为圆心。轨道的电阻忽略不计。 OM 是有一定电阻、可绕 O 转动的金属杆， M 端位于 PQS 上， OM 与轨道接触良好。空间存在与半圆所在平面垂直的匀强磁场，磁感应强度大小为 B 。现使 OM 从 OQ 位置以恒定的角速度逆时针转到 OS 位置并固定（过程I）；再使磁感应强度大小以一定的变化率从 B 增加到 B' （过程II）。在过程I、II中，流过 OM 的电荷量相等，则 $\frac{B'}{B}$ 等于（ ）

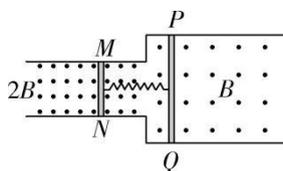


- A. $\frac{5}{4}$ B. $\frac{3}{2}$ C. $\frac{7}{4}$ D. 2

【答案】B

【解析】在过程 I 中，根据法拉第电磁感应定律，有 $E_1 = \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t_1} = \frac{(\frac{1}{2}\pi r^2 - \frac{1}{4}\pi r^2)B}{\Delta t_1}$ ，根据闭合电路欧姆定律，有 $I_1 = \frac{E_1}{R}$ ， $q_1 = I_1\Delta t_1$ ；同理，在过程 II 中，有 $E_2 = \frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t_2} = \frac{(B'-B)\frac{1}{2}\pi r^2}{\Delta t_2}$ ， $I_2 = \frac{E_2}{R}$ ， $q_2 = I_2\Delta t_2$ ，又 $q_1 = q_2$ ，联立解得 $\frac{B'}{B} = \frac{3}{2}$ 。

迁移应用 2. [2023·辽宁卷·10, 6分] 多选 如图，两根光滑平行金属导轨固定在绝缘水平面上，左、右侧导轨间距分别为 d 和 $2d$ ，处于竖直向上的磁场中，磁感应强度大小分别为 $2B$ 和 B 。已知导体棒 MN 的电阻为 R 、长度为 d ，导体棒 PQ 的电阻为 $2R$ 、长度为 $2d$ ， PQ 的质量是 MN 的 2 倍。初始时刻两棒静止，两棒中点之间连接一压缩量为 L 的轻质绝缘弹簧。释放弹簧，两棒在各自磁场中运动直至停止，弹簧始终在弹性限度内。整个过程中两棒保持与导轨垂直并接触良好，导轨足够长且电阻不计。下列说法正确的是 ()



- A. 弹簧伸展过程中，回路中产生顺时针方向的电流
 B. PQ 速率为 v 时， MN 所受安培力大小为 $\frac{4B^2d^2v}{3R}$
 C. 整个运动过程中， MN 与 PQ 的路程之比为 2:1
 D. 整个运动过程中，通过 MN 的电荷量为 $\frac{BLd}{3R}$

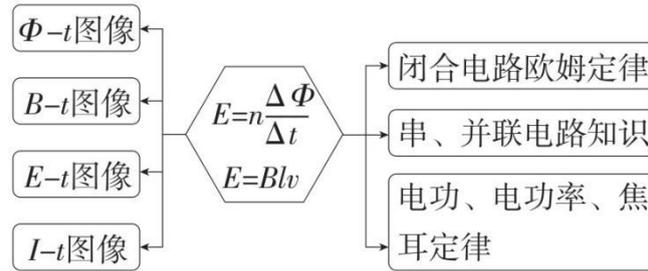
【答案】AC

【解析】弹簧伸展过程中，由右手定则可判定 PQ 向右运动产生的感应电流为顺时针方向， MN 向左运动产生的感应电流也是顺时针方向，所以回路中产生顺时针方向的电流，A 正确；因 MN 所受安培力 $F_{安1} = 2BId$ ， PQ 所受安培力 $F_{安2} = BI \cdot 2d$ ，所以 $F_{安1} = F_{安2}$ ，两导体棒与弹簧组成的系统动量守恒， $mv_{MN} - 2mv_{PQ} = 0$ ，当 PQ 的速率为 v 时， MN 的速率为 $2v$ ，此时 $E = 2Bd \cdot 2v + B \cdot 2dv = 6Bdv$ ， $I = \frac{E}{3R} = \frac{2Bdv}{R}$ ， MN 所受安培力 $F_{安} = 2BId = \frac{4B^2d^2v}{R}$ ，B 错误；任意时刻 $v_{MN} : v_{PQ} = 2:1$ ，且速度方向相反，则在相同时间内 MN 和 PQ 的路程之比

为 2:1, C 正确; 在整个运动过程中弹簧最终恢复到原长, 有 $x_{MN} + x_{PQ} = L$, 则 MN 左移 $\frac{2}{3}L$, PQ 右移 $\frac{L}{3}$, $\Delta\Phi = 2B \cdot \frac{2}{3}L \cdot d + B \cdot \frac{L}{3} \cdot 2d = 2BLd$, 通过 MN 的电荷量即通过整个回路的电荷量, $q = \bar{I}\Delta t = \frac{\bar{E}}{3R} \cdot \Delta t = \frac{\Delta\Phi}{3R\Delta t} \cdot \Delta t = \frac{\Delta\Phi}{3R} = \frac{2BLd}{3R}$, D 错误。

题型三 电磁感应中的图像问题

1. 图像问题类型

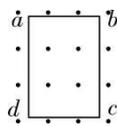


2. 解题方法: 先定性排除, 再定量解析

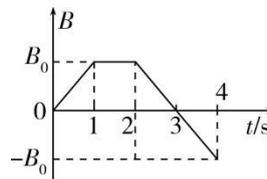
(1) 定性排除法: 用右手定则或楞次定律确定物理量的方向, 定性地分析物理量的变化趋势、变化快慢、是否均匀变化等, 特别注意物理量的正负和磁场边界处物理量的变化, 通过定性分析排除错误选项。

(2) 定量解析法: 根据题目所给条件推导出物理量之间的函数关系, 然后由函数关系对图像作出分析, 由图像的斜率、截距等作出判断。

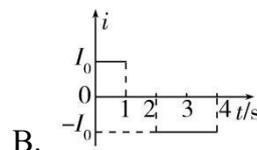
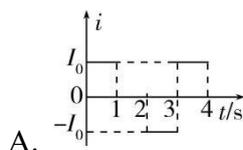
例 3 多选 如图甲所示, 闭合矩形导线框 $abcd$ 固定在匀强磁场中, 磁场的方向与导线框所在平面垂直, 磁感应强度 B 随时间 t 变化的规律如图乙所示。规定垂直纸面向外为磁场的正方向, 顺时针方向为线框中感应电流的正方向, 水平向右为安培力的正方向。关于线框中的感应电流 i 、 ad 边所受的安培力 F 随时间 t 变化的图像, 下列选项正确的是 ()

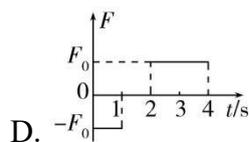
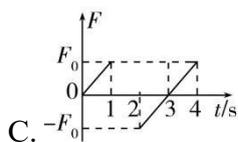


甲



乙

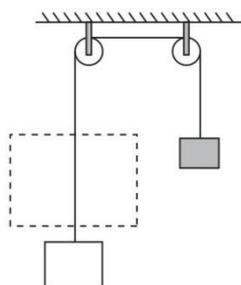


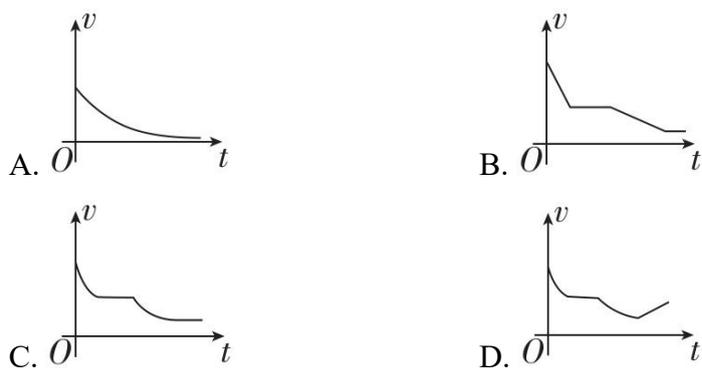


【答案】BC

【解析】由题图乙可知， $0\sim 1\text{s}$ 时间内， B 的方向垂直纸面向外， B 增大， Φ 增大，由楞次定律及安培定则可知，感应电流的方向是顺时针方向，为正值； $1\sim 2\text{s}$ 时间内，磁通量不变，无感应电流； $2\sim 3\text{s}$ 时间内， B 的方向垂直纸面向外， B 减小， Φ 减小，由楞次定律及安培定则可知，感应电流的方向是逆时针方向，是负值； $3\sim 4\text{s}$ 时间内， B 的方向垂直纸面向里， B 增大， Φ 增大，由楞次定律及安培定则可知，感应电流的方向是逆时针方向，是负值。由左手定则可知，在 $0\sim 1\text{s}$ 时间内， ad 边受到的安培力方向水平向右，是正值； $1\sim 2\text{s}$ 时间内，无感应电流，安培力为零； $2\sim 3\text{s}$ 时间内，安培力水平向左，是负值； $3\sim 4\text{s}$ 时间内，安培力水平向右，是正值。由法拉第电磁感应定律可知，感应电动势 $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B}{\Delta t}S$ ，感应电流 $i = \frac{E}{R} = \frac{S\cdot\Delta B}{R\cdot\Delta t}$ ，由 $B-t$ 图像可知，在 $0\sim 1\text{s}$ 、 $2\sim 4\text{s}$ 时间段内， $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ 的大小不变，在各时间段内 i 的大小是定值， ad 边受到的安培力 $F = BiL$ ， i 、 L 不变， B 均匀变化，则安培力 F 均匀变化，不是定值。综上可知，B、C 正确，A、D 错误。

例 4 [2024·全国甲卷·21，6分] 多选 如图，一绝缘细绳跨过两个在同一竖直面（纸面）内的光滑定滑轮，绳的一端连接一矩形金属线框，另一端连接一物块。线框与左侧滑轮之间的虚线区域内有方向垂直纸面的匀强磁场，磁场上下边界水平。在 $t = 0$ 时刻线框的上边框以不同的初速度从磁场下方进入磁场。运动过程中，线框始终在纸面内且上下边框保持水平。以向上为速度的正方向，下列线框的速度 v 随时间 t 变化的图像中可能正确的是（ ）

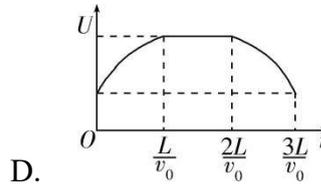
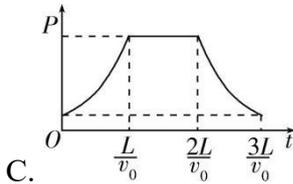
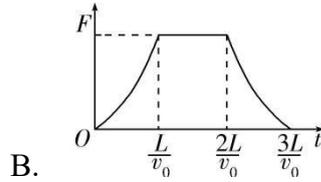
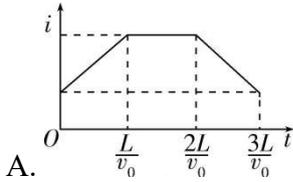
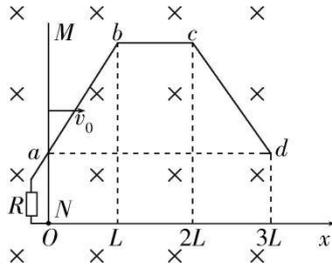




【答案】AC

【解析】设线框上边框在进入磁场瞬间的速度为 v ，上、下边框长度均为 L ，线框电阻为 R ，磁场的磁感应强度为 B ，则线框所受安培力 $F = BIL = \frac{B^2L^2v}{R}$ ，设线框质量为 m ，物块质量为 M ，由四个选项可知，线框刚进入磁场时，线框加速度方向向下，则对线框有 $mg + F - T = ma$ ，对物块有 $T - Mg = Ma$ ，联立可得加速度大小 $a = \frac{(m-M)g + \frac{B^2L^2v}{R}}{M+m}$ ，线框向上进入磁场的过程做加速度逐渐减小的减速运动，B 错误；当 $m = M$ 时，可能在线框完全进入磁场前，速度减为 0，加速度也减为 0（结合上述 a 的表达式可得该结论），A 正确；当 $m = M$ ，且线框减速到某一速度刚好全部进入磁场，则线框匀速上升到上边框接触到磁场上边界后，继续做加速度越来越小的减速运动，线框完全出磁场后匀速上升，C 正确；由 D 选项可知，线框完全进入磁场前，加速度已减为 0 且速度不为 0，结合上述 a 的表达式，可知 $m < M$ ，则线框从完全进入磁场后至上边框到磁场上边界的过程中向上做匀加速运动，离开磁场的过程再做加速度减小的减速运动，D 错误。

迁移应用 3. [2022·河北卷·8, 6分] 多选 如图，两光滑导轨水平放置在竖直向下的匀强磁场中，一根导轨位于 x 轴上，另一根由 ab 、 bc 、 cd 三段直导轨组成，其中 bc 段与 x 轴平行，导轨左端接入一电阻 R 。导轨上一金属棒 MN 沿 x 轴正向以速度 v_0 保持匀速运动， $t = 0$ 时刻通过坐标原点 O ，金属棒始终与 x 轴垂直。设运动过程中通过电阻的电流为 i ，金属棒受到安培力的大小为 F ，金属棒克服安培力做功的功率为 P ，电阻两端的电压为 U 。导轨与金属棒接触良好，忽略导轨与金属棒的电阻。下列图像可能正确的是（ ）



【答案】AC

【解析】设 ab 、 cd 导轨与 x 轴夹角为 θ ，在 O 处，金属棒有效长度为 y_0 ，在 $0 \sim \frac{L}{v_0}$ 时间内，金属棒切割磁感线有效长度为 $y = y_0 + v_0 t \tan \theta$ ，则切割磁感线的感应电动势 $E = Byv_0 = By_0 v_0 + Bv_0^2 t \tan \theta$ ，感应电动势 E 与 t 是一次函数关系，由于忽略导轨与金属棒的电阻，则感应电流 i 与时间 t 也是一次函数关系，在 $\frac{L}{v_0} \sim \frac{2L}{v_0}$ 时间内，金属棒切割磁感线有效长度不变，所以感应电动势不变，感应电流不变，在 $\frac{2L}{v_0} \sim \frac{3L}{v_0}$ 时间内相当于 $0 \sim \frac{L}{v_0}$ 时间内的逆过程，A 正确；由于不计除电阻 R 之外的所有电阻，所以电阻 R 两端电压与感应电动势相等，D 错误；当 $t = 0$ 、 $t = \frac{3L}{v_0}$ 时，金属棒的感应电动势并不等于零，电流也不等于零，所以安培力并不等于 0，B 错误；在 $0 \sim \frac{L}{v_0}$ 时间内，金属棒克服安培力做功的功率 $P = Fv_0 = \frac{B^2 y^2 v_0^2}{R} = \frac{B^2 v_0^2}{R} (y_0 + v_0 t \tan \theta)^2$ ， $P - t$ 图像是抛物线的一部分，在 $\frac{L}{v_0} \sim \frac{2L}{v_0}$ 时间内切割磁感线有效长度不变， $P = Fv_0 = \frac{B^2 y^2 v_0^2}{R}$ ，所以 P 恒定，在 $\frac{2L}{v_0} \sim \frac{3L}{v_0}$ 时间内相当于 $0 \sim \frac{L}{v_0}$ 时间内的逆过程，C 正确。

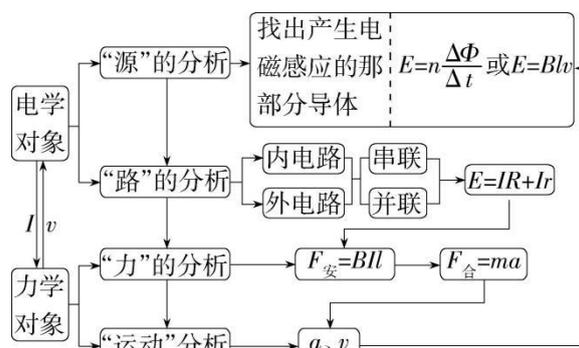
温馨提示 请完成《分层突破训练》课时作业 63

专题突破 21 电磁感应中的动力学和能量问题

关键能力·核心突破

题型一 电磁感应中的动力学问题

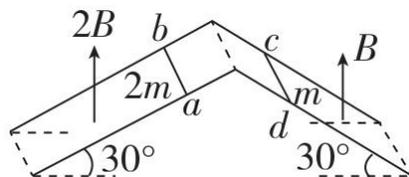
1.解答电磁感应中动力学问题的“两个对象”“四个分析”



2.动态分析的基本思路

导体有初速度或受外力运动 $\xrightarrow{E=Blv}$ 感应电动势 $\xrightarrow{I=\frac{E}{R+r}}$ 感应电流 $\xrightarrow{F=BIL}$ 导体受安培力 \rightarrow 合力变化 $\xrightarrow{F_合=ma}$ 加速度变化 \rightarrow 速度变化 \rightarrow 临界状态。

例 1 [2024·黑吉辽卷·9, 6分] 多选 如图, 两条“Λ”形的光滑平行金属导轨固定在绝缘水平面上, 间距为 L , 左、右两导轨面与水平面夹角均为 30° , 均处于竖直向上的匀强磁场中, 磁感应强度大小分别为 $2B$ 和 B 。将有一定阻值的导体棒 ab 、 cd 放置在导轨上, 同时由静止释放, 两棒在下滑过程中始终与导轨垂直并接触良好。 ab 、 cd 的质量分别为 $2m$ 和 m , 长度均为 L 。导轨足够长且电阻不计, 重力加速度大小为 g , 两棒在下滑过程中 ()



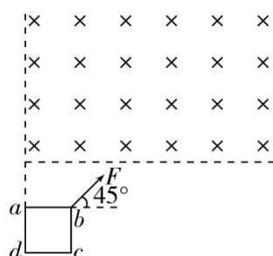
- A. 回路中的电流方向为 $abcda$
- B. ab 中电流趋于 $\frac{\sqrt{3}mg}{3BL}$
- C. ab 与 cd 加速度大小之比始终为 2:1
- D. 两棒产生的电动势始终相等

【答案】AB

【解析】对两棒分别由右手定则知电流方向为 $abcda$, A 正确。对 ab 棒沿左导轨面方向由牛顿第二定律有 $2mgsin\theta - 2BILcos\theta = 2ma_1$, 对 cd 棒沿右导轨面方向由牛顿第二定律有 $mgsin\theta - BILcos\theta = ma_2$, 两式比较得 $a_1 = a_2$, C 错误。两棒加速度大小始终相等, 所以速率始终相等, 因所处磁场的磁感应强度

不同，所以两棒产生的电动势不相等，D 错误。稳定后，两棒各自沿左、右导轨面向下做匀速运动，对 ab 棒沿左导轨面方向由力的平衡条件有 $2BIL\cos\theta = 2mgsin\theta$ ，可得 $I = \frac{\sqrt{3}mg}{3BL}$ ，B 正确。

迁移应用 1. [2022·湖北卷·15, 15 分] 如图所示，高度足够的匀强磁场区域下边界水平、左右边界竖直，磁场方向垂直于纸面向里。正方形单匝线框 $abcd$ 的边长 $L = 0.2\text{m}$ 、回路电阻 $R = 1.6 \times 10^{-3}\Omega$ 、质量 $m = 0.2\text{kg}$ 。线框平面与磁场方向垂直，线框的 ad 边与磁场左边界平齐， ab 边与磁场下边界的距离也为 L 。现对线框施加与水平向右方向成 $\theta = 45^\circ$ 角、大小为 $4\sqrt{2}\text{N}$ 的恒力 F ，使其在图示竖直平面内由静止开始运动。从 ab 边进入磁场开始，在竖直方向线框做匀速运动； dc 边进入磁场时， bc 边恰好到达磁场右边界。重力加速度大小取 $g = 10\text{m/s}^2$ ，求：



- (1) ab 边进入磁场前，线框在水平方向和竖直方向的加速度大小；
- (2) 磁场的磁感应强度大小和线框进入磁场的整个过程中回路产生的焦耳热；
- (3) 磁场区域的水平宽度。

【答案】 (1) 20m/s^2 10m/s^2

(2) 0.2T 0.4J

(3) 1.1m

【解析】

(1) ab 边进入磁场前，由牛顿第二定律得水平方向， $F\cos 45^\circ = ma_x$ 则 $a_x = 20\text{m/s}^2$ 竖直方向， $F\sin 45^\circ - mg = ma_y$ 则 $a_y = 10\text{m/s}^2$

(2) ab 边进入磁场前，线框在竖直方向一直做匀加速直线运动，则 ab 边刚进入磁场时有 $v_y^2 = 2a_yL$ ，则 $v_y = 2\text{m/s}$ 之后线框在竖直方向做匀速运动则

$$F\sin 45^\circ = mg + \frac{B^2 L^2 v_y}{R} \text{ 解得 } B = 0.2\text{T} \text{ 线框进入磁场的整个过程所用时间 } t = \frac{L}{v_y} =$$

$$0.1\text{s} \text{ 则回路产生的焦耳热 } Q = \frac{(BLv_y)^2}{R} t = 0.4\text{J}$$

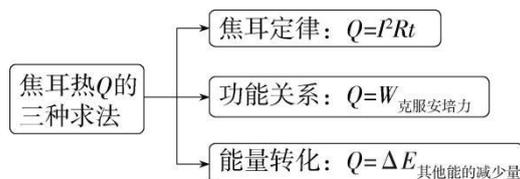
(3) 未进入磁场时运动的时间 $t_0 = \frac{v_y}{a_y} = 0.2\text{s}$ 则线框在水平方向做匀加速直线运动的位移 $x = \frac{1}{2} a_x (t_0 + t)^2 = 0.9\text{m}$ 故磁场区域的水平宽度 $d = x + L = 1.1\text{m}$

题型二 电磁感应中的能量问题 考教衔接

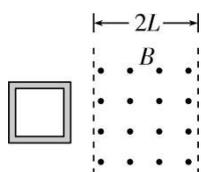
1. 能量转化（动生式电磁感应中）



2. 求解焦耳热 Q 的三种方法



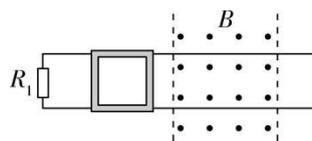
例 2 [2023 · 新课标卷 · 26, 20 分] 一边长为 L 、质量为 m 的正方形金属细框，每边电阻为 R_0 ，置于光滑的绝缘水平桌面（纸面）上。宽度为 $2L$ 的区域内存在方向垂直于纸面的匀强磁场，磁感应强度大小为 B ，两虚线为磁场边界，如图甲所示。



甲

(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，如图乙所示。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。



乙

溯源教材

(人教版选择性必修第二册第二章“复习与提高”B组)

2.如图 2-8, 单匝线圈 $ABCD$ 在外力作用下以速度 v 向右匀速进入匀强磁场, 第二次又以 $2v$ 匀速进入同一匀强磁场。

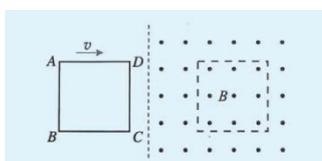


图 2-8

- (1) 求第二次进入与第一次进入时线圈中电流之比。
- (2) 求第二次进入与第一次进入时外力做功的功率之比。
- (3) 求第二次进入与第一次进入过程中线圈产生热量之比。

溯源分析

相同点	两道题都考查了线圈穿越磁场模型
不同点	线圈穿越磁场模型比较常见, 教材题目比较基础常规, 高考题以平面线圈在与线圈平面垂直的匀强磁场中的运动来设计学习探索问题情境, 题目在比较熟悉的物理模型的基础上展开, 逐步深入, 涉及的必备知识包括牛顿第二定律、电阻的串联与并联、闭合电路欧姆定律、法拉第电磁感应定律、安培力、能量守恒定律等物理概念和规律, 通过对这些概念和规律的理解与运用, 主要考查理解能力、推理论证能力、模型建构能力以及学科素养中的科学思维, 突出考查的综合性特点
复习启示	线圈穿越有界匀强磁场问题是电磁感应部分的一种综合性很强的习题类型, 主要涉及的是判断线圈在穿越磁场的过程中有无感应电流产生、判断感应电流的方向、计算感应电流的大小、研究线圈的受力及运动情况、研究力做功及能量转化情况等

【答案】 (1) $\frac{B^2L^3}{mR_0}$

(2) $\frac{3B^4L^6}{25mR_0^2}$

【解析】

(1) 金属框在进入磁场和穿出磁场两个过程中产生感应电动势，安培力做负功，由动量定理得 $-B\bar{I}_{进}Lt_{进} = mv_{进} - mv_0 - B\bar{I}_{出}Lt_{出} = mv_{出} - mv_{进}$ $v_{出} = \frac{v_0}{2}$

$$\bar{I}_{进} = \frac{\bar{E}_{进}}{4R_0} = \frac{BL\bar{v}_{进}}{4R_0} \quad \bar{I}_{出} = \frac{\bar{E}_{出}}{4R_0} = \frac{BL\bar{v}_{出}}{4R_0}$$

联立解得 $v_0 = \frac{B^2L^3}{mR_0}$

(2) 金属框的上、下边框处处与导轨始终接触良好，导轨电阻可忽略，则上、下边框被导轨短路，金属框进入磁场过程中左边框与 R_1 并联，右边框相当于电源，等效电路图如图 1 所示。

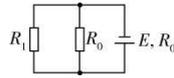


图 1

R_1 与 R_0 并联后电阻为 $\frac{2}{3}R_0$ ， $R_{总1} = \frac{5}{3}R_0$ ，该过程 R_1 上产生的热量与整个回路产生的热量之比 $\frac{Q_1}{Q_{总1}} = \frac{I_1^2 R_1}{I_{总1}^2 R_{总1}}$ ，由电路特点知 $\frac{I_1}{I_0} = \frac{R_0}{R_1} = \frac{1}{2}$ ， $I_{总1} = I_1 + I_0$ ，则 $\frac{Q_1}{Q_{总1}} = \frac{2}{15}$ ，设金属框刚好完全进入磁场时的速度为 v_1 ，金属框刚开始进入磁场到完全进入磁场过程中，由动量定理可得 $-\bar{F}_{安1}\Delta t_1 = mv_1 - mv_0$ ，其中 $\bar{F}_{安1} = B\bar{I}_1L$ ， $\bar{I}_1 = \frac{\Delta\Phi_1}{R_{总1}\Delta t_1} = \frac{3BL^2}{5R_0\Delta t_1}$ ，解得 $v_1 = \frac{2B^2L^3}{5R_0m}$ ，则此过程中整个回路产生的热量 $Q_{总1} = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{21B^4L^6}{50mR_0^2}$ 此过程中 R_1 产生的热量 $Q_1 = \frac{2}{15}Q_{总1} = \frac{7B^4L^6}{125mR_0^2}$ 金属框全部在磁场中运动时，等效电路如图 2 所示

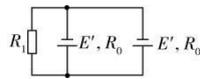


图 2

简化电路如图 3 所示

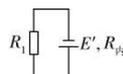


图 3

$R_{内} = \frac{R_0}{2} R_{总2} = R_1 + R_{内} = \frac{5}{2} R_0$ 该过程 R_1 上产生的热量与整个回路产生的热量之

比 $\frac{Q_2}{Q_{总2}} = \frac{I_{总2}^2 R_1}{I_{总2}^2 R_{总2}} = \frac{4}{5}$ 设金属框右边框刚要出磁场时的速度为 v_2 ，从金属框恰好完

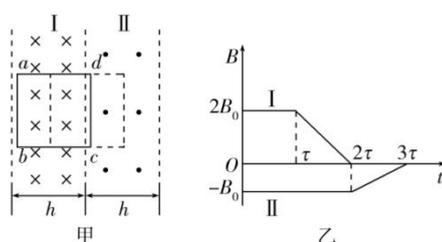
全进入磁场到金属框右边框刚要出磁场过程中，通过整个闭合回路的磁通量发生变化，由动量定理可得 $-\bar{F}_{安2} \Delta t_2 = mv_2 - mv_1$ $\bar{F}_{安2} = B\bar{I}_2 L$ ，其中 $\bar{I}_2 =$

$\frac{\Delta \Phi_2}{R_{总2} \Delta t_2} = \frac{2BL^2}{5R_0 \Delta t_2}$ 解得金属框右边框到达磁场右边界时的速度 $v_2 = 0$ 则此过程中整

个回路产生的热量 $Q_{总2} = \frac{1}{2} mv_1^2 - \frac{1}{2} mv_2^2 = \frac{2B^4 L^6}{25mR_0^2}$ 此过程中 R_1 产生的热量 $Q_2 =$

$\frac{4}{5} Q_{总2} = \frac{8B^4 L^6}{125mR_0^2}$ 综上， R_1 产生的总热量 $Q = Q_1 + Q_2 = (\frac{7}{125} + \frac{8}{125}) \frac{B^4 L^6}{mR_0^2} = \frac{3B^4 L^6}{25mR_0^2}$

迁移应用 2. [2023 · 广东卷 · 14, 13 分] 光滑绝缘的水平面上有垂直平面的匀强磁场，磁场被分成区域 I 和 II，宽度均为 h ，其俯视图如图甲所示，两磁场的磁感应强度随时间 t 的变化图线如图乙所示， $0 \sim \tau$ 时间内，两区域磁场恒定，方向相反，磁感应强度大小分别为 $2B_0$ 和 B_0 ，一电阻为 R ，边长为 h 的刚性正方形金属线框 $abcd$ ，平放在水平面上， ab 、 cd 边与磁场边界平行。 $t = 0$ 时，线框 ab 边刚好跨过区域 I 的左边界以速度 v 向右运动。在 τ 时刻， ab 边运动到距区域 I 的左边界 $\frac{h}{2}$ 处，线框的速度近似为零，此时线框被固定，如图甲中的虚线框所示。随后在 $\tau \sim 2\tau$ 时间内，I 区磁感应强度线性减小到 0，II 区磁场保持不变； $2\tau \sim 3\tau$ 时间内，II 区磁感应强度也线性减小到 0。求：



- (1) $t = 0$ 时，线框所受的安培力 F ；
- (2) $t = 1.2\tau$ 时，穿过线框的磁通量 Φ ；
- (3) $2\tau \sim 3\tau$ 时间内，线框中产生的热量 Q 。

【答案】 (1) $\frac{9B_0^2 h^2 v}{R}$ ，方向水平向左

(2) $\frac{3B_0 h^2}{10}$

$$(3) \frac{B_0^2 h^4}{4\tau R}$$

【解析】

(1) 由题可知, $t = 0$ 时线框切割磁感线产生的感应电动势 $E = 2B_0hv + B_0hv = 3B_0hv$ 则感应电流大小 $I = \frac{E}{R} = \frac{3B_0hv}{R}$ 所受的安培力 $F = 2B_0 \frac{3B_0hv}{R} h + B_0 \frac{3B_0hv}{R} h = \frac{9B_0^2 h^2 v}{R}$ 方向水平向左。

(2) 在 τ 时刻, ab 边运动到距区域 I 的左边界 $\frac{h}{2}$ 处, 线框的速度近似为零, 此时线框被固定, 则 $t = 1.2\tau$ 时穿过线框的磁通量 $\Phi = 1.6B_0h \cdot \frac{1}{2}h - B_0h \cdot \frac{1}{2}h = \frac{3B_0h^2}{10}$ 。

(3) $2\tau \sim 3\tau$ 时间内, II 区磁感应强度也线性减小到 0, 则有 $E' = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B_0 \frac{1}{2}h^2}{\tau} = \frac{B_0h^2}{2\tau}$ 感应电流大小 $I' = \frac{E'}{R} = \frac{B_0h^2}{2\tau R}$ 则 $2\tau \sim 3\tau$ 时间内, 线框中产生的热量 $Q = I'^2 R \tau = \frac{B_0^2 h^4}{4\tau R}$ 。

温馨提示 请完成《分层突破训练》课时作业 64

专题突破 22 电磁感应中的动量问题

关键能力·核心突破

题型一 动量定理在电磁感应中的应用

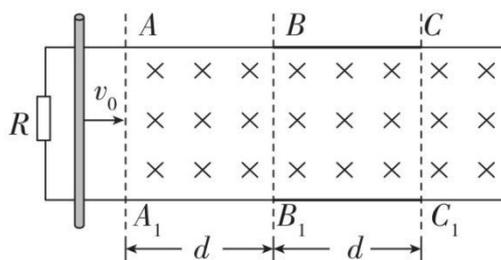
1. 导体棒或金属框在感应电流所引起的安培力作用下做非匀变速直线运动的题目中, 涉及速度 v 、电荷量 q 、运动时间 t 、运动位移 x 时常用动量定理求解。
2. 在电磁感应中应用动量定理时, 通常将下面两式结合应用:

$$-iLB \cdot \Delta t = m(v_2 - v_1);$$

$$q = i\Delta t = n \frac{\Delta\Phi}{R}.$$

考向 1 单棒问题

例 1 [2024·湖南卷·8, 5分] 多选 某电磁缓冲装置如图所示, 两足够长的平行金属导轨置于同一水平面内, 导轨左端与一阻值为 R 的定值电阻相连, 导轨 BC 段与 B_1C_1 段粗糙, 其余部分光滑, AA_1 右侧处于竖直向下的匀强磁场中, 一质量为 m 的金属杆垂直导轨放置。现让金属杆以初速度 v_0 沿导轨向右经过 AA_1 进入磁场, 最终恰好停在 CC_1 处。已知金属杆接入导轨之间的阻值为 R , 与粗糙导轨间的动摩擦因数为 μ , $AB = BC = d$ 。导轨电阻不计, 重力加速度为 g , 下列说法正确的是 ()



- A. 金属杆经过 BB_1 的速度为 $\frac{v_0}{2}$
- B. 在整个过程中，定值电阻 R 产生的热量为 $\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}\mu mgd$
- C. 金属杆经过 AA_1B_1B 与 BB_1C_1C 区域，金属杆所受安培力的冲量相同
- D. 若将金属杆的初速度加倍，则金属杆在磁场中运动的距离大于原来的 2 倍

【答案】 CD

【解析】 取向右为正方向，金属杆从 AA_1 到 BB_1 的过程，根据动量定理得

$$-B\bar{I}_1 L \cdot t_1 = mv - mv_0, \text{ 其中 } \bar{I}_1 \cdot t_1 = q_1 = \frac{BLd}{2R}, \text{ 同理，金属杆从 } BB_1 \text{ 到 } CC_1 \text{ 的过}$$

$$\text{程，根据动量定理得 } -B\bar{I}_2 L \cdot t_2 - \mu mg \cdot t_2 = 0 - mv, \text{ 其中 } \bar{I}_2 \cdot t_2 = q_2 = \frac{BLd}{2R},$$

由此可知 $mv > mv_0 - mv$ ，则金属杆经过 BB_1 的速度 $v > \frac{v_0}{2}$ ，A 错误；根据能量

守恒可知电流通过整个回路所产生的总热量 $Q = \frac{1}{2}mv_0^2 - \mu mgd$ ，则定值电阻 R

上产生的热量 $Q_R = \frac{Q}{2} = \frac{1}{4}mv_0^2 - \frac{1}{2}\mu mgd$ ，B 错误；经过 AA_1B_1B 与 BB_1C_1C 区

域，金属杆所受安培力的冲量分别为 $I_{\text{安}} = -B\bar{I}_1 L t_1 = -BLq_1$ ， $I'_{\text{安}} = -B\bar{I}_2 L t_2 =$

$-BLq_2$ ，结合 A 选项的分析，可知金属杆经过 AA_1B_1B 与 BB_1C_1C 区域，金属杆

所受安培力的冲量相同，C 正确；初速度为 v_0 时，金属杆在磁场中的运动过程

$$\text{由动量定理得 } -BLq - \mu mgt_2 = 0 - mv_0, \text{ 其中 } q = \frac{BLx}{2R}, \text{ 解得 } x = \frac{2R(mv_0 - \mu mgt_2)}{B^2 L^2},$$

若将金属杆的初速度加倍，即初速度为 $2v_0$ 时，金属杆在磁场中的运动过程由

$$\text{动量定理得 } -BLq' - \mu mgt' = 0 - m \cdot 2v_0, \text{ 其中 } q' = \frac{BLx'}{2R}, \text{ 解得 } x' =$$

$$\frac{2R(m \cdot 2v_0 - \mu mgt')}{B^2 L^2}, \text{ 以 } 2v_0 \text{ 的初速度进入磁场，金属杆经过 } BB_1C_1C \text{ 区域的时间更}$$

短，即 $t' < t_2$ ，由此可知， $x' > 2x$ ，D 正确。

考向 2 双棒问题

例 2 [2024 · 江西卷 · 15, 18 分] 如图 1 所示，绝缘水平面上固定一光滑平行金属导轨，导轨左右两端分别与两粗糙的倾斜平行金属导轨平滑连接，两侧导轨倾角分别为 θ_1 、 θ_2 ，导轨间距均为 $l = 2\text{m}$ ，水平导轨所在区域存在竖直向上的

匀强磁场，磁感应强度大小 $B = 0.5\text{T}$ 。现有两均匀金属细棒甲和乙，质量分别为 $m_1 = 6\text{kg}$ 和 $m_2 = 2\text{kg}$ ，接入导轨的电阻均为 $R = 1\Omega$ 。左、右两侧倾斜导轨与两棒的动摩擦因数分别为 $\mu_1 = \frac{3}{20}$ 、 $\mu_2 = \frac{44}{183}$ 。初始时刻，乙静止在水平导轨上，与水平导轨左端 P_1P_2 的距离为 d ，甲从左侧倾斜导轨高度 $h = 4\text{m}$ 的位置由静止滑下。水平导轨足够长，两棒运动过程中始终与导轨接触良好且保持垂直。若两棒发生碰撞，则为完全非弹性碰撞。不计空气阻力和导轨的电阻。（ g 取 10m/s^2 ， $\sin\theta_1 = 0.6$ ， $\sin\theta_2 = 0.8$ ）

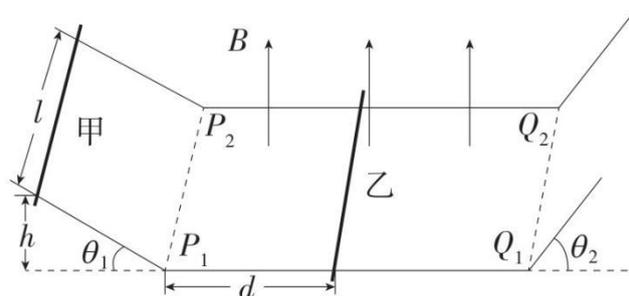


图 1

- (1) 求甲刚进入磁场时乙的加速度大小和方向；
- (2) 为使乙第一次到达水平导轨右端 Q_1Q_2 之前甲和乙不相碰，求 d 的最小值；
- (3) 若乙前两次在右侧倾斜导轨上相对于水平导轨的高度 y 随时间 t 的变化如图 2 所示（ t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 b 均为未知量），乙第二次进入右侧倾斜导轨之前与甲发生碰撞，甲在 $0 \sim t_3$ 时间内未进入右侧倾斜导轨，求 d 的取值范围。

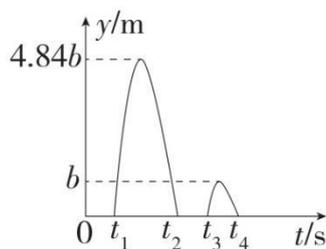


图 2

【答案】 (1) 2m/s^2 方向水平向右

(2) 24m

(3) 见解析

【解析】

(1) 设甲进入磁场时的速度为 v_0 ，甲从左侧倾斜导轨滑下的过程，由动能定理得 $m_1gh - \mu_1 m_1 g \cos\theta_1 \times \frac{h}{\sin\theta_1} = \frac{1}{2} m_1 v_0^2 - 0$ 代入数据解得 $v_0 = 8\text{m/s}$ 甲刚进入

磁场时，回路中的电流 $I = \frac{Blv_0}{2R}$ 对乙，由牛顿第二定律得 $ILB = m_2 a$ 联立解得 $a = 2\text{m/s}^2$ ，方向水平向右

(2) 分别对甲、乙受力分析可知，甲在水平导轨上向右减速运动，乙在水平导轨上向右加速运动，若甲、乙在刚要发生碰撞时达到共同速度，对应 d 的值最小，设最小值为 d_{\min} ，则从甲进入磁场到甲、乙第一次共速，由动量守恒定律得 $m_1 v_0 = (m_1 + m_2)v$ 代入数据解得 $v = 6\text{m/s}$ 对乙棒，由动量定理得 $\bar{I}lBt = m_2 v - 0$ 其中 $\bar{I} = \frac{\bar{E}}{2R}$ 又 $\bar{E} = Bl\bar{v} = \frac{Bld_{\min}}{t}$ 联立解得 $d_{\min} = 24\text{m}$

(3) 由题意可知乙第二次进入右侧倾斜导轨之前与甲发生碰撞，根据第(2)问的分析可知乙第一次进入右侧倾斜导轨前与甲达到共同速度，其速度 $v = 6\text{m/s}$ 乙上升过程的加速度大小 $a_{\uparrow} = g\sin\theta_2 + \mu_2 g\cos\theta_2 = \frac{1728}{183}\text{m/s}^2$ 乙下降过程的加速度大小 $a_{\downarrow} = g\sin\theta_2 - \mu_2 g\cos\theta_2 = \frac{1200}{183}\text{m/s}^2$ 联立可得 $\frac{a_{\uparrow}}{a_{\downarrow}} = \frac{36}{25}$ 设乙第一次上升和下降的距离均为 s ，乙第一次返回右侧倾斜导轨底端时的速度大小为 v' ，

根据匀变速直线运动规律可知 $v^2 = 2a_{\uparrow}s$ ， $v'^2 = 2a_{\downarrow}s$ 联立解得 $\frac{v'}{v} = \sqrt{\frac{a_{\downarrow}}{a_{\uparrow}}} = \frac{5}{6}$ ，

$v' = 5\text{m/s}$ 设乙第一次在右侧倾斜导轨上运动的过程中，甲在水平导轨上运动的距离为 d_1 设乙第二次到达右侧倾斜导轨底端时甲的速度大小为 v_1 ，甲、乙碰撞后的速度大小为 v_2 ，根据题图 2 可知 $\frac{v_2}{v} = \frac{5}{11}$ ，解得 $v_2 = \frac{30}{11}\text{m/s}$ 若甲、乙在右侧倾斜导轨底端恰好不相碰，设甲碰撞前的速度大小为 v_3 ，根据动量守恒定律有 $m_1 v_3 - m_2 v' = (m_1 + m_2)v_2$ 代入数据解得 $v_3 = \frac{175}{33}\text{m/s}$ 对甲，应用动量定理

可得 $-\bar{I}'lBt' = m_1 v_3 - m_1 v$ 其中 $\bar{I}' = \frac{\bar{E}'}{2R}$ $\bar{E}' = \frac{Bld_1}{t'}$ 联立并代入数据解得 $d_1 =$

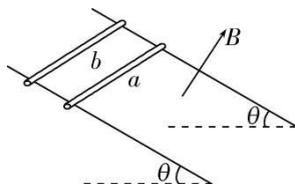
$\frac{92}{11}md_{\min} + d_1 = \frac{356}{11}\text{m}$ 若甲、乙第二次达到共同速度时恰好不相撞，甲、乙组成

的系统在水平导轨上满足动量守恒的条件，甲、乙的共同速度大小为 v_2 $m_1 v_1 - m_2 v' = (m_1 + m_2)v_2$ 从乙到达水平导轨至甲、乙发生碰撞的过程，对甲根据动

量定理有 $-\bar{I}''lBt'' = m_1 v_2 - m_1 v_1$ 其中 $\bar{I}'' = \frac{\bar{E}''}{2R}$ $\bar{E}'' = \frac{Bld_2}{t''}$ 联立并代入数据解得 $d_2 =$

$\frac{340}{11}md_{\min} + d_1 + d_2 = \frac{696}{11}\text{m}$ 综上所述可知， d 的取值范围为 $\frac{356}{11}\text{m} < d < \frac{696}{11}\text{m}$ 。

迁移应用 1. [2023·湖南卷·14, 14分]如图, 两根足够长的光滑金属直导轨平行放置, 导轨间距为 L , 两导轨及其所构成的平面均与水平面成 θ 角, 整个装置处于垂直于导轨平面斜向上的匀强磁场中, 磁感应强度大小为 B . 现将质量均为 m 的金属棒 a 、 b 垂直导轨放置, 每根金属棒接入导轨之间的电阻均为 R . 运动过程中金属棒与导轨始终垂直且接触良好, 金属棒始终未滑出导轨, 导轨电阻忽略不计, 重力加速度为 g .



- (1) 先保持棒 b 静止, 将棒 a 由静止释放, 求棒 a 匀速运动时的速度大小 v_0 ;
- (2) 在(1)问中, 当棒 a 匀速运动时, 再将棒 b 由静止释放, 求释放瞬间棒 b 的加速度大小 a_0 ;
- (3) 在(2)问中, 从棒 b 释放瞬间开始计时, 经过时间 t_0 , 两棒恰好达到相同的速度 v , 求速度 v 的大小, 以及时间 t_0 内棒 a 相对于棒 b 运动的距离 Δx 。

- 【答案】** (1) $\frac{2mgR\sin\theta}{B^2L^2}$
- (2) $2g\sin\theta$
- (3) $gt_0\sin\theta + \frac{mgR\sin\theta}{B^2L^2} + \frac{2m^2gR^2\sin\theta}{B^4L^4}$

【解析】

(1) 棒 a 沿导轨向下运动, 当 $mgsin\theta = BIL$ 时, 棒 a 开始以速度 v_0 匀速运动, 此时有 $E_0 = BLv_0$, 流过金属棒的电流 $I = \frac{E_0}{2R}$, 联立有 $mgsin\theta = \frac{B^2L^2v_0}{2R}$, 解得 $v_0 = \frac{2mgR\sin\theta}{B^2L^2}$ 。

(2) 棒 b 释放瞬间, 受到的安培力方向沿导轨平面向下, 根据牛顿第二定律有 $mgsin\theta + BIL = ma_0$ 解得 $a_0 = 2g\sin\theta$ 。

(3) 从棒 b 释放瞬间到两棒共速, 对棒 a 根据动量定理有 $mgt_0\sin\theta - I_F = mv - mv_0$ ①对棒 b 根据动量定理有 $mgt_0\sin\theta + I_F = mv$ ②解得 $v = gt_0\sin\theta + \frac{mgR\sin\theta}{B^2L^2}$ 。 t_0 时间内 a 、 b 棒与导轨构成的回路中产生的感应电动势的平均值 $\bar{E} = \frac{\Delta\Phi}{t_0} = \frac{BL\Delta x}{t_0}$, $\bar{I} = \frac{\bar{E}}{2R}$, 联立解得 $I_F = \bar{I}Lt_0 = \frac{B^2L^2\Delta x}{2R}$ 由①②得 $2I_F = mv_0$, 解得 $\Delta x = \frac{2m^2gR^2\sin\theta}{B^4L^4}$ 。

题型二 动量守恒定律在电磁感应中的应用

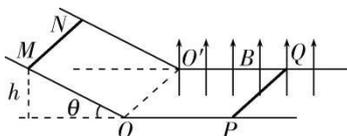
1.问题情境

在相互平行的水平轨道间的两导体棒做切割磁感线运动时，由于这两根导体棒所受的安培力等大反向，若不受其他外力，两导体棒的总动量守恒。

2.解题思路

解决上述问题时通常将两棒视为一个整体，于是相互作用的安培力是系统的内力，这个变力将不影响整体的动量守恒。因此解题的突破口是巧妙选择系统，运用动量守恒定律（动量定理）和功能关系求解。

例3 多选 如图所示，两根间距为 d 的光滑平行金属导轨，在 OO' 左侧构成倾角为 θ 的斜面，右侧是足够长的水平轨道，有竖直向上的匀强磁场，磁感应强度为 B 。长度为 d 的两根金属棒 MN 、 PQ 始终垂直于导轨，与导轨接触良好，质量均为 m ， MN 棒的电阻是 PQ 棒电阻的一半。金属棒 MN 从静止释放沿导轨下滑（不计 OO' 处能量损失）。导轨电阻不计，整个过程中 MN 棒与 PQ 棒未发生碰撞，重力加速度为 g ，则下列说法正确的是（ ）



- A. 整个过程中金属棒 MN 产生的焦耳热为 $\frac{1}{2}mgh$
- B. 整个过程流过金属棒 PQ 的电荷量为 $\frac{B\sqrt{2gh}}{2md}$
- C. 释放后金属棒 MN 最终与 PQ 棒在水平轨道上一起做匀速直线运动
- D. 金属棒 MN 滑至 OO' ，刚进入磁场区域时，金属棒 PQ 两端的电压为 $\frac{2Bd\sqrt{2gh}}{3}$

【答案】CD

【解析】 MN 棒进入磁场后，受到向左的安培力，先减速， PQ 棒受到向右的安培力做加速运动，两棒受到的安培力等大反向，系统动量守恒，最终两棒共速，做匀速直线运动，则根据题中条件可得 $mgh = \frac{1}{2}mv_0^2$ ， $mv_0 = 2mv$ ，则

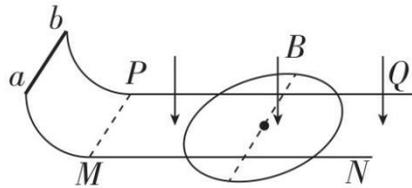
$$v_0 = \sqrt{2gh}, \quad v = \frac{\sqrt{2gh}}{2}, \quad \text{对系统，根据能量守恒定律可得 } mgh = \frac{1}{2} \times 2mv^2 + Q,$$

$$\text{可得 } Q = \frac{1}{2}mgh, \quad \text{则整个过程中金属棒 } MN \text{ 产生的焦耳热为 } Q_{MN} = \frac{R}{R+2R}Q =$$

$$\frac{1}{6}mgh, \quad \text{故 A 错误，C 正确；对金属棒 } PQ, \text{ 由动量定理可得 } B\bar{I}dt = mv - 0, \text{ 整}$$

个过程流过金属棒PQ的电荷量为 $q = \bar{I}t$ ，可得 $q = \frac{m\sqrt{2gh}}{2Bd}$ ，故 B 错误；金属棒MN滑至OO'，刚进入磁场区域时，产生的感应电动势为 $E = Bdv_0$ ，则感应电流为 $I = \frac{E}{R+2R}$ ，则金属棒PQ两端的电压为 $U = I \cdot 2R = \frac{2Bd\sqrt{2gh}}{3}$ ，故 D 正确。

迁移应用 2. [2024·湖北卷·15, 18分]如图所示，两足够长平行金属直导轨MN、PQ的间距为L，固定在同一水平面内，直导轨在左端M、P点分别与两条竖直固定、半径为L的 $\frac{1}{4}$ 圆弧导轨相切。MP连线与直导轨垂直，其左侧无磁场，右侧存在磁感应强度大小为B、方向竖直向下的匀强磁场。长为L、质量为m、电阻为R的金属棒ab跨放在两圆弧导轨的最高点。质量为2m、电阻为6R的均匀金属丝制成一个半径为L的圆环，水平放置在两直导轨上，其圆心到两直导轨的距离相等。忽略导轨的电阻、所有摩擦以及金属环的可能形变，金属棒、金属环均与导轨始终接触良好，重力加速度大小为g。现将金属棒ab由静止释放，求：



- (1) ab刚越过MP时产生的感应电动势大小。
- (2) 金属环刚开始运动时的加速度大小。
- (3) 为使ab在整个运动过程中不与金属环接触，金属环圆心初始位置到MP的最小距离。

【答案】 (1) $BL\sqrt{2gL}$

(2) $\frac{B^2L^2\sqrt{2gL}}{3mR}$

(3) $\frac{B^2L^3+mR\sqrt{2gL}}{B^2L^2}$

【解析】

(1) 对金属棒ab由静止释放到刚越过MP过程，由动能定理有 $mgL = \frac{1}{2}mv_0^2$ 解得 $v_0 = \sqrt{2gL}$ 则金属棒ab刚越过MP时产生的感应电动势大小为 $E = BLv_0 = BL\sqrt{2gL}$

(2) 根据题意可知, 金属环在导轨间两段圆弧并联接入电路中, 导轨外侧的两段圆弧被短路, 由几何关系可得金属环接入电路中的两段圆弧所对应的圆心角为 60° , 金属环接入电路中的两段圆弧的电阻均为 R 可知, 整个回路的总电阻为 $R_{\text{总}} = R + \frac{R \cdot R}{R+R} = \frac{3}{2}R$ 金属棒 ab 刚越过 MP 时, 金属环开始运动, 此时通过金属棒 ab 的感应电流为 $I = \frac{E}{R_{\text{总}}} = \frac{2BL\sqrt{2gL}}{3R}$ 对金属环由牛顿第二定律有 $2BL \cdot \frac{I}{2} = 2ma$ 解得 $a = \frac{B^2L^2\sqrt{2gL}}{3mR}$

(3) 结合上述分析可知, 金属环和金属棒 ab 所受的安培力等大反向, 则系统的动量守恒, 由于金属环做加速运动, 金属棒做减速运动, 为使 ab 在整个运动过程中不与金属环接触, 则临界情况是金属棒 ab 和金属环速度相等时, 金属棒 ab 恰好追上金属环, 对应距离的最小值, 设此时速度为 v 由动量守恒定律有 $mv_0 = mv + 2mv$ 解得 $v = \frac{1}{3}v_0$ 对金属棒 ab , 由动量定理有 $-B\bar{I}Lt = m \cdot \frac{v_0}{3} - mv_0$ 则有 $BLq = \frac{2}{3}mv_0$ 设金属棒运动的距离为 x_1 , 金属环运动的距离为 x_2 , 则有 $q = \frac{BL(x_1-x_2)}{R_{\text{总}}}$ 联立解得 $\Delta x = x_1 - x_2 = \frac{mR\sqrt{2gL}}{B^2L^2}$ 则金属环圆心初始位置到 MP 的最小距离 $d = L + \Delta x = \frac{B^2L^3 + mR\sqrt{2gL}}{B^2L^2}$

温馨提示 请完成《分层突破训练》课时作业 65