

# 第12章 电磁感应

## 一、电磁感应现象

### 1. 电磁感应的探索历程

1820年4月奥斯特发现了电流对磁针的作用，即电流的磁效应。同年7月21日奥斯特又以《关于磁针上电冲突作用的实验》为题发表了他的发现。这篇论文使欧洲物理学界产生了极大震动，导致了大批实验成果的出现，由此开辟了物理学的新领域——电磁学。

法拉第在收集电磁学资料的过程中，对电磁现象的研究产生极大的热情，他仔细分析了电流的磁效应等现象后，他提出既然电流能产生磁，那么磁是否能产生电呢？从1824年到1831年法拉第经历了一系列的失败。最终发现稳定的电流可以产生磁场，不过稳定的磁场却无法产生电流，只有变化的磁场才可能产生电流。

法拉第把引起电流的原因概括为五类：变化的电流；变化的磁场；运动的恒定电流；运动的磁场；在磁场中运动的导体。把这一现象称为**电磁感应**，产生的电流称为**感应电流**。

电磁感应现象的发现使人们对电与磁内在联系的认识更加完善，宣告了电磁学作为一门统一学科的诞生。

### 2. 磁通量

#### (1) 定义

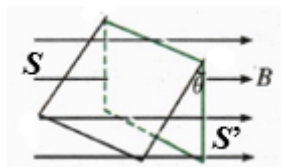
设在磁感应强度为 $B$ 的匀强磁场中，有一个与磁场方向垂直的平面，面积为 $S$ ，把 $B$ 与 $S$ 的乘积叫做穿过这个面积的**磁通量**，简称磁通。

#### (2) 公式

$\Phi = BS$ ，平面与 $B$ 垂直。若平面与 $B$ 不垂直，则要用这个面在垂直于磁场 $B$ 方向的投影面积 $S'$ 与 $B$ 的乘积表示磁通量， $\Phi = BS'$ 。

若我们定义面积矢量 $\vec{S}$ ，其方向垂直于所在平面，则磁通量表达式可写成：

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$



### (3) 单位

韦伯，简称韦，符号Wb， $1\text{Wb} = 1\text{T} \cdot \text{m}^2$ 。

### (4) 注意

磁通量在数值上等于穿过某横截面的磁感线的条数。磁通量为标量，为了计算方便，有了“正”“负”之分。任何一个面都有正、反两面，若规定磁感线从正面穿入时磁通量为正，则从反面穿入时磁通量为负。

#### 例题精讲

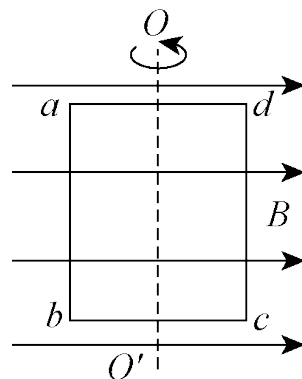
1 我国已经制定了登月计划，假如宇航员登月后想探测一下月球表面是否有磁场，他手边有一只灵敏电流表和一个线圈。则下列推断中正确的是（ ）

- A. 直接将电流表放于月球表面，看是否有示数来判断磁场的有无
- B. 将电流表与线圈组成闭合回路，使线圈沿某一方向运动，如电流表无示数，则判断月球表面无磁场
- C. 将电流表与线圈组成闭合回路，使线圈沿某一方向运动，如电流表有示数，则判断月球表面有磁场
- D. 将电流表与线圈组成闭合回路，使线圈分别绕两个互相垂直的轴转动，月球表面若有磁场，则电流表至少有一次示数不为0

答案 CD

解析 电流表有示数时可判断有磁场存在，沿某方向运动而无示数不能确定磁场是否存在。D项中线圈分别绕互相垂直的轴转动，若月球表面存在磁场，则至少有一次穿过线圈（可正穿也可斜穿）的磁通量的变化率不为0，故电流表有示数，C、D正确。  
故选CD。

- 2 矩形线框 $abcd$ 的边长分别为 $l_1$ 、 $l_2$ ，可绕它的一条对称轴 $OO'$ 转动，匀强磁场的磁感应强度为 $B$ ，方向与 $OO'$ 垂直，初位置时线圈平面与 $B$ 平行，如图所示。



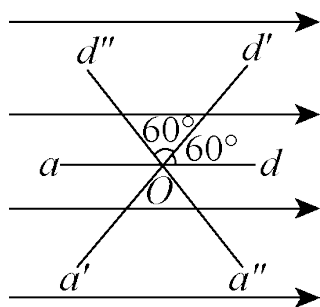
- (1) 初位置时穿过线框的磁通量 $\Phi_0$ 为多少。
- (2) 当线框沿图甲所示方向绕过 $60^\circ$ 时，磁通量 $\Phi_1$ 为多少，这一过程中磁通量的变化 $\Delta\Phi_1$ 为多少。
- (3) 当线框绕轴沿图示方向由图乙中的位置再转过 $60^\circ$ 位置时，磁通量 $\Phi_2$ 为多少，这一过程中 $\Delta\Phi_2 = \Phi_3 - \Phi_2$ 为多少。

答案

- (1) 0。
- (2)  $\frac{\sqrt{3}}{2}BS$ 。
- (3)  $\frac{\sqrt{3}}{2}BS$ ；0。

解析

- (1) 本题的关键是分析矩形线框的平面是否与 $B$ 垂直，只有垂直时才能应用 $\Phi = B \cdot S$ ，不垂直时可把面积沿与 $B$ 垂直方向投影，为能清晰地观察面积与 $B$ 夹角的情况，可作出其俯视图如图所示。



当处于图甲所示位置时，从俯视图可看出没有磁感线穿过矩形线框，故中 $\Phi_0 = 0$ 。

- (2) 当绕轴（从上往下看）沿逆时针方向转动 $60^\circ$ 到 $a'b'$ 位置时，线框与 $B$ 的夹角 $\theta = 60^\circ$ 。

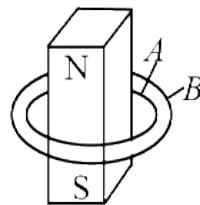
$$\text{所以 } \Phi_1 = B \cdot S \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}BS,$$

$$\Delta\Phi_1 = \Phi_1 - \Phi_0 = \frac{\sqrt{3}}{2}BS.$$

(3) 当再由 $a'b'$ 位置逆时针转 $60^\circ$ 时, 到 $a''b''$ , 这时线框与 $B$ 方向成 $120^\circ$ 角.

$$\text{所以 } \Phi_2 = B \cdot S \sin 120^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} BS, \Delta\Phi_2 = \Phi_2 - \Phi_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} BS - \frac{\sqrt{3}}{2} BS = 0.$$

3 如图所示, 两个圆环 $AB$ 同心放置, 且半径 $R_A < R_B$ , 一条形磁铁置于两环的圆心处, 且与圆环平面垂直, 则 $AB$ 两环中磁通量 $\Phi_A$ 、 $\Phi_B$ 之间的关系为 ( )



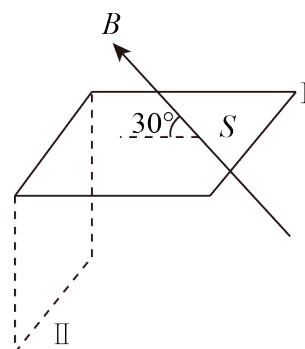
- A.  $\Phi_A > \Phi_B$
- B.  $\Phi_A = \Phi_B$
- C.  $\Phi_A < \Phi_B$
- D. 无法确定 $\Phi_A$ 与 $\Phi_B$ 的大小关系

答案 A

**解析** 本题易产生误解, 认为由 $\Phi = BS$ 知:  $S_A < S_B$ , 所以,  $\Phi_B > \Phi_A$ , 根本原因是对磁感线与磁通量概念理解不透. 磁感线是闭合曲线, 不仅在磁铁外部空间有, 而且内部空间也有, 因而穿过 $AB$ 圆环面的磁感线有磁体内部的全部磁感线(由 $S$ 指向 $N$ )和磁铁外部的部分磁感线(由 $N$ 指向 $S$ ), 两者方向相反, 因此穿过两圆环的磁通量应是两者抵消后的代数和, 其磁感线方向由 $S$ 指向 $N$ . 设在磁铁内部的全部磁感线条数为 $\Phi$ , 均穿过 $AB$ 两圆环, 方向向上, 磁通量为正; 磁铁外部空间穿过 $AB$ 两环的磁感线条数分别为 $\Phi_1$ 和 $\Phi_2$ , 且 $\Phi_1 < \Phi_2$ , 方向向下, 磁通量为负,  $\therefore \Phi_A = \Phi - \Phi_1$ ,  $\Phi_B = \Phi - \Phi_2$ , 所以,  $\Phi_A > \Phi_B$ . 故选A.

照猫画虎

4 如图所示, 匀强磁场的磁感应强度为 $B$ ,  $B$ 的方向与水平方向的夹角为 $30^\circ$ , 图中实线位置有一面积为 $S$ 的矩形线圈处于磁场中, 并绕着它的一条边从水平位置转到竖直位置(图中虚线位置). 在此过程中磁通量的改变量大小为 ( )



A.  $\frac{\sqrt{3}-1}{2}BS$

B.  $BS$

C.  $\frac{\sqrt{3}+1}{2}BS$

D.  $2BS$

答案 C

解析 矩形线圈 $abcd$ 如图所示放置，匀强磁场方向向右上方，平面水平放置时通过线圈的磁通量为

$$\Phi_1 = BS \cos \theta = BS \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}BS.$$

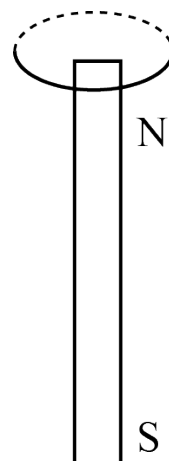
当规定此时穿过线圈为正面，则当线圈绕 $ad$ 轴转 $90^\circ$ 角时，穿过线圈反面，则其的磁通

$$\Phi_2 = -BS \cos \theta' = -BS \cos 60^\circ = -\frac{1}{2}BS.$$

$$\text{因此穿过线圈平面的磁通量的变化量为 } \Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = \frac{\sqrt{3}+1}{2}BS.$$

故选C.

- 5 如图所示，在条形磁铁外面套一圆环，当圆环从磁铁的N极向下平移到S极的过程中，穿过圆环的磁通量如何变化（ ）



A. 逐渐增加

B. 逐渐减少

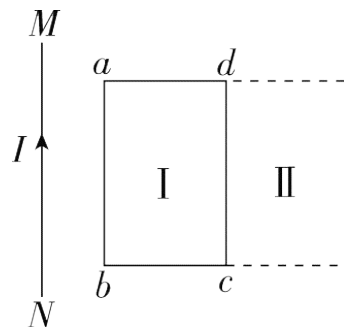
C. 先逐渐增加，后逐渐减少

D. 先逐渐减少，后逐渐增大

答案 C

**解析** 条形磁铁外部两极处磁场最强，而中间位置磁场最弱，而总磁通量等于内外磁感线条数的差值，则可知，在两极处磁通量最大，而在中间时磁通量最小，由于内部磁感线条数相同，且内部磁感线与外部磁感线的总数相等，所以线圈包含的磁通量一定是内部大于外部的磁通量，所以外部磁感线越多，则总磁通量越小，所以，由N到S极时，磁通量先增大后减小，故C正确，ABD错误。  
故选C。

6 如图，通有恒定电流的导线MN与闭合金属框共面，第一次将金属框由I平移到II，第二次将金属框由I绕cd边翻转到II，设先后两次通过金属框的磁通量的变化分别为 $\Delta\Phi_1$ 和 $\Delta\Phi_2$ ，则（ ）



- A.  $\Delta\Phi_1 > \Delta\Phi_2$
- B.  $\Delta\Phi_1 = \Delta\Phi_2$
- C.  $\Delta\Phi_1 < \Delta\Phi_2$
- D. 不能判断

答案 C

**解析** 方法一：设在位置I时磁通量大小为 $\Phi_1$ ，位置II时磁通量大小为 $\Phi_2$ 。

第一次将金属框由I平移到II，穿过线框的磁感线方向没有改变，磁通量变化量 $\Delta\Phi_1 = \Phi_1 - \Phi_2$ ，

第二次将金属框绕cd边翻转到II，穿过线框的磁感线的方向发生改变，磁通量变化量 $\Delta\Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_2$ 。故 $\Delta\Phi_1 < \Delta\Phi_2$ 。

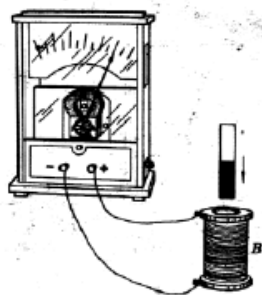
方法二：第一次将线圈从I平移到II，磁感线从线框的同一侧穿入， $\Delta\Phi_1$ 为前后两位置磁通量的绝对值之差，第二次将线框I绕cd边翻转到位置II，磁感线从线框的另一侧穿入， $\Delta\Phi_2$ 为前

后两位置磁通量的绝对值之和，故有 $\Delta\Phi_1 < \Delta\Phi_2$ ，即C正确。

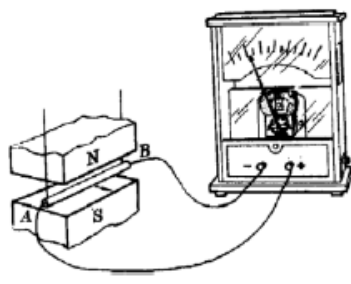
故选C。

### 3. 感应电流产生的条件

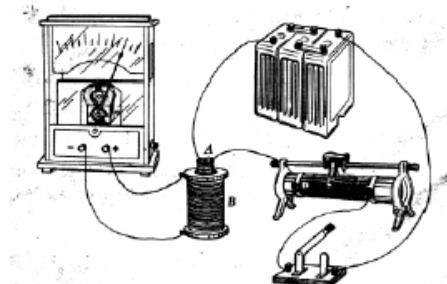
1. 电磁感应现象通常有下列三种情况：



(a) 磁铁和线圈相对运动



(b) 部分导体切割磁感线



(c) 两个线圈间的电磁感应

(1) 磁铁和线圈相对运动，如图(a)，将磁铁插入或拔出螺线管时，灵敏电流计中有感应电流通过；但磁铁在线圈中不动时，无感应电流。

(2) 闭合电路中的一部分导体做切割磁感线运动时，如图(b)，灵敏电流计中感应电流通过；而导体棒AB顺着磁感线运动或者静止不动时，无感应电流产生。

(3) 将小螺线管A插入大螺线管中不动，当开关闭合或断开的瞬间，或者在开关闭合后滑动变阻器改变阻值时，灵敏电流计中也有感应电流通过，如图(c)。

2. 感应电流的产生条件：

(1) 条件分析：

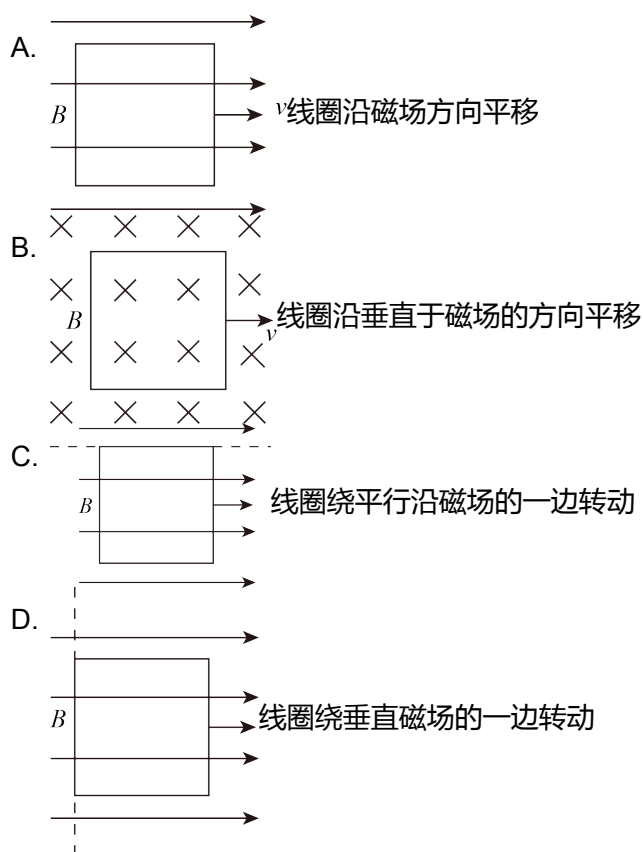
①图(a)、(c)中：有磁感线穿过的闭合回路的面积S不变，磁感线强度B变化；

②图(b)中，磁场的B不变，有磁感线穿过的闭合回路的面积S变化。

(2) 归纳总结：只要穿过**闭合电路的磁通量发生变化**，闭合回路中就有感应电流产生。

#### 例题精讲

7 如图所示，有一个正方形闭合线圈，在分布范围足够大的匀强磁场中做如图所示的运动。下列四个图中，能产生感应电流的是( )



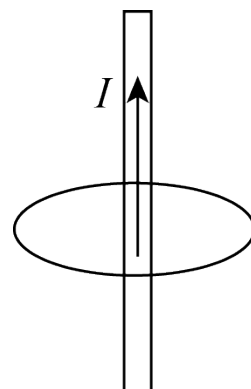
答案 D

**解析** 产生感应电流的条件是线圈的磁通量发生变化，在A、C中，线圈中没有磁感线穿过；B中穿过线圈的磁感线始终没变，面积也不变，故磁通量不变；D中穿过线圈的磁通量在变化，故它会产生感应电流，D是正确的。  
故选D。

照猫画虎

8 如图所示，通电直导线与闭合导线环的平面垂直，且过圆环中心。关于感应电流的产生，下列说法正确的是（ ）





- A. 通电直导线中的电流增强或减弱时，环中有感应电流
- B. 环以任意直径为轴转动时，环中有感应电流
- C. 环以导线为轴，在垂直于导线的平面内转动时，环中有感应电流
- D. 以上说法都不对

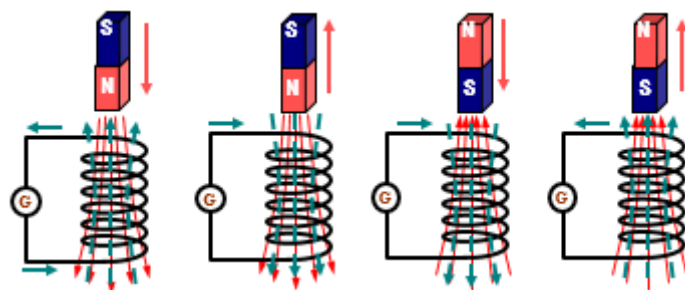
答案 D

解析 通电导线电流变化时，导线产生的磁场与线圈平行，线圈中不会有磁通量，故没有感应电流产生，D正确。  
故选D。

## 二、楞次定律

### 1. 楞次定律

实验现象



感应电流方向（俯视）	逆时针	顺时针	顺时针	逆时针
穿过回路磁通量的变化	增大	减小	增大	减小

原磁场方向	向下	向下	向上	向上
感应电流磁场方向	向上	向下	向下	向上

结论(1)：当线圈内原磁通量增加时，感应电流的磁场 $B'$ 的方向与原磁场 $B_0$ 的方向相反→感应电流的磁场阻碍磁通量的增加；

结论(2)：当线圈内原磁通量减少时，感应电流的磁场 $B'$ 的方向与原磁场 $B_0$ 的方向相同→感应电流的磁场阻碍磁通量的增加。

### 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是**阻碍**引起感应电流的磁通量的**变化**。

#### (2) 对“阻碍”的理解：

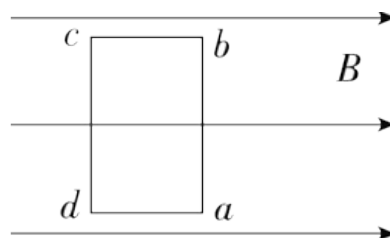
- ①谁起阻碍作用？**感应电流的磁场**；
- ②阻碍谁？**原磁通量的变化**；
- ③“阻碍”就是感应电流的磁场总与原磁场的方向相反吗？**不一定，“增反减同”**；
- ④阻碍是阻止吗？**否，只是使磁通量的变化变慢。**

#### (3) 利用楞次定律判断感应电流的方向的步骤：

- ①判断原磁场 $B_0$ 的方向；
- ②确定原磁通量的增减情况；
- ③根据楞次定律，确定感应电流的磁场 $B'$ 的方向；
- ④根据右手螺旋定则判断能够引起上述 $B'$ 的感应电流的方向。

### 例题精讲

- 9 如图所示，线圈 $abcd$ 所在平面与磁感线平行，在线圈以 $ab$ 边为轴顺时针（由下往上看）转过 $180^\circ$ 的过程中，线圈中感应电流的方向为（ ）



A. 沿 $abcda$

B. 沿 $dcbad$

C. 先沿 $abcda$ ，后沿 $dcbad$

D. 先沿 $dcbad$ ，后沿 $abcda$

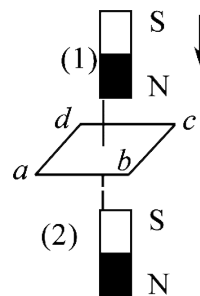
答案 D

解析 可知由与磁感线平行位置开始转动到时，穿过线圈磁通量增加，感应电流磁场与原磁场方向相反，电流方向由 $dcbad$ ；

转到平行位置穿过线圈的磁通量减少，感应电流的磁场方向与原磁场方向相同，电流方向为 $abcda$ ，故D．

故选D．

10 如图所示，一个N极朝下的条形磁铁竖直下落，恰能穿过水平放置的固定方形导线框，则（ ）



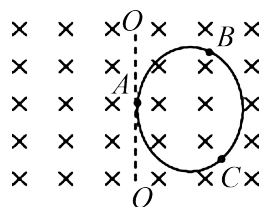
- A. 磁铁经过图中位置(1)时，线框中感应电流方向沿 $abcd$ 方向，经过位置(2)时沿 $adcb$ 方向
- B. 磁铁经过位置(1)时，感应电流沿 $adcb$ 方向，经过位置(2)时，沿 $abcd$ 方向
- C. 磁铁经过(1)和(2)位置时，感应电流都沿 $adcb$ 方向
- D. 磁铁经过(1)和(2)位置时，感应电流都沿 $abcd$ 方向

答案 A

解析 略

照猫画虎

11 如图所示，一圆形金属线圈放置在水平桌面上，匀强磁场垂直桌面竖直向下，过线圈上A点作切线 $OO'$ ， $OO'$ 与线圈在同一平面上，在线圈以 $OO'$ 为轴翻转 $180^\circ$ 的过程中，线圈中电流流向（ ）



- A. 始终为  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$
- B. 始终为  $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$
- C. 先为  $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ ，再为  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$
- D. 先为  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ ，再为  $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$

答案 A

**解析** 当线圈平面与磁场方向平行时，磁通量为零，之前磁通量向里减少，根据楞次定律，线圈内电流为  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ ；之后磁通量向里增加，根据楞次定律，线圈内的电流依次是  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 。  
故选A。

## 2. 广义楞次定律

楞次定律中的“阻碍”作用是把其他形式的能量（或其他电路的电能）转化（或转移）为感应电流所在回路的电能，在这个过程中，能量总是守恒的。楞次定律的深刻意义，正是在于它是能量守恒定律在电磁感应现象中的体现。

从本质上看，楞次定律可广义地表述为：感应电流的效果总是要反抗引起感应电流的原因。

常见的情况有以下几种：

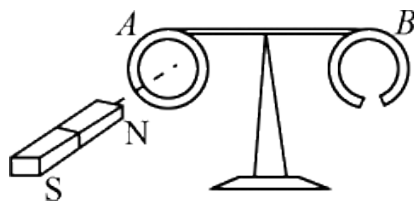
①就磁通量而言，总是阻碍引起感应电流的磁通量（原磁通量）的变化，即当原磁通量增加时，感应电流的磁场就与原磁场方向相反；当原磁通量减少时，感应电流的磁场就与原磁场方向相同。简称：“**增反减同**”。

②当感应电流因磁场变化而引起时，感应电流受到的安培力通常使回路发生运动以阻碍原磁通量的变化，简称：“**来拒去留**”。

③感应电流使回路受到的安培力总要引起回路发生形变或具有形变的趋势，而形变或形变的趋势仍是向阻碍磁通量变化的方向进行。

例题精讲

- 12 如图所示， $A$ 、 $B$ 都是很轻的铝环，分别固定在绝缘细杆的两端，杆可绕中间竖直轴在水平面内转动，环 $A$ 是闭合的，环 $B$ 是断开的．若用磁铁分别接近这两个圆环，下列说法中正确的是（ ）

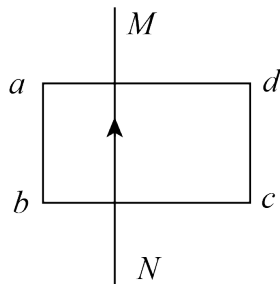


- A. 磁铁N极接近A环时，A环被吸引
- B. 磁铁N极远离A环时，A环被吸引
- C. 磁铁N极接近B环时，B环被排斥
- D. 磁铁N极远离B环时，B环被排斥

答案 B

解析 A. 当靠近A环时，A环中的磁通量发生变化，会产生感应电流，根据楞次定律，A环被排斥，故A错误；  
 B. 同理可得，远离A环时，A环被吸引，故B正确；  
 CD. 由于B环不是闭合的，所以不会产生感应电流，故CD错误．  
 故选B．

- 13 如图，通电导线 $MN$ 与单匝矩形线圈 $abcd$ 共面，位置靠近 $ab$ 且相互绝缘．当 $MN$ 中电流突然减小时，线圈所受安培力的合力方向（ ）



- A. 向左
- B. 向右
- C. 垂直纸面向外
- D. 垂直纸面向里

答案 B

解析 方法一：当 $MN$ 中电流突然减小时，单匝矩形线圈 $abcd$ 垂直纸面向里的磁通量减小，根据楞次定律，单匝矩形线圈 $abcd$ 中产生的感应电流方向顺时针方向，由左手定则可知，线圈所受安

培力的合力方向向右。

故选B。

方法二：金属线框 $abcd$ 放在导线 $MN$ 上，导线中电流产生磁场，根据安培定则判断可知，线框 $abcd$ 左右两侧磁场方向相反，线框左侧的磁通量小于线框右侧的磁通量，磁通量存在抵消的情况。若 $MN$ 中电流突然减小时，穿过线框的磁通量将减小。根据楞次定律可知，感应电流的磁场要阻碍磁通量的变化，则线框 $abcd$ 感应电流方向为顺时针，再由左手定则可知，左边受到的安培力水平向右，而右边的安培力方向也水平向右，故安培力的合力向右。故B正确，ACD错误。

故选：B。

- 14 如图所示， $A$ 、 $B$ 为大小、形状均相同且内壁光滑，但用不同材料制成的圆管，竖直固定在相同高度，两个相同的磁性小球，同时从 $A$ 、 $B$ 管上端的管口无初速度释放，穿过 $A$ 管的小球比穿过 $B$ 管的小球先落到地面。下面对两管的描述中可能正确的是（ ）



- A.  $A$ 管是用塑料制成的， $B$ 管是用铜制成的
- B.  $A$ 管是用铝制成的， $B$ 管是用胶木制成的
- C.  $A$ 管是用胶木制成的， $B$ 管是用塑料制成的
- D.  $A$ 管是用铜制成的， $B$ 管是用胶木制成的

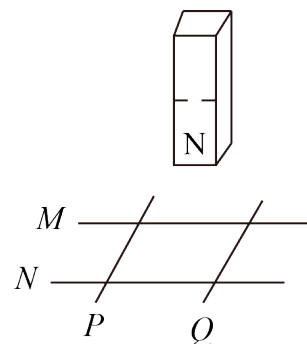
答案 A

解析 因为穿过 $A$ 管的小球比穿过 $B$ 管的小球先落到地面，所以两管一个金属的，一个非金属的，根据楞次定律“来拒去留”可知金属管对磁性小球的作用力始终向上，所以小球落到地面较晚，所以 $A$ 为非金属的， $B$ 为金属的。A选项正确。

故选A。

照猫画虎

- 15 如图所示，光滑固定导轨 $M$ 、 $N$ 水平放置，两根导体棒 $P$ 、 $Q$ 平行放在导轨上，形成闭合回路。当一根条形磁铁（ $N$ 极向下）从上向下接近回路时，两导体棒将（ ）

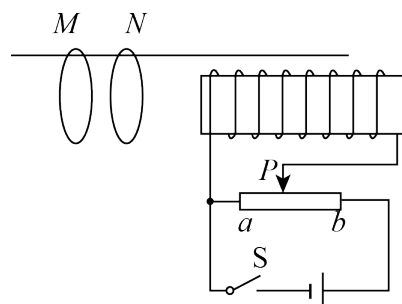


- A. 保持不动      B. 相互远离      C. 相互靠近      D. 无法判断

答案 C

解析 当一条形磁铁从高处下落接近回路时，穿过回路的磁通量增加，根据楞次定律：感应电流的磁场总是阻碍磁通量的变化，可知， $P$ 、 $Q$ 将互相靠拢，回路的面积减小一点，使穿过回路的磁场减小一点，起到阻碍原磁通量增加的作用。故C正确，ABD错误。  
故选C。

- 16 如图所示，两个相同的闭合铝环 $M$ 、 $N$ 套在一根光滑的绝缘水平杆上，螺线管的轴线与铝环的圆心在同一直线上，闭合电键 $S$ 后，向左快速移动滑动变阻器的滑片 $P$ ，不考虑两环间的相互作用力，则在移动滑片 $P$ 的过程中（ ）



- A.  $M$ 、 $N$ 环向左运动，它们之间的距离增大  
B.  $M$ 、 $N$ 环向左运动，它们之间的距离减小  
C.  $M$ 、 $N$ 环向右运动，它们之间的距离增大  
D.  $M$ 、 $N$ 环向右运动，它们之间的距离减小

答案 C

解析

当滑动变阻器的滑动触头向左移动时，滑动变阻器接入电路的阻值变大，电路电流变小，螺线管内部、外部的磁场均减小，穿过 $M$ 、 $N$ 两金属环的水平向右的磁通量减小，根据楞次定律，可知向右运动可以阻碍穿过线圈的磁通量减小，所以环将向右运动；结合条形磁铁的特点可知，靠近条形磁铁的 $N$ 处的磁感应强度比较大，所以 $N$ 环受到的安培力也比较大，加速度比较大，所以两环之间的距离将增大。

故选C。

## 三、法拉第电磁感应定律

### 1. 感应电动势

当闭合电路的磁通量发生变化时，闭合电路中产生感应电流，则必然有电动势，叫做**感应电动势**。

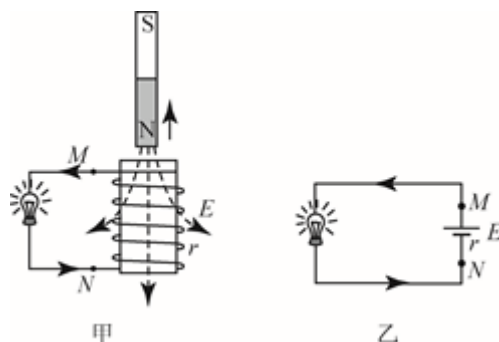
根据我们学过的电学知识可知，感应电流的大小应该由感应电动势及回路的电阻决定，回路电阻与材料有关。磁通的变化量只能决定感应电动势，无法决定回路的电阻，所以，不可能存在磁通变化量与感应电流大小之间的确定关系。因此，对电磁感应的定量描述，用感应电动势比用感应电流更为合适。

产生感应电动势部分为等效电源。在电源内部，感应电动势方向由电源负极指向正极，跟内电路中电流方向一致。

### 2. 法拉第电磁感应定律

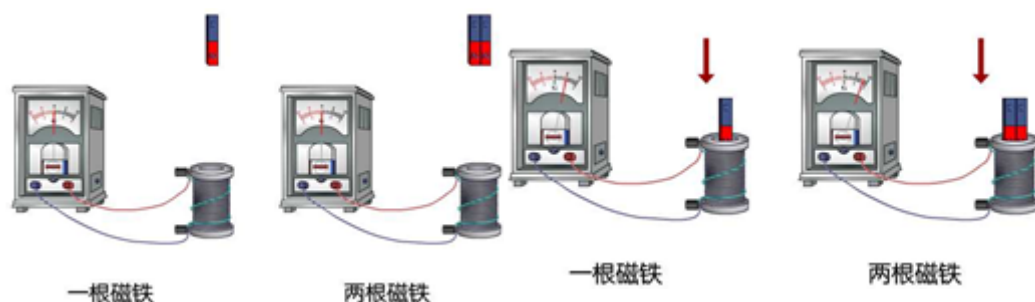


背景实验

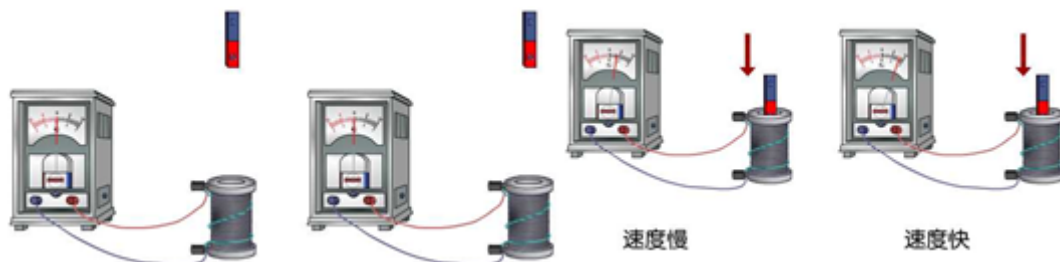


我们发现磁铁穿过线圈时灯泡会发光，是因为电路中存在电流，此时条形磁铁和线圈的作用类似于电源，产生的电动势称为感应电动势，其方向我们可以由楞次定律判断出来。那么感应电动势的大小是多少呢？我们应该怎么定量的计算呢？让我们看看如下的实验：



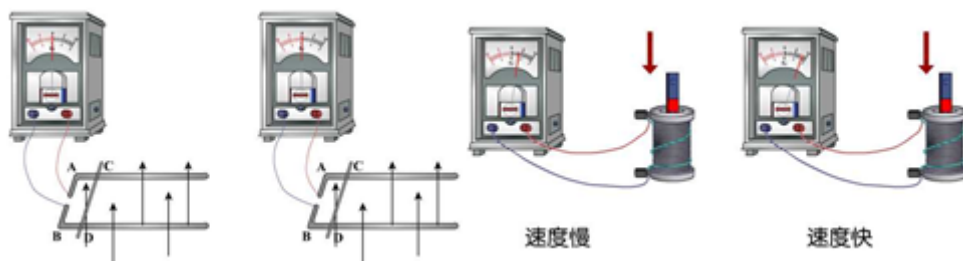


相同的时间里磁铁多的产生的感应电流大，也可说成感应电动势越大。



同一个磁铁在同一个高度下落速度越快的，产生的感应电流越大

通过上面的实验可知感应电流或感应电动势的大小与磁感应强度的变化快慢有关。



通过右手定则可以判断上面的金属棒D端的电势高；并且磁场的磁感应强度不变时，导棒运动速度越快，感应电流或电动势则越大。这说明感应电流或电动势与闭合回路的面积变化快慢有关。

## 定律

通过上述实验，我们可以得到如下结论：电路中感应电动势的大小，跟穿过这个电路的磁通量的变化率成正比，这就是**法拉第电磁感应定律**。法拉第电磁感应定律的数学表达式是：

$$\mathcal{E} = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (n \text{ 为线圈匝数})$$

①当磁感应强度改变引起磁通量变化时： $\mathcal{E} = nS \frac{\Delta B}{\Delta t}$ ；

②当线圈面积改变引起磁通量变化时： $\mathcal{E} = nB \frac{\Delta S}{\Delta t}$ ；

③若 $\Delta t$ 取一段时间，则 $\mathcal{E}$ 为 $\Delta t$ 这段时间内的平均值；

④由公式可知 $1\text{V} = 1\text{Wb/s}$ 。

### 3. $\Phi$ 、 $\Delta\Phi$ 、 $\Delta\Phi/\Delta t$ 的对比

	磁通量 $\Phi$	磁通量的变化量 $\Delta\Phi$	磁通量的变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$
物理意义	穿过某个面磁感线的条数	穿过某个面磁通量的变化量	穿过某个面磁通量变化的快慢
大小	$\Phi = BS_{\perp}$	$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ $\Delta\Phi = B\Delta S$ $\Delta\Phi = S\Delta B$	$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B \frac{\Delta S}{\Delta t}$ $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = S \frac{\Delta B}{\Delta t}$
注意	标量，但有正负	转过 $180^\circ$ ，穿过平面的磁通量是一正一负， $\Delta\Phi = 2BS$	不表示磁通量大小，也不表示磁通量的变化量大小，实际为单匝线圈上产生的电动势

#### 例题精讲

- 17 一个200匝、面积为 $20\text{cm}^2$ 的圆线圈，放在匀强磁场中，磁场方向与线圈平面成 $30^\circ$ 角，磁感应强度在 $0.5\text{s}$ 内由 $0.1\text{T}$ 增加到 $0.5\text{T}$ ，则初状态穿过线圈的磁通量是 \_\_\_\_\_，在 $0.05\text{s}$ 内穿过线圈的磁通量的变化量是 \_\_\_\_\_，线圈中平均感应电动势的大小是 \_\_\_\_\_。

- 答案
- $1 \cdot 10^{-4}\text{Wb}$
  - $4 \times 10^{-4}\text{Wb}$
  - $1.6\text{V}$

解析 根据磁通量公式 $\Phi = BS \sin 30^\circ = 0.1 \times 20 \times 10^{-4} \times \frac{1}{2}\text{Wb} = 10^{-4}\text{Wb}$ 。

圆线圈在匀强磁场中，现让磁感强度在 $0.05\text{s}$ 内由 $0.1\text{T}$ 均匀地增加到 $0.5\text{T}$ 。

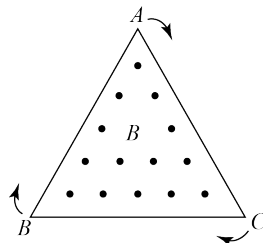
所以穿过线圈的磁通量变化量是： $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (B_2 - B_1)S \cdot \sin 30^\circ = 4 \times 10^{-4}\text{Wb}$ ，

而磁通量变化率为： $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 8 \times 10^{-3}\text{Wb/s}$ ，

则线圈中感应电动势大小为： $E = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 1.6\text{V}$ 。

#### 照猫画虎

- 18 如图所示，每边长为 $a$ 的等边三角形区域内有匀强磁场，磁感应强度 $B$ 的方向垂直图平面朝外。每边长为 $a$ 的等边三角形导体框架 $ABC$ ，在 $t = 0$ 时恰好与磁场区的边界重合，而后以周期 $T$ 绕其中心沿顺时针方向匀速旋转，于是在框架 $ABC$ 中有感应电流。规定电流按 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 方向流动时电流强度取为正，反向流动时取为负。设框架 $ABC$ 的总电阻为 $R$ ，则从 $t = 0$ 到 $t_1 = \frac{T}{6}$ 时间内平均电流强度 $\bar{I}_1 =$  \_\_\_\_\_；从 $t = 0$ 到 $t_2 = \frac{T}{2}$ 时间内平均电流强度 $\bar{I}_2 =$  \_\_\_\_\_。

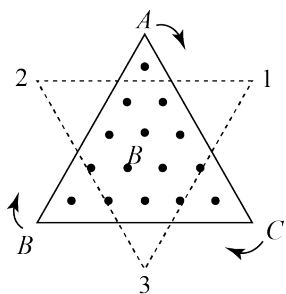


答案

1.  $\frac{\sqrt{3}Ba^2}{2RT}$
2.  $\frac{\sqrt{3}Ba^2}{6RT}$

解析

从 $t = 0$ 到 $t_1 = T/6$ 时间内， $\triangle ABC$ 中 $ABC$ 分别转到如图所示的1，2，3处，



此时间间隔内线圈中磁通量的变化为： $\Delta\Phi = \frac{2}{3}BS - BS = -\frac{1}{3}BS = -\frac{\sqrt{3}}{12}a^2B$ ；

则 $\varepsilon = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \frac{\frac{\sqrt{3}}{12}a^2B}{T/6} = \frac{\sqrt{3}Ba^2}{2T}$ ， $\bar{I}_1 = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\sqrt{3}Ba^2}{2RT}$ ；由楞次定律可知，其方向与题中规定的正方向一致。

同理， $t = 0$ 到 $t_2 = \frac{T}{2}$ 时间内， $\triangle ABC$ 中 $ABC$ 分别转到如图所示的3，2，1处，线圈中磁通量变化仍为 $\Delta\Phi$ ，但

$\Delta t' = \frac{T}{2} = 3\Delta t$ ，则 $\bar{I}_2 = \frac{1}{3}\bar{I}_1 = \frac{\sqrt{3}Ba^2}{6RT}$ ，其方向与题中规定的正方向一致。

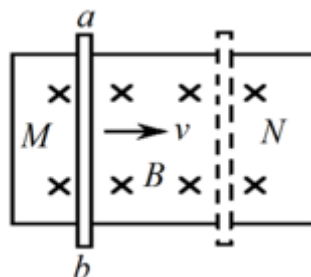
## 四、动生电动势

电磁感应定律表明，只要穿过线圈的磁通量 $\Phi$ 发生变化，就有感应电动势 $\mathcal{E}$ 产生，根据磁通量的定义（ $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$ ）可知，磁通变化率为

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\vec{S}}{dt} \cdot \vec{B} + \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot \vec{S}$$

由此可以看出导致 $\Phi$ 发生变化的原因有两种情况：一种是在稳定的磁场中由于**线圈平动或者转动**导致 $\Phi$ 变化而产生的感应电动势，这类问题都会使得导体做切割磁感线的运动，这种情况产生的感应电动势称为**动生电动势**。另一种是线圈保持不动，由于所在**空间磁场的变化**而导致 $\Phi$ 变化而产生的感应电动势，这种情况产生的感应电动势称为**感生电动势**。这两种情况下产生的电动势有什么不同？产生这两种电动势的非静电力又是什么呢？下面我们先来讨论前一种情况。

## 1. 动生电动势的大小



$ab$ 向右运动切割磁感线，引起线圈面积发生变化，在时间 $\Delta t$ 内，面积改变量 $\Delta S = Lv_0 \Delta t$ ；由法拉第电磁感应定律：

$$\mathcal{E} = nB \frac{\Delta S}{\Delta t} = nB \frac{Lv_0 \Delta t}{\Delta t} ;$$

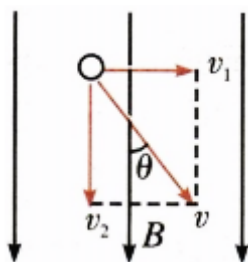
当 $n = 1$ 时， $\mathcal{E} = BLv_0$ ，即，当线圈切割磁感线，产生的感应电动势：

$$\mathcal{E} = BLv$$



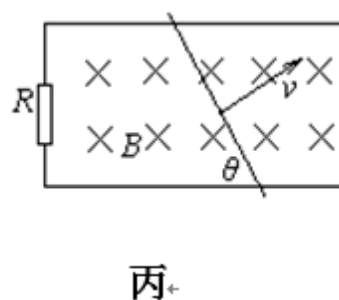
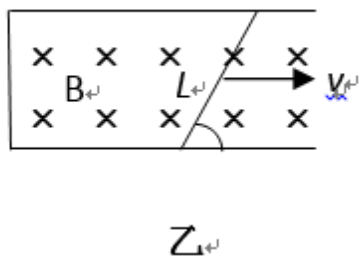
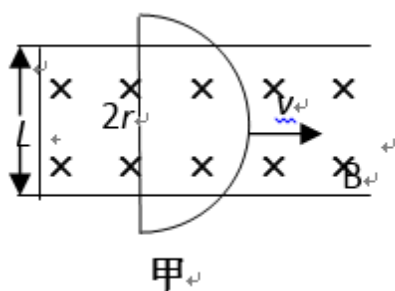
### 切割磁感线的有效长度

①当导体运动与磁场方向有一夹角时： $\mathcal{E} = BLv \sin \theta = BLv_1$ （如下）



②在公式 $\mathcal{E} = BLv \sin \theta$ 中， $L$ 是指有效长度，图甲中，半径为 $r$ 的半圆形导体垂直切割磁感线时，感应电动势 $\mathcal{E} = BLv \neq 2Brv$ 。图乙中，长为 $L$ 的导体棒垂直切割磁感线时，其感应电动势

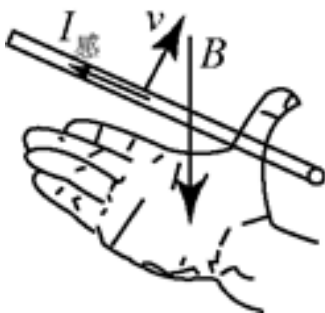
$E = BLv \sin \theta \neq BLv$ 。图丙中，长为 $L$ 的导体棒垂直切割磁感线时，其感应电动势 $E = BLv$ 。



## 2. 动生电动势的方向——右手定则

闭合电路的一部分导体做切割磁感线运动时，我们可以用**右手定则**来判断感应电流的方向。

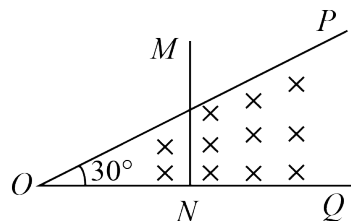
伸开右手，让大拇指跟其余四指垂直，并且都跟手掌在同一平面内，让磁感线从掌心穿入，大拇指指向导体切割的方向，其余四指所指的方向就是感应电流的方向。



右手定则只适用于导体切割磁感线的情形，而楞次定律是普遍适用的。可以说，**右手定则是楞次定律的特殊情况**。

### 例题精讲

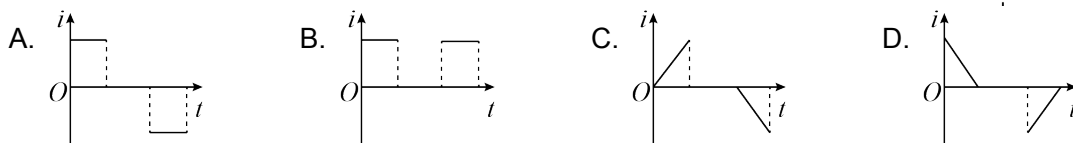
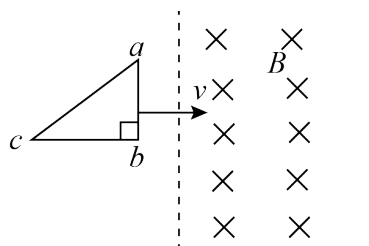
- 19 如图所示，有一弯成 $\angle$ 型的金属框架 $POQ$ ，竖直放置的金属棒 $MN$ 以 $v$ 匀速在 $POQ$ 上水平向右运动，已知 $\angle POQ = 30^\circ$ ，在 $POQ$ 范围内有磁感应强度为 $B$ 的匀强磁场。那么当 $MN$ 从 $O$ 点开始匀速运动过程中，感应电动势和时间的关系式是 \_\_\_\_\_。



答案  $\frac{\sqrt{3}}{3}Bv^2t$

解析 棒以 $v$ 匀速运动，根据几何关系则有， $\frac{L}{vt} = \tan 30^\circ$ ，所以 $L = \frac{\sqrt{3}}{3}vt$ ，  
由于 $E = BLv$ ，所以 $E = Bv \cdot \frac{\sqrt{3}}{3}vt = \frac{\sqrt{3}}{3}Bv^2t$ ，  
故答案为： $\frac{\sqrt{3}}{3}Bv^2t$ 。

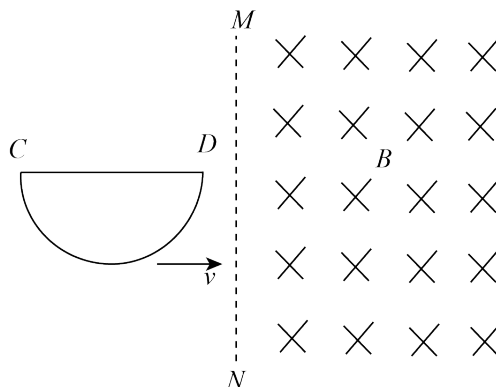
- 20 如图所示，两平行的虚线间的区域内存在着有界匀强磁场，有一较小的三角形线框 $abc$ 的 $ab$ 边与磁场边界平行，现使此线框向右匀速穿过磁场区域，运动过程中始终保持速度方向与 $ab$ 边垂直。则下列各图中哪一个可以定性地表示线框在进入磁场的过程中感应电流随时间变化的规律（ ）



答案 D

解析 根据 $E = BLv$ 及进入磁场时切割磁感线的等效杆长在减小可知D正确。  
故选D。

- 21 如图所示，一导线弯成半径为 $a$ 的半圆形闭合回路。虚线 $MN$ 右侧有磁感应强度为 $B$ 的匀强磁场，方向垂直于回路所在的平面。回路以速度 $v$ 向右匀速进入磁场，直径 $CD$ 始终与 $MN$ 垂直。从 $D$ 点到达边界开始到 $C$ 点进入磁场为止，下列结论正确的是（ ）



- A. 感应电流方向不变
- B.  $CD$ 段直线始终不受安培力
- C. 感应电动势最大值  $E_m = Bav$
- D. 感应电动势平均值  $\bar{E} = \frac{1}{4}\pi Bav$

答案 ACD

解析 A. 在闭合电路进入磁场的过程中，通过闭合电路的磁通量逐渐增大，根据楞次定律可知感应电流的方向为逆时针方向不变，故A正确；

B. 根据左手定则可以判断，受安培力向下，故B错误；

C. 当半圆闭合回路进入磁场一半时，即这时等效长度最大为  $a$ ，这时感应电动势最大  $E = Bav$ ，故C正确；

D. 由法拉第电磁感应定律可得感应电动势平均值  $\bar{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B \cdot \frac{1}{2}\pi a^2}{\frac{2a}{v}} = \frac{1}{4}\pi Bav$ ，故D正确。

故选ACD。

- 22 在北半球上，地磁场竖直分量向下。飞机在我国上空匀速巡航，机翼保持水平，飞行高度不变。由于地磁场的作用，金属机翼上有电势差，设飞行员左方机翼末端处的电势为  $\varphi_1$ ，右方机翼末端处电势为  $\varphi_2$ ，则（ ）
- A. 若飞机从西往东飞， $\varphi_1$ 比 $\varphi_2$ 高
  - B. 若飞机从东往西飞， $\varphi_2$ 比 $\varphi_1$ 高
  - C. 若飞机从南往北飞， $\varphi_1$ 比 $\varphi_2$ 高
  - D. 若飞机从北往南飞， $\varphi_2$ 比 $\varphi_1$ 高

答案 AC

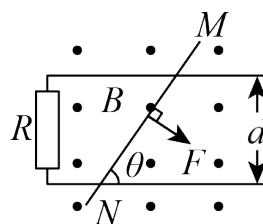
解析 当飞机在北半球飞行时，因为地磁场的存在，且地磁场的竖直分量方向竖直向下，因为感应电动势的方向与感应电流的方向是相同的，由低电势指向高电势。由右手定则可判知，在北半球，不论沿任何方向水平飞行，都是飞机的左方机翼电势高，右方机翼电势低，即总有  $\varphi_1$

比 $\varphi_2$ 高，故A、C正确．

故选AC．

### 照猫画虎

- 23 如图所示，平行导轨间距为 $d$ ，一端跨接一个电阻 $R$ ，匀强磁场的磁感应强度为 $B$ ，方向垂直于平行金属导轨所在平面．一根金属棒与导轨成 $\theta$ 角放置，金属棒与导轨的电阻均不计．当金属棒沿垂直于棒的方向以恒定的速度 $v$ 在金属导轨上滑行时，通过电阻 $R$ 的电流大小为 \_\_\_\_\_ ．

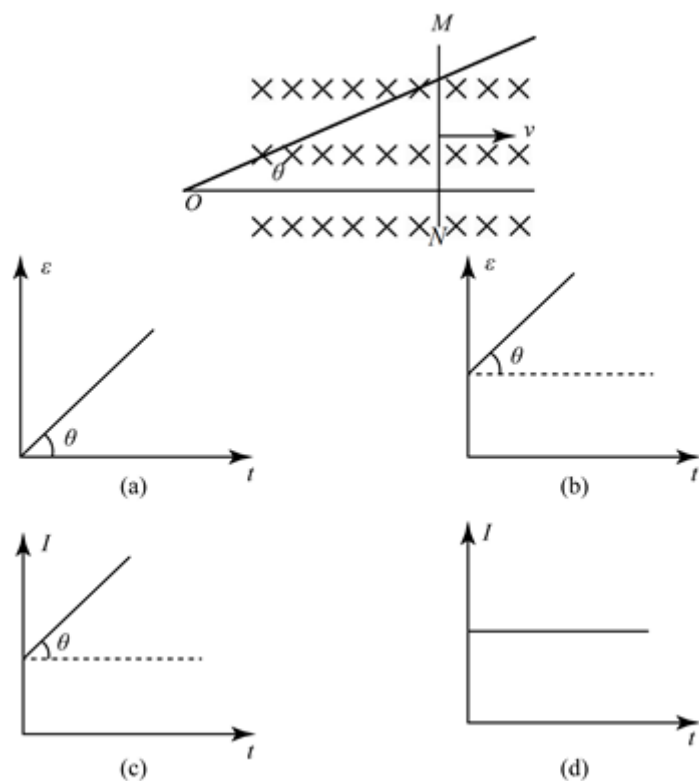


答案  $\frac{Bdv}{R \cdot \sin \theta}$

解析 图示金属棒沿垂直于棒的方向以 $v$ 滑行，金属棒垂直切磁感线，产生感应电动势和感应电流，金属棒有效切割长度为 $\frac{d}{\sin \theta}$ ，依可得感应电动势 $E = B l v = B v \cdot \frac{d}{\sin \theta}$ ，再依闭合电路欧姆定律得 $I = \frac{E}{R} = \frac{Bdv}{R \cdot \sin \theta}$ ．

- 24 如图所示，金属杆 $MN$ 在三角形金属框架上以速度 $v$ 从图示位置起向右作匀速滑动，框架夹角为 $\theta$ ，杆和框架由粗细均匀、截面积相同的同种材料制成，则回路中的感应电动势 $\epsilon$ 和电流 $I$ 随时间 $t$ 变化的规律分别是下图中的（ ）





- A. (a) 和 (c)      B. (a) 和 (d)      C. (b) 和 (c)      D. (b) 和 (d)

答案 D

**解析** 设初始时刻,  $ON$  长度为  $x_0$ , 经过时间  $t$ ,  $MN$  位移  $x = vt$ , 则  $MN$  在三角形导轨间的有效切割长度  $l = (x + x_0) \tan \theta = (vt + x_0) \tan \theta$ .

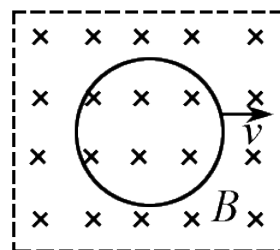
则  $\epsilon = Blv = Bv(vt + x_0) \tan \theta = (Bv^2 \tan \theta) t + Bvx_0 \tan \theta$ , 与 (b) 图相符;

设单位长度电阻为  $r$ , 则时刻  $t$  时, 回路中总电阻  $R = (x + x_0) \left( 1 + \tan \theta + \frac{1}{\cos \theta} \right)$ ,

$$I = \frac{\epsilon}{R} = \frac{Bv(x + x_0) \tan \theta}{(x + x_0) \left( 1 + \tan \theta + \frac{1}{\cos \theta} \right)} = \frac{Bv \sin \theta}{1 + \cos \theta + \sin \theta}, \text{ 与 } t \text{ 无关, 与 (d) 图相符.}$$

故 D 正确.

- 25 如图所示, 金属圆环处于有直线边界的匀强磁场中; 磁场方向与圆环平面垂直, 现以垂直于磁场边界的速度将圆环匀速拉出磁场, 在该过程中, 圆环上的感应电流 ( )



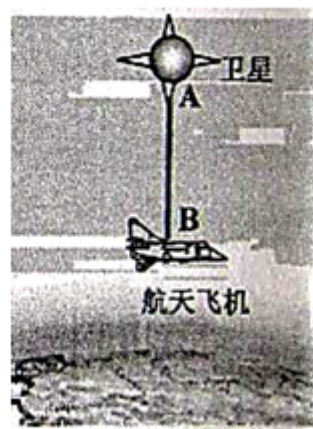
- A. 大小不变      B. 逐渐减小      C. 逐渐增大      D. 先增大后减小

答案 D

解析 根据动生电动势表达式： $E = BLv$ ，圆环拉出磁场过程中，有效长度先变大再变小，故电动势也是先变大再变小。

故选D。

- 26 当航天飞机在环绕地球的轨道上飞行时，从中释放一颗卫星，卫星与航天飞机保持相对静止，两者用导电绳相连，这种卫星称为“绳系卫星”。现有一颗卫星在地球赤道上空运行，卫星位于航天飞机正上方，卫星所在位置地磁场方向由南向北。下列说法正确的是：（ ）



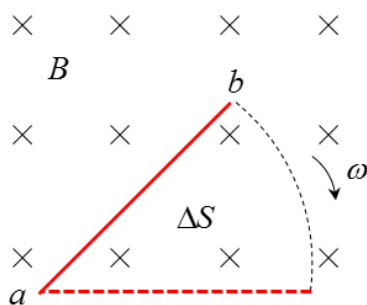
- A. 航天飞机和卫星从西向东飞行时，图中B端电势高  
B. 航天飞机和卫星从西向东飞行时，图中A端电势高  
C. 航天飞机和卫星从南向北飞行时，图中B端电势高  
D. 航天飞机和卫星从南向北飞行时，图中A端电势高

答案 B

解析

地球赤道上空运行，此处磁场方向在卫星所在位置是由南向北，从西向东飞行时，根据右手定则知感应电流***B***流向***A***，电源内部由低到高。

### 3. 转动产生的动生电动势



如图所示，长为***L***的金属棒以***a***为支点在磁感应强度为***B***的磁场中以角速度***ω***匀速转动，***ab***棒产生的感应电动势为：

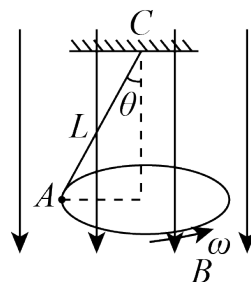
$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B\Delta S}{\Delta t} = \frac{B\frac{\Delta\theta L^2}{2}}{\Delta t} = \frac{B\omega L^2}{2}$$

其中  $\frac{\omega L}{2} = v_{\text{中}}$ ， $v_{\text{中}}$  为金属棒中点的速度，故电动势又可以表示为：

$$E = BLv_{\text{中}}$$

#### 例题精讲

- 27 如图所示，长为***L***的金属导线上端悬于***C***点，下端系一小球***A***，在竖直向下的匀强磁场中做圆锥摆运动，转动方向如图所示，导线与竖直方向的夹角为***θ***，摆球的角速度为***ω***，磁感应强度为***B***，则金属导线中产生感应电动势的高电势端及大小为（ ）



- A. *C*点  $\frac{1}{2}BL^2\omega$
- B. *C*点  $\frac{1}{2}BL^2\omega\sin^2\theta$
- C. *A*点  $\frac{1}{2}BL^2\omega$
- D. *A*点  $\frac{1}{2}BL^2\omega\sin^2\theta$

答案 B

解析 根据右手定则知C点电势高，

可将金属导线看成水平方向与竖直方向，竖直方向不切割磁感线，

水平方向切割磁感线，

由法拉第电磁感应定律，金属导线产生的感应电动势为： $E = BL\sin\theta\bar{v}$ ，

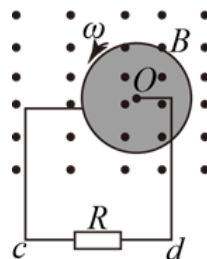
圆周运动的速度为： $v = L\sin\theta\cdot\omega$ ，

$$\bar{v} = \frac{1}{2}v = \frac{1}{2}L\sin\theta\cdot\omega，$$

因此金属导线中产生的感应电动势大小电势差为： $E = \frac{1}{2}BL^2\omega\sin^2\theta$ ，故B正确，ACD错误。

故选B。

- 28 如图半径为 $r$ 的金属圆盘在垂直于盘面的匀强磁场中，绕 $O$ 轴以角速度 $\omega$ 沿逆时针方向匀速转动，电阻两端分别接盘心 $O$ 和盘边缘，金属圆盘的电阻不计，则通过电阻 $R$ 的电流强度的大小和方向是 ( )



- A. 由 $c$ 到 $d$ ， $I = \frac{Br^2\omega}{R}$   
 B. 由 $d$ 到 $c$ ， $I = \frac{Br^2\omega}{R}$   
 C. 由 $c$ 到 $d$ ， $I = \frac{Br^2\omega}{2R}$   
 D. 由 $d$ 到 $c$ ， $I = \frac{Br^2\omega}{2R}$

答案 C

解析 将金属圆盘看成无数条金属幅条组成的，这些幅条切割磁感线，产生感应电流，由右手定则判断可知：通过电阻 $R$ 的电流强度的方向为从 $c$ 到 $d$ 。

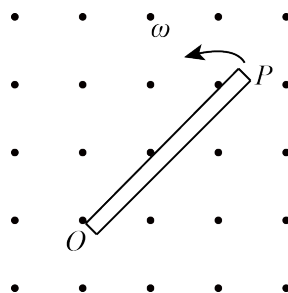
金属圆盘产生的感应电动势为： $E = \frac{1}{2}Br^2\omega$ ，通过电阻 $R$ 的电流强度的大小为：

$$I = \frac{E}{R} = \frac{Br^2\omega}{2R}。$$

故选C。

照猫画虎

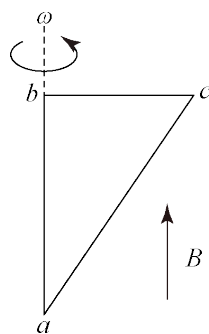
- 29 如图所示，匀强磁场的磁感应强度为 $B$ ，在垂直于磁场方向的平面内，有一个长度为 $L$ 的金属棒 $OP$ 绕垂直于纸面的转动轴 $O$ 沿逆时针方向以角速度 $\omega$ 匀速转动，试求金属棒 $OP$ 转动时所产生的感应电动势的大小和电流方向。



答案  $E = \frac{1}{2}BL^2\omega$ ，方向由 $O$ 向 $P$

解析 金属棒 $OP$ 切割磁感线运动时，棒上各点的线速度大小不同，从线速度和角速度的关系 $v = \omega r$ 可出，其平均切割速度为 $\bar{v} = \frac{\omega L}{2}$ ，所以感应电动势为 $E = \frac{1}{2}BL^2\omega$ ，根据右手定则方向由 $O$ 向 $P$ 。

- 30 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 $\omega$ 逆时针转动时， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 三点的电势分别为 $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 。已知 $bc$ 边的长度为 $l$ 。下列判断正确的是（ ）

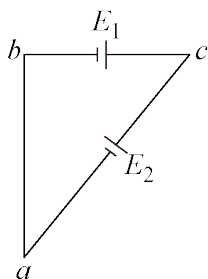


- A.  $U_a > U_c$ ，金属框中无电流
- B.  $U_b > U_c$ ，金属框中电流方向沿 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow a$
- C.  $U_{bc} = -\frac{1}{2}Bl^2\omega$ ，金属框中无电流
- D.  $U_{bc} = \frac{1}{2}Bl^2\omega$ ，金属框中电流方向沿 $a \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$

答案 C

解析 等效电路图如图，电动势相互抵消，无电流，由右手定则可得 $b$ 比 $c$ 低， $U_{bc} = \frac{1}{2}BL\omega^2$ 。

故选C。



## 4. 动生电动势的本质

如图甲所示，一条长度为 $l$ 的直导线 $CD$ ，在匀强磁场 $B$ 中以速度 $v$ 向右运动，并且导线 $CD$ 与 $B$ 、 $v$ 的方向垂直。不管导线中是否存在电流，即不管导线中的自由电子是否有沿导线定向运动的漂移速度 $v_{漂}$ ，它们都要随导线的速度 $v$ 向右运动，即都存在一个分速度 $v$ ，因此每个自由电子受到的洛伦兹力都存在一个分力 $F_{洛v}$ ，它的大小为

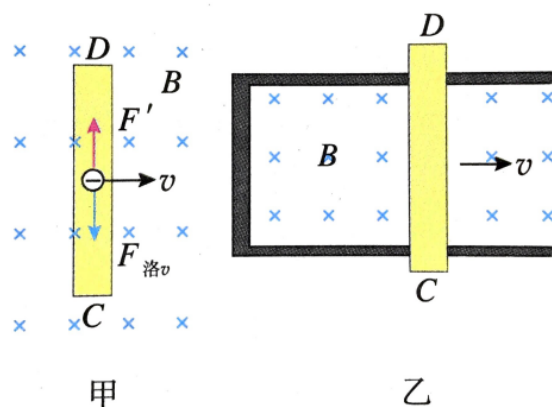
$$F_{洛v} = Bev$$

由左手定则可以判断， $F_{洛v}$ 的方向由 $D$ 指向 $C$ 。

在力 $F_{洛v}$ 的作用下，导体中的自由电子将沿导体向下运动，使导体下端聚集负电荷，导体上端因缺失电子而出现正电荷聚集，结果使导体上端 $D$ 的电势高于下端 $C$ 的电势，出现由 $D$ 指向 $C$ 的静电场，此电场作用于电子的静电力 $F'$ 的方向由 $C$ 指向 $D$ ，与 $F_{洛v}$ 方向相反。随着导体两端正、负电荷的积累，电场不断增强，当作用在自由电子上的静电力 $F'$ 与电子受到的 $F_{洛v}$ 相平衡时， $D$ 、 $C$ 两端将产生一个稳定的电势差。

如果用导线把 $C$ 、 $D$ 两端连接起来，如乙所示，由于 $D$ 端的电势比 $C$ 端的电势高，自由电子在静电力作用下将在导线框中沿顺时针方向流动，形成逆时针方向的电流，电荷的流动使 $CD$ 两端积累的电荷不断减少， $F_{洛v}$ 又不断使自由电子从 $D$ 端运动到 $C$ 端，从而在回路中形成持续的电流。

可见运动的导体 $CD$ 就是一个电源， $D$ 端是电源的正极， $C$ 端是电源的负极，自由电子受洛伦兹力的作用，从 $D$ 端被搬运到 $C$ 端，当然也可以等效看作是正电荷受洛伦兹力作用从 $C$ 端被搬运到 $D$ 端。这里的洛伦兹力就相当于电源中的非静电力。



根据电动势的定义，电动势等于单位正电荷从负极通过电源内部移动到电源的正极，非静电力所做的功，因此该电动势为

$$E = \frac{W_{\text{非}}}{e} = \frac{F_{\text{洛}v}l}{e} = Blv$$

这与之前利用法拉第电磁感应定律得到结果一致。



### 再论动生电动势的方向

动生电动势的本质是带电粒子随导线运动时，洛伦兹力沿导线方向的分量，所以我们可以认为动生电动势的方向同样可以采用洛伦兹力方向判别的法则来进行判断：

$$\vec{F}_{\text{洛}} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

判断出带电粒子的受到洛伦兹力的方向我们就可以得到感应电流和和动生电动势的方向了！

## 五、感生电动势

### 1. 感生电动势的概念

导体切割磁感线时，洛伦兹力的一个分量充当非静电力做功，产生了动生电动势，当导体不动，由于磁场变化而产生感应电动势时，非静电力又是谁呢？

英国物理学家麦克斯韦分析了这类电磁感应现象后，提出了自己的理论解释，他认为：变化的磁场能够在它的周围空间产生一种电场，叫做**感生电场**。感应电场的电场线与静电场的电场线不同，它是封闭的曲线，因此也被称为**涡旋电场**。

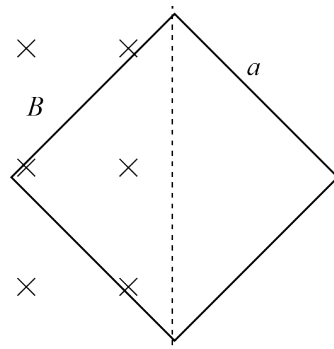
涡旋电场对置于场中的电荷有作用力，但与静电场不同的是，这个力为非保守力，当电荷绕涡旋电场的电场线一周回到起始点的过程中，电场力做功不为0。因此，置于变化磁场中的导体，涡旋电场对电荷的作用力充当非静电力。我们把这种情况下产生的感应电动势称为**感生电动势**。当磁感应强度以变化

率 $k$ 均匀变化时，其大小为：

$$\mathcal{E} = n \frac{dB}{dt} \cdot S = nkS$$

例题精讲

- 31 如图所示，一正方形线圈的匝数为 $n$ ，边长为 $a$ ，线圈平面与匀强磁场垂直，且一半处在磁场中，在 $\Delta t$ 时间内，磁感应强度的方向不变，大小由 $B$ 均匀增大到 $2B$ ，在此过程中，线圈中产生的感应电动势为（ ）



A.  $\frac{nBa^2}{2\Delta t}$

B.  $\frac{Ba^2}{2\Delta t}$

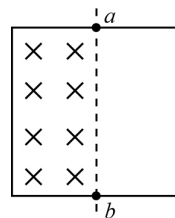
C.  $\frac{nBa^2}{\Delta t}$

D.  $\frac{2nBa^2}{\Delta t}$

答案 A

解析  $E = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = N \frac{\Delta B}{\Delta t} S = n \frac{2B - B}{\Delta t} \frac{1}{2} a^2 = \frac{nBa^2}{2\Delta t}$ ，故A正确。  
故选A。

- 32 用均匀导线做成的正方形线框边长为 $0.2\text{m}$ ，正方形的一半放在垂直于纸面向里的匀强磁场中，如图所示。当磁场以 $10\text{T/s}$ 的变化率增强时，线框中 $a$ 、 $b$ 两点间的电势差是（ ）



A.  $U_{ba} = 0.1\text{V}$

B.  $U_{ba} = -0.1\text{V}$

C.  $U_{ba} = 0.2\text{V}$

D.  $U_{ba} = -0.2\text{V}$

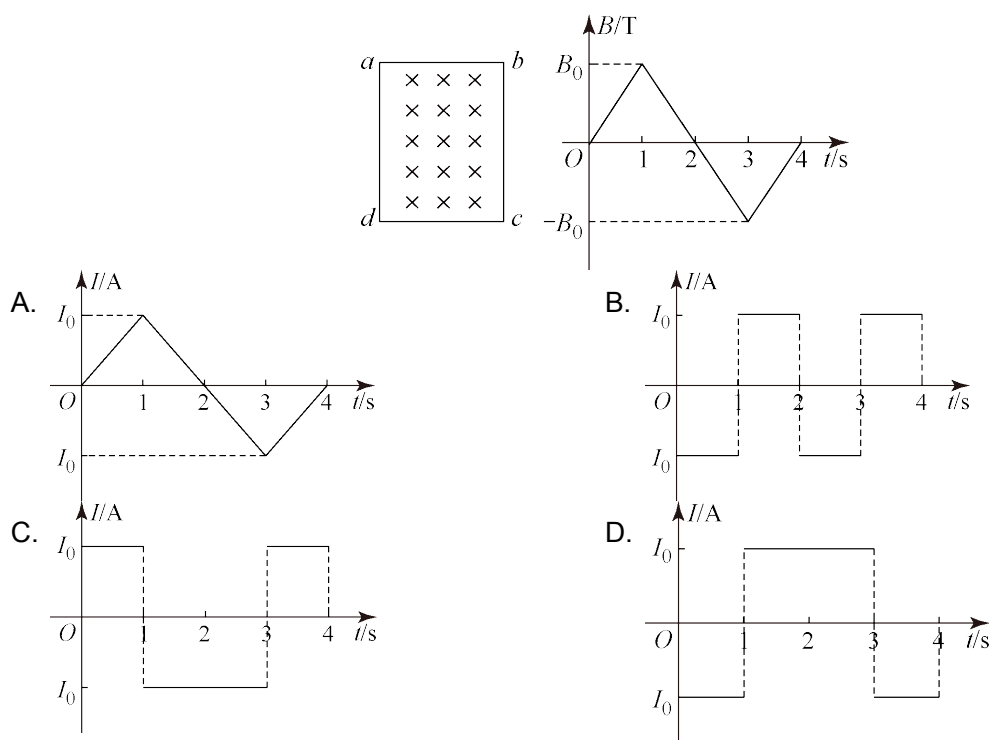
答案 A

解析



左半部分磁通量变化而产生的感应电动势，故线框中将产生感应电流；把左半部分线框看成电源，设其电动势为 $E$ ，正方形线框总电阻为 $r$ ，则内电阻为 $\frac{r}{2}$ ，则 $ab$ 两点间的电势差即为电源的路端电压，设 $l$ 为边长， $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 10 \text{ T/s}$ ，感应电动势 $E = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = 10 \times \frac{0.2^2}{2} \text{ V} = 0.2 \text{ V}$ ，所以有 $U = IR = \frac{E}{r} \cdot \frac{r}{2} = 0.1 \text{ V}$ ，由于 $a$ 点电势低于 $b$ 点，有 $U_{ab} = -0.1 \text{ V}$ ， $U_{ba} = 0.1 \text{ V}$ 。  
故选A。

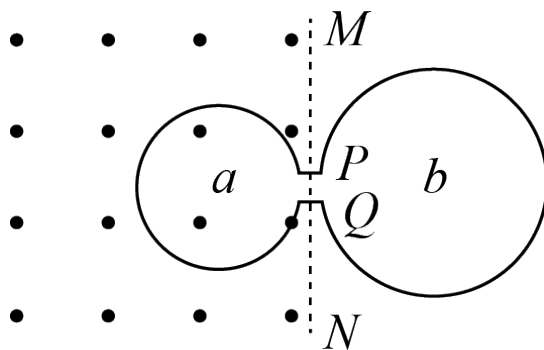
- 33 矩形导线框 $abcd$ 固定在匀强磁场中，磁感线的方向与导线框所在平面垂直，规定磁场的正方向垂直纸面向里，磁感应强度 $B$ 随时间变化的规律如图所示。若规定逆时针方向为感应电流 $I$ 的正方向，下列各图中正确的是（ ）



答案 C

**解析** 由图可知， $0 \sim 1 \text{ s}$ 内，线圈中磁通量的变化率相同，故 $0 \sim 1 \text{ s}$ 内电流的方向相同，由楞次定律可知，电路中电流方向为逆时针，即电流为正方向；  
 同理可知， $1 \sim 2 \text{ s}$ 内电路中的电流为顺时针， $2 \sim 3 \text{ s}$ 内，电路中的电流为顺时针， $3 \sim 4 \text{ s}$ 内，电路中的电流为逆时针，由 $E = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B \cdot S}{\Delta t}$ 可知，电路中电流大小恒定不变。  
 故选C。

- 34 如图所示，虚线 $MN$ 左侧有垂直于纸面向外的匀强磁场，用同种材料同样规格的导线作成如图形状的导线框，其中 $a$ 、 $b$ 是两个圆环，它们的半径之比为 $r_a:r_b=2:3$ ，小缺口之间相连，连接点为 $P$ 、 $Q$ 。第一次将 $a$ 环置于磁场中， $b$ 环在磁场外（如图）；第二次将 $b$ 环置于磁场中， $a$ 环在磁场外；两次 $P$ 、 $Q$ 都处于磁场边界。关于两次 $P$ 、 $Q$ 间的电压 $U_1$ 、 $U_2$ 之比 $U_1:U_2$ ，下列判断正确的是（ ）

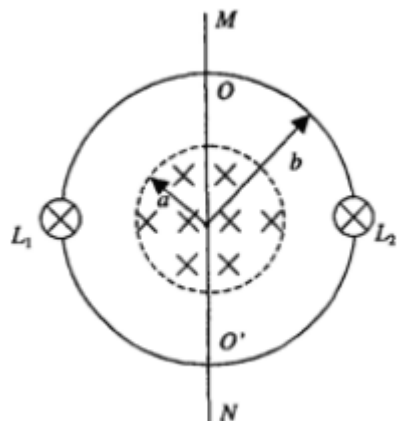


- A. 等于3:2      B. 等于2:3      C. 等于4:9      D. 等于9:4

答案 B

解析 单独将A环放在磁场中产生 $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ，A为电源， $PQ$ 间的电压为路端电压也就是B环两端的电压。同理B环放进磁场，B为电源。故B对。  
故选B。

- 35 如图所示，半径为 $a$ 的圆形区域内有匀强磁场，磁感应强度 $B = 0.2\text{T}$ ，磁场方向垂直纸面向里，半径为 $b$ 的圆环与磁场同心的放置，磁场与环面垂直，其中 $a = 0.4\text{m}$ ， $b = 0.6\text{m}$ 。金属环上分别接有灯泡 $L_1$ 、 $L_2$ ，两灯泡的电阻均为 $R_0 = 2\Omega$ ，一金属棒 $MN$ 与金属环接触良好，棒与环的电阻均不计。



- (1) 若棒以  $v_0 = 5\text{m/s}$  的速率在环上向右匀速滑动，求棒滑过圆环直径  $OO'$  的瞬时， $MN$  中感应电动势和流过灯  $L_1$  的电流；
- (2) 撤去中间的金属棒  $MN$ ，若此时磁感应强度随时间均匀变化，其变化率为  $\frac{4}{\pi}\text{T/s}$ ，求  $L_1$  的功率。

答案

(1)  $0.4\text{A}$

(2)  $P = 0.0512\text{W}$

解析

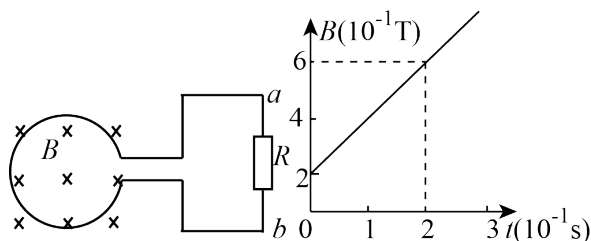
(1)  $E = B2av_0 = 0.8\text{V}$

两灯泡为并联关系，电源内阻不计，所以  $I = \frac{E}{R_0} = 0.4\text{A}$

(2)  $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B}{\Delta t} \pi a^2 = 0.64\text{V}$ ，

$P = I^2 R_0 = \left(\frac{E}{2R_0}\right)^2 R_0 = 0.0512\text{W}$

- 36 如图所示，一个圆形线圈  $n = 1000$  匝，线圈  $S = 20\text{cm}^2$ ，线圈电阻  $r = 1\Omega$ ，在线圈外接一个阻值为  $R = 4\Omega$  的电阻，把线圈放入一个方向垂直线圈平面向里的匀强磁场中，磁感应强度随时间变化的规律如  $B-t$  图线所示，在  $0-2\text{s}$  内求：



- (1) 线圈产生的感应电动势  $E$ 。
- (2) 电阻  $R$  中的电流  $I$  的大小。

(3) 电阻 $R$ 两端的电势差 $U_{ab}$  .

答案

(1)  $4\text{ V}$

(2)  $0.8\text{ A}$

(3)  $-3.2\text{ V}$

解析

(1) 由图可以知道： $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 2\text{ T/S}$

由法拉第电磁感应定律可以知道产生的感应电动势为

$$E = n \frac{\Delta B}{\Delta t} S = 1000 \times 2 \times 0.002\text{ V} = 4\text{ V} .$$

(2) 回路中电流 $I = \frac{E}{R+r} = \frac{4}{4+1}\text{ A} = 0.8\text{ A} .$

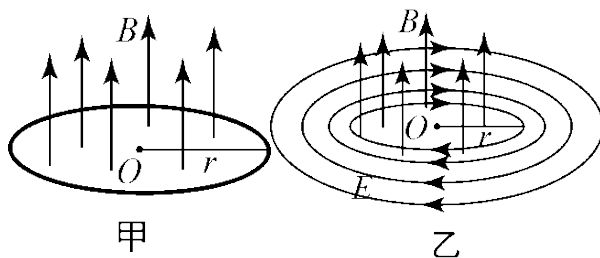
(3) 由题可知 $U_{ab} = \frac{-RE}{R+r}$  解得 $U_{ab} = -3.2\text{ V} .$

## 2. 涡旋电场的电场线 (选讲)

### 进阶拓展

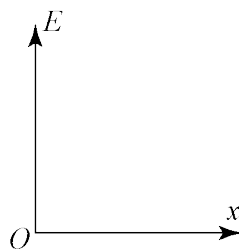
37 麦克斯韦电磁理论认为：变化的磁场会在空间激发一种电场，这种电场与静电场不同，称为感生电场或涡旋电场 .

在如图甲所示的半径为 $r$ 的圆形导体环内，存在以圆环为边界竖直向上的匀强磁场，磁感应强度大小随时间的变化关系为 $B = kt$  ( $k > 0$ 且为常量) . 该变化的磁场会在空间产生圆形的涡旋电场，如图乙所示，涡旋电场的电场线是与导体环具有相同圆心的同心圆，同一电场线上各点场强大小相同，方向沿切线 . 导体环中的自由电荷就会在感生电场的作用下做定向运动，产生感应电流，或者说导体中产生了感应电动势，涡旋电场力充当非静电力，其大小与涡旋电场的场强 $E$ 满足关系 $F = Eq$  .

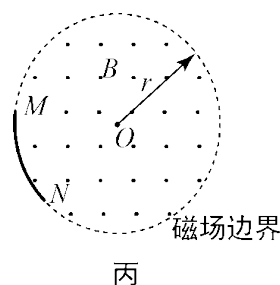


(1) 根据法拉第电磁感应定律，推导导体环中产生的感应电动势 $\epsilon$  .

- (2) 在乙图中以圆心 $O$ 为坐标原点，向右建立一维 $x$ 坐标轴，推导在 $x$ 轴上各处电场强度的大小 $E$ 与 $x$ 之间的函数表达式，在图中定性画出 $E-x$ 图像。



- (3) 图丙为图乙的俯视图，去掉导体环，在磁场圆形边界上有 $M$ 、 $N$ 两点， $MN$ 之间所夹的小圆弧恰为整个圆周的 $1/6$ ；将一个带电量为 $+q$ 的带电小球沿着圆弧分别顺时针、逆时针从 $M$ 移动到 $N$ ，求涡旋电场力分别所做的功。在此基础上，对比涡旋电场和静电场，说明涡旋电场中为什么不存在电势的概念。



答案

- (1)  $\pi r^2 k$   
(2) 见解析  
(3) 见解析

解析

(1)  $\varepsilon = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = S \frac{\Delta B}{\Delta t} = \pi r^2 k$  .

- (2) 求 $x$ 处的涡旋电场场强，可认为放一个半径为 $x$ 的导体环（圆心和磁场区域圆心相同）

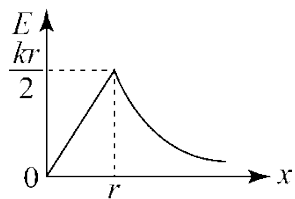
当 $x < r$ 时： $\varepsilon = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B}{\Delta t} S = k\pi x^2$  ,

$E_x = \frac{\varepsilon}{2\pi x} = \frac{k\pi x^2}{2\pi x} = \frac{kx}{2}$  ;

当 $x \geq r$ 时： $\varepsilon = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B}{\Delta t} S = k\pi r^2$  ,

$E_x = \frac{\varepsilon}{2\pi x} = \frac{k\pi r^2}{2\pi x} = \frac{kr^2}{2x}$  .

坐标图如图所示：



(3)  $E_r = \frac{kr}{2}$ ,  $+q$  受力沿着电场线 ( 顺时针 ),

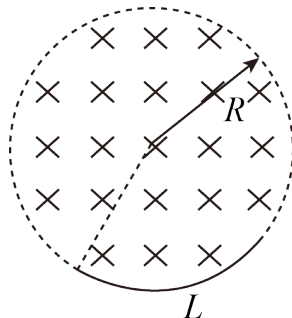
$$\text{顺时针移动时: } W_1 = E_r q \cdot \frac{5}{6} \cdot 2\pi r = \frac{5qk\pi r^2}{6};$$

$$\text{逆时针移动时: } W_2 = -E_r q \cdot \frac{1}{6} \cdot 2\pi r = -\frac{qk\pi r^2}{6};$$

因为: 沿不同路径从  $M$  移动到  $N$  点,  $W_1 \neq W_2$ , 即涡旋电场力做功与路径有关, 所以

不存在电势能  $E_P$  的概念,  $\varphi = \frac{E_P}{q}$ , 所以不存在电势的概念.

- 38 如图所示, 有一匀强磁场分布在一个半径为  $R$  的圆形区域内, 并以变化率  $\frac{\Delta B}{\Delta t}$  均匀变化. 长度为  $L$  的圆弧形金属棒按图中形式放置, 圆弧圆心与圆形磁场的中心重合, 下面给出了此圆弧形金属棒中产生的感应电动势的表达式, 其中只有一个是合理的. 你可能不会求解此圆弧形金属棒中产生的感应电动势, 但是你可以通过一定的物理分析, 对下列表达式的合理性做出判断根据你的判断, 此圆弧形金属棒中产生的感应电动势的合理表达式为 ( )



A.  $E = \frac{\Delta B}{\Delta t} \frac{LR}{2}$

B.  $E = \frac{\Delta B}{\Delta t} LR$

C.  $E = \frac{\Delta B}{\Delta t} L$

D.  $E = 0$

答案 A

解析 略.

### 3. 动生感应和感生感应综合

由法拉第电磁感应定律可得:  $\mathcal{E} = n \frac{d\Phi}{dt}$  ( $n$  为线圈匝数), 其中磁通量和磁场面积及磁感强度大小方向都有关系. 当线圈内磁场面积和磁感强度都在变化时, 产生的总电动势应是这两部分电动势 ( 动生和感生 ) 的代数和.

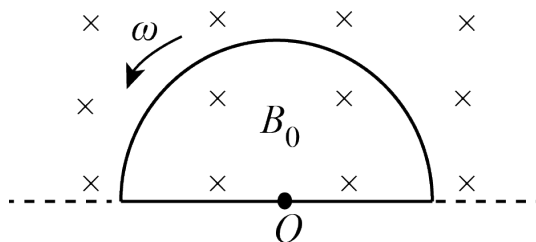
考虑单线圈, 且线圈平面与磁感线垂直, 即:

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\vec{S}}{dt} \cdot \vec{B} + \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot \vec{S}$$

无论是处理动生电动势还是感生电动势, 我们都可以通过法拉第电磁感应定律来进行求解.

例题精讲

- 39 如图，均匀磁场中有一由半圆弧及其直径构成的导线框，半圆直径与磁场边缘重合；磁场方向垂直于半圆面（纸面）向里，磁感应强度大小为  $B_0$ 。使该线框从静止开始绕过圆心  $O$ 、垂直于半圆面的轴以角速度  $\omega$  匀速转动半周，在线框中产生感应电流。现使线框保持图中所示位置，磁感应强度大小随时间线性变化。为了产生与线框转动半周过程中同样大小的电流，磁感应强度随时间的变化率  $\frac{\Delta B}{\Delta t}$  的大小应为（ ）

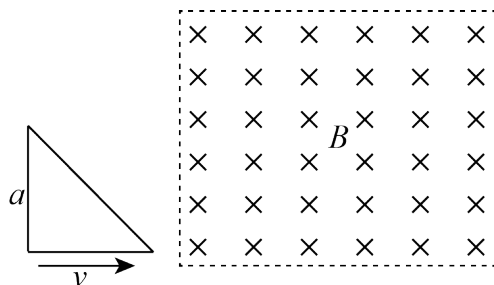


- A.  $\frac{4\omega B_0}{\pi}$       B.  $\frac{2\omega B_0}{\pi}$       C.  $\frac{\omega B_0}{\pi}$       D.  $\frac{\omega B_0}{2\pi}$

答案 C

解析 线圈匀速转动过程中， $I = \frac{E}{r} = \frac{\frac{1}{2}B_0 R^2 \omega}{r} = \frac{1}{2} \frac{B_0 R^2 \omega}{r}$ ；要使线圈产生相同电流，  
 $I = \frac{E}{r} = \frac{1}{r} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{1}{r} \frac{\Delta B \frac{1}{2} \pi R^2}{\Delta t} = \frac{1}{2} \pi \frac{1}{r} \frac{\Delta B R^2}{\Delta t}$ ，所以  $\frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{\omega B_0}{\pi}$ ，所以C正确。

- 40 如图所示，一金属导线单位长度的电阻为  $\rho$ ，折成等腰直角三角形，直角边长为  $a$ ，在  $t = 0$  时刻从图示位置开始以匀速  $v$  进入以  $B = B_0 - kt$  规律变化的均匀磁场中，其中  $k$  为大于零的常数。当三角形的水平直角边进入一半时，求：



- (1) 导线内的动生电动势。
- (2) 导线内的感生电动势。
- (3) 导线内的电流强度。

答案

$$(1) \frac{B_0 av}{2} - \frac{ka^2}{4}$$

$$(2) \frac{1}{8} ka^2$$

$$(3) \frac{|4B_0 v - 3ka|}{8(2 + \sqrt{2})\rho}$$

解析

(1) 当三角形的水平直边进入，

$$B = B_0 - k \cdot \frac{a}{2v}$$

$$\text{则动生电动势为 } E_{\text{动}} = B \cdot \frac{a}{2} \cdot v = \frac{B_0 av}{2} - \frac{ka^2}{4}$$

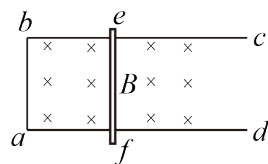
$$(2) \text{ 感生电动势为 } E_{\text{感}} = \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| \cdot S = \frac{1}{8} ka^2$$

$$(3) \text{ 感应电动势为 } E = |E_{\text{动}} - E_{\text{感}}| = \left| \frac{B_0 av}{2} - \frac{3ka^2}{8} \right|$$

$$\text{则电流强度为 } I = \frac{E}{R} = \frac{\left| \frac{B_0 av}{2} - \frac{3ka^2}{8} \right|}{(2 + \sqrt{2})a\rho} = \frac{|4B_0 v - 3ka|}{8(2 + \sqrt{2})\rho}$$

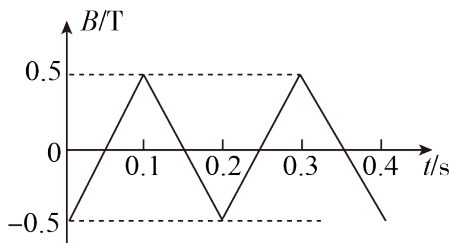
照猫画虎

41 如图甲所示，水平固定的光滑金属导轨  $abcd$ ，处于竖直向下的匀强磁场中。导轨的  $ad$  边与  $bc$  边平行，间距为  $L_1 = 10\text{cm}$ ，电阻可忽略不计。一根导体棒  $ef$  平行于  $ab$  边置于导轨上，与导轨保持良好接触。已知导体棒的电阻为  $R = 0.52\Omega$ ，与  $ab$  相距为  $L_2 = 10\text{cm}$ 。



甲

(1) 如果磁感应强度  $B$  按图乙的规律变化，且导体棒在外力作用下保持静止，则在  $0.4\text{s}$  内导体棒中产生的焦耳热为多少。



乙

(2) 若磁感应强度按照  $B = \frac{1}{200t + 10} \text{T}$  的规律变化，同时棒以恒定速度  $v = 2\text{m/s}$  从初位置开始向右匀速运动，求棒中的感应电流的变化规律。



答案

- (1) 0.008J  
(2) 回路中不存在感应电流

解析

- (1) 根据法拉第电磁感应定律，感生电动势大小为：

$$E = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dB}{dt} S = 0.1V ,$$

$$\text{导体棒中产生的热量为：} Q = I^2 R t = \frac{E^2}{R} t = 0.008J .$$

故答案为：0.008J .

- (2) 由于杆的运动为平动，因此回路中的电动势大小为：

$$E = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dB}{dt} S + \frac{dS}{dt} B ,$$

回路面积为：

$$S = S_0 + L_2 vt = (0.2t + 0.01)m^2 ,$$

磁感应强度的变化情况满足：

$$B = \frac{1}{200t + 10} T .$$

因此，

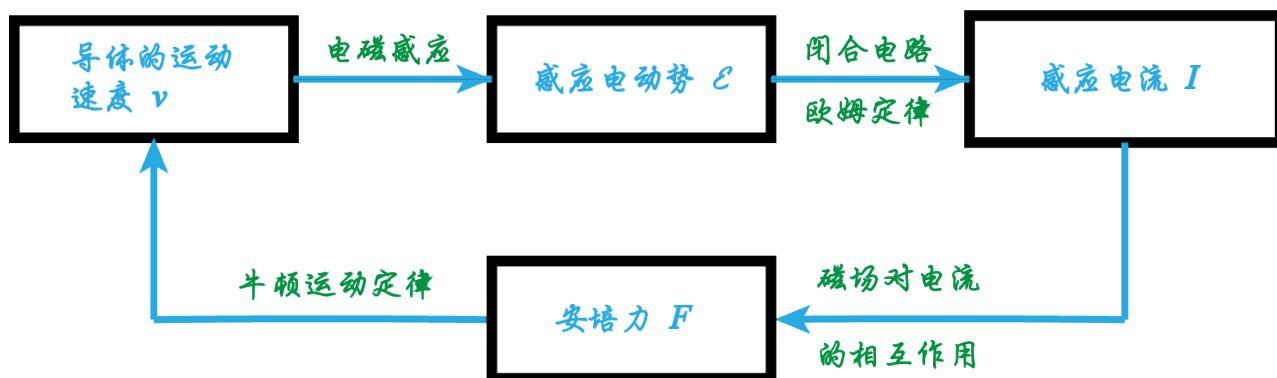
$$\begin{aligned} E &= \frac{dB}{dt} S + \frac{dS}{dt} B \\ &= (0.2t + 0.01) \frac{-200}{(200t + 10)^2} + 0.2 \times \frac{1}{200t + 10} \\ &= 0 . \end{aligned}$$

即回路中不存在感应电流 .

故答案为：回路中不存在感应电流 .

## 六、电磁感应中的力学问题

电磁感应和力学问题的综合，其联系的桥梁是磁场对电流的安培力。因为电流与导体的运动存在着相互制约关系。



处理电磁感应中的动力学问题的思路：

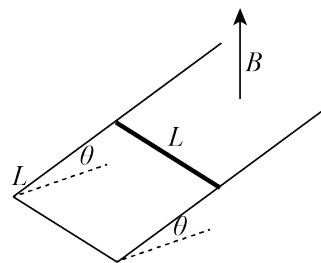
- ①确定感应电动势的大小和方向；
- ②画出必要的等效电路图，根据闭合电路欧姆定律求回路中电流；
- ③分析导体受力情况（包括安培力）；
- ④结合动力学方程或平衡方程求解。

总的来说，在与电磁感应结合的动力学问题中，导体一般不是做匀变速运动，而是经历一个动态变化的过程再趋于一个稳定状态，因此解这类问题时正确进行动态分析，确定最终的稳定状态是解题的关键。

## 1. 静力学问题

### 例题精讲

- 42 如图所示，光滑平行U形轨道相距为 $L$ ，倾角为 $\theta$ ，一质量为 $m$ 、电阻为 $R$ 、长为 $L$ 的导体棒置于距导轨底端 $L$ 处，空间存在竖直向上的变化磁场，磁感应强度 $B = B_0 + kt$  ( $k > 0$ )，现在导体棒上加一沿斜面向上的力，使导体棒始终保持静止，重力加速度为 $g$ ，则 $t$ 时刻的力 $F =$  \_\_\_\_\_。



答案  $\frac{(B_0 + kt) k L^3 \cos^2 \theta}{R} + mg \sin \theta$

解析 根据法拉第电磁感应定律，有  $E = \frac{\Delta B}{\Delta t} S = k L^2 \cos \theta$ 。

$$\text{回路中的感应电流 } I = \frac{E}{R} = \frac{kL^2 \cos \theta}{R} .$$

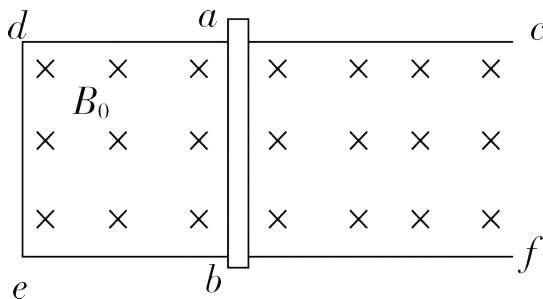
$$\text{导体棒受到的安培力 } f = BIL = \frac{(B_0 + kt) kL^3 \cos \theta}{R} .$$

导体棒的受力如图所示，根据平衡条件，有

$$F = f \cos \theta + mg \sin \theta = \frac{(B_0 + kt) kL^3 \cos^2 \theta}{R} + mg \sin \theta .$$

### 照猫画虎

- 43 如图所示，固定于水平桌面上的金属框架  $cdef$ ，处在竖直向下的匀强磁场中，金属棒  $ab$  搁在框架上，可无摩擦滑动。此时  $abcd$  构成一个边长为  $l$  的正方形，棒的电阻为  $R$ ，其余部分电阻不计。开始时磁感应强度为  $B_0$ 。



- (1) 若从  $t = 0$  时刻起，磁感应强度均匀增加，每秒增量为  $k$ ，同时保持棒静止，求棒中的感应电流，并在图上标出感应电流的方向；
- (2) 在上述 (1) 情况中，始终保持棒静止，当  $t = t_1$  时需加的垂直于棒的水平拉力为多大？
- (3) 若从  $t = 0$  时刻起，磁感应强度逐渐减小，当棒以恒定速度  $v$  向右做匀速运动时，可使棒中不产生感应电流，则磁感应强度应怎样随时间变化（写出  $B$  与  $t$  的关系式）？

### 答案

- (1) 感应电流  $I = \frac{E}{R} = \frac{kl^2}{R}$ ，方向为逆时针方向。
- (2)  $F = (B_0 + kt_1) \frac{kl^3}{R}$
- (3)  $B = \frac{B_0 l}{l + vt}$

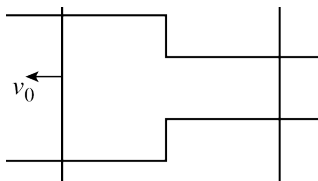
### 解析

- (1) 感应电动势  $E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = kl^2$ ，  
感应电流  $I = \frac{E}{R} = \frac{kl^2}{R}$ ，由楞次定律可判定感应电流方向为逆时针方向。
- (2)  $t = t_1$  时， $B = B_0 + kt_1$ ， $F = BIl$ ，所以  $F = (B_0 + kt_1) \frac{kl^3}{R}$ 。
- (3) 使棒中不产生感应电流，则应保持总磁通量不变。  
 $Bl(l + vt) = B_0 l^2$ ，所以  $B = \frac{B_0 l}{l + vt}$ 。

## 2. 动力学问题

### 例题精讲

- 44 如图所示，水平光滑导轨上垂直放置两根质量均为 $m$ 且有电阻的金属杆，导轨宽处与窄处间距比为 $2:1$ ，空间存在竖直向下匀强磁场，现给左边的杆一个初速度 $v_0$ ，在系统稳定时，左杆仍在宽轨上运动，右杆仍在窄轨上运动，则这个过程产生的热量 $Q=$ \_\_\_\_\_。



答案  $\frac{2}{5}mv_0^2$

解析 当系统稳定时，设左杆速度为 $v_1$ ，右杆速度为 $v_2$ ，在此过程中金属杆的平均电流为 $\bar{I}$ ，根据动量定理，有：

$$-2B\bar{I}l\Delta t = mv_1 - mv_0, \quad (1)$$

$$B\bar{I}l\Delta t = mv_2. \quad (2)$$

联立式①和式②，得 $v_1 + 2v_2 = v_0$ 。

③

系统稳定时，回路中无电流，则有 $2Blv_1 - Blv_2 = 0$ 。

④

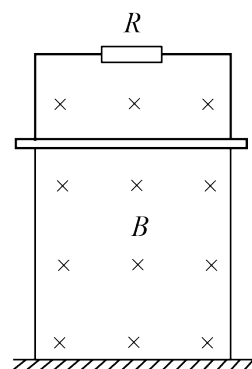
即 $2v_1 = v_2$ 。

⑤

联立式③和式⑤，得 $v_1 = \frac{1}{5}v_0$ ， $v_2 = \frac{2}{5}v_0$ 。

产生的热量为 $Q = \frac{1}{2}mv_0^2 - \left(\frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2\right) = \frac{2}{5}mv_0^2$ 。

- 45 如图所示，金属框架竖直放置，框架上端接一电阻 $R$ ；框架上有一质量为 $m$ 、长为 $l$ 电阻不计的金属棒平行于地面放置，与框架接触良好无摩擦。金属框架处在一磁感应强度为 $B$ 的匀强磁场中且磁场方向与框架平面相垂直。若金属框架足够长，将棒静止释放后：



- (1) 试着描述它的运动状态；
- (2) 此过程中的最大加速度；
- (3) 求出稳定时的速度。

答案

(1) 静止→加速度逐渐减小的变加速直线运动→匀速直线运动

(2)  $g$

(3)  $v_m = \frac{mgR}{B^2 l^2}$

解析

(1) 略

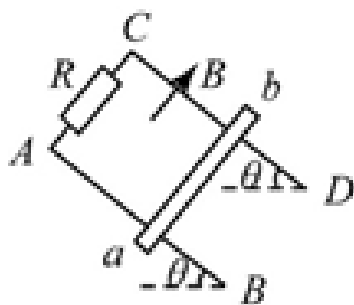
(2) 略

(3) 略

### 3. 能量问题

电磁感应过程中往往涉及多种能量之间的相互转化，但我们仍可以从能量守恒的角度来分析和简化相关的问题。

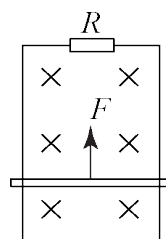
①如图所示金属棒 $ab$ 沿导轨由静止下滑时，重力势能减少，一部分用来克服安培力做功，转化为感应电流的电能，最终在 $R$ 上转化为焦耳热；另一部分转化为金属棒的动能，若导轨足够长，棒最终达到稳定状态匀速运动时，减小的重力势能完全用来克服安培力做功，转化为电能，最终在 $R$ 上转化为焦耳热。因此，从功和能的观点入手，分析清楚电磁感应过程中能量转化的关系，是解决电磁感应中能量问题的重要途径之一。



②安培力做功和电能变化的特定对应关系。克服安培力做多少功，就有多少其他形式的能转化为电能。同理，安培力做功的过程，是电能转化为其他形式的能的过程，安培力做多少功就有多少电能转化为其他形式的能。

### 例题精讲

- 46 如图所示，竖直放置的两根平行金属导轨之间接有定值电阻  $R$ ，质量不能忽略的金属棒与两导轨始终保持垂直并良好接触且无摩擦，棒与导轨的电阻均不计，整个装置放在匀强磁场中，磁场方向与导轨平面垂直，棒在竖直向上的恒力  $F$  作用下加速上升的一段时间内，力  $F$  做的功与安培力做的功的代数和等于（ ）



- A. 棒的机械能增加量  
B. 棒的动能增加量  
C. 棒的重力势能增加量  
D. 电阻  $R$  上放出的热量

答案 A

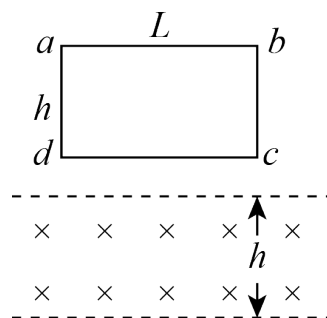
解析 棒受重力  $G$ 、拉力  $F$  和安培力  $F_A$  的作用。由动能定理： $W_F + W_G + W_A = \Delta E_K$  得

$W_F + W_A = \Delta E_K + mgh$ ，即力  $F$  做的功与安培力做功的代数和等于机械能的增加量。

故选A。

- 47 如图所示，电阻为  $R$  的矩形导线框  $abcd$ ，边长  $ab = L$ ， $ad = h$ ，质量为  $m$ ，从某一高度自由落下，通过一匀强磁场，磁场方向垂直纸面向里，磁场区域的宽度为  $h$ 。线框恰好以恒定速度通过磁

场，此过程中线框中产生的焦耳热是多少？（不考虑空气阻力）



**答案**  $2mgh$

**解析**

解法一：以线框为研究对象，线框穿过磁场（设线框的速度为  $v$ ）的时间  $t = \frac{2h}{v}$ 。

线框穿过磁场时产生的感应电流  $I = \frac{Blv}{R}$ 。

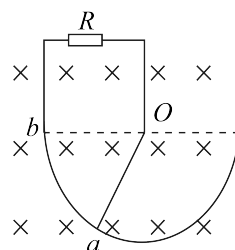
由平衡条件可知线框在穿过磁场时所受的安培力  $F = BIl = mg$ 。

由焦耳定律，线框中产生的热量  $Q = I^2 Rt$ 。

由以上各式解得  $Q = 2mgh$ 。

解法二：根据能量守恒定律，线框以恒定速率通过磁场的过程中，重力与线框所受安培力平衡，因此这一过程实质是重力势能转化为内能的过程，所以此过程中线框产生的焦耳热为  $2mgh$ 。

48 如图所示，在磁感应强度为  $B$  的匀强磁场中，设导体棒  $Oa$  可以以点  $O$  为中心转动，而另一端  $a$  刚好搭在光滑的半圆形金属导轨上， $Oa$  长为  $l$  且以角速度  $\omega$  匀速转动，在  $Ob$  间接入一阻值为  $R$  的电阻，不计其他电阻，在转动半圈的过程中试求：



- (1)  $Oa$  中产生的感应电动势。
- (2) 流过  $R$  上的电流。
- (3) 所需外力的功率。

**答案**

(1)  $\frac{Bl^2\omega}{2}$

$$(2) \frac{Bl^2\omega}{2R}$$

$$(3) \frac{B^2l^4\omega^2}{4R}$$

解析

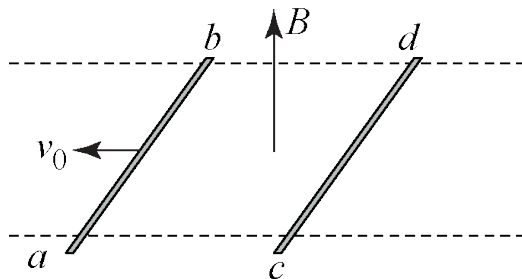
$$(1) \text{ } Oa \text{ 中产生的感应电动势为 } E = Blv = Bl \times \frac{0 + \omega l}{2} = \frac{Bl^2\omega}{2}.$$

$$(2) \text{ 回路中的电流为: } I = \frac{E}{R} = \frac{Bl^2\omega}{2R}.$$

$$(3) \text{ 回路消耗的功率等于外力做功的功率, 为 } P = \frac{E^2}{R} = \frac{B^2l^4\omega^2}{4R}.$$

照猫画虎

- 49 如图所示, 一水平面内固定两根足够长的光滑平行金属导轨, 导轨上面横放着两根完全相同的铜棒  $ab$  和  $cd$ , 构成矩形回路, 在整个导轨平面内都有竖直向上的匀强磁场  $B$ . 开始时, 棒  $cd$  静止, 棒  $ab$  有一个向左的初速度  $v_0$ , 则关于两棒以后的运动, 下列说法正确的是 ( )



- A.  $ab$  棒做匀速直线运动,  $cd$  棒做匀加速直线运动
- B.  $ab$  棒减小的动量等于  $cd$  棒增加的动量
- C.  $ab$  棒减小的动能等于  $cd$  棒增加的动能
- D. 两棒一直运动, 机械能不断转化为电能

答案 B

解析

A. 初始时  $ab$  棒向左运动受到向右的安培力,  $cd$  棒受到向左的安培力, 所以  $ab$  棒减速,  $cd$  棒加速, 设  $ab$  棒速度为  $v_1$ 、 $cd$  棒速度为  $v_2$ , 开始时  $v_1 > v_2$ , 随着运动两棒的相对速度  $\Delta v = v_1 - v_2$  逐渐减小至 0, 两根切割磁场产生的感应电动势为  $E = BL \cdot \Delta v$ ,  $E$  也逐渐减小最终为 0, 感应电流逐渐减小到 0, 安培力逐渐减到 0, 所以  $ab$  棒做加速度逐渐减小的变加速直线运动, 故 A 错误;

B. 两棒组成的系统受安培力的合力为零, 故系统的动量守恒, 所以  $ab$  棒减小的动量等于  $cd$  棒增加的动量, 故 B 正确;

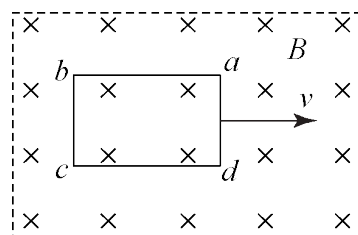


C. 回路中有产生电磁感应现象，有电流做功产生电热，所以根据能量守恒可以知道， $ab$ 棒减小的动能等于 $cd$ 棒增加的动能与两棒产生电热之和，所以 $ab$ 棒减小的动能大于 $cd$ 棒增加的动能，故C错误；

D. 当 $v_1 > v_2$ 时，产生电磁感应现象，产生电热，机械能转化为电能，最后两棒共速 $v_1 = v_2$ ，之后两棒以共同的速度做匀速直线运动，机械能守恒，不再产生电能，故D错误。

故选B。

50 将一个闭合矩形金属线框 $abcd$ 放入如图所示的匀强磁场中，图中虚线表示磁场的边界，在作用力将线框 $abcd$ 从磁场中以速度 $v$ 匀速拉出的过程中，下列说法正确的是（ ）



- A. 拉线框的速度 $v$ 越大，通过导线横截面的电荷量越多
- B. 拉力做功的多少与线框 $bc$ 边的长度无关
- C. 磁场越强，拉力做功越多
- D. 线框电阻越大，拉力做功越多

答案 C

解析 A. 由于 $q = \frac{\Delta\Phi}{R}$ ，不论线框的速度如何，磁通量的变化量都相同，故通过导线横截面的电量相同，故A错误；

BCD. 因为线框匀速运动，故拉力做的功等于回路产生的热量，则拉力做的功 $W = Q = I^2 R t$ ， $I = \frac{Blbcv}{R}$ 联立得 $W = \frac{B^2 l^2 bc L ab v}{R}$ ，故磁场越强，拉力做的功越大；拉力做功的大小与线框的宽度 $bc$ 有关；线框的电阻越大，拉力做的功越少，故C正确，BD错误。

故选C。