# 第六章 电磁感应定律

## 第一节 楞次定律

1．如图 6 – 1 所示，大小不等的两导电圆环 P、Q 均固定于水平桌面，Q 环位于 P 环内。在两环间的范围内存在方向竖直向下、大小随时间均匀增强的匀强磁场 *B*。确定 P 环内和 Q 环内感应电流的方向，并说明判断的理由。

*B*

*P*

*Q*

2．为了知道钢梁或钢轨的结构是否均匀，采用一种由金属线圈和灵敏电流计连接而构成的探测仪。如图 6 – 2 所示，检查时把线圈套在钢梁或钢轨上，并且沿着它移动，遇到结构不均匀的地方，灵敏电流计的指针会摆动，表示线圈内有电流通过。怎样解释这个现象？

探测器

副线圈

探测器

原线圈

钢梁

3．如图 6 – 3 所示，在磁感应强度为 *B* 的匀强磁场中，一面积为 *S* 的线框平行于磁场方向放置。若线框以 bc 边为轴转动（ad 边先向上）。从初始位置开始转过 90° 的过程中，穿过线框的磁通量的变化为\_\_\_\_\_\_\_\_\_；线框从初始位置转过 180° 的过程中，ab 边中的电流方向为\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_。

*B*

*a*

*b*

*c*

*d*

*O*

*b*

*c*

*d*

*O*′

上

下

N

S

*a*

4．如图 6 – 4 所示，蹄形磁体和矩形线圈均可绕竖直轴线 OO′ 转动。当用外力使磁体逆时针（从上往下俯视）匀速转动时，试问：

（1）线圈中感应电流的方向如何？会不会改变？

（2）线圈转动中，其转速和磁体的转速是否相等？

5．如图 6 –5 所示，一个条形磁体从线圈上方很远处开始向下匀速穿过一环形线圈，*t*1 表示磁体中部与线圈共面的时刻。如果规定俯视逆时针方向电流为正方向，那么能够正确反映环形线圈中电流随时间变化情况的图是图 6 – 6 中的图\_\_\_\_\_\_\_，试说明判断的理由。

N

S

*I*

*t*1

0

*t*

(a)

*I*

*t*1

0

*t*

(b)

*I*

*t*1

0

*t*

(c)

*I*

*t*1

0

*t*

(d)

6．如图 6 – 7 所示，P、Q 为两根水平固定的导电导轨，ab、cd 为两根导体棒，搁在导轨上，且都与导轨垂直。现将一条形磁体的 N 极竖直向下插入两导体棒与导轨组成的闭合回路中，在此过程中，导体棒中的感应电流方向为\_\_\_\_\_\_\_\_\_，两导体棒所受磁场力的方向为\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_。

*a*

*c*

*d*

*b*

*P*

*Q*

S

N

7．如图 6 – 8 所示，在一个水平放置的长直通电螺线管上方有一固定的水平光滑杆，杆上正中间套有两个相同的具有弹性的导线环，环面与螺线管轴线垂直，且环心在螺线管的轴线上。现将滑动变阻器的滑臂向右滑动，则两导线环内的感应电流方向（从左向右看）为\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_（选填“顺时针”或“逆时针”），两导线环所受磁场力产生的效果为\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_。

*A*

*B*

8．如图 6 – 9所示，通电螺线管竖直放置，半径小于螺线管的铜环沿螺线管的轴线加速下落，在下落过程中环面始终保持水平。铜环先后通过轴线上 1、2、3 位置时的加速度分别为 *a*1、*a*2、*a*3，则加速度的大小 *a*1 \_\_\_\_\_ *g*、*a*2\_\_\_\_\_ *g*、*a*3\_\_\_\_\_ *g*。（均选填“＞”“＜”或“=”）。

1

2

3

9．如图 6 – 10所示，在长直导线 MN 的右侧有一边长为 *L* 的正方形线框 abcd，导线与线框在同一平面内，且导线与 ab 边平行，ab 边距离导线为 *L*，导线中通以如图所示方向的恒定电流。当线框绕 ab 边转过角度 *θ*（*θ* < 150°）的过程中，穿过线框中的磁通量如何变化？判断线框中产生感应电流的方向，并叙述判断的理由。

*c*

*d*

*a*

*b*

*L*

*L*

*M*

*N*

*I*

10．如图 6 – 11 所示，在垂直于纸面向外的匀强磁场中有一 U 形金属导轨，导轨平面与磁场垂直。金属杆 PQ 置于导轨上并与导轨形成闭合回路 PQMN，一矩形金属框 T 位于回路围成的区域内，线框与导轨共面。现让金属杆 PQ 突然向右运动的瞬间，PQMN 中产生\_\_\_\_\_\_\_\_\_方向的感应电流，金属框 T 中产生\_\_\_\_\_\_\_\_\_方向的感应电流，试说明判断的理由。（均选填“顺时针”或“逆时针”）

*B*

*T*

*P*

*Q*

*N*

*M*

### 参考答案

1．P 环内磁通量增大，根据楞次定律，感应电流的磁场要反抗磁通量的增大，感应电流产生的磁场方向与原磁场方向相反，由“右手螺旋定则”可知感应电流为逆时针方向。

Q 环内没有磁场，磁通量为零且不变化，所以感应电流为零。

2．套在结构均匀的钢梁或钢轨上的探测器原线圈通电后在其内部产生恒定磁场，灵敏电流计与副线圈组成的闭合回路中没有感应电流。当探测仪经过某些钢梁或钢轨内部结构不均匀的地方时磁场将发 生变化，根据楞次定律，副线圈内将产生感应电流，灵敏电流计的指针就会摆动。因此，可以根据灵敏电流计的指针是否摆动判断钢梁或钢轨内部有没有结构缺陷。

3．*BS*，先 b→a 后 a→b

Δ*Φ* = | *Φ*2 − *Φ*1 | = | *BS* − 0 | = *BS*

线框从初始位置转过 90° 的过程中，线框内向右的磁通量增大，根据楞次定律，从右向左看感应电流为顺时针方向，通过 ab 边的电流方向为 b→a；线框继续转过 90° 的过程中，线框内向右的磁通量减小，根据楞次定律，从右向左看感应电流为逆时针方向，通过 ab 边的电流方向为 a→b。所以通过 ab 边中的电流方向为先 b→a 后 a→b。

4．（1）线圈中感应电流的方向为 abcda，感应电流的方向不会改变。当蹄形磁体转动时，矩形线圈会跟着转动，两者转动的方向一致。因蹄形磁体转动时，在矩形线圈中产生了感应电流，根据楞次定律，感应电流要阻碍磁体和线圈之间的相对运动，因此外力使蹄形磁体转动时，矩形线圈会跟着转动，当线圈随着蹄形磁体转动时，两者之间的夹角先是逐渐加大，当夹角超过 90° 时，两者之间的夹角又开始逐渐减小，穿过线圈的磁通量开始减小，但此时磁场反向穿过线框，所以感应电流方向仍然保持不变，矩形线圈仍然会跟着蹄形磁体同方向转动。

（2）不相等。如果线圈的转速和磁体的转速相等的话，它们之间就没有相对运动，通过线圈的磁通量不随时间变化，线圈中就不会产生感应电流，磁场对线圈的 ab 边和 cd 边就没有力的作用，线圈也就不会转动。

5．（d）

当条形磁体 S 极从图示位置插入线圈的过程中，线圈中向上的磁通量增大，根据楞次定律，线圈中感应电流产生的磁场方向向下，感应电流为顺时针方向（*I* < 0），且电流的变化率增大。条形磁体的中部插入到线圈平面附近时磁通量最大，但此时刻线圈磁通量的变化率最小，感应电流为零（*I* = 0）。当条形磁体的中部从线圈平面向下运动的过程中，线圈中向上的磁通量减小，根据楞次定律感应电流产生的磁场方向向上，感应电流为逆时针方向（*I* > 0），且电流的变化率增大。

6．abdca，导体棒 ab 斜向右下方，导体棒 cd 斜向左下方，使两导体棒相互靠近。

条形磁体的 N 极竖直向下插入两导体棒与导轨组成的闭合回路中，该闭合回路中的磁通量增大，根据楞次定律感应电流产生的磁场方向向上，由右手螺旋定则可知，感应电流为 abdca，前视图如图 7 所示。ab 棒和 cd 棒所在处的磁感应强度分别为 *B*ab 和 *B*cd，根据左手定则判断所受安培力分别为 *F*ab 和 *F*cd，所以导体棒 ab 受力斜向右下方，导体棒 cd 受力斜向左下方，使两导体棒相互靠近。

*Bcd*

*Bab*

*Fab*

*Fcd*

*a*，*b*

*c*，*d*

图 7

7．顺时针方向，紧缩并相互靠近。

滑线变阻器的滑臂向右滑动，通过螺线管的电流减小，使通过两环向右的磁通量减小，根据楞次定律感应电流的磁场方向向右，根据“右手螺旋定则”两导线环内的感应电流方向（从左向右看）均为顺时针方向，所以两环还将紧缩并相互靠近。

8．<，=，<

铜环下落到 1 位置时，铜环磁通量增大，根据楞次定律，感应电流产生的磁场力方向向上，铜环的加速度 *a*1 < *g*。

铜环下落到 2 位置时，铜环磁通量最大，但磁感应强度近似不变，磁通量的变化量近似为零，铜环的加速度 *a*2 = *g*。

铜环下落到 3 位置时，铜环磁通量减小，根据楞次定律，感应电流产生的磁场力方向向上，铜环的加速度 *a*2 < *g*。

9．根据长直导线周围磁场分布的“右手螺旋定则”，通过线圈的磁场方向是垂直于纸面向里。

当线圈绕 ab 边转过 120° 度时，线圈 ab 边和 cd 边与直导线的距离相等，通过线圈的磁通量为零，如图 8 所示。线圈绕 ab 边转过 120° 度的过程中，通过线圈的磁通量减小，根据楞次定律，感应电流的方向为 adcba；线圈绕 ab 边再转过 30° 的过程中，反向通过线圈的磁通量增大，根据楞次定律，感应电流的方向仍为 adcba。所以线圈绕 ab 边转过角度 150° 的过程中，穿过线圈中的磁通量先减小后增大，感应电流的方向始终为adcba。

*a*

*d*

*c*

*b*

*L*

*L*

*M*

*N*

*I*

*M*,*N*

*a*,*b*

*c*,*d*

*c*,*d*

*B*

图 8

10．顺时针，逆时针

金属杆 PQ 突然向右运动的瞬间，穿过 PQMN 中的磁通量增大，根据楞次定律，感应电流的磁场方向（垂直于纸面向里）与原磁场的方向相反，由“右手螺旋定则”判断 PQMN 中产生顺时针方向的感应电流。金属框 T 中感应电流产生磁场的磁通量增大，再根据楞次定律，金属框 T 中感应电流为逆时针方向。

## 第二节 法拉第电磁感应定律

1．一个 500 匝的线圈，其电阻为 5 Ω，将它与电阻为 495 Ω 的电热器连成闭合电路。若在 0.3 s 内，穿过线圈的磁通量从 0.03 Wb 均匀增加到 0.09 Wb。求：

（1）线圈中产生的感应电动势；

（2）通过电热器的电流。

2．如图 6 – 12 所示，abcd 为一单匝矩形导线框，边长 ab = 10 cm、bc = 20 cm，该导线框的一半位于具有理想边界、磁感应强度 *B* = 0.1 T、方向垂直纸面向里的匀强磁场中，若导线框绕通过 ab 边的轴以角速度 *ω* = 100π rad/s 匀速转动。求：

*B*

*a*

*b*

*c*

*d*

20 cm

10 cm

（1）当导线框由图示位置转过 180° 的过程中，感应电动势的平均值；

（2）当导线框转过 90° 时感应电动势的瞬时值。

3．如图 6 – 13 所示，匀强磁场的磁感应强度 *B* 随时间均匀增大，两导线框均为正方形，边长之比为 2∶1。试求：

*B*

（1）若两线框由相同导线做成，则两线框中感应电动势之比、感应电流之比和消耗的电功率之比；

（2）相同时间内通过导线某横截面的电量之比。

4．如图 6 – 14 所示，质量为 *M*、电阻为 *R*、长为 *L* 的细金属丝折成一个等边三角形 ACD。在 A 处焊接且用细线挂于 O 点，加一个垂直纸面向里均匀变化的磁场，当磁感应强度按规律 *B* = *kt*（*k* 为常数）增大并且正好增大为 *B*0 时，试求：

*B*

*D*

*C*

*A*

*O*

（1）细线上的拉力；

（2）AD 边受到的磁场力。

5．如图 6 – 15（a）所示，宽为 *L* = 0.30 m 的 U 形线框水平放置，一根金属棒放在线框与线框所围的面积为 0.060 m2，金属棒与线框上接触良好，线框左边接一个阻值 *R* = 2.0 Ω 的电阻，其余电阻均不计。现让匀强磁场垂直穿过线框，磁感应强度 *B* 随时间变化的关系如图 6 – 15（b）所示，最初磁场方向竖直向下。若金属棒在 0.60 s 时刚要滑动，试求：

（1）此时棒受到的安培力大小；

（2）金属棒加速度的方向。

*R*

*L*

*B* / T

*t* / s

1.0

−1.5

0

0.1

0.2

0.3

(b)

(a)

6．已知某一区域的地下埋有一根与地表面平行的很长直线电缆，电缆中通有变化的电流，在其周围有变化的磁场，因此可以通过在地面上测量闭合试探线圈中的感应电动势来探测电缆的确切位置、走向和深度。当线圈平面平行地面测量时，在地面上 *a*、*c* 两处测得试探线圈中的电动势为零，*b*、*d* 两处线圈中的电动势不为零；当线圈平面与 *ac* 连线方向平行，且与地面成 45° 夹角时，在 *b*、*d* 两处测得试探线圈中的电动势为零。经过测量发现，*a*、*b*、*c*、*d* 恰好位于边长为 1 m 的正方形的四个顶角上，如图 6 – 16 所示。据此可以判定地下电缆在哪两点连线的正下方，离地表面的深度为多少？说明判断的理由。

*a*

*d*

*b*

*c*

地面

试探线圈

7．如图 6 – 17（a）所示，*n* = 200 匝的线圈（图中只画了 2 匝）的两端与一个 *R* = 48 Ω 的电阻相连，线圈本身的电阻 *r* = 2.0 Ω，线圈内有指向纸内方向的磁场。线圈中的磁通量按图 6 – 17（b）所示的规律变化。求：

*Φ* / Wb

*t* / s

(b)

0.10

0.015

0.010

0.005

0

*a*

*b*

*R*

*B*

(a)

（1）线圈产生的感应电动势 *E*；

（2）通过电阻 *R* 的电流 *I* 大小和方向；

（3）电阻 *R* 两端的电压。

8．如图 6 – 18（a）所示，间距为 *L* = 0.40 m 的平行光滑轨道放置在水平面上，左侧连接一阻值为 *R* = 0.40 Ω 的电阻，质量为 *m* = 1.0 kg 的导体杆放在轨道上，与两轨道垂直，杆及轨道的电阻皆可忽略不计，整个装置处于垂直轨道平面向下的匀强磁场中，现用一外力 *F* 沿轨道方向拉杆，使之做匀加速运动，测得力 *F* 与时间 *t* 的关系如图 6 – 18（b）所示。试求：

*B*

*F*

*R*

*F* / N

*t* / s

(a)

(b)

0

1.0

2.0

5

10

15

20

25

30

（1）杆运动的加速度 *a*；

（2）磁场的磁感应强度 *B*。

9．如图 6 – 19 所示，有一垂直纸面向里的非匀强磁场，其磁感应强度大小沿 *y* 方向不变，沿 *x* 方向均匀减小，减小率为 0.050 T/m，一边长为 10 cm 的正方形导线框总电阻为 0.25 Ω，导线框平面与磁场方向垂直。在外力作用下，以 20 m/s 的速度沿 *x* 正方向做匀速直线运动。求：

*B*

*x*

*y*

*O*

（1）导线框中感应电动势的大小；

（2）导线框中感应电流的大小和方向。

10．如图 6 – 20 所示，水平放置的两根光滑的平行金属导轨与电阻为 *R* 的导体相连，导轨间距为 *L*，其间有垂直导轨平面磁感应强度为 *B* 的匀强磁场。导轨上有一质量为 *m* 的导体棒 ab，以初速度 *v*0 向右运动，棒和导轨的电阻均不计。求：

*B*

*a*

*b*

*R*

*v*0

（1）导体棒整个运动过程中通过闭合回路的电量 *q*；

（2）导体棒在整个运动过程中的位移 *x*。

11．如图 6 – 21 所示，固定于水平桌面上的金属框架 *edcf*，处在竖直向下的匀强磁场中，金属棒 *ab* 搁在框架上，可无摩擦地滑动，此时 *adcb* 构成一个边长为 *L* 的正方形。棒的电阻为 *r*，其余电阻不计。开始时磁感应强度为 *B*0。

*B*

*d*

*a*

*e*

*f*

*b*

*c*

（1）若从 *t* = 0 时刻起，磁感应强度均匀增大，每秒增量为 *k*，棒同时保持静止，求棒中的感应电流。请在图上标出感应电流的方向；

（2）在上述情况（1）中，若棒始终保持静止，在 *t* = *t*1 时刻需施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，同时棒以恒定速度 *v* 向右做匀速运动，棒中恰好不产生感应电流，则磁感应强度应随时间如何变化？（写出 *B* 与 *t* 的关系式）

### 参考答案

1．（1）线圈中产生的感应电动势为 *E* = *n* = 500×V = 100 V

（2）通过电热器的电流为 *I* = = A = 0.2 A

2．（1）感应电动势的平均值为

= = = = = V = 0.20 V

（2）感应电动势的瞬时值为

*E* = *BL*dc*v* = *BL*dc*L*ad*ω* = 0.1×0.10×0.20×100π V = 0.20π V ≈ 0.628 V

3．（1）设左、右两正方形导线框的边长分别为 2*a* 和 *a*，则感应电动势为

*E*1 = *S* = (2*a*)2 ，*E*2 = *S* = *a*2

所以 *E*1∶*E*2 = 4∶1

*I*1 = = = ，*I*2 = = =

所以 *I*1∶*I*2 = 2∶1

*P*1 = *E*1*I*1，*P*2 = *E*2*I*2

= = ×=

所以 *P*1∶*P*2 = 8∶1。

（2）*Q*1 = *I*1Δ*t*，*Q*2 = *I*2Δ*t*，所以 *Q*1∶*Q*2 = *I*1∶*I*2 = 2∶1

4．（1）当磁感应强度增大过程中，金属丝中产生逆时针方向的感应电流。对三角形 ACD 三条边产生的安培力的合力为零，所以细线上的拉力等于金属丝的重力 *T* = *Mg*。

（2）金属丝中的感应电动势为 *E* = = *S* = （）2 sin60°×*k* = *kL*2

感应电流为 *I* = = *kL*2

AD 边受到的磁场力为 *F* = *B*0*I*  = *B*0 *kL*3 =

5．（1）由图（b）可得

= T/s = T/s

*B* 随时间变化的关系为 *B* = 1.0 − *t*，当 *t* = 0.60 s 时，*B* = − 4.0 T

感应电动势为 *E* = *S* = 0.060× V = 0.50 V

感应电流为 *I* = = A = 0.25 A

金属棒受到的安培力大小为 *F* = *BIL* = 4.0×0.25×0.30 N = 0.30 N

（2）最初磁场方向竖直向下，所以当 *t* = 0.60 s 时磁场方向竖直向上，且磁感应强度增大，根据楞次定律，从上向下看感应电流的方向为顺时针方向，再根据“左手定则”可判断金属棒所受安培力的方向向左，则由牛顿第二定律知道加速度的方向与安培力的方向相同，所以金属棒的加速度方向为水平向左。

6．当线圈平面平行于地面测量时，在地面上 a、c 两处测得试探线圈中的电动势为零，说明通过线圈的磁通量始终为零，则直线电缆在 a、c 连线的正下方。

b、d 两处测得线圈中的电动势不为零，说明穿过线圈的磁通量发生变化，则试探线圈在通电直导线的两边。当线圈平面与地面成 45° 夹角时，在 b、d 两处测得试探线圈中的电动势为零，说明此时直线电缆处在线圈平面的中垂线方向上，即在 b、d 两处的线圈平面中垂线的交点处。又由于 a、b、c、d 恰好位于边长为 1 m 的正方形的四个顶角上，所以可确定地下电缆在 ac 两点连线的正下方。当线圈平面与地面成 45° 夹角时，直线电缆在线圈平面的正前下方如图 9 所示，设正方形 abcd 的边长 *l*，∠O1bO2 为 45°，所以电缆离地表面的深度为

*h* = O1O2 = O1b = *l*

*a*ʹ

*a*

*b*

*d*

*c*

*c*ʹ

*O*2

*O*1

图 9

7．（1）根据法拉第电磁感应定律

*E* = *n* = 200×V = 10 V

（2）电流的大小为

*I* = = A = 0.20 A

根据图像可知，线圈中垂直于纸面向里的磁场增大，根据楞次定律，线圈中感应电流产生的磁场垂直于纸面向外，再根据右手螺旋定则可知线圈中的感应电流为逆时针方向，所以通过电阻 *R* 的电流方向为 a→b。

（3）电阻 *R* 两端的电压是路端电压为

*U* = *IR* = 0.20×48 V = 9.6 V

8．（1）导体棒运动时受到拉力 *F* 和安培力的作用，所以有

*F* − *BIL* = *ma*

即 *F* − = *ma* 或 *F* = *t* + *ma*

可见 *F* – *t* 图中的截距为 *ma* = 0.50，代入数据可解得：*a* = m/s2 = 0.50 m/s2

（2）*F* – *t* 图中的斜率为 *k* = = = = 0.050，所以

*B* = = = 0.50 T

9．（1）磁感应强度 *B* 沿 *x* 正方向的变化率为 = 0.050 T/m。设某时刻导线框左、右两边所处的磁感应强度分别为 *B*1、*B*2，则该时刻两边产生的电动势分别为 *E*1、*E*2，整个导线框的电动势之和为

*E* = *E*1 – *E*2 = (*B*1 – *B*2)*Lv* = Δ*B*′*Lv*

式中 Δ*B*′ 为沿 *x* 方向上相距 *L* 的两点磁感应强度的变化量，其大小为

Δ*B*′ = *L* = 0.050×0.10 T = 5.0×10−3 T

代入上式，导线框中感应电动势的大小为

*E* = Δ*B*′*Lv* = 5.0×10−3×0.10×20 V = 0.010 V

（2）感应电流的大小为

*I* = = A = 0.040 A

导线框沿 *x* 正方向做匀速直线运动过程中，通过导线框的磁通量减小，根据楞次定律，感应电流产生的磁场方向垂直于纸面向里，感应电流为顺时针方向。

另外，第（1）问还可以这样求解：

*E* = = *S* = *L*2 = *L*2*v* = 0.102×20×0.050 V = 0.010 V

10．（1）以 *v*0 方向为正方向，设运动过程中某一时刻通过导体棒的电流为 *i*，导体棒的速度为 *v*，导体棒受到安培力为

*F*安 = − *BiL*

在微小时间 Δ*t* 内，应用动量定理，得

− *BiL*·Δ*t* = *m*·Δ*v*

对导体棒运动的全过程，有

∑（− *BiL*·Δ*t*） = ∑（*m*·Δ*v*）

即 − *BL* ∑（*i*·Δ*t*） = *m* ∑（Δ*v*）

− *BL*·*q* = *m*（0 − *v*0）

通过闭合回路的电量为 *q* =

（2）导体棒 ab 两端的感应电动势为 *E* = *BLv*，感应电流为 *i* =

导体棒受到安培力 *F*安 = − *BiL* = −

在微小时间 Δ*t* 内，由动量定理，得

− ·Δ*t* = *m*·Δ*v*

对导体棒运动的全过程，有

∑（− ·Δ*t*） = ∑（*m*·Δ*v*）

− ∑（*v*·Δ*t*） = *m* ∑（Δ*v*）

− ·*x* = *m*（0 − *v*0）

导体棒在整个运动过程中的位移为 *x* =

11．（1）感应电流为 *I* = = *S* = ，由于闭合回路的磁通量增大，根据楞次定律，感应电流的方向为逆时针，金属棒 ab 中的感应电流方向为 b→a。

（2）*t* = *t*1 秒时，*B* = *B*0 + *kt*1

棒受到的安培力为 *F*安 = *BIL*

因为棒始终保持静止，水平拉力为 *F* = *F*安 = *BIL*

所以，水平拉力为 *F* = (*B*0 + *kt*1)

（3）若不产生感应电流的则要求闭合回路中的总磁通量不变，即

*B*0*L*2 = *BL*(*L* + *vt*)

所以，磁感应强度随时间的变化规律为 *B* = 。