# 第六章

# 电磁感应定律

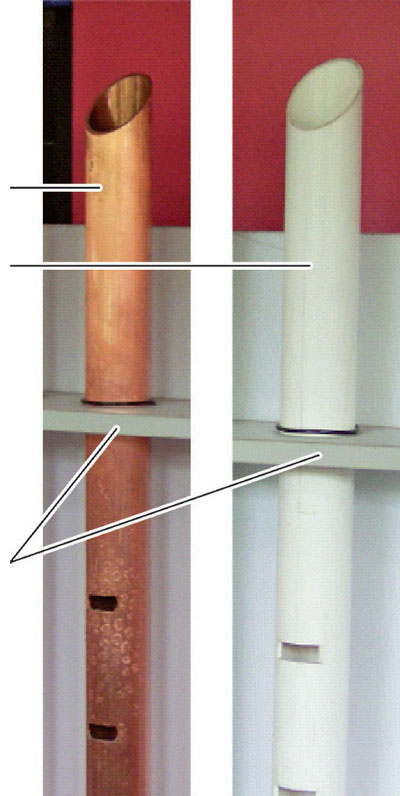
电的发现和广泛使用不仅给人类生活带来很多方便，而且使社会生产力大大提高，社会财富大大增加，人们生活变得更加丰富多彩。国防、交通、日常生活等都离不开电。电能是使用效率最高、最方便的能源。电来自发电厂的发电机，发电机的基本原理是电磁感应。电磁感应是电磁学中最重大的发现之一，它进一步揭示了电、磁之间的相互联系。电磁感应在电工技术、电子技术及电磁测量等方面都有广泛的应用。描述电磁感应的楞次定律和法拉第电磁感应定律是电磁场理论的重要组成部分。

必修课程中我们已经学习了电磁感应现象，知道磁通量是一个重要的物理量，懂得磁感应强度能够描述磁场的强弱。本章将学习电磁感应现象的内在物理本质。通过实验，探究影响感应电流方向的因素，理解楞次定律和法拉第电磁感应定律。本章的学习将用到磁通量变化的概念、牛顿运动定律、闭合电路欧姆定律和能量守恒定律。本章的学习将经历科学探究的过程，对电磁感应实验现象和实验结果进行归纳推理，提升科学思维的能力。本章的学习将为交变电流和变压器的探究奠定基础。

第一节

楞次定律

如图 6–1 所示是竖直放置的两根长度相同的空心管，一根是铜管，另一根是塑料管。用左、右手分别握住略小于空心管内径的铝块从两管的上端口同时释放，发现两铝块同时快速下降至下端口。如果将铝块换成同样大小的强磁铁块，重复上述实验，发现在塑料管中的强磁铁块仍然快速下降至下端口，但是在铜管中的强磁铁块下降明显减缓，似乎强磁铁块除了受到重力作用以外还受到了向上的阻力作用。这是由于强磁铁块在铜管中下落时，铜管中产生了感应电流，感应电流的磁场与下落磁体间的相互作用导致强磁铁块下降速度减缓。这个感应电流的方向决定了铜管产生的磁场方向。



空心铜管

空心塑料管

固定板

图 6–1 竖直放置的空心铜管和塑料管

那么，感应电流的方向是由什么决定的呢？下面我们通过一个实验来探究一下。

学生实验

探究影响感应电流方向的因素

**提出问题**

在必修课程中我们已学过电磁感应现象，知道穿过闭合回路的磁通量发生变化时闭合回路中就有感应电流产生。感应电流的方向由哪些因素决定？遵循何种规律？

**实验原理与方案**

将条形磁体的 N 极或 S 极分别插入感应线圈，或从感应线圈中抽出，观察与感应线圈组成闭合回路的灵敏电流计指针的偏转情况。然后分析归纳出判断感应线圈中感应电流方向的规律。

**实验装置与方法**

首先要确定灵敏电流计电流流入方向与指针的偏转方向之间的关系，可根据如图 6–2 所示的电路图观察电路中的电流方向已知时相应的灵敏电流计指针偏转方向。此后就可以从灵敏电流计指针的偏转方向确定电流的流入方向。图 6–2 中限流电阻取几十千欧。采用瞬间闭合开关的方法，尽可能缩短灵敏电流计的通电时间，以保护灵敏电流计。如图 6–3 所示，用导线将灵敏电流计和感应线圈相连。

*E*

限流电阻 *R*

S

图 6–2 确定电流计偏转方向的电路图

图 6–3 研究感应电流的方向的实验装置

磁体

感应

线圈

灵敏电流计

**实验操作与数据收集**

按照图 6–4（a）、（b）、（c）、（d）的顺序，先后将条形磁体的 N 极或 S 极插入和抽出感应线圈，观察灵敏电流计指针的偏转方向和感应线圈中导线的绕向，判断线圈中感应电流的方向，并在表 6-1 中记录。

图 6–4 研究感应电流方向的实验过程

(a)

(b)

(c)

(d)

N

N

S

S

表 6–1 实验记录表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 记录对象 | N 极插入 | N 极抽出 | S 极插入 | S 极抽出 |
| ① 原磁场 *B* 的方向 |  |  |  |  |
| ② |  |  |  |  |
| ③ 感应电流的方向（俯视） |  |  |  |  |
| ④ |  |  |  |  |
| ⑤ |  |  |  |  |

**数据分析**

条形磁体的 N 极或 S 极插入都使感应线圈内的磁通量增大，而抽出都使感应线圈内的磁通量减小。条形磁体的 N 极插入，感应线圈内磁感线的方向向下；条形磁体的 S 极插入，感应线圈内磁感线的方向向上。

条形磁体的 N 极（或 S 极）插入或抽出时，感应线圈中的感应电流方向相反；条形磁体的 N 极（或 S 极）插入和 S 极（或 N 极）抽出时，感应线圈中的感应电流方向相同。

**实验结论**

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**交流与讨论**

各组交流如何确定感应电流方向的方法，依据实验事实讨论感应电流的方向是否和原磁场的方向、磁感线的方向和磁通量的增减变化有关。

1834 年，物理学家楞次（H．Lenz，1804—1865）在分析了许多实验事实后，将实验结论用一句话巧妙地表达为：感应电流的磁场总是要阻碍引起感应电流的磁通量的变化，这就是**楞次定律（Lenz’s law）**，是电磁学中的一个重要定律。

在必修课程中我们已经知道在磁感应强度为 *B* 的匀强磁场中，垂直通过一个面积为 *S* 的闭合回路的磁通量 *Φ* = *BS*。磁通量变化有多种可能的形式：一是闭合回路所在处磁场的磁感应强度 *B* 发生了变化；二是闭合回路所围面积 *S* 发生了变化。无论如何，只要闭合回路的磁通量发生变化，一定会引起感应电流。

根据楞次定律判断感应电流方向的一般步骤为：

（1）确定原磁场的方向；

（2）确定穿过闭合线圈的磁通量是增加还是减少；

（3）根据楞次定律确定感应电流的磁场方向；

（4）利用右手螺旋定则确定感应电流的方向。

可以根据楞次定律解释图 6–1 中的实验现象。强磁铁块在铜管内下降过程中，铜管内的磁通量发生变化，产生的感应电流的磁场总是反抗引起感应电流的磁通量的变化。因此下降的磁铁块将不断受到感应电流产生的磁场磁力的阻碍作用而减小下降速度。铝块在铜管和塑料管中下降，以及磁铁块在塑料管中下降时，都没有感应电流产生，铝块、磁铁块几乎以重力加速度（管壁与铝块、磁铁块之间的摩擦力和空气阻力都很小，可以忽略）匀加速下降。

楞次定律包含着深刻的物理意义，实际上是能量守恒定律在电磁感应现象中的反映。

## 楞次定律符合电磁感应现象中的能量守恒定律

按照楞次定律判断的感应电流方向是能量守恒定律的必然结果。如图 6–4 所示，当条形磁体的 N 极从上向下插入闭合线圈时，根据楞次定律，线圈内感应电流所产生的磁场应阻碍原磁通量的变化，此时产生感应电流的线圈相当于 N 极向上的“条形磁体”，同名磁极相斥，从而阻碍条形磁体向下运动。因此，条形磁体向下运动时需克服感应电流的磁场力做功，使机械能转化为线圈中感应电流的电能，感应电流通过线圈电阻再转化为焦耳热。反之，当条形磁体的 N 极从下向上抽出闭合线圈时，根据楞次定律，在线圈内感应电流产生的磁场的 S 极向上，异名磁极相吸，同样要阻碍条形磁体的向上运动。条形磁体也

要克服感应电流磁场的阻力做功，使机械能转化为线圈中感应电流的电能，感应电流通过线圈电阻再转化为焦耳热。

总之，在条形磁体插入或抽出线圈的运动而获得感应电流过程中，感应电流的磁场对条形磁体的磁场力总是阻碍条形磁体的运动；外界移动磁体就要克服感应电流的磁场力做功；另一方面导体都存在电阻，感应电流在闭合回路中流动时将释放焦耳热。做功伴随着能量的转化，正是外力克服阻力做功将机械能转化成感应电流的电能，进而转化为内能。设想感应电流的效果不是反抗引起感应电流的“原因”，那么在上述实验中，将条形磁体插入或抽出线圈的过程中，不需要外力做功就能产生感应电流而释放焦耳热。显然这是违反能量守恒定律的。

示例 1 如图 6–5（a）所示是法拉第发现电磁感应现象的实验示意图，*A*、*B* 是套在同一铁芯上的两个线圈。试标出当开关 S 闭合的瞬间，与线圈 *B* 相连接的灵敏电流计中电流的方向。

图 6–5 法拉第发现电磁感应现象的实验示意图

S

*A*

*B*

*D*

*C*

(a)

S

*A*

*B*

*D*

*C*

(b)

**分析**：线圈 *A* 与电源接通的瞬间，线圈 *A* 中的磁通量发生变化，引起套在同一铁芯上闭合线圈 *B* 的磁通量相应变化，从而在线圈 *B* 中产生感应电流。

**解**：根据右手螺旋定则，线圈 *A* 中的磁感线穿过线圈 *B* 的方向如图 6–5（b）中的实线所示；电路接通瞬间，线圈 *B* 中的磁场增强，磁通量也增大；根据楞次定律，线圈 *B* 中感应电流的磁场方向应该与原磁场方向相反，即如图 6–5（b）中的虚线所示；再用右手螺旋定则判断感应电流的方向便可确定流过灵敏电流计的电流方向是 *D* → *C*。

铁芯是一种导磁能力很强的磁性物质，绕在铁芯上的线圈通以较小的电流就能获得较强的磁场。相对于铁芯中的磁场，其他地方的磁场都很微弱，因此可近似认为磁感线都局限在铁芯内。如果将两个线圈套在同一个铁芯上，就把两个分别与不同线圈相连、彼此绝缘的电路通过铁芯中磁场紧密地联系起来，实现两个电路的电能之间的转移。铁芯一般都是用硅钢片制作的，硅钢是一种含硅的钢材。

拓 展 视 野

大家谈

图 6–5（a）中开关 S 断开的瞬间，如何确定线圈 *B* 中流过灵敏电流计的电流方向。接通电源一段时间后，灵敏电流计的指针是否继续偏转？

示例 2 如图 6–6 所示，导线框 *abcd* 处在匀强磁场中，匀强磁场的方向垂直于导线框平面，与导线框接触良好的导体棒 *MN* 在外力作用下向右做匀速运动。试用楞次定律判断导体棒 *MN* 中感应电流的方向。

图 6–6 导体棒在磁场中运动

*B*

*b*

*c*

*a*

*d*

*M*

*N*

*v*

**分析**：通过判断通过闭合回路 *MbcNM* 的磁通量的变化，依据楞次定律来确定感应电流的方向。

**解**：当导体棒 *MN* 向右运动时，闭合回路 *MbcNM* 面积减小，通过的磁通量下降。根据楞次定律，感应电流产生的磁场跟原磁场同方向，以阻碍原磁通量的减少；用右手螺旋定则可知通过导体棒的感应电流方向是 *N* → *M*。

如图 6–6 所示的情景通常称为导体切割磁感线产生感应电流。要判断直导线切割磁感线产生感应电流的方向，除了应用楞次定律以外还可以用**右手定则 (right-hand rule)**。右手定则告诉我们：伸出右手，四指与大拇指垂直且与掌心在同一平面内，使磁感线垂直穿过掌心，大拇指指向导体的运动方向，则四指指向就是感应电流的方向，也就是运动导体（闭合电路的一部分）内部感应电流的方向（图 6–7）。

图 6–7 右手定则示意图（说明：图中运动导体是闭合电路的一部分）

N

S

*I*

*v*

尝试用右手定则判断示例 2 导体棒 *MN* 中感应电流的方向。

大家谈

根据如图 6–6 所示的情景，讨论下列几个问题：

（1）如果导体棒 *MN* 处于静止状态，导线框在外力作用下向左做匀速运动，此时导体棒 *MN* 中感应电流的方向如何？

（2） 如果导体棒和导线框都处于静止状态，要使导体棒仍然能够产生 *N* → *M* 方向的感应电流，磁感应强度 *B* 的大小应该如何变化？

（3） 如果导体棒和导线框都处于静止状态，磁感应强度 *B* 的大小也不变，如何使导体棒仍然产生 *N* → *M* 方向的感应电流？

从以上讨论中，你发现了什么内在的规律？

图 6–8 用分子电流假说解释感应电流产生的磁场力

条形磁体

S

*B*′

*v*

N

*F*1

*F*2

按照分子电流假说，每个分子相当于一个由分子环流形成的小磁针。在条形磁体中，这些小磁针同方向排列，所有分子环流在磁体内部相互抵消，在磁体表面形成环形面电流，称为磁化电流。条形磁体产生的磁场即可看成由磁化电流形成。如图 6–8 所示，当条形磁体向下插入闭合线圈过程中，从俯视角度看，磁体 N 极向下的磁化电流为顺时针方向，对纵切面而言，磁化电流垂直于纸面“左侧向里，右侧向外”；根据楞次定律，闭合线圈内将产生逆时针方向的感应电流，感应电流的磁场为 *B*ʹ；承载左右两侧磁化电流元的磁体受到磁场 *B*ʹ 的安培力分别为 *F*1 和 *F*2。承载外侧所有磁化电流元的磁体受到的安培力的矢量和方向一定向上，阻碍条形磁体的向下运动。磁体侧面的磁化电流为所有分子电流叠加而成；因此感应电流的磁场力就是感应电流的磁场对承载着分子电流的条形磁体的安培力。

拓 展 视 野

**问题 思考**

**与**

1. 如图 6–9 所示，一个闭合导体圆环 *a* 和有缺口的导体圆环 *b* 用细杆连接，可绕细杆中央的光滑转动轴 *O* 在水平面内自由转动。用足够强的条形磁体的任一极插入环 *a* 时，可观察到环向后退；插入 *b* 环时，环不动。试解释观察到的现象。

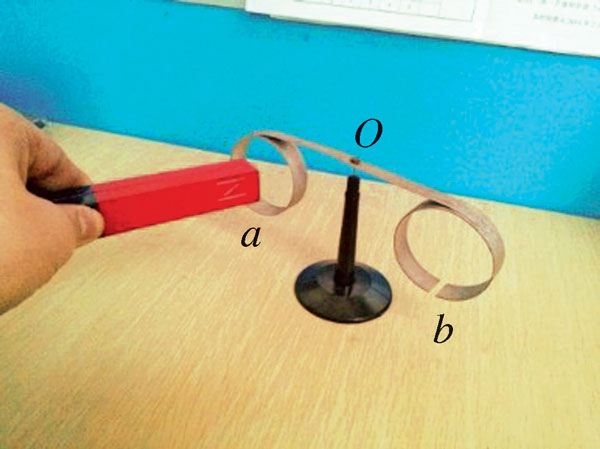


图 6–9

1. 现将电池组、滑动变阻器、带铁芯的线圈 *A*、线圈 *B*、电流计及开关用导线按如图 6–10 所示连接。在开关闭合、线圈 *A* 放在线圈 *B* 中的情况下，某同学发现将滑动变阻器的滑片 *P* 向左加速滑动时，灵敏电流计指针向右偏转。由此判断下列后续操作是否符合实验事实，简述判断的理由。

图 6–10

*A*

*B*

*P*

+

−

G

（1）线圈 *A* 向上拔出或滑动变阻器滑片 *P* 向右加速滑动，都能引起电流计指针向左偏转；

（2）线圈 *A* 中铁芯向上拔出或断开开关，都能引起电流计指针向右偏转；

（3）滑动变阻器的滑片 *P* 匀速向左或匀速向右滑动，都能使灵敏电流计指针静止在中央。

图 6–11

*y*

*x*

*O*

*B*

1. 如图 6–11 所示，在 *y* 轴左侧有一垂直于纸面向里的匀强磁场，一个圆形线圈的一半放在磁场中，圆心与原点 *O* 重合，线圈平面与磁场方向垂直。若要使线圈中产生顺时针方向的感应电流，原磁场的磁通量应增大还是减少？感应电流磁场的方向如何？若使上述线圈中的感应电流为顺时针方向，线圈的运动方式有哪三种可能？

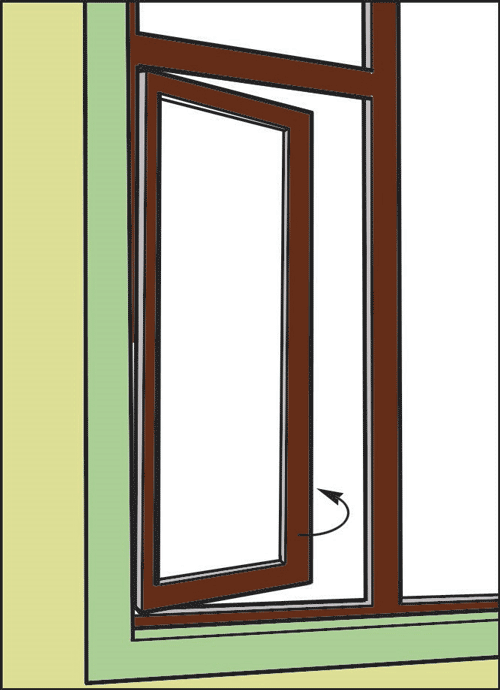


图 6–12

1. 如图 6–12 所示，某教室墙上有一朝南的钢窗，从室内学生的角度看，穿过窗户的地磁场是什么方向？学生推开窗户时，穿过窗户的地磁场的磁通量如何变化？从学生的角度看，窗框中的感应电流沿什么方向？
2. 如图 6–13 所示，闭合铜环与闭合金属框相接触置于匀强磁场中。当铜环向右移动时（金属框不动）：甲同学认为闭合铜环 *egfhe* 的磁通量没有发生变化，所以闭合铜环内没有感应电流；乙同学认为闭合回路 *eadfge* 的磁通量变大，根据楞次定律有逆时针方向的感应电流。请根据所学知识判断甲、乙两同学的观点是否正确，并简述理由。

**× × × × × × ×**

**× × × × × × ×**

**× × × × × × ×**

**× × × × × × ×**

**× × × × × × ×**

**× × × × × × ×**

**× × × × × × ×**

A

a

b

O

C

图 6–14

图 6–13

*a*

*e*

*b*

*c*

*f*

*d*

*g*

1. 如图 6–14 所示，*AOC* 是光滑的直角金属导轨，*AO* 沿竖直方向，*OC* 沿水平方向。*ab* 为靠在导轨上的一根金属直棒，*b* 端较 *a* 端更靠近 *O* 点。金属直棒从静止开始在重力作用下运动，运动过程中 b 端始终在 *OC* 上，*a* 端始终在 *AO* 上，直到金属直棒 *ab* 完全落在 *OC* 上。整个装置放在一匀强磁场中，磁场方向垂直纸面向里。则：

（1）确定金属直棒 *ab* 在运动过程中感应电流的方向，并说明判断的理由；

（2）确定金属直棒 *ab* 所受磁场力的方向，并说明判断的理由。

## 整章分析

### 学习目标

通过楞次定律和法拉第电磁感应定律的科学探究，进一步掌握分析与归纳实验证据的方法，提升对实验结果定性和定量分析的能力。

理解楞次定律和法拉第电磁感应定律的物理意义。能以能量的观点解释楞次定律，深化能量观，了解楞次定律和电磁感应定律在生产生活中的应用。

### 编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为：

2.2.1 探究影响感应电流方向的因素，理解楞次定律。

2.2.2 通过实验，理解法拉第电磁感应定律。

关于电磁感应的阐述，遵循由浅入深、从定性到定量的原则。必修课程第十一章初步介绍了电磁感应现象及感应电流产生的条件，本章在了解电磁感应现象及感应电流产生条件的基础上用实验探究楞次定律，学习判别感应电流方向的方法。本章还将深入讨论电磁感应现象中感应电动势与磁通量变化之间的定量关系，通过对法拉第电磁感应定律的科学探究，深入理解其物理意义。展示结合实验归纳和理论演绎研究问题的物理方法。通过介绍了法拉第电磁感应定律的简单应用体现学习物理学的意义。

本章核心概念是磁通量的变化率及感应电动势，重要实验规律是楞次定律和法拉第电磁感应定律。

本章的学习有助于深化实验探究能力，提升物质观、运动和相互作用观和能量观。

本章学习共需要 8 课时。第一节 2 课时，第二节 6 课时。

## 本章教材解读

### 本节编写思路

本节内容建立在教材必修三第十一章第三节“电磁感应现象”的基础之上。虽然本节教学所用的实验器材与必修三第十一章第三节基本相同，但是为确定“感应电流方向”，仍有必要利用这些实验器材做进一步探究相关实验。

“楞次定律”判断磁通量变化时产生的感应电流的方向，本节重点即为运用楞次定律判断感应电流的方向。学习楞次定律要体现探究过程。在分组进行“探究影响感应电流方向的因素”实验的过程中，学生将经历合理选择实验器材，根据实验现象检验假设的思路，制订科学探究的实验方案，正确操作实验器材，获得可靠的实验数据，通过分析数据发现规律，并能恰当使用证据推出物理结论或质疑 已有结论，进而通过归纳形成简洁的、具有普遍意义的结论。

探究楞次定律的过程涉及磁场的方向、磁通量的变化、线 圈 的绕向、电流的方向等多种因素，相互之间的逻辑关系比较复杂，楞次定律具有较强的抽象性和概括性。理解楞次定律和应用楞次定律判断感应电流的方向有较大的难度；因此，楞次定律成为本节教学的难点。

本节教学应重视理解楞次定律的物理意义。从磁通量变化角度看，感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化；从导体跟磁体的相对运动角度看，感应电流的磁场总是阻碍导体间的相对运动。

### 正文解读

为了便于观察铝块或磁铁块在管内下落的情况，长铜管和塑料管的中部沿竖直方向都开了若干个孔。

中学实验室常用的 J0409 型灵敏电流计测量范围为 ±300 μA。1 节干电池串联几十千欧的电阻，则通过灵敏电流计的电流处在测量范围内。为了更好地保护灵敏电流计，在实验之前，常采用将干电池的两极通过导线与灵敏电流计两个接线柱瞬间接触的方法判断电流方向与灵敏电流计指针偏转方向之间的关系。

按照教材图 6 – 4 所示的实验过程，依次将条形磁体的 N 极 和 S 极先后插入和拔出感应线圈，将观察到的实验现象以及分析、推理和结论记录在表 6 – 1 中。

根据条形磁体的极性判断感应线圈内原磁场磁感应强度 *B* 的方向，填入表 6 – 1 编号为 ① 的一行中。根据灵敏电流计指针的偏转方向确定线圈中感应电流的方向，填入表 6 – 1 编号为 ③ 的一行中。根据上述实验中观察到的现象，发现 ① 和 ③ 两行中各列实验现象之间并没有直接的逻辑关系。

由必修教材三第十一章第三节的学习已知道闭合线圈内磁通量的变化是产生感应电流的必要条件，由此引导学生在表 6 – 1 实验记录表编号为 ② 的一行第 1 列中填入“原磁场磁通量的变化”，相应填写该行其余四列的内容。感应电流本身也会产生磁场，根据“右手螺旋定则”可以判断感应电流产生的磁场方向，在表 6 – 1 实验记录表编号为 ④ 的一行第 1 列中填入“感应电流的磁场方向”，并相应填写该行其余四列的内容。比较实验记录表编号为 ② 和 ④ 的两行各列实验结果分析的内容，发现“原磁场磁通量的变化”与“感应电流的磁场方向”之间存在一定的逻辑关系，于是在编号为 ⑤ 的那一行第 1 列中填入“感应电流磁场的方向与原磁场磁通量的变化之间的关联”，并相应填写该行其余四列的内容。通过分析归纳得出“感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化”的结论，即楞次定律。

正确理解楞次定律需要知道闭合电路所处的空间存在两个磁场，即原磁场（产生感应电流的磁场）和感应电流的磁场。能够区分“原磁场的方向”“原磁场磁通量的大小”和“原磁场磁通量的变化”各自不同的物理含义。

正确理解楞次定律中“阻碍”这个关键词。“阻碍”不是“相反”，既不是阻碍原来的磁场，也不是阻碍原来的磁通量，而是指感应电流的磁场阻碍原磁场磁通量的增大或减少；“阻碍”不仅是“反抗”，当原磁场的磁通量增大时，感应电流的磁场与原磁场的方向相反，“反抗”磁通量的增大；当原磁场的磁通量减小时，感应电流的磁场与原磁场的方向相同，以“补偿”原磁通量的减小，所以“阻碍”不仅可以是对磁通量增大的“反抗”，也可以是对原磁通量减小的“补偿”。“阻碍”并不“阻止”，感应电流的磁场是阻止不了原磁场磁通量变化的。

产生感应电流的过程遵守能量守恒定律，阻碍的作用是克服磁场力做功，把其他形式的能量转化为产生感应电流的回路的电能。

此处设置大家谈旨在巩固对楞次定律的理解。

如图 6 – 5（b）所示，线圈 B 中原来的磁场是顺时针方向。开关断开的瞬间线圈 B 中磁通量突然减小，根据楞次定律线圈 B 中感应电流的磁场方向应与原磁场方向相同，也应为顺时针方向；再用“右手螺旋定则”判断线圈 B 中感应电流的方向便可确定流过灵敏电流计的电流方向是 C→D。

由此可见，线圈 B 中磁通量“增大”和“减小”两个相反的过程中，通过线圈 B 的感应电流方向一定是相反的。

比较楞次定律和“右手定则”，了解彼此间联系和区别：从研究的对象分析：楞次定律研究的是整个闭合导体回路；“右手定则”研究的是闭合导体回路的一部分，即做切割磁感线运动的那一段导线。

从适用的范围分析：楞次定律可应用于由磁通量变化引起感应电流的各种情况（包括一部分导体做切割磁感线运动的情况）；“右手定则”只用于一段导线在磁场中做切割磁感线运动的情况。因此，“右手定则”是楞次定律在特殊情景中的一种应用。

此处设置大家谈旨在进 一步深化对产生感应电流的条件和感应电流方向的认识。

（1）如果导体棒 MN 处于静止状态，导线框在外力作用下向左做匀速运动，导线框的 bc 边向左切割磁感线，根据“右手定则”可以判断通过导体棒的电流方向仍然为 N→M。也可以认为闭合回路 NMbc 中的磁通量减小，根据楞次定律，感应电流的磁场与原磁场方向相同，再根据“右手螺旋定则”，通过导体棒的电流方向仍然为 N→M。

（2）如果导体棒和导线框都处于静止状态，当磁感应强度 *B* 减小，闭合回路 NMbc中的磁通量减小，根据楞次定律，感应电流的磁场与原磁场方向相同，再根据“右手螺旋定则”，通过导体棒的电流方向仍然为N→M。

（3）如果导体棒和导线框都处于静止状态，磁感应强度 *B* 的大小也不变，改变感应强度 *B* 的方向，使通过闭合回路的磁通量减小，根据楞次定律，感应电流的磁场与原磁场方向相同，再根据“右手螺旋定则”，通过导体棒的电流方向仍然为 N→M。

从以上讨论中不难发现闭合回路 NMbc 中的磁通量减小是引起感应电流的前提，且通过导体棒的感应电流一定为 N→M 方向；反之，如果闭合回路 NMbc中的磁通量增大（导体棒向左移动或者导线框向右移动），通过导体棒的感应电流一定为 M→N 方向。

### 问题与思考解读

1．参考解答：条形磁体的任一极插入 a 环时，穿过 a 环的磁通量增加，根据楞次定律 a 环中感应电流的磁场阻碍原磁通量增大，环中感应电流的磁场和原条形磁体的磁场方向相反，所以条形磁体和存在感应电流的 a 环间的相互作用力是斥力，正如同名磁极相互排斥。而 b 环有缺口，条形磁体插入时，环中并无感应电流，和条形磁体间没有作用力，所以条形磁体插入 b 环时环不动。

命题意图：强化科学思维推理、论证能力和归纳能力。

主要素养与水平：运动与相互作用（Ⅰ）；模型建构（Ⅰ）；科学推理（Ⅱ）。

2．参考解答：已知滑动变阻器的滑动端 P 向左加速滑动时，滑动变阻器的电阻迅速增大，通过线圈 A 的电流迅速减小，通过线圈 B 的磁通量迅速减小，灵敏电流计的指针向右偏转。

（1）当线圈 A 向上拔出，通过线圈 B 的磁通量减小，灵敏电流计指针应向右偏转。此判断错。

滑动变阻器滑动端 P 向右加速滑动，滑动变阻器的电阻减小，通过线圈 A 的电流增大，通过线圈 B 的磁通量增大，灵敏电流计指针向左偏转。此判断对。

（2）对。两种操作均使通过线圈 B 的磁通量减小，电流计指针应该向右偏转。

（3）错。滑动变阻器的滑动端 P 匀速向左（或匀速向右）滑动，滑动变阻器的电阻均匀增大（或均匀减小），通过线圈 A 的电流均匀减小（或均匀增大），通过线圈 B 的磁通量均匀减小（或均匀增大），线圈 B 中产生感应电流，电流计指针不应静止，而应向右（或向左）偏转。

命题意图：从不同的实验操作中归纳总结磁通量变化和感应电流方向之间的内在关联。

主要素养与水平：运动与相互作用（Ⅱ）；模型建构（Ⅰ）；科学推理（Ⅱ）；科学论证（Ⅱ）。

3．参考解答：原磁场的方向垂直于纸面向里，则顺时针方向感应电流产生的磁场方向也为垂直于纸面向里，根据楞次定律可知：线圈内原来的磁通量一定减少。

线圈沿 *x* 轴正方向移动，或线圈绕 *x* 轴转动且转角小于 90°，或线圈绕 *y* 轴转动且转角小于 90°，（或线圈绕 *Oxy* 平面内任意轴转动且转角小于 90° 均可）。上述这些可能的运动方式都能使线圈内原来的磁通量减少，则线圈中一定会产生顺时针方向的感应电流。

命题意图：此题需要综合应用右手螺旋定则、楞次定律以及匀强磁场中磁通量的定义，要求学生具有一定的空间想象能力。此题也可以根据感应电流的方向应用“右手定则”判断线圈运动方向，但分析过程比较复杂。

主要素养与水平：模型建构（Ⅰ）；科学论证（Ⅱ）。

4．参考解答：从室内学生的角度看，穿过窗户的地磁场方向是指向窗内偏下，推窗过程中穿过窗户的地磁场的磁通量减小。根据楞次定律窗框中感应电流是逆时针方向。

命题意图：在三维立体空间的具体情境中分析电磁感应现象，需要一定的模型建构能力和科学推理能力。

主要素养与水平：运动与相互作用（Ⅰ）；模型建构（Ⅱ）；科学论证（Ⅱ）。

5．参考解答：甲同学的观点错误，乙同学的观点正确。如果没有金属框，单独铜环向右移动的过程中，闭合铜环 egfhe 的磁通量没有发生变化，所以闭合铜环内没有感应电流。当铜环在闭合金属框上向右移动时，虽然闭合回路 egfhe 内的磁通量没有变化，但与之相联系的回路 eadfge 和回路 ebcfhe 的磁通量却同时发生变化。因此，回路中有感应电流产生。电流方向可以根据楞次定律判断（回路 eadfge 的磁通量在逐渐增加，将有逆时针方向的感应电流；回路 ebcfhe 磁通量在逐渐减小，将有顺时针方向的感应电流）。因此铜环的左右两侧分别存在 f→g→e 和 f→h→e 方向的感应电流。

应用“右手定则”也可以判断感应电流的方向，注意切割磁感线的等效长度为圆 egfhe 的直径。

命题意图：灵活确定研究对象的磁通量变化规律，为第 3 节应用法拉第电磁感应定律解决问题做准备。

主要素养与水平：模型建构（Ⅱ）；科学推理（Ⅲ）。

6．参考解答：（1）金属直棒中感应电流方向先是 b→a，后变为 a→b。

当 ab 棒在图示位置运动到倾角为 45° 的过程中，ab 棒与直角金属导轨包围的面积增大，磁通量也增大，根据楞次定律感应电流的磁场要反抗磁通量的增大，在 ab 棒与直角金属导轨组成的回路中产生逆时针方向的感应电流，所以通过 ab 棒的感应电流方向是 b→a；当 ab 棒继续运动的过程中，ab 棒与直角金属导轨包围的面积减小，磁通量也减小，根据楞次定律感应电流的磁场要反抗磁通量的减小，在 ab 棒与直角金属导轨组成的回路中产生顺时针方向的感应电流，所以通过 ab 棒的感应电流是 a→b。

（2）金属直棒中感应电流方向为 b→a 时，根据“左手定则”判断磁场力方向与 ab 垂直指向左下方向；当金属直棒中感应电流方向为 a→b 时，磁场力方向与 ab 垂直指向右上方向。

命题意图：楞次定律结合“左手定则”判断感应电流的方向和安培力的方向，关注磁通量变化问题中可能出现磁通量的极大值。

主要素养与水平：运动与相互作用（Ⅱ）；模型建构（Ⅲ）；科学推理（Ⅲ）。