# 第四章 4 法拉第电磁感应定律

穿过闭合导体回路的磁通量发生变化，其中就有感应电流。既然有感应电流，电路中就一定有电动势。如果电路没有闭合，这时虽然没有感应电流，电动势依然存在。在电磁感应现象中产生的电动势叫做**感应电动势（induction electromotive force）**。产生感应电动势的那部分导体就相当于电源。

感应电动势的大小跟哪些因素有关呢？

在用导线切割磁感线产生感应电流的实验中，导线运动的速度越快、磁体的磁场越强，产生的感应电流就越大；在向线圈中插入条形磁铁的实验中，磁铁的磁场越强、插入的速度越快，产生的感应电流就越大。这些经验向我们提示，感应电动势可能与磁通量变化的快慢有关，而磁通量变化的快慢可以用磁通量的变化率表示。

## 电磁感应定律

纽曼（F．E．Neumann，1798-1895）、韦伯（W．E．Weber，1804-1891）在对理论和实验资料进行严格分析后，于1845年和1846年先后指出：**闭合电路中感应电动势的大小，跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比**，后人称之为**法拉第电磁感应定律（Faraday law of electromagnetic induction）**。

如果时刻*t*1穿过闭合电路的磁通量为*Φ*1，时刻t2穿过闭合电路的磁通量为*Φ*2，则在时间Δ*t*＝*t*2－*t*1内，磁通量的变化量为Δ*Φ*＝*Φ*2－*Φ*1，磁通量的变化率就是。用*E*表示闭合电路中的感应电动势，那么电磁感应定律就可以表示为

*E*＝*k*

式中*k*是比例常量。在国际单位制中，电动势的单位是伏（V）、磁通量的单位是韦伯（Wb）、时间的单位是秒（s），这时k＝1。于是

*E*＝ （1）

虽然（1）式并非是法拉第亲自给出的，但由于他对电磁感应现象丰富的、开创性的研究，将这发现的荣誉归于他的名下，他是当之无愧的。

闭合电路常常是一个匝数为*n*的线圈，而且穿过每匝线圈的磁通量总是相同的。由于这样的线圈可以看成是由*n*个单匝线圈串联而成的，因此整个线圈中的感应电动势是单匝线圈的*n*倍，即

*E*＝*n* （2）

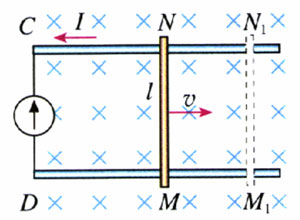
这几个公式只表示感应电动势的大小，不涉及它的正负，计算时Δ*Φ*应取绝对值。至于感应电流的方向，可以用上节学到的楞次定律判定。

## 导线切割磁感线时的感应电动势

根据法拉第电磁感应定律，只要知道磁通量的变化率，就可以算出感应电动势。常见的一种情况是，导线做切割磁感线运动而使磁通量变化，这时法拉第电磁感应定律可以表示为一种更简单、更便于应用的形式。

如图4.4-1所示，把矩形线框CDMN放在磁感应强度为*B*的匀强磁场里，线框平面跟磁感线垂直。设线框可动部分MN的长度为*l*，它以速度*v*向右运动，在Δ*t*时间内，由原来的位置MN移到M1N1，这个过程中线框的面积变化量是

Δ*S*＝*lv*Δ*t*



**图4.4-1 计算导线切割磁感线时的感应电动势**

穿过闭合电路的磁通量的变化量则是

Δ*Φ*＝*B*Δ*S*＝*Blv*Δ*t*

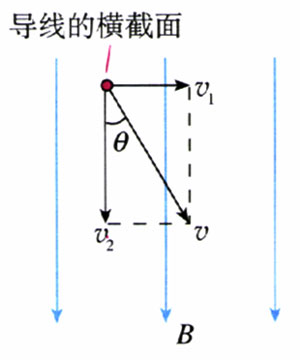
根据法拉第电磁感应定律，*E*＝，由此求得闭合电路的感应电动势

*E*＝*Blv* （3）

在国际单位制中，*B*、*l*、*v*的单位分别是特斯拉（T）、米（m）、米每秒（m/s），*E*的单位是伏（V）。

如果导线的运动方向与导线本身是垂直的，但与磁感线方向有一个夹角*θ*（图4.4-2），速度*v*可以分解为两个分量：垂直于磁感线的分量*v*1=*v*sin*θ*和平行于磁感线的分量*v*2＝*v*cos*θ*。后者不切割磁感线，不产生感应电动势。前者切割磁感线，产生的感应电动势为

*E*＝*Blv*1



**图4.4-2 导线运动方向不与磁感线垂直时的情况**

考虑到*v*1＝*v*sin*θ*，因此

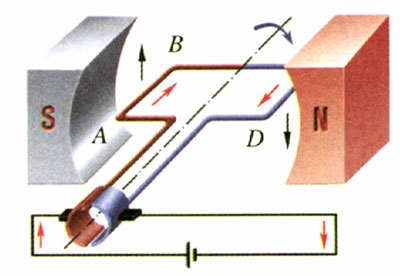
*E*＝*Blv*sin*θ* （4）

## 反电动势

我们在初中学过了直流电动机的原理，它是由于通电导线在磁扬中受到了安培力而产生了运动。学过了电磁感应现象以后，我们可以从另外一个角度审视这个问题。

### 思考与讨论

在图4.4-3中，电源在电动机线圈中产生的电流的方向以及AB、CD两个边受力的方向都已经标出。



**图4.4-3 电动机转动时，线圈内是否也会产生感应电动势？**

现在的问题是，既然线圈在磁场中转动，线圈中就会产生感应电动势。感应电动势是加强了电源产生的电流，还是削弱了它？是有利于线圈的转动，还是阻碍了线圈的转动？

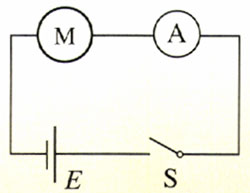
电动机转动时，线圈中也会产生感应电动势，这个感应电动势总要削弱电源电动势的作用，我们把这个电动势称为反电动势。它的作用是阻碍线圈的转动。如果要使线圈维持原来的转动，电源就要向电动机提供能量。这正是电能转化为其他形式能的过程。

如果电动机工作中由于机械阻力过大而停止转动，这时没有了反电动势，电阻很小的线圈直接连在电源的两端，电流会很大，时间长了很可能把电动机烧毁。所以，如果电动机由于机械故障停转，要立即切断电源，进行检查。

同学们可以把“反电动势”这一小节当做前面所学知识的一道综合练习题。

### 做一做

如图4.4-4，将玩具电动机通过开关、电流表接到电池上。闭合开关S，观察电动机启动过程中电流表读数的变化。怎样解释电流的这种变化？



**图4.4-4 观察电动机启动过程中电流的变化**

在电动机上加一定的负载，例如用手轻触转子的轴，观察电流表读数的变化并做出解释。

电动机启动时的电流与正常工作时的电流不同，有负载时与空载时的电流不同。这在技术上会引起什么问题？如果有问题，应该沿什么途径解决？

## 问题与练习

1．关于电磁感应，下述说法正确的是什么？

A．穿过线圈的磁通量越大，感应电动势越大。

B．穿过线圈的磁通量为O，惑应电动势一定为0。

C．穿过线圈的磁通量的变化越大，感应电动势越大。

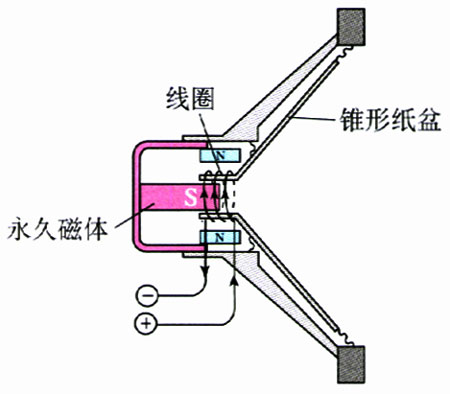
D．穿过线圈的磁通量变化越快，感应电动势越大。

2．有一个1 000匝的线圈．在0.4 s内通过它的磁通量从0.02 Wb增加到0.09 Wb，求线圈中的感应电动势。如果线圈的电阻是10 Ω，把一个电阻为990 Ω的电热器连接在它的两端，通过电热器的电流是多大？

3．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，两者用导电缆绳相连，这种卫星称为绳系卫星．利用它可以进行多种科学实验。

现有一颗绳系卫星在地球赤道上空沿东西方向运行。卫星位于航天飞机正上方，它与航天飞机间的距离是20.5 km，卫星所在位置的地磁场为*B*＝4.6×10-5 T，沿水平方向由南向北。如果航天飞机和卫星的运行速度是7.6 km/s，求缆绳中的感应电动势。

4．动圈式扬声器的结构如图4.4-5所示。线圈圆筒安放在永磁体磁极间的空隙中，能够自由运动。按音频规律变化的电流通进线圈，安培力使线圈运动。纸盆与线圈连接，随着线圈振动而发声。



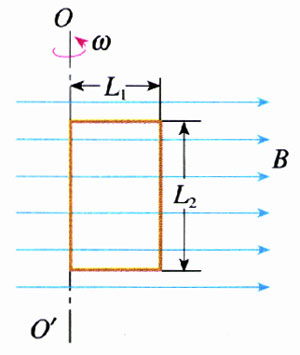
**图4.4-5 动圈式扬声器**

这样的扬声器能不能当做话筒使用？也就是说，如果我们对着纸盆说话，扬声器能不能把声音变成相应的电流？为什么？

5．如图4.4-6，矩形线圈在匀强磁场中绕OO′轴转动时，线圈中的感应电动势是否变化？为什么？设线圈的两个边长分别是*L*1和*L*2，转动时角速度是*ω*，磁场的磁感应强度为*B*。试证明：在图示位置时，线圈中的感应电动势为

*E*＝*BSω*

式中*S*＝*L*1*L*2，为线圈面积。

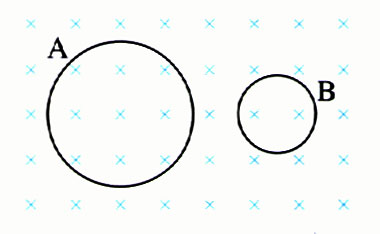


**图4.4-6 证明线圈此时的感应电动势为*BSω***

6．如图4.4-7所示，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＝2*r*B，图示区域内有匀强磁场，且磁感应强度随时间均匀减小。

（1）A、B线圈中产生的感应电动势之比*E*A∶*E*B是多少？

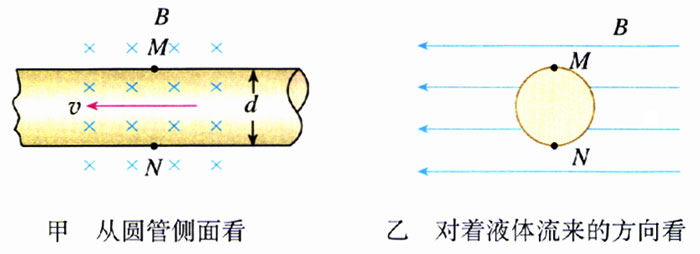
（2）两线圈中感应电流之比*I*A∶*I*B是多少？



**图4.4-7 两线圈中感应电动势之比、感应电流之比各是多少？**

7．图4.4-8是电磁流量计的示意图。圆管由非磁性材料制成，空间有匀强磁场。当管中的导电液体流过磁场区域时，测出管壁上MN两点间的电势差*U*，就可以知道管中液体的流量*q*——单位时间内流过管道横截面的液体的体积。已知管的直径为*d*，磁感应强度为*B*，试推出*q*与*U*关系的表达式。假定管中各处液体的流速相同。

电磁流量计的管道内没有任何阻碍流体流动的结构，所以常用来测量高黏度及强腐蚀性流体的流量。它的优点是测量范围宽、反应快、易与其他自动控制装置配套。



**图4.4-8 电磁流量计的示意图**