

# 电磁感应现象中能量转化和守恒

郑维鹏

电磁感应现象可分为两大类，一是由磁场的变化引起的电磁感应现象，二是由导体和磁场的相对运动引起的电磁感应现象。

在教学中发现一部分教师和同学们常进入两种误区。

(一) 不能在应用中理解用电器是消耗电能的仪器，在用电器通电的过程中，电流做功的过程是电能转化为其他形式能的过程(如纯电阻用电器在工作时将电能转化为电热；蓄电池充电时将电能转化为化学能和电热；电动机在工作时将电能转化为机械能和电热)，而将电磁感应现象中感应电流做功的过程仅认为是电能转化为电热的过程；

(二) 由于不理解电源将其他形式的能转化为电能的值是由非静电力做功来量度的，不同性质的非静电力做功对应着不同性质的能转化为电能，因而在导体和磁场发生相对运动的电磁感应现象中只注重机械能转化为电能，而不重视机械能转化为电能的过程是通过导体克服安培力做功(或更准确的说是在克服阻碍导体和磁场相对运动的安培力做功)来实现的。下面通过导体和磁场发生相对运动的电磁感应现象从三个方面来说明此问题。

## 一、发电机给固定电阻供电模型

如图 1 所示，两根光滑的长直金属导轨  $MN$ 、 $M'N'$  平行置于同一水平面上，导轨间距为  $L$ ，电阻不计， $MM'$  处接有阻值为  $R$  的电阻。长度也为  $L$ ，阻值为  $r$  的金属棒  $ab$  垂直于导轨放置，导轨处于磁感应强度为  $B$ 、方向竖直向下的匀强磁场中。 $ab$  在外力作用下向右以速度  $v$  匀速运动且与导轨保持良好接触，试求回路中的电功率。

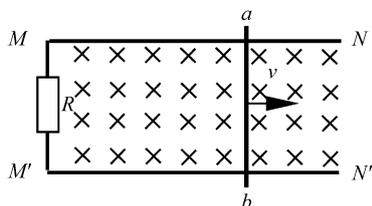


图 1

分析  $ab$  棒做切割磁感线运动产生的感应电动势为  $\varepsilon = BLv$ ，

$$\text{回路中的感应电流 } I = \frac{\varepsilon}{R+r}.$$

(一) 从电能消耗的过程看：此电路是纯电阻

用电器，电流做功将电能转化为电热，故

$$P = I^2(R+r) = \frac{B^2 L^2 v^2}{R+r}.$$

(二) 从电源的角度看：导体棒做切割磁感线运动产生感应电动势，感应电动势做功功率为：

$$P = \varepsilon I = \frac{B^2 L^2 v^2}{R+r}.$$

(三) 从电能产生的过程看：通有电流的导体棒在磁场中受到的安培力  $F_{\text{安}} = BIL$ ，方向向左。为了使导体棒匀速运动，必有外力  $F$  与  $F_{\text{安}}$  平衡，此外力的功率为：

$$P = Fv = BILv = \frac{B^2 L^2 v^2}{R+r}.$$

这正好等于上面求得的感应电动势做功的功率。由此我们知道电路中感应电动势提供的电能是由外力做功消耗机械能转化而来的，即克服安培力做功将机械能转化为电能，这就是发电机内的能量转化过程。

## 二、发电机和电动机模型

如图 2 所示，在水平面上固定两光滑的长直平行金属导轨  $MN$ 、 $PQ$ ，导轨间距离为  $L$ ，导轨的电阻忽略不计，

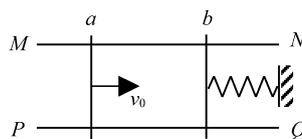


图 2

磁感应强度为  $B$  的匀强磁场垂直于导轨所在平面。长度也均为  $L$ 、电阻均为  $R$ 、质量分别为  $m_a$ 、 $m_b$  的两根金属杆  $a$ 、 $b$  垂直导轨置于导轨上。开始时  $a$  杆以初速度  $v_0$  向静止的  $b$  杆运动，当  $a$  杆向右的速度为  $v$  时， $b$  杆向右的速度达到最大  $v_m$ ，此时弹簧的弹性势能为  $E_p$ 。

问题(一)  $b$  杆由静止至达最大速度的过程中回路中产生的电能。

错解 对于  $a$ 、 $b$  两杆和弹簧组成的系统由能的转化和守恒可知，回路中产生的电能等于系统减少的机械能，故

$$E_{\text{电}} = \frac{1}{2} m_a v_0^2 - \frac{1}{2} m_a v^2 - \frac{1}{2} m_b v_m^2 - E_p.$$

究其错误的原因，此时  $b$  杆不是纯电阻用电器，

而是电动机模型，电流对  $b$  杆做的功一部分因电流的热效应转化为  $b$  杆的电热，另一部分通过安培力对  $b$  杆做正功转化为  $b$  杆和弹簧的机械能，实际上  $a$ 、 $b$  两杆和弹簧组成的系统减少的机械能等于  $a$ 、 $b$  两杆产生的电热。

**正解** 由于  $a$  杆的运动产生感应电动势，结果使  $b$  杆中有电流通过；而  $b$  杆电流在磁场中受到安培力使得它运动，故此模型  $a$  杆相当于发电机、 $b$  杆相当于电动机，发电机通过克服安培力做功将机械能转化为电能，故回路产生的电能等于  $a$  杆减少的机械能，即：

$$E_{\text{电}} = \frac{1}{2} m_a v_0^2 - \frac{1}{2} m_a v^2。$$

问题（二）  $b$  杆由静止至达到最大速度的过程中  $b$  杆消耗的电能。

**分析** 此过程中  $a$ 、 $b$  两杆产生的焦耳热相等，设其均为  $Q$ ，

$$b \text{ 杆消耗的电能 } E_b = Q + \frac{1}{2} m_b v_m^2 + E_P，$$

$$a \text{ 杆输出的电能 } E_a = E_{\text{电}} - Q， E_a = E_b。$$

$$\text{解得 } E_b = \frac{1}{4} m_a v_0^2 + \frac{1}{4} m_b v_m^2 - \frac{1}{4} m_a v^2 + \frac{E_P}{2}。$$

问题（三）  $b$  杆达最大速度时电路中消耗的电功率。

**分析**  $a$  杆产生的感应电动势  $\varepsilon_a = BLv$ ，由法拉第电磁感应定律回路中产生的感应电动势  $\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = BL(v - v_m)$ ，

$$\text{回路中的感应电流 } I = \frac{\varepsilon}{2R}。$$

方法（一） 从电源的角度看： $a$  杆相当于电源，其将机械能转化为电能的功率

$$P_{\text{电}} = I\varepsilon_a = \frac{B^2 L^2 (v - v_m)v}{2R}。$$

方法（二） 从电能产生的过程看： $a$  杆克服安培力做功的过程是机械能转化为电能的过程

$$P_{\text{电}} = F_{\text{安}} v = BILv = \frac{B^2 L^2 (v - v_m)v}{2R}。$$

方法（三） 从电能的消耗过程看：回路中产生的电能的一部分转化为  $a$ 、 $b$  两杆的电热，另一部分转化为  $b$  杆和弹簧的机械能，由于  $b$  杆相当于电动机，电能转化为机械能部分是通过安培力对  $b$  棒做功来实现的

$$P_{\text{电}} = I^2(2R) + F_{\text{安}} v_m = \frac{B^2 L^2 (v - v_m)v}{2R}。$$

### 三、既是发电机又是电动机模型

如图 3 所示，光滑的平行长直金属导轨置于水平面内，间距为  $L$ 、导轨左端接有阻值为  $R$  的电阻，质量为  $m$  的导体棒垂直跨接在导轨

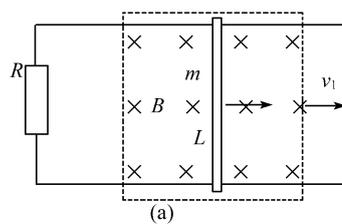


图 3

上。导轨和导体棒的电阻均不计，且接触良好。在导轨平面上有一矩形区域内存在着竖直向下的匀强磁场，磁感应强度大小为  $B$ 。开始时，导体棒静止于磁场区域的右端，当磁场以速度  $v_1$  匀速向右移动时，导体棒随之开始运动，同时受到水平向左、大小为  $f$  的恒定阻力，并很快达到恒定速度，此时导体棒仍处于磁场区域内。导体棒以恒定速度运动时，单位时间内克服阻力所做的功和电路中消耗的电功率各为多大？

**分析** 设导体棒匀速运动的速度为  $v_2$ ，则整个回路产生的感应电动势

$$\varepsilon = BL(v_1 - v_2)，$$

$$\text{回路中感应电流 } I = \frac{\varepsilon}{R}，$$

对于棒由物体的平衡有  $F_{\text{安}} = f$ ， $F_{\text{安}} = BIL$ ，

$$\text{解得 } v_2 = v_1 - \frac{fR}{B^2 L^2}，$$

单位时间内克服阻力所做的功  $P_f = fv_2 =$

$$f \left( v_1 - \frac{fR}{B^2 L^2} \right)。$$

方法（一） 从电能的消耗角度看：此电路是纯电阻用电器，电路中消耗的电能全部转化为电热，故

$$P_{\text{电}} = P_R = \frac{\varepsilon^2}{R} = \frac{B^2 L^2 (v_1 - v_2)^2}{R} = \frac{f^2 R}{B^2 L^2}。$$

方法（二） 从电能产生的角度看：易错误的认为安培力对导体棒做正功，仅把导体棒看作是一个电动机，但实际上此模型为磁场动，导体棒动，导体棒相对磁场运动， $a$  棒既是发电机又是电动机。

导体棒相对磁场向左的速度为  $v_{\text{相}} = v_1 - v_2$ ，导体棒受到的安培力向右，导体棒受到的安培力阻碍导体和磁场的相对运动，故回路中产生的电能可由克服

# 速度选择器的工作原理及应用

于文高

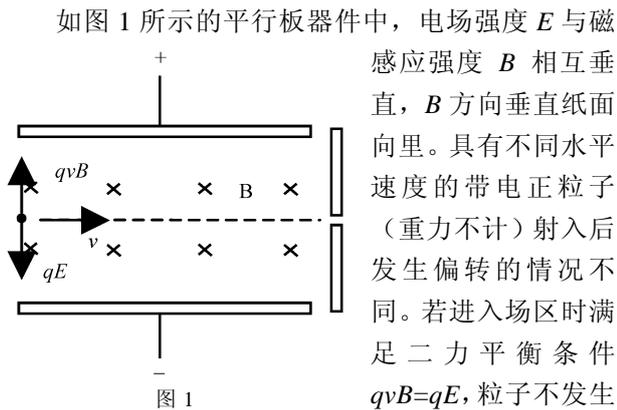


图 1

如图 1 所示的平行板器件中，电场强度  $E$  与磁感应强度  $B$  相互垂直， $B$  方向垂直纸面向里。具有不同水平速度的带电正粒子（重力不计）射入后发生偏转的情况不同。若进入场区时满足二力平衡条件  $qvB=qE$ ，粒子不发生偏折；若进入场区时有  $qvB>qE$ ，粒子向上偏折；若进入场区时有  $qvB<qE$ ，粒子向下偏折，这样就把唯一满足  $v=E/B$  的粒子从速度选择器的右小孔选择出来了（ $v$ 、 $B$ 、 $E$  方向也存在确定的关系，由  $v=E/B$  知， $v$  仅与  $E$ 、 $B$  有关，而与粒子的质量、电性无关），故称为速度选择器。此模型的应用相当广泛，现举例说明。

## 1. 霍尔效应

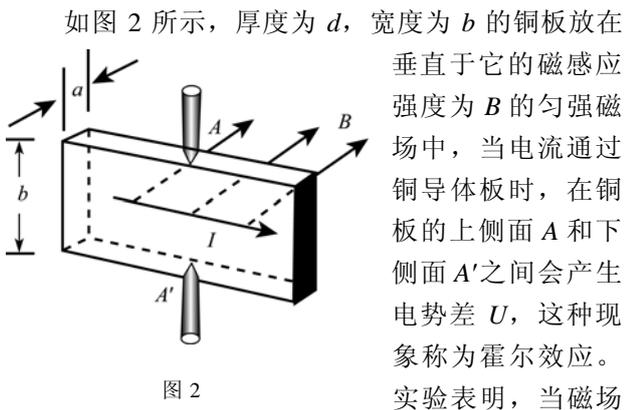


图 2

如图 2 所示，厚度为  $d$ ，宽度为  $b$  的铜板放在垂直于它的磁感应强度为  $B$  的匀强磁场中，当电流通过铜导体板时，在铜板的上侧面  $A$  和下侧面  $A'$  之间会产生电势差  $U$ ，这种现象称为霍尔效应。实验表明，当磁场

不太强时，电势差  $U$ 、电流  $I$  和  $B$  关系为  $U=kIB/d$ ，式中的比例系数  $k$  为霍尔系数。设电流  $I$  是自由电子的定向移动形成的，自由电子的平均定向速度为  $v$ 、电荷量为  $e$ ，回答下列问题：

(1) 达到稳定状态时，导体板上侧面  $A$  的电势 \_\_\_\_\_（填“高于”、“低于”或“等于”）下侧面  $A'$  的电势，此时导体板上、下两侧之间的电势差为  $U_{A'A}=\underline{\hspace{2cm}}$ 。

(2) 由静电力和洛伦兹力的平衡条件，证明霍尔系数为  $k=1/(ne)$ ，其中  $n$  为导体单位体积中自由电子的个数。

解析：(1) 首先分析电流通过铜导体板时的微观物理过程。由于铜板放在垂直于它的磁感应强度为  $B$  的匀强磁场中，电流是自由电子的定向运动形成的，电流方向从左到右，自由电子定向移动的方向从右到左。根据左手定则可判断自由电子受到的洛伦兹力的方向向上，自由电子向  $A$  板聚集， $A$  板出现多余的正电荷，所以  $A$  板电势低于  $A'$  板电势，应填“低于”。达到稳定状态时，自由电子受到横向静电力与洛伦兹力的作用，由两力平衡有  $e\frac{U_{A'A}}{b}=evB$  可得  $U_{A'A}=Bvb$ 。

阻碍导体和磁场相对运动的安培力做功来量度，即

$$P_{\text{电}} = f(v_1 - v_2),$$

解得  $P_{\text{电}} = \frac{f^2 R}{B^2 L^2}$ 。

综上所述在研究电磁感应现象中的能量问题时一定从电能的产生和电能的消耗两个角度分析。

从电能消耗的角度看，电流做功将电能转化为其他形式的能，要注意区别纯电阻用电器和非纯电阻用电器；从电能产生的角度看，电源将其他形式的能转化为电能的过程是通过克服阻碍导体和磁场相对运动的安培力做功来实现的。

(武汉三中 430050)