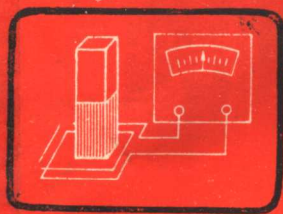


中学物理教学参考丛书

电磁感应



上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

电 磁 感 应

周祖方 蒋皋泉

曹毓梁 奚天敬

上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

电 磁 感 应

周祖方 蒋皋泉

曹毓梁 奚天敬

上海教育出版社出版发行

(上海永福路 123 号)

各地新华书店经销 崇明浜镇印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 2.5 字数 51,000

1987 年 7 月第 1 版 1987 年 7 月第 1 次印刷

印数 1~3,000 本

统一书号: 7150·3899 定价·0.51 元

编 者 的 话

本书是中学物理教学参考丛书之一，主要供中学物理教师参考。全套丛书共有十七本，将陆续出版。

《电磁感应》的主要内容是论述有关电磁感应的基础知识。全书共分五章：第一章阐述电磁感应现象的基本规律；第二章介绍自感现象和互感现象；第三章分析了一些容易混淆的问题；第四章介绍一些电磁感应现象的演示实验；第五章简单介绍涡流和磁流体发电的常识。供教学上参考。

目 录

第一章 电磁感应现象	1
一、动生电动势	1
二、动生电动势的方向 右手定则	4
三、电磁感应现象中的能量转换	6
四、楞次定律	7
五、法拉第电磁感应定律	9
六、感应电场	18
思考题一	16
第二章 自感与互感	18
一、自感现象与自感电动势	18
二、简单自感电路的分析	20
三、分析日光灯线路	24
四、互感现象与互感电动势	26
五、变压器	29
六、感应圈	33
思考题二	34
第三章 问题分析	37
一、 $\mathcal{E} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ 与 $\mathcal{E} = Blv$	37
二、磁场的能量	39
三、自感电动势的产生	41
四、闭合线框在磁场中平动	41

五、磁通量、磁通量的变化及变化率	45
六、导体在同一平面内旋转的感应电动势	47
七、自感现象中电流的方向	51
思考题三	52
第四章 实验仪器的改装、制作和使用	55
一、高灵敏示教电表	55
二、演示温差发电	57
三、演示旋转磁场发电	57
四、演示线圈在地磁场中运动时的感应电动势	58
五、演示金属圆盘在磁场中旋转	59
六、演示单根导线切割磁力线产生动生电动势	61
七、演示电解液中的洛伦兹力	61
八、演示自感现象	63
思考题四	63
第五章 附录	65
一、涡流	65
二、磁流体发电	67
三、思考题参考答案	71

第一章 电磁感应现象

1820年丹麦物理学家奥斯特发现了电流的磁效应，第一次揭示了电和磁的联系。此后，有人就想既然电流有磁效应，那末是不是也可以利用磁场的作用使导体里产生电流？英国科学家法拉第为了解决这个问题，精心实验并作了系统的研究，终于在1831年第一次发现了电磁感应现象，总结出电磁感应定律。

电磁感应现象揭示了电与磁之间的内在联系。它的发现在科学技术上有划时代的意义。电磁感应定律是电磁学的理论基础之一，它不仅使人们对于电磁现象的本质有了更深入的认识，而且在实践上开拓了广泛利用电能的道路。

一、动生电动势

磁场对静止电荷是没有作用力的，但对作定向运动的电荷要显示出力的作用。实验证明：运动的带电粒子在磁场中要受洛伦兹力 f 的作用， f 的大小和粒子的带电量 q 、磁感应强度 B 、速度 v ，有如下的关系

$$f = qvB \sin \theta$$

式中 θ 为 v 和 B 之间的夹角。只要带电粒子在磁场中的运动方向跟磁场方向不在同一直线上，带电粒子就一定要受到洛伦兹力 f 的作用， f 的方向可以用左手定则判断（图1-1）。

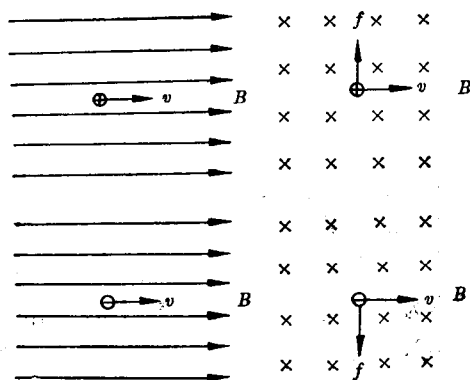


图 1-1

在图 1-2 中一段长 l 的直导线 MN ，在均匀磁场 B 中，以速度 v 向右作切割磁力线的运动。如果 v 的方向跟磁场方向和导线都垂直，导线里的每个电量为 e 的自由电子因随着

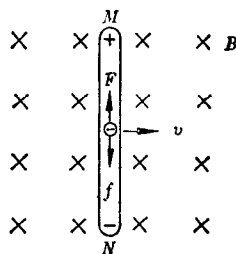


图 1-2

导线一起作定向运动，都要受洛伦兹力 f 的作用，此力的大小为 $f=evB$ ，它的方向沿导线由 M 指向 N 。自由电子在力 f 作用下将沿导线从 M 端移向 N 端，结果在直导线 N 端出现过剩的负电荷， M 端出现过剩的正电荷。于是在直导线内部产生一个电场强度为 E ，方向从 M 指向 N 的电场。

这电场又使导线里的电子受到一个方向由 N 指向 M 的电场力 F ， $F=eE$ 。

这样，每个自由电子既受洛伦兹力 f 的作用，又受方向跟 f 相反的电场力 F 的作用。电场力 F 随着场强的变化而变化。导体中的自由电子不断移向 N 端，电场将逐渐增强，自由电子

所受的电场力 F 也逐渐增大。当电场力 F 增大到跟洛伦兹力 f 平衡时, 导线里的自由电子就不再向 N 端移动, 这时导线两端间的电势差 U_{MN} 就等于导线在磁场里作切割磁力线运动而产生的感应电动势 $\mathcal{E}$ 。

即

$$\begin{aligned} f &= F, \\ evB &= eE, \\ vB &= E. \end{aligned}$$

又

$$U_{MN} = El = \mathcal{E},$$

所以

$$\mathcal{E} = Blv \quad (1)$$

我们把导体与磁力线发生相对运动而产生的感应电动势称为动生电动势。

如果导体的运动方向跟磁场方向不垂直, 有一夹角 θ (图 1-3), 那末可以把速度 v 分解成跟磁力线方向平行的分量 $v \cos \theta$ 和跟磁力线方向垂直的分量 $v \sin \theta$, 计算时应以 $v \sin \theta$ 代入公式 (1), 于是得到

$$\mathcal{E} = Blv \sin \theta \quad (2)$$

θ 是 v 与 B 的夹角。

如果导体的运动方向跟磁场方向垂直, 但跟导体本身并不垂直, 而有一夹角 α (图 1-4), 那末应以跟运动方向垂直的有效长度 $l \sin \alpha$ 代入公式, 于是得到

$$\mathcal{E} = Blv \sin \alpha \quad (3)$$

α 是 v 与 l 的夹角。

可见导体因切割磁力线运动而产生的动生电动势大小的一般式应为

$$\mathcal{E} = Blv \sin \theta \sin \alpha。$$

【例题 1】长 5.0 厘米的导线在 2.0×10^{-2} 特斯拉的匀强磁场中运动, 运动的方向跟磁力线垂直, 运动的速率 $v =$

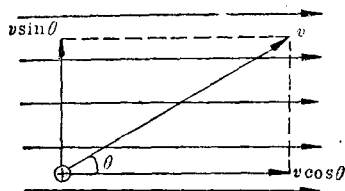


图 1-3

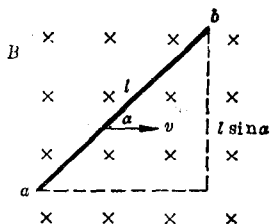


图 1-4

0.10米/秒, 求: 动生电动势。

解: 根据题意, 只指出运动方向跟磁力线垂直, 至于导线本身跟运动方向是否垂直, 题中没有说明, 因此可以有下面三种情况:

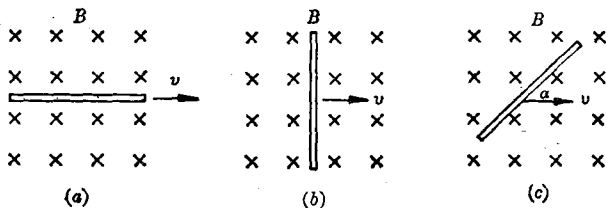


图 1-5

第一种情况: 如图 1-5(a) 所示, $\alpha=0^\circ$ 动生电动势 $\mathcal{E}=0$ 。

第二种情况: 如图 1-5(b) 所示, $\alpha=90^\circ$ $\mathcal{E}=Blv=2.0 \times 10^{-2} \times 5.0 \times 10^{-2} \times 0.10$ 伏特 $=1.0 \times 10^{-4}$ 伏特。

第三种情况: 如图 1-5(c) 所示, $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, $\mathcal{E}=Blv \sin \alpha = 10^{-4} \sin \alpha$ 伏特。

动生电动势 $\mathcal{E}$ 的数值的范围是 $0 \leq \mathcal{E} \leq 1.0 \times 10^{-4}$ 伏特。

二、动生电动势的方向 右手定则

闭合回路的一部分导体在磁场中作切割磁力线的运动时, 所产生的感生电流的方向可以用右手定则来判断(图 1-6)。

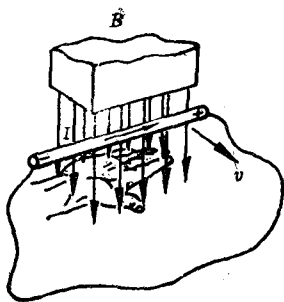


图 1-6

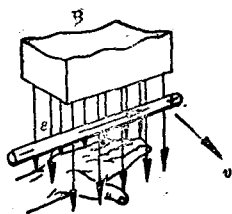


图 1-7

右手定则也可以用来判断动生电动势的方向。应用右手定则判断动生电动势的方向时，右手四指所指的方向是动生电动势的方向，也就是电源内部电势升高的方向。电动势的方向是从电源的负极通过电源内部指向电源的正极(图 1-7)。

[例题 2] 一个外径为 R ，内径为 r 的圆形扁金属环，放置在磁感应强度为 B 的均匀磁场中，圆环平面跟磁力线垂直。若圆环绕中心轴匀速转动，角速度为 ω (图 1-8)，它能否产生动生电动势？

解：圆环上沿半径方向各点的线速度与半径成正比。外边缘上各点的线速度为 $R\omega$ ，内边缘上各点的线速度为 $r\omega$ ，圆环沿半径方向的部分垂直切割磁力线，其有效长度 $l = R - r$ ，它切割磁力线的平均速度 $\bar{v} = \frac{1}{2}(R\omega + r\omega)$ ，所以平均动生电动势

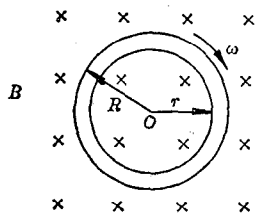


图 1-8

$$\mathcal{E} = Bl\bar{v} = B(R-r) \times \frac{1}{2}\omega(R+r) = \frac{1}{2}B\omega(R^2 - r^2),$$

应用右手定则可以判断动生电动势的方向由圆环内边缘沿着半径指向外边缘，圆环外边缘的电势比内边缘的电势高，外边缘相当于电源的正极，内边缘相当于负极。

三、电磁感应现象中的能量转换

电阻为 R 的矩形线框 $abcd$ ，沿垂直于磁场方向以速度 v

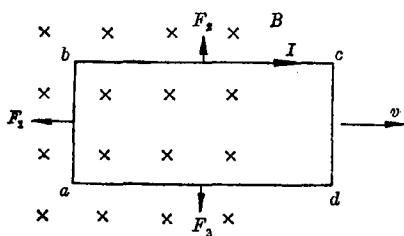


图 1-9

匀速向右运动(图 1-9)。

在线框的运动过程中，只有 ab 边作切割磁力线运动，若 ab 边长为 l ，则 ab 边产生的动生电动势为

$$\mathcal{E} = Blv。$$

线框中感生电流的大小 $I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{Blv}{R}$ ，方向如图 1-9 所示。通电线框各边分别受到安培力 F_1 、 F_2 和 F_3 的作用，其中 F_2 与 F_3 大小相等，方向相反，互相平衡，只有作用于 ab 段的力 F_1 阻碍线框向右运动，它的大小是 $F_1 = IlB = \left(\frac{Blv}{R}\right)lB = \frac{B^2 l^2 v}{R}$ 。

要使线框作匀速运动，作用在线框 cd 边上的外力 F 必需等于阻力 F_1 ，即

$$F = F_1 = \frac{B^2 l^2 v}{R}。$$

外力 F 作功的机械功率

$$P_1 = Fv = \frac{B^2 l^2 v^2}{R}。$$

线框中电流作功的功率

$$P_2 = I^2 R = \left(\frac{Blv}{R}\right)^2 R = \frac{B^2 l^2 v^2}{R}。$$

所以

$$P_1 = P_2。$$

以上结果表明外力对线框做功的过程中，机械能转换成电能。

[例题 3] 磁场中有两条平行金属导轨，间距为 l ，导轨上垂直放置两条电阻各为 R 的金属棒 ab 和 cd ，如果不计导轨的电阻和它跟金属棒之间的摩擦。当金属棒 ab 以初速度 v 向右运动时，将会发生什么现象？

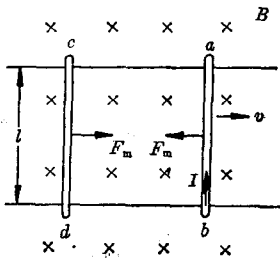


图 1-10

解： ab 作切割磁力线运动而产生动生电动势 $\mathcal{E}_1 = Blv$ 。电路闭合，感生电流 $I = \frac{\mathcal{E}_1}{2R} = \frac{Blv}{2R}$ 。磁场对通电导体 ab 和 cd 的作用力如图 1-10 所示，金属棒 cd 作加速运动，金属棒 ab 作减速运动。由于金属棒 ab 速度逐渐减小，动生电动势 $\mathcal{E}_1$ 随着逐渐减小，而金属棒 cd 从静止出发作切割磁力线运动产生动生电动势 $\mathcal{E}_2$ ， $\mathcal{E}_2$ 随着 v 的增大而逐渐增大，回路里的电流为 $I' = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{2R}$ 。在这期间，金属棒 ab 减少的动能转换为金属棒 cd 的动能和电路中供应电阻消耗的电能。当两者运动速度相等时，它们产生的动生电动势相等， $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = 0$ 。在这瞬间，回路中没有电流，于是 ab 和 cd 所受的安培力为零，两者都作匀速运动。它们两端都保持一定的电势差， $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = Blv$ ，且 a 和 c 是正极， b 和 d 是负极。这时，能量就不再转换。

四、楞次定律

1833年楞次提出了当闭合电路内磁通量变化时产生感生电流的规律。闭合电路内感生电流的方向，总是要使感生电流的磁场阻碍引起感生电流的磁通量的变化。这个规律称为

楞次定律。

应用楞次定律判断感生电流的方向，应首先分析穿过回路的磁通量是怎样变化的？接着考虑阻碍这种变化的磁场的方向是怎样的？最后根据右手螺旋法则决定感生电流的方向。必须指出，当磁通量发生变化时，感生电流的磁场只能“阻碍”而不能阻止这种变化。这是因为磁通量的变化是产生感生电流的必要条件，如果这种变化一旦被阻止，就不能产生感生电流。

使穿过回路的磁通量 ϕ 发生变化的情况可以从式 $\phi = BS$ 中看出，只要 B 或 S 发生变化，就会引起 ϕ 发生变化。大致有以下几种：

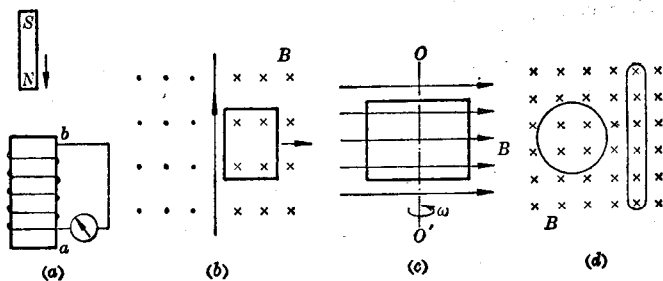


图 1-11

1. 磁棒直接插入线圈，或从线圈中取出，使线圈中的磁通量发生变化[图 1-11(a)]。

2. 磁场位置固定，线圈靠近或远离非均匀分布的磁场，使穿过线圈的磁通量发生变化[图 1-11(b)]。

3. 线圈在均匀磁场中绕固定轴转动，使穿过线圈的磁通量发生变化[图 1-11(c)]。

4. 在磁场中的线圈，因形状发生变化，导致穿过它的

磁通量发生变化[图1-11(d)]。

5. 线圈保持静止, 由于插入、抽出铁芯或邻近电路中的电流变化,

导致穿过线圈的磁通量发生变化(图1-12)。

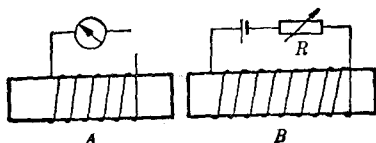


图 1-12

五、法拉第电磁感应定律

法拉第概括和分析了大量的实验结果, 总结出如下的规律: 当回路中磁通量发生变化时, 产生的感应电动势 $\mathcal{E}$ 跟穿过这一回路的磁通量的变化率成正比。这就是法拉第电磁感应定律。如果采用国际单位制, 则此定律可以表示为

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (4)$$

我们把由于回路中磁通量发生变化而产生的感应电动势称为感生电动势。

在实际工作中, 为了获得较大的感生电动势, 常采用多匝线圈。如果线圈是 N 匝, 整个线圈中所产生的感生电动势等于每匝线圈的 N 倍, 即

$$\mathcal{E} = - N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (5)$$

式中的负号反映了感生电动势的方向, 是楞次定律的数学表达式。关于式中的负号与感生电动势 $\mathcal{E}$ 的方向的关系, 可以作如下的说明: 在回路上先任意规定一个沿回路的走向作为回路的正方向, 再用右手螺旋法则根据规定好的回路走向确定此回路平面法线 n 的方向(图1-13)。通过回路面积

的磁通量 ϕ 可正、可负，磁场方向与法线方向相同为正值，磁场方向与法线方向相反为负值。

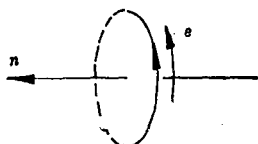


图 1-13

感生电动势 $\mathcal{E}$ 的正、负只由 $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$

决定。当 $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} > 0$ 时， $\mathcal{E} < 0$ ，表

示感生电动势的方向和回路上所

选定的正方向相反；如果 $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} < 0$ ， $\mathcal{E} > 0$ ，表示感生电动势的方向和回路上所选定的正方向相同。用这种方法确定感生电动势的方向和用楞次定律确定的方向完全一致。

[例题 4] 回路平面中的磁感应强度 B 增加或减小时，分析感生电动势的方向与 B 的方向之间的关系。

1. 设 ϕ 为正值， $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} > 0$ ，则 $\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} < 0$ ，感生电动势 $\mathcal{E}$ 的方向与选定的回路的正方向相反（图 1-14）。

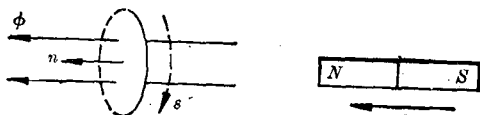


图 1-14

2. 设 ϕ 为正值， $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} < 0$ ，则 $\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} > 0$ ，感生电动势 $\mathcal{E}$ 的方向与选定的回路的正方向相同（图 1-15）。

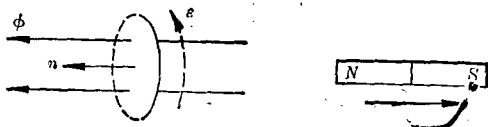


图 1-15

3. 设 ϕ 为负值, $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} < 0$, 则 $\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} > 0$, 感生电

动势 $\mathcal{E}$ 的方向与选定的回路的正方向相同(图 1-16)。

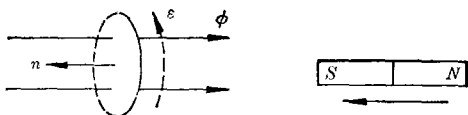


图 1-16

4. ϕ 为负值, $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} > 0$, $\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} < 0$, 感生电动势的

方向与选定的回路的正方向相反(图 1-17)。

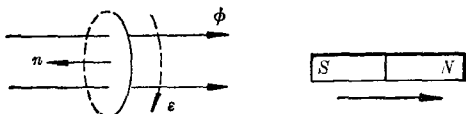


图 1-17

[例题 5] 金属线框围成等腰梯形, 上底 $cd = L_1$, 下底 $ab = L_2$, 高 $O_1O_2 = h$ 。线框沿与两底垂直的方向以均匀速度 v 垂直进入匀强磁场 B 中, 试求进入磁场过程中的感生电动势的平均值。

解: 根据题意, 设 $t=0$ 时, 上底刚进入磁场, 经过时间 $t_h = \frac{h}{v}$ 后完全

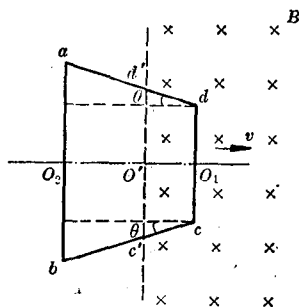


图 1-18

进入磁场, 如在 t 时刻进入磁场部分为梯形 $cc'd'd$ 。 cc' 、 cd 、 dd' 切割磁场的有效长度为 $c'd' = cd + 2 \cdot O_1O_2 \tan \theta$ (图 1-18)。