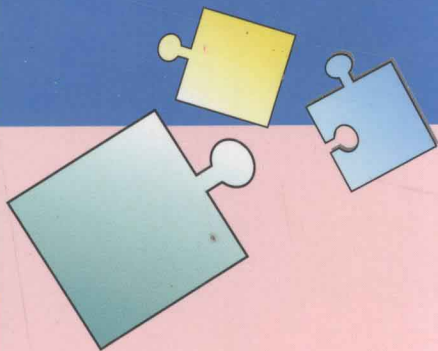


中学物理专题丛书

胡保祥

主编



程 嗣 编著

电磁感应

ZHONGXUE WULI ZHUANTI CONGSHU

湖北教育出版社

6

胡保祥 主编

中学物理专题丛书

江苏工业学院图书馆
藏书章

电磁感应

程嗣 编著

6

湖北教育出版社

(鄂)新登字 02 号

图书在版编目(CIP)数据

电磁感应/程嗣编著. —武汉:湖北教育出版社,2003

(中学物理专题丛书/胡保祥主编)

ISBN 7-5351-3725-3

I. 电… II. 程… III. 电磁感应—中学—教学参考资料
IV. G634.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 035442 号

出版 发行:湖北教育出版社

网址:<http://www.hbedup.com>

武汉市青年路 277 号

邮编:430015 电话:027-83619605

邮购电话:027-83669149

经 销:新 华 书 店

印 刷:文字六〇三厂印刷

(441021·湖北襄樊盛丰路 45 号)

开 本:787mm×1092mm 1/32

7 印张

版 次:2004 年 2 月第 1 版

2004 年 2 月第 1 次印刷

字 数:143 千字

印数:1—8 000

ISBN 7-5351-3725-3/C·3033

定价:9.50 元

如印刷、装订影响阅读,承印厂为你调换

目 录

第一章 电磁感应现象	1
一 电磁感应现象发现的历史	1
二 电磁感应现象	4
第二章 感应电流的方向	18
一 楞次定律	18
二 楞次定律的推广应用	31
三 右手定则	41
第三章 感应电动势	50
一 感应电动势的概念	50
二 感应电动势的大小	57
三 各种感应电动势	69
四 自感	90
五 涡流	102
第四章 电磁感应的应用	107
一 电路	108
二 电磁感应与力学的综合	136
三 电磁感应中的能量守恒	165
四 图象	187
五 电磁感应与实际的联系	202

第一章

电磁感应现象

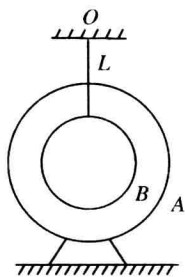
一 电磁感应现象发现的历史

1820年4月,丹麦物理学家奥斯特发现了电流的磁效应后,很多物理学家立即以高度的热情涌入这个新领域.长期以来,人们把电和磁两者彼此独立起来.奥斯特的惊人发现使当时整个科学界受到很大震动,从此揭开了研究电磁联系的序幕.

奥斯特的发现引起了普遍的思考:既然电流能在其周围产生磁效应,那么磁体或电流也应能在附近导线中感应出电流来.但如何从实验中去找到这种前所未有的感应现象却非易事.从1820年到1831年的这段时间内,当时许多著名的科学家如法国的安培、菲涅尔、阿拉果和英国的沃拉斯顿等都纷纷投身于探索磁与电的关系之中.他们用各种很强的磁铁试图产生电流,但均无结果.究其原因,都是由于思想方法上的片面性,受思维定势的负迁移作用影响,他们认为奥斯特的磁效应是一种稳定效应,因此在研究“磁生电”时,也都是从稳定条件出发,而没有考虑动态效果.

在这各种实验中,尤以安培和瑞士物理学家科拉顿所做的实验值得玩味。

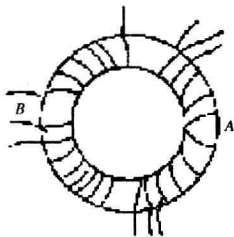
从1820年到1821年,安培做了很多实验,以期能实现“磁生电”,但各个实验都毫无例外地失败了。1822年,为了验证他的分子电流假说,安培又设计了这样一个实验。其实验装置如图所示。A是一个固定在支架上的线圈,它是由很多匝绝缘导线绕成的;B是一个由很细的铜条弯成的铜环,并利用一根穿过线圈的细线L把铜环悬挂于O点,铜环正好同心地悬挂在线圈里面。将一个强磁体放在铜环附近。在未接通电流时,铜环和磁体之间没有相互作用,当线圈中通以电流时发现铜环发生了偏转。安培认为在电流通过线圈时,在铜环中感应出分子电流,铜环被磁化了,铜环的偏转是由于强磁极对磁化了的铜环作用的结果,但他并未发现在铜环中感应出的同轴电流。安培未能发现电磁感应的原因是他把他的分子电流理论看得极为重要,完全被自己的理论囚禁起来了。



1823年,瑞士物理学家科拉顿曾企图用磁铁在线圈中运动获得电流。他用一个线圈与一个检流计连成一个闭合回路。为了使磁铁不至于影响检流计中的小磁针,特意将检流计用长导线连接后放在隔壁的房间里,他用磁棒在线圈中插入或拔出,然后一次又一次地跑到另一房间里去观察检流计是否偏转,当然他观察不到指针的偏转。与发现电磁感应的机会失之交臂,十分可惜。

奥斯特的实验也使法拉第受到极大震动.他认为这个实验“猛然打开了一个科学领域的大门,那里过去是一片漆黑,如今充满了光明”.法拉第从对称性诱发了一连串思考,在1822年的日记里,他提出了大胆设想:“由电产生磁,由磁产生电”,并记下了“感应”这个词.从此开始了长期的艰苦探索.

法拉第最初也是像上述物理学家一样,利用通常的思想方法去进行实验.在10年时间中,他做了大量实验,均以毫无结果而告终,实验没有得到他预想的结果.虽然经受了一系列的失败,但动摇不了他的信念.他坚信电与磁的相互转化,磁一定可以转化为电.正在此时,英国物理学家



斯特金发明了电磁铁.他在一块原来没有磁性的软铁上绕以导线,通电以后,软铁就变成具有了强磁性的磁铁.这一发明对法拉第的进一步研究有一定的启发和帮助.1831年8月29日,法拉第完成了第一次成功的实验.他在如图所示软铁环的A边绕了三个线圈,可以串联起来使用,也可以分开使用.在B边以同样的方向绕了两个线圈.他把B边的线圈接到电流表上,把A边的线圈接到电池组上.他突然想到,每次将与电池接通后才去看指针是否偏转,会不会是电流表放得太远了?法拉第抱着试一试的心情把电流表放在眼前,当电路接通时,法拉第看到电流表的指针立即发生明显的偏转、振荡,然后停止在原来的位置上.这表明线圈B中出现了感应电流.当电路A断开时,他又看到指针向相反方向偏转.把A边的三个线圈串联成一个线圈重做以上实验,对磁针

产生的效应比以前更加强烈.他看到 B 边的感应电流是明显的,又是瞬时的,只在 A 边断开和接上电源时的瞬间产生.法拉第十年磨一剑终告成功.

第一次的发现,使法拉第猛然领悟,由磁感应电的现象是一种暂态效应.他明确了其中的原因后,继续进行了大量的实验,探讨电磁感应现象产生的条件.1831年11月24日,法拉第向英国皇家学会报告了整个实验情况,并把这种现象正式定名为“电磁感应”.

二 电磁感应现象

要学好本节的内容,关键在于明确电磁感应现象产生的条件.

1. 磁通量

(1)定义:穿过某一面积的磁感线条数叫穿过这个面的磁通量.若设匀强磁场的磁感应强度为 B ,在场中有一个与磁场方向垂直的平面,其面积为 S ,则穿过该面的磁通量的定义式为 $\Phi = BS$.

(2)说明:

①上述定义式仅适用于处于匀强磁场中的面(可为平面或曲面,也可为一回路所包围的面).若平面跟磁场方向不垂直,且与磁场方向的平面夹角为 α ,则应作出它在垂直于磁场方向上的投影平面,算出其投影面积 $S_{\perp} = S\sin\alpha$,此时,磁通量为 $\Phi = BS\sin\alpha$.若为非匀强磁场,可以把此面分割成很多

块,使得每小块面积上的磁场是均匀的.应用上式求出每块小面积上的磁通量再求和即可.

$$\begin{aligned} \text{即 } \varphi &= \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 + \Delta\Phi_3 + \cdots \\ &= B_1 \cdot \Delta S_1 \sin\alpha_1 + B_2 \cdot \Delta S_2 \sin\alpha_2 + B_3 \cdot \Delta S_3 \sin\alpha_3 + \cdots \\ &= \sum_i B_i \cdot \Delta S_i \sin\alpha_i. \end{aligned}$$

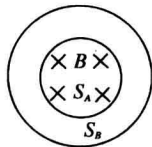
②磁通量为标量,没有方向,但有正负.若规定磁感线从某一个方向穿过该面时磁通量取正值,则当磁感线从反方向穿过该面时,其磁通量就取负值.因此,若空间中有几个磁场,当其磁感线分别从不同方向穿过该面时,即有的磁感线穿入这个面,有的穿出这个面,则这时穿过该面的磁通量应是几个磁场对这个面磁通量的代数和(即应算出磁感线的净剩条数).

③在国际单位制中,磁通量的单位是韦伯,简称韦,符号是 Wb.

④在上述定义式中,若令 $\alpha = 90^\circ$,则有 $B = \frac{\Phi}{S}$,此式表示穿过垂直于磁场方向的单位面积的磁感线条数,所以磁感应强度又叫磁通密度.

⑤由上述定义式知磁通量的决定因素有三个,即该面的面积 S 、磁场的磁感应强度 B 及该面在磁场中的取向 α .因此,判断磁通量是否会变化即应分析这三个量的变化情况.

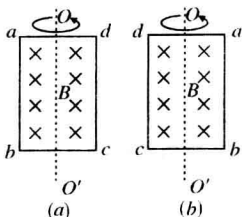
例 1 如图所示,磁感应强度 B 垂直于平面 S_A 和 S_B ,那么,通过平面 S_A 和 S_B 的磁通量的大小关系如何?



分析 按磁通量的定义,穿过某一面积的磁通量大小只与穿过该面积的磁感线条数有关.而面积 S 指完全处在垂直于磁感应强度的磁场中的有效面积.

解 由公式 $\Phi = BS_{\perp}$, 得出 $\Phi_A < \Phi_B$. 其实从图中不难看出穿过平面 S_A 和 S_B 的磁感线条数是相同的, 故 $\Phi_A = \Phi_B$.

例 2 如图(a)所示,在磁感应强度为 B 的匀强磁场中,面积为 S 的闭合线圈 $abcd$ 垂直磁场放置.现将线圈绕对称轴转过 180° , 求这个过程中穿过线圈的磁通量变化量.

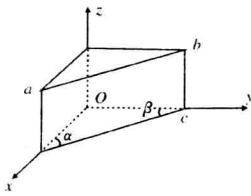


分析 虽然磁通量是标量,但有正负之分.磁感线穿过某一平面,要注意是从哪一面穿入,哪一面穿出.

解 取(b)位置的磁通量为正,则(a)位置的磁通量为负.所以

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = BS - (-BS) = 2BS.$$

例 3 一个矩形线圈 $abcd$ 面积为 S , 如图所示, 放在 $Oxyz$ 直角坐标系内, 线圈平面垂直于 Oxy 平面, 与 Ox 、 Oy 轴的夹角分别为 $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 60^\circ$. 匀强磁场的磁感应强度为 B . 则当磁场方向分别沿 Ox 、 Oy 、 Oz 方向时, 穿过线圈的磁通量各是多少?



分析 解决磁场类习题, 应具备一定的空间想象能力. 本题即是如此. 要注意判断各种情况下线圈的投影面积.

解 由匀强磁场中磁通量的公式 $\Phi = BS\sin\alpha$ (α 为 B 与 S 间的夹角)

得 当磁场方向沿 Ox 方向时,穿过线圈的磁通量

$$\Phi_1 = BS\sin 30^\circ = \frac{1}{2}BS;$$

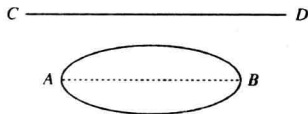
当磁场方向沿 Oy 方向时,穿过线圈的磁通量

$$\Phi_2 = BS\sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}BS;$$

当磁场方向沿 Oz 方向时,因为 $B \parallel S$,所以穿过线圈的磁通量 $\Phi_3 = 0$.

例4 如图所示为一放置在水平面上的圆形线圈, AB 为其直径.在过线圈的竖直平面内有一通电长直导线 CD ,已知 $CD \parallel AB$.当 CD 竖直向上平移时,该电流磁场穿过线圈的磁通量将

- A. 逐渐增大
- B. 逐渐减小
- C. 始终为零
- D. 不为零,但保持不变

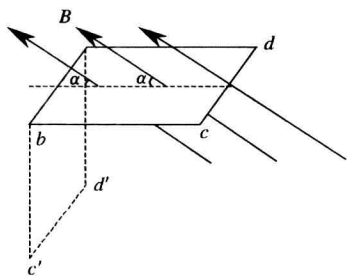


分析 注意磁感线是闭合曲线,将从不同方向穿过回路,其磁通量为代数和.

解 通电导线产生的磁场的磁感线从 AB 的一侧穿入圆面,从 AB 的另一侧穿出圆面,由磁感线的封闭性和直线电流磁场的对称性知穿过线圈的磁通量为零即穿过线圈的磁感线净剩条数为零,所以 C 项正确.

例5 如图所示,面积为 S 的矩形线圈 $abcd$,处于磁感应

强度为 B 的匀强磁场中, 磁场方向与线圈平面成 α 角, 当线圈以 ab 为轴顺时针方向转过 90° 时, $abcd$ 面的磁通量变化量 $\Delta\Phi$ 为



- A. $BS\cos\alpha$
 B. $-BS(\sin\alpha + \cos\alpha)$
 C. $BS\sin\alpha$ D. BS

分析 将磁感应强度 B 沿平行于线圈平面方向和垂直于线圈平面方向分解, 穿过线圈的磁通量由垂直于线圈平面的分量决定. 并且要注意此过程中磁感线的穿行方向. 不妨把图中的 $abcd$ 的上、下两个面称为上表面和下表面. 则在从开始到线圈平面与磁感应强度平行的过程中, 磁感线从图中线圈 $abcd$ 的下表面穿入, 从上表面穿出; 而在后续过程中, 磁感线从 $abcd$ 的上表面穿入, 从下表面穿出.

解 开始时磁感应强度 B 与线圈平面成 α 角, 其垂直于 S 的分量为 $B\sin\alpha$, 因此初态磁通量 $\Phi_1 = BS\sin\alpha$; 转过 90° 即末态时磁感应强度 B 在垂直于 S 方向上的分量为 $B\cos\alpha$, 磁通量为负值, $\Phi_2 = -BS\cos\alpha$.

所以, 磁通量的变化量 $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = -BS\cos\alpha - BS\sin\alpha$. 故应选 B 项.

例 6 用一根长 L 的导线组成一个怎样的线圈, 如何放置, 在磁感应强度一定的磁场中可使穿过该线圈的磁通量最大?

分析 可根据磁通量的计算公式和几何图形中周长与面积的关系得出。

解 根据磁通量公式 $\Phi = BS_{\perp}$. 当 B 一定时, S_{\perp} 越大, 磁通量 Φ 也越大。

因为在一定周长的几何图形中, 圆的面积最大, 所以应把这根导线绕成单匝的圆线圈。

由 $L = 2\pi R$, 得 $R = \frac{L}{2\pi}$, 所以面积 $S = \pi R^2 = \frac{L^2}{4\pi}$ 。

这个圆线圈应垂直磁场放置, 得到的最大磁通量为 $\Phi = BS = \frac{BL^2}{4\pi}$ 。

2. 电磁感应现象

电磁感应现象: 利用磁场产生电流的现象。

(1) 产生感应电流的条件

产生感应电流的条件有两种说法:

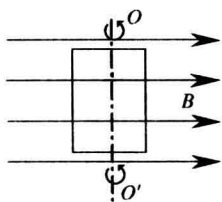
- ① 闭合电路的一部分导体在磁场中做切割磁感线运动;
- ② 穿过闭合电路的磁通量发生变化。

(2) 对产生感应电流的条件理解:

① 上述条件的两种形式具有统一性。这种统一性是特殊性和普遍性的关系, 即穿过闭合电路的磁通量发生变化是产生感应电流的普遍条件, 而闭合电路的一部分导体在磁场中做切割磁感线运动则是引起闭合电路的磁通量发生变化的具体方法之一。且要注意, 闭合电路的部分导体做切割磁感线运动时, 不一定总会引起闭合电路的磁通量发生变化。

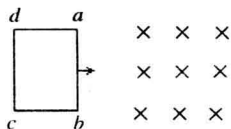
② 关键要注意“闭合”与“变化”两词。就是说在闭合电路

中有磁通量穿过但不变化,即使磁场很强,磁通量很大,也不会产生感应电流.当然电路若不闭合,也不可能产生电流.磁通量发生变化,可以是闭合电路所包围的面积(实为垂直于磁场方向的投影面积)不变,磁感应强度发生变化;磁



感应强度不变化,但闭合电路包围的面积发生变化;磁感应强度和闭合电路包围的面积同时发生变化.如闭合线圈绕 OO' 轴转动,在某一时刻线圈平面与匀强磁场方向平行如图所示时,穿过闭合电路中的磁通量在此时刻为零,但此过程中磁通量正在增加.因此,是否产生感应电流与穿过闭合电路中有无磁通量无关,只与穿过闭合电路中的磁通量变化有关.电磁感应现象是极为丰富复杂的现象.在整块导体中也能产生感应电流.这时,我们可把整块导体看成由许多回路组成或许多导线组成.

③导体做切割磁感线运动时,必须突出“一部分导体”.例如,如图中所示线框 $abcd$ 向右运动,在 ab 边



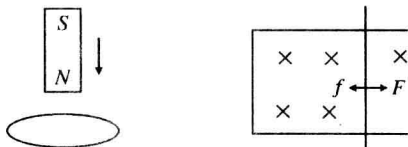
进入磁场时,线框中仅有 ab 这一部分导体切割磁感线,框内会有感应电流.一旦整个线框全部进入磁场继续向右运动时,框内的磁通量不再变化,也就没有感应电流.所以,根本的是抓住磁通量有无变化来判断.

总之,穿过闭合电路的磁通量发生变化的说法与闭合电路的一部分导体在磁场中做切割磁感线运动的说法比较,更能反映电磁感应现象的本质,更具有普遍性.但是,如果电路

断开而磁通量发生变化,又有什么情况发生呢?这个问题我们将在后续章节里讨论.

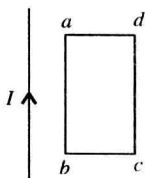
3. 电磁感应现象的实质

电磁感应现象的实质是其他形式的能量转化为电能的过程.



如图所示,把磁铁靠近线圈时,线圈中将激起感应电流,此电流做功,将消耗电能;而外力移动磁铁将做功,从而消耗机械能.所以产生的电能是从机械能转化而来的.同理,如图所示,用外力 F 移动放在金属框架上的导体时,导体切割磁感线,在导体中激起的感应电流,同样将消耗电能,这也是通过外力 F 做功,由机械能转化而来.所以,电磁感应是一种将其其他形式的能量转化为电能的过程.

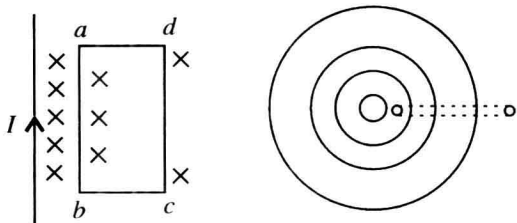
例7 如图所示,竖直放置的长直导线通以恒定电流,有一个可以自由运动的矩形线框与导线在同一平面,在下列情况中线框中产生感应电流的是



- A. 导线中电流变大
- B. 线框向右平动
- C. 线框向下平动
- D. 线框以直导线为轴转动

分析 是否产生感应电流,关键就是分析穿过闭合线框

的磁通量是否在变化,而分析磁通量是否有变化,关键是分清磁感线的分布,亦即分清磁感线的疏密变化和磁感线方向的变化.



解 对于 A 选项,因 I 增大而引起导线周围的磁场增强,使线框的磁通量增大,所以 A 选项正确;对于 B 选项,因离开直导线方向越远,磁感线分布越稀疏(如图),因此线框向右平动时,穿过线框的磁通量变小,故 B 项正确;对于 C 选项,由于线框向下平动时穿过线框磁通量不变,故 C 项错误;对于 D 选项,先画出俯视图如图所示,由图中可以看出线框绕直导线转动(并非以 ab 边为轴)时,在任何位置穿过它的磁感线条数不变,因此无感应电流,故 D 项错误. 正确答案是 A、B.

例 8 在下列几种情况中,线圈中是否产生感应电流?为什么?

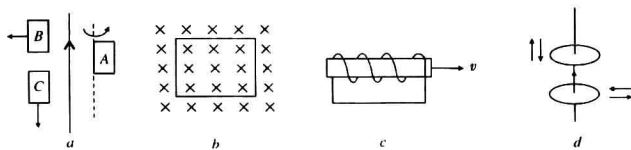
(1)如图(a),矩形线圈在长直电流的磁场中匀速平动或匀速转动时;

(2)如图(b),矩形线圈在足够大的匀强磁场中:①向任意方向平动;②以任意一边为轴匀速转动时;③以平行磁感线的某一点为轴在纸面上匀速转动时;

(3)如图(c)所示,磁铁放在螺线管内与螺线管以同一速

度运动时。

(4)如图(d),圆形线圈在长直电流的磁场中在竖直方向上、下平移或在水平面内左、右平移时。



分析 注意线圈的运动情况和磁场的磁感线分布。

解 (1) A 、 B 线圈中均有感应电流,因长直电流周围的磁场是非均匀的,这两种运动状态使穿过线圈的磁通量均发生变化, C 线圈是在与长直电流等距处发生平动,因而穿过 C 线圈的磁通量不发生变化。

(2)由任意方向平动,穿过线圈的磁通量不发生变化,所以没有感应电流产生;以任意一条边为轴匀速转动时,穿过线圈的磁通量发生变化,有感应电流产生;以平行磁感线的某一点为轴,在纸面内绕轴匀速转动,穿过线圈的磁通量不发生变化,线圈中没有感应电流。

(3)磁铁和螺线管以同一速度运动时,磁铁和螺线管处于相对静止,穿过螺线管的磁通量不发生变化,无感应电流产生。

(4)这两种运动过程均不产生感应电流,因为直线电流的磁场的磁感线应是一组一组的以导线为圆心的同心圆,每组磁感线所构成的同心圆平面,均与导线相垂直,因而这两种运动没有磁感线穿过线圈,磁通量始终为零,不发生变化,因此无感应电流产生。