

电学

中册

华中师范学院物理系
电学教研室编

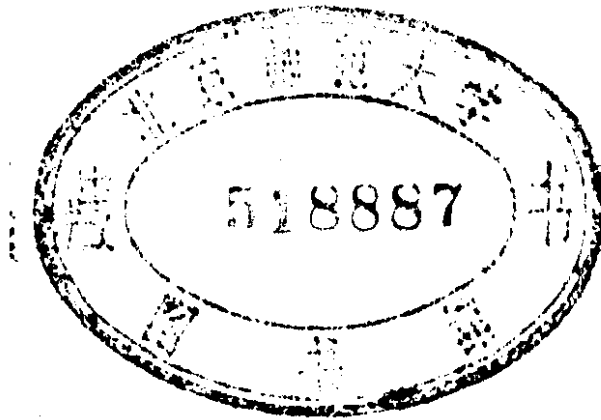
人民教育出版社

电 学

中 册

华中师范学院物理系
电学教研室编

1911/60/06



人民教育出版社

1976年·北京

电 学

中 册

华中师范学院物理系电学教研室编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

1976年3月第1版 1976年11月第1次印刷

书号 13012·029 定价 0.68 元

关于本书所用文字符号的说明

本书所用文字符号,除国际通用者外,均根据1964年颁布的中华人民共和国国家标准 GB315-64《电工设备文字符号编制通则》所规定的原则,采用了我国汉语拼音字母。为了便于识别起见,凡是采用汉语拼音字母的下标符号,均以小写斜体字表示。兹将本书所用汉语拼音字母下标的意义列表说明如下(上册已经出现过的符号,这里就不重复了):

符 号	意 义	符 号	意 义
A_{cl}	测量值	R_{fz}	负载电阻
C_b	标准电容	S_e	额定容量
I_w	涡流	U_z	正向电压
I_z	正向电流	U_f	反向电压
I_f	反向电流	$U_{\alpha a}$	相电压
$I_{\alpha a}$	相电流	U_x	线电压
I_x	线电流	U_{sc}	输出电压
k_x	线电压比例系数	U_{sr}	输入电压
$k_{\alpha a}$	相电压比例系数	β_e	相对额定误差
M_{pj}	平均转矩	τ_{cd}	充电时间常数
M_z	制动力矩	τ_{fd}	放电时间常数
P_e	额定功率	Φ_{1l}	原边漏磁通
R_n	内阻		

目 录

第三章 交流电	1
§ 3-1 电磁感应	1
(一) 电磁感应现象	1
(二) 电磁感应定律	5
§ 3-2 正弦交流电 正弦交流电的矢量表示法	9
(一) 正弦交流电的产生	9
(二) 正弦交流电的三要素	12
(三) 相位差	16
(四) 正弦交流电的矢量表示法	20
实验一 交流电路的电流、电压的研究	22
§ 3-3 含电阻和电感的交流电路	25
(一) 纯电阻电路 交流电的有效值	26
(二) 电感 纯电感电路	30
(三) 电感与电阻串联电路 感抗与阻抗	35
§ 3-4 含电容的交流电路 电功率	41
(一) 纯电容电路	41
(二) $R-L-C$ 串联电路 电压谐振	45
(三) 交流电路的功率	52
§ 3-5 变压器	55
(一) 变压器的运行规律	57
(二) 变压器的运行性能	69
(三) 变压器的构造	72
实习 小型电力变压器的简单计算与绕制	75
(四) 几种特殊用途的变压器	82

(五) 互感	88
(六) 感应圈	91
§ 3-6 复数表示法 等效复阻抗	93
(一) 复数及其运算	93
(二) 交流电的复数表示法	100
(三) 等效复阻抗	105
§ 3-7 功率因数的提高 并联谐振	114
(一) 并联谐振	114
(二) 功率因数的提高	117
实验二 功率因数的提高	120
§ 3-8 三相交流电路	122
(一) 三相电动势的产生	122
(二) 三相电源绕组的连接法	124
(三) 三相负载的连接法	128
(四) 三相电路的功率	135
实验三 三相负载的连接	139
(五) 三相变压器	142
§ 3-9 电工测量	146
(一) 电磁式电流、电压表	150
(二) 电动式瓦特表	152
(三) 感应式电度表	157
(四) 兆欧表	162
(五) 电动式频率表	164
(六) 测电容和电感的交流电桥	166
§ 3-10 交流电的整流与滤波	171
(一) 半导体二极管的单向导电性	172
(二) 单相半波电阻负载整流电路	173
(三) 单相全波电阻负载整流电路	176
(四) 单相桥式电阻负载整流电路	178
实验四 万用电表交流电压档的分析计算与安装	181

(五) 三相桥式电阻负载整流电路	184
(六) 整流元件的串联与并联	188
(七) 倍压整流电路	189
(八) 滤波器	192
第三章习题	199
附 交流电路小结	

第三章 交流电

§ 3-1 电磁感应

本书上册讨论了一些电现象和磁现象的基本规律，并且通过磁场和电流相互作用规律的学习，了解到磁和电是矛盾的两个方面，彼此互相依存互相矛盾，又依据一定的条件各向着其相反的方面转化。电和磁的对立统一现象在生产实际中得到了广泛运用，因此进一步掌握电和磁这个矛盾的相互联系和相互转化的规律是十分重要的。本节中我们讨论反映电和磁相互转化的重要规律——电磁感应定律。发电机、变压器等工农业生产中的常用设备，就是应用电磁感应原理制成的。

“认识从实践始”。首先让我们分析实验现象，从研究交流发电机和变压器中的电磁感应现象入手，从中归纳总结出电磁感应定律。

(一) 电磁感应现象

(1) 交流发电机中的电磁感应现象

工农业生产和日常生活中广泛应用的交流电多是交流发电机产生的。图 3-1-1 是两极交流发电机结构示意图。在固定的两个磁极(电磁铁) N 、 S 之间产生磁场。线圈紧绕在一个圆柱铁心上(图中只画了一匝)，铁心与线圈相互绝缘。铁心与线圈合称电枢，由原动机拖动而在磁极之间旋转(例如，图示方向)。线圈的 a 、 d

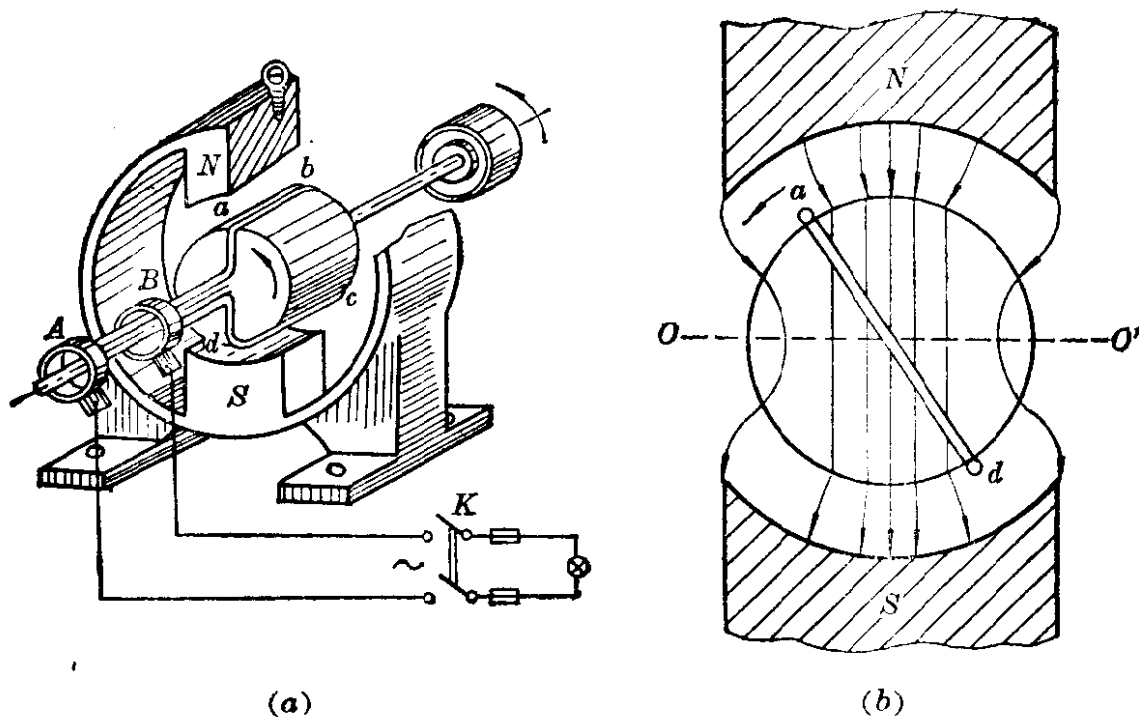


图 3-1-1

两端分别与铜质滑环 A 、 B 相连。 A 、 B 两个滑环叫集流环，它们绝缘固定在转轴上并与电枢一起转动，而且转动时集流环又各自和两个通外电路的固定电刷保持接触。这样，通过线圈、集流环、电刷、外电路和负载（图中是一个灯泡）构成回路。图 3-1-1(b) 是磁极和电枢的简化正视图。图中画出了从 N 极发出并穿过电枢铁心后进入 S 极的磁力线分布概况。磁力线处处都与铁心的表面垂直。

实践表明，当原动机带动电枢转动时，如果使开关 K 接通，电灯泡就亮了。这说明，线圈内产生了电动势，因而回路中有电流。当电枢不转动时，灯泡就熄了，说明线圈内无电动势，回路中没有电流。可见导体在磁场中运动时，导体中有产生电动势的可能。但是否导体在磁场中作任何运动，导体中都会产生电动势呢？图 3-1-2(a) 所示的实验说明并非如此。图中线圈的一个直线边 ab 处于均匀磁场 B 中（其余部分在磁场外面），线圈的两端串联一个灵敏电流计。当直线边 ab 沿着与磁场 B 平行的方向[如图 3-1-2(a)

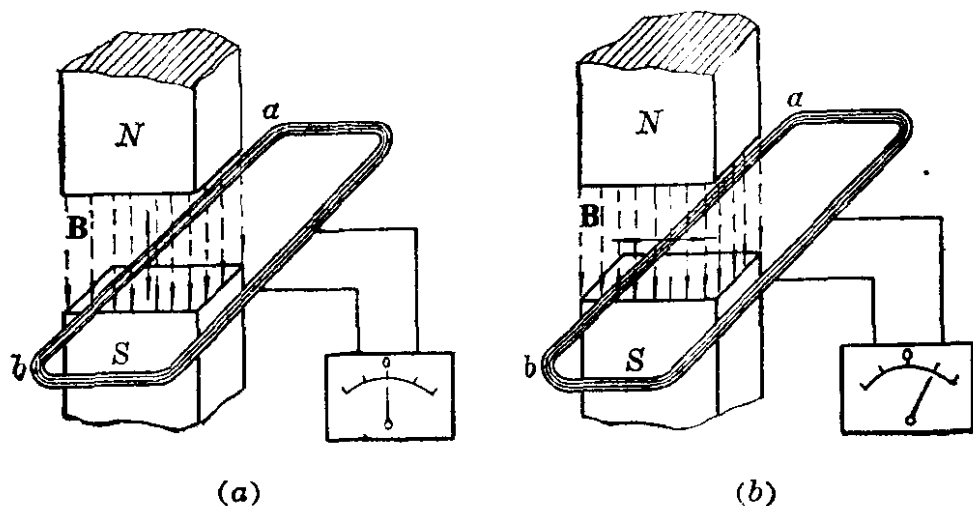


图 3-1-2

中实线箭头所示方向]运动, 电流计的指针不摆动, 这说明线圈中没有产生感应电动势, 回路中无电流。当线圈的直线边 ab 沿其它方向[如图 3-1-2(b)所示的实线箭头方向]运动时, 电流计的指针就摆动, 这说明线圈中有感应电动势产生, 回路中有电流。而且当线圈沿着与磁场垂直的方向运动时, 电流计的指针偏转最大, 这说明线圈中产生的电动势最大。上述实验证明, 只有导体在磁场中沿切割磁力线的方向运动, 导体中才会产生电动势。如果把导体连成闭合回路, 回路中就会有电流。这种现象称为电磁感应现象, 这样产生的电动势, 称为感应电动势, 产生的电流称为感应电流。电磁感应是交流发电机发电的基本原理。

如果在上述图 3-1-2(a) 所示的实验中, 使线圈固定不动, 而让产生磁场的电磁铁运动, 同样, 只要线圈不断切割磁力线, 线圈中就有感应电动势产生, 回路中就有电流, 电流计的指针就有偏转。发电机就是靠线圈和磁铁作相对运动, 使线圈切割磁力线产生感应电动势而发出电来。根据转动部分的不同, 发电机可分为两大类: 一类是转动电枢式, 这类发电机的磁极固定, 线圈部分转动。小型发电机多采用转动电枢式。另一类是转动磁极式, 这类发电机的线圈固定, 磁极转动。大型发电机均采用转动磁极式, 有

的小型发电机也采用转动磁极式。

(2) 变压器中的电磁感应现象

上面我们看到了,当磁极和线圈有相对运动时,会发生电磁感应现象,产生感应电动势。其实电磁感应并不限于靠这种方式产生,实际中还可以看到,尽管磁铁和导体不存在相对运动,却仍然发生电磁感应现象。变压器就是一种常见的例子。

图 3-1-3 是一个变压器的示意图。在铁心 T 的左方绕有原线圈 I, 右方绕有副线圈 II。图中原线圈与直流分压线路相接,副线圈与电流计 G 相接。

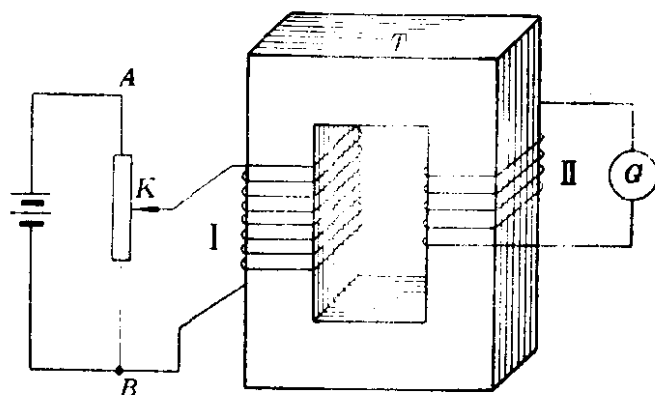


图 3-1-3

实验表明,让分压滑动触点 K 以一定速度由 B 向 A 方向滑动,使原线圈中的电流不断增加,这时电流计 G 的指针会发生偏转。电流计指针的偏转说明副线圈中产生了电动势,这个电动势在副线圈 II 和电流计 G 组成的回路中产生了电流。触点 K 一停止滑动,电流计的指针就回到零,说明副线圈中没有电动势了。如果把滑动触点 K 由 A 向 B 方向滑动,使原线圈中的电流由大变小,电流计的指针也会发生偏转,但是偏转的方向与前相反。由此可见,只要原线圈中的电流发生变化,副线圈中就有电动势产生,它的方向与原线圈中电流的增减趋势有关。副线圈与原线圈没有直接的连接,为什么原线圈中的电流变化,会在副线圈中产生电动势呢?

我们知道,当原线圈通电流之后,其周围产生磁场。由于铁心的作用,这个磁场会得到加强并集中在铁心内部,使铁心里产生了一定的磁通。原线圈中电流强度不断变化时,铁心里的磁通也随之不断变化。虽然副线圈和原线圈没有电的连接,但是铁心里的

磁通穿过了副线圈而使两个线圈彼此联系起来。电与磁的关系，本来就是两个对立物的统一。副线圈中电(电动势)的产生，是由于穿过它的磁(磁通)转化而来的。转化的条件就是穿过副线圈的磁通要不断地变化。如果磁通不变化，这种转化就不能实现。这种由于原线圈中电流的变化而在副线圈中产生电动势的现象，也是电磁感应现象。

发电机中，由于线圈和磁铁之间的相对运动引起电磁感应；变压器中，由于原线圈中电流的变化引起电磁感应。上述两种情况，产生电磁感应的关键均在于穿过线圈的磁通发生变化，而不在于磁通本身和磁通的变化是用什么方式产生的。在转动电枢式发电机中是磁极固定线圈转动，从而引起通过线圈的磁通变化；在转动磁极式发电机中是线圈固定磁极转动，磁场的方向不断变化，使穿过线圈的磁通变化；在变压器中是线圈固定，而原线圈中电流不断变化，从而引起穿过副线圈的磁通变化。因此，只要线圈中磁通发生变化，都要发生电磁感应现象。

(二) 电磁感应定律

在了解了电磁感应现象的基本特点以后，我们再来分析一个线圈中感应电动势的大小和方向，与穿过这个线圈的磁通的变化之间的定量关系。发电机[参见图 3-1-1(a)]的线圈转动越快，也就是穿过线圈磁通的变化越大，灯泡就越亮，说明线圈中产生的感应电动势越大。变压器的演示实验中(如图 3-1-3 所示)，触点 K 滑动越快，即原线圈中电流变化越快，副线圈中电流计指针的偏转就越大，说明穿过副线圈的磁通变化越快，而导致感应电动势越大。分析上述两个实验，以及总结大量电磁感应实验的结果，得出了电磁感应定律^①：导体回路中的感应电动势 e 与通过这个回路

^① 又称为法拉第电磁感应定律。

的磁通量的变化率 $\frac{d\Phi}{dt}$ 的负值成正比。如果磁通变化率以韦/秒为单位, 电动势以伏为单位, 则此定律可写成:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3-1-1)$$

式中的负号反映了感应电动势的方向。

关于上式中负号与感应电动势 e 的方向的关系, 可以这样来说明, 设线圈 L 中有磁

通 Φ 穿过, 如图 3-1-4 所示。当穿过线圈的磁

通 Φ 增加时 (图 a), 即

磁通变化率为正, $\frac{d\Phi}{dt}$

>0 , 按式 (3-1-1), 这时

在线圈 L 中产生的感应

电动势 $e = -\frac{d\Phi}{dt} < 0$,

其值为负, 说明感应电动势是沿线圈 L 的这样一个方向: 在感应电

动势的作用下, 所产生的感应电流的磁场要与原来磁通 Φ 的方向

相反。当穿过线圈的磁通 Φ 减小时 (图 b), 即磁通变化率为负,

$\frac{d\Phi}{dt} < 0$, 这时按式 (3-1-1), $e = -\frac{d\Phi}{dt} > 0$, 即为正值, 说明感应电

动势是沿线圈 L 的另一个方向, 即在感应电动势的作用下所产生的

的感应电流的磁场要与原来磁通 Φ 的方向相同。

从上面的讨论中我们看到, 当穿过线圈的磁通增长时, 感应电

流的磁场与原磁通的方向相反, 即阻碍着原磁通的增长; 而当穿过

线圈的磁通减少时, 感应电流的磁场又与原磁通的方向相同, 即阻

碍着原磁通的减少。由此我们可以得出结论: 电磁感应过程中的

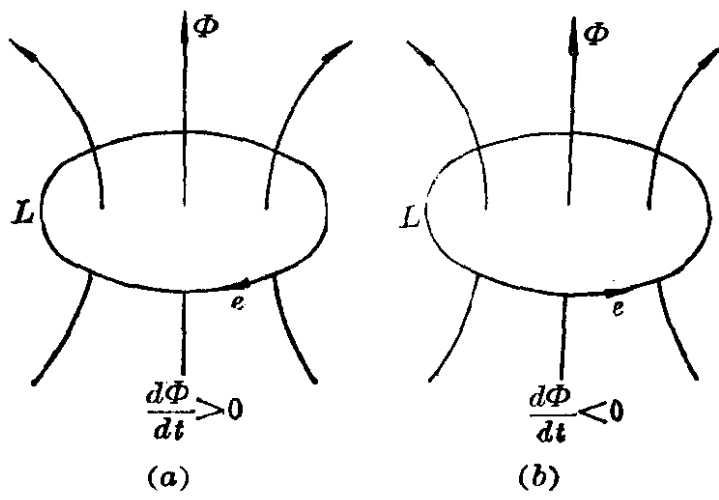


图 3-1-4

感应电流的磁场总是阻碍原磁场的变化，这就是通常所称的楞次定律。根据这个定律，可以用右手螺旋法则来判定感应电动势的方向。右手螺旋法则是：磁通增长时，用右手大拇指指向磁通相反的方向（表示阻碍增长），弯曲其它四指所指的方向就是感应电流的方向，也就是感应电动势的方向。磁通减少时，就用右手大拇指指向磁通相同的方向（表示阻碍减少），那么弯曲其它四指所指的方向就是感应电流的方向，也就是感应电动势的方向。总之，把右手大拇指指向磁场及变化的方向，弯曲的四指所指的方向就是感应电动势的方向。这里必须注意“阻碍”磁通的变化并不是“完全阻止”磁通的变化，磁通的变化是引起感应电流的外因，感应电流的效果只是企图阻碍或减弱这个变化，而不能完全阻止它，如果这一变化完全被阻止，则感应电流就不会继续产生。

例 1 图 3-1-5 中，线圈 A 中的电键闭合或断开时，试确定线圈 B 中感应电动势的方向（请读者自行分析）。

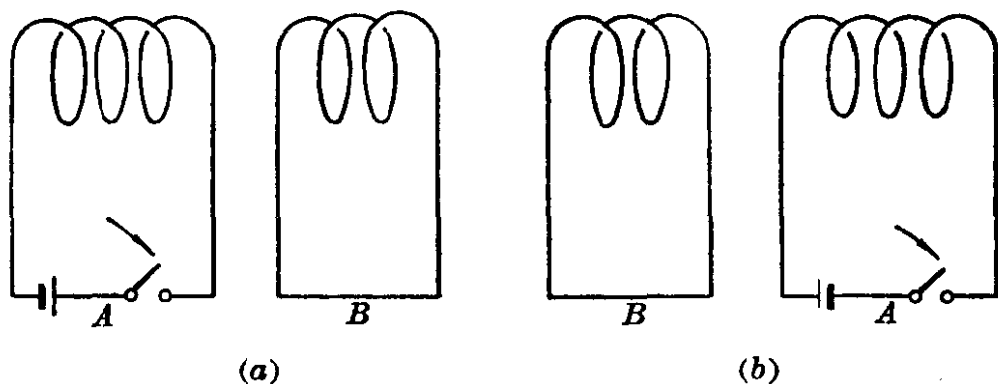


图 3-1-5

圈 B 中感应电动势的方向（请读者自行分析）。

例 2 有一个 $N=100$ 匝的密绕螺线管，处于均匀磁场 $B=0.4$ 韦/米² 中，且 B 的方向平行于螺线管的轴线，如图 3-1-6 所示。设螺线管的截面积 $S=5$ 厘米²。若使 B 在 0.05 秒内减少到零，求螺线管线圈中产生的感应电动势的大小和方向。

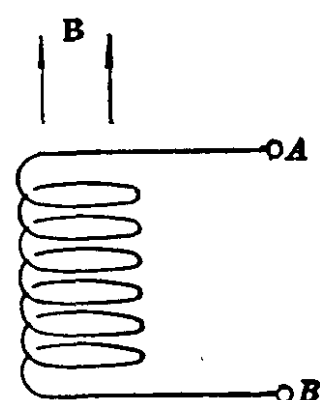


图 3-1-6

解 根据电磁感应定律, 每一匝线圈的感应电动势为 $-\frac{d\Phi}{dt}$, 那么 N 匝线圈的感应电动势为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3-1-2)$$

通过螺线管中的磁通为

$$\Phi = BS$$

所以

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt}$$

若把 0.05 秒内 B 的变化近似地看成均匀的, 那么

$$\begin{aligned} e &= -100 \times (5 \times 10^{-4} \text{米}^2) \times \frac{(0-0.4) \text{韦/米}^2}{0.05 \text{秒}} \\ &= 0.4 \text{V} \end{aligned}$$

根据楞次定律, 感应电流的磁场要阻碍磁通的减少, 可以判定线圈内感应电动势的方向是由 B 到 A 。

例 3 电子计算机中作为存储元件的环形磁心 (如图 3-1-7 所示), 用矩形磁滞回线的铁氧体材料制成 (参见本书上册图 2-5-8)。回路 1 中的脉冲电流 I 使磁心由原来已被磁化的 $+B_s$ 剩磁状态翻转到 $-B_s$ 的剩磁状态。试估计在这磁化状态的翻转过程中, 回路 2 中产生的感应电动势。已知 $B_s = 1700$ 高, 翻转时间 $\tau = 0.45$ 微秒。

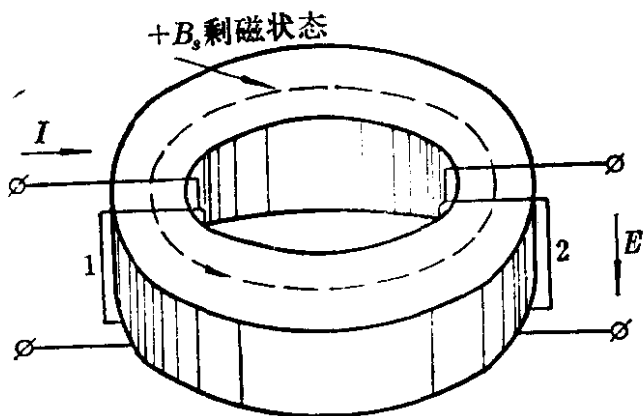


图 3-1-7

解 由于磁性材料的导磁性很强, 可以认为磁场全部均匀地集中在环形磁心中。剩磁为 B_s 时, 则穿过回路 2 的磁通为 $B_s S$, 其中 S 是环形磁心的截面积。当剩磁状态翻转时, 磁通改变到 $-B_s S$ 。

考虑到材料磁滞回线是矩形，因此在 τ 秒内磁通的改变量即为 $2B_s S$ ，故

$$e = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \frac{2B_s S}{\tau} = \frac{2 \times (0.17 \text{ 韦/米}^2) \times (0.15 \times 0.3 \times 10^{-6} \text{ 米}^2)}{0.45 \times 10^{-6} \text{ 秒}} \\ = 34 \times 10^{-3} \text{ V} = 34 \text{ mV}$$

感应电动势 e 的方向可用楞次定律确定，如图所示的方向。如果原来磁心中的剩磁为 $-B_s$ (与图中所示方向相反)，当回路 1 中仍通以如图所示的方向的脉冲电流时，由于磁心已达饱和，因此磁心中的磁感应强度仍为 $-B_s$ ，磁化状态不能翻转，磁通没有发生变化，回路 2 中没有感应电动势产生。所以通过 e 的测量，便可把原来“记忆”在磁心中的磁化状态“读出来”。

§ 3-2 正弦交流电 正弦交流电的矢量表示法

在生产实践中，应用得最广泛的电源是交流电源。例如一般照明用的是单相交流电源。机床运转，电力排灌等则要用三相交流电源。在电视和雷达的发送中，要用到高频交流电源。与直流电不同，交流电路中的电流和电压的大小和方向都随时间不断地变化。交流电随时间变化的形式有各种各样，不同形式的交流电应用范围各不相同。由于正弦交流电在生产中应用最广泛，而且其它形式的交流电，一般都可以用数学方法化成很多正弦交流电之和，因此，我们主要研究正弦交流电。这一节中，将着重讨论正弦交流电的产生、特征及其矢量表示法。

(一) 正弦交流电的产生

利用电磁感应是交流发电机发电的基本原理。现在我们根据电磁感应的普遍规律来讨论交流发电机产生的感应电动势，以及由此引起的感应电流随时间变化的规律。为此，先来分析由图 3-

1-1 所示的交流发电机产生的电动势的特征。当原动机带动线圈(电枢)等速旋转时,线圈中产生的感应电动势 e 的大小如何随时间而改变呢?为此,来计算在电枢转动时通过线圈的磁通的变化率是多少。假定开始时,线圈在如图 3-2-1 所示的实线位置,经过 Δt 的时间后转到图中虚线所示的位置。从图中可以看出,有一些原先没有穿过这匝线圈的磁力线,在 Δt 时间之后穿过了这个线圈,如图中第 7 和第 8 条,以及第 2 和第 3 条(为了形象化地说明问题,图中仅仅画出很少几条磁力线)。 Δt 时间内穿过线圈的磁力线增加了多少呢?从近 N 极的一边来看,增加的磁力线

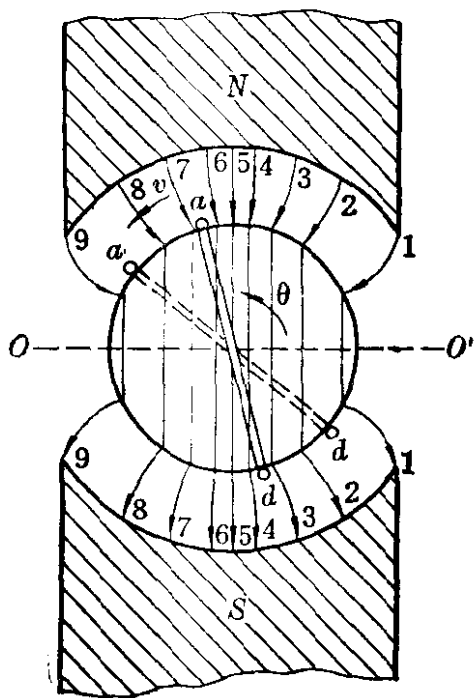


图 3-2-1

即穿过导线 ab (参见图 3-1-1)在转动 Δt 的时间内所扫过的面积 $\Delta S_1 = lv\Delta t$ 的那些磁力线,式中 l 和 v 是导线 ab 的长度和运动速度。设磁极与铁心间隙之间的磁感应强度为 B ,那么穿过 ΔS_1 的磁力线是 $\Delta S_1 B = Blv\Delta t$ 条。从近 S 极的一边来看,在转动 Δt 时间内,穿过导线 cd 所扫过的面积的那些磁力线,也是 $Blv\Delta t$ 条。于是在 Δt 时间内,穿过这匝线圈的磁力线增加了 $\Delta\Phi = 2Blv\Delta t$ 条。

由此可见,在电枢旋转时,穿过线圈匝中磁力线的增长率是 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} =$

$2Blv$ 。根据电磁感应定律, $e = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right|$, 所以线圈中的感应电动势的大小是:

$$e = 2Blv \quad (3-2-1)$$

如果 B 用韦/米², l 用米, v 用米/秒为单位,则 e 的单位是伏。

一段在磁场里运动的直导线中感应电动势的方向,可以用右