

第一篇 电工技术基础

第一章 电场、磁场与电磁感应

1.1 电场和电场强度

1.1.1 电荷

自然界中任何物质都由分子组成，而各种分子又都由原子组成。原子则由原子核以及围绕它按照一定轨道不停地高速旋转的电子组成。原子核由带正电荷的质子和不带电的中子组成，电子是带负电荷的（一个电子的电量是 1.6×10^{-19} 库仑）质子数和电子数是相等的，故原子不显电性而呈中性。由于原子核带正电，故对外层电子具有束缚力，在无外界影响情况下，电子只能在它的轨道上运行，而不能脱离它的轨道。

原子核外的电子可以只有一层，也可以有几层，各层的最多电子数都符合 $2n^2$ 规律，其中 n 是由原子核算起的电子层的层次，如 n 为1，则第一层电子层的电子为2个，如 n 为2，则第二层电子层的层电子为8个，如 n 为3，则第三层电子层的电子为18个，……，但最外层电子层的电子数不得超过8个。见图1-1。

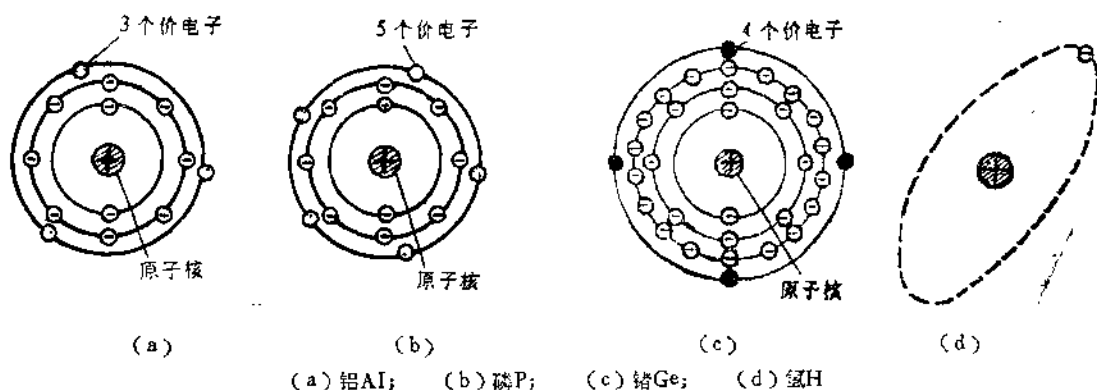


图1-1 几种原子的结构示意图

如铜的原子序是29，即第一层电子2个，第二层8个，第三层18个，第四层1个。（图1-2）。

某些原子最外层的电子不仅较少(1~3个),而且受原子核的束缚力最小,因而在外界某些因素(如电场作用)影响下,容易脱离最外层轨道即摆脱原子核的束缚,而成为不受束缚的自由电子。失去电子的原子的质子和电子的平衡被打破,因而显正电性,叫正离子,如果通过某种方法(如摩擦或静电感应)使原子获得电子,原子就呈负电性,叫负离子。原子本身的电子,只能从一个物体转移到其他物体,既不能创造也不能消灭,这就是电荷守恒定理。

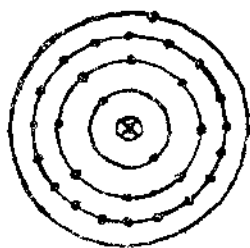


图1-2 铜原子图

带电性的微粒叫电荷,电子、正离子和负离子都是电荷。带电荷的物体叫带电体。

同性电荷互相排斥,异性电荷互相吸引。在真空中两个点电荷之间的作用力跟它们的电量的乘积成正比,跟它们之间的距离的平方成反比,作用力的方向在它们的连线上。这就是库仑定律。表为

$$F = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (\text{牛顿}) \quad (1-1)$$

式中 $Q_1 Q_2$ 为两个点电荷的电量单位为库仑, r 为两个点电荷之间的距离(米)。

例1-1 两个电量分别为 1×10^{-8} 库仑和 2×10^{-8} 库仑的点电荷,相距0.3米,每个电荷受到的静电力是多少?

解 $F = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \cdot \frac{1 \times 10^{-8} \times 2 \times 10^{-8}}{(0.3)^2} \text{ 牛顿} = 2 \times 10^{-6} \text{ 牛顿}$

式中 K (静电力常数)取 9×10^9 牛顿·米²/库仑²,两个电荷同性(符号相同), F 为“正”,相互作用力是斥力,每个电荷都受到对方的在它们的连线上的 2×10^{-6} 牛顿的斥力。若 F 为“负”,则为吸力。

例1-2 比较电子和质子间的静电力和万有引力。已知电子质量是 0.91×10^{-30} 千克,质子质量是 1.67×10^{-27} 千克。

解 $\because$ 它们之间的静电力是 $F = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$,万有引力

$$F_{引} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$$\therefore \frac{F}{F_{引}} = \frac{K Q_1 Q_2}{G m_1 m_2}$$

取 $Q_1 = Q_2 = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑, $K = 9 \times 10^9$ 牛顿·米²/库仑², G (万有引力常数)为 6.67×10^{-11} 牛顿·米²/千克²

$$\text{则 } \frac{F}{F_{引}} = 2.3 \times 10^{39}$$

可见静电力比万有引力大得多。

1.1.2 电场和电场强度

两个点电荷之间的相互作用,是由于带电体的周围空间存在着一种特殊形态的物质,它就是电场。电场的特征是:在电场内的电荷,受到力的作用即电场力(静电力)的作用,

使电荷在电场内顺着电场力的方向移动，电场力对电荷做功，这表明电场内是有能量的。

电场一般分为点电荷电场和平行板均匀电场两种。在点电荷周围存在的电场，叫点电荷电场，由两平行板产生的电场叫均匀电场（图1-3）。

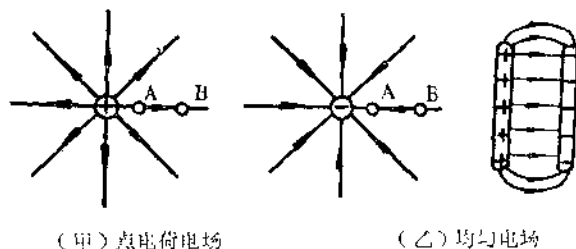


图1-3 几种电场形式

电荷在场内某一点受到的电场力，不仅与电荷所带的电量 q 成正比而且还与该点的电场强度成正比。电场强度就是电场中某一点单位正电荷所受到的电场力。电场强度简称场强。

$$E = \frac{F}{q} \quad (1-2)$$

式中 E ——电场强度（牛顿/库仑）

F ——电场力（牛顿）

q ——电荷的带电量（库仑）

根据库仑定律，在点电荷 Q 形成的电场中，距 Q 为 r 之处的场强：

$$E = K \frac{Q}{r^2} \quad (1-3)$$

场强是矢量，即有量值和方向。通常用电力线来描绘电场。点电荷电场电力线的绘制是这样规定的：（1）电力线是从正电荷出发到负电荷终止的一系列曲线（特殊情况为直线），曲线上每一点的切线方向都与该点的电场强度方向一致（图1-4）。（2）在与电场强度方向垂直的单位面积上，穿过的电力线数目与该处场强的大小成正比。在场强大的地方电力线密，场强小的地方电力线疏。在点电荷电场中，离点电荷愈近，场强愈大，电力线愈密；反之，离电荷愈远，场强愈小，电力线愈疏。但在匀强电场中，则各点的电力线的密度都是一样的。如图 9-5(f) 所示。

在电场 E 中，电场力 ($F = qE$) 使电荷 q 从 A 移到 B 所做的功为 $W = F \cdot \cos\theta \cdot \overline{AB} = qE \cdot \overline{AM} = qEd$ 。 W 与 q 的起止位置有关而与所经路径无关见图 (1-6)。

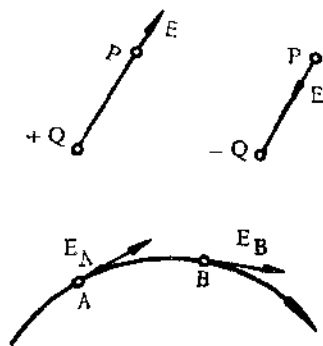


图1-4 场强方向

如果有几个点电荷同时存在，它们的电场就互相叠加，形成合成电场。其方法为求矢量和的平行四边形法则。如图 1-7 所示。即 $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ (1-4)

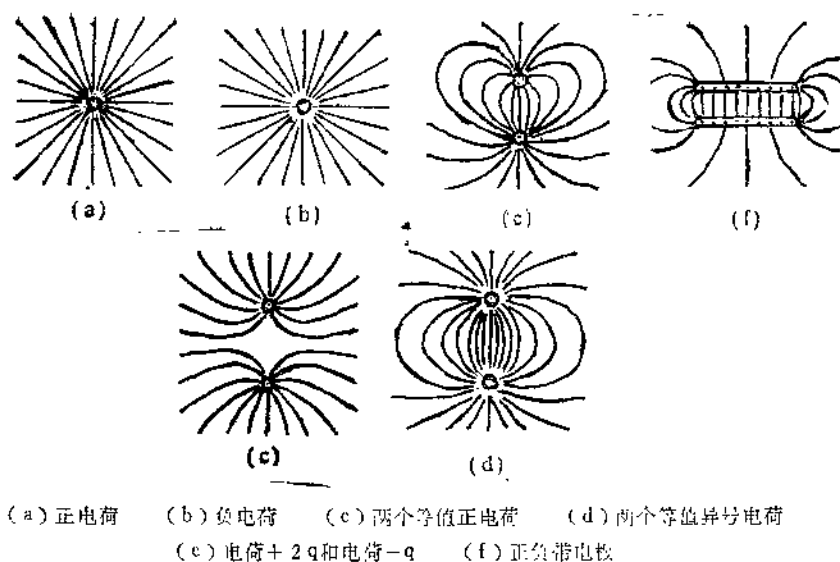


图1-5 几种电场电力线

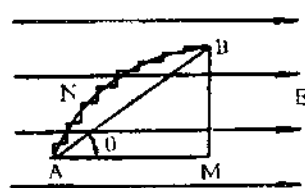


图1-6

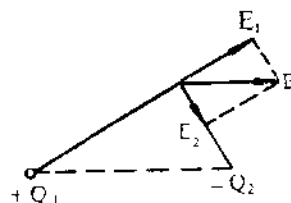


图1-7 合成场强

1.2 磁与磁场

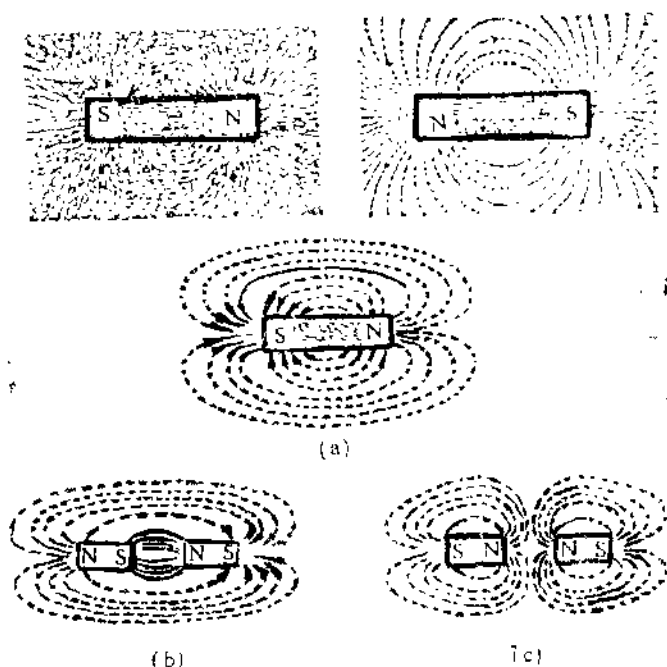
1.2.1 磁的现象

有些物体有吸引钢铁的性质，这种物体叫磁体，它吸铁的性质叫磁性。天然的磁体为铁族元素化合物如磁铁矿 (Fe_3O_4) 等，故又称磁铁。用铁镍钴的合金可做成人造磁铁。条形磁铁两端对铁的吸力最大，故两端又称磁极。可自由转动的条形磁铁（或指南针）静止时总有一端指向地磁北极，这一端便称 N 极，另一端指向地磁南极称 S 极。若将条形磁铁的 N 极靠近另一磁体（或指南针）的 N 极，则后者的 N 极会被推离，称互相排斥， S 极与 S 极靠近时也相排斥，这种现象叫同性极相排斥，若将条形磁铁的 N 极靠近指南针的 S 极，则互相吸引，这种现象叫异性极相吸引。

磁体之所以显磁性，是由于磁体内之分子电流在外界条件影响下作规则排列的结果。

为何两个互不接触的磁铁之间会有相互作用力呢？与电荷周围存在电场一样，磁体的周围空间也存在一种特殊物质——磁场。它可以用磁力线来描绘。磁力线肉眼是看不见的，但可以用简单的实验演示出来。该实验是在水平的玻璃板下紧贴条形磁铁，连续轻震玻璃板，它上面的铁粉不久便排成为图 1-8 形状的磁力线。

若将许多指南针沿磁力线放置(图1-8),则可总结磁力线描述磁场的特点为:(1)在磁铁外部磁力线的方向总是从N极出发回到S极,不间断,不相交;在磁铁内部,则由S极到N极,形成闭合回路。(2)磁铁极处磁力大,磁力线密,磁场强;磁铁中间磁力弱,磁力线疏,磁场弱。



(a) 一个条形磁铁的磁力线; (b) 两个异性磁极邻近的磁力线; (c) 两个同性磁极邻近的磁力线

图1-8 磁力线的特性

穿过与磁场方向垂直的某一横切面积 S 的磁力线总数叫穿过该切面的磁通(ϕ),单位为韦伯或麦克斯尔, $1 \text{ 韦伯} = 10^8 \text{ 麦克斯尔} = 1 \text{ 伏} \cdot \text{秒}$ 。

通过与磁场方向垂直的单位面积的磁力线数叫磁通密度,又叫磁感应强度(B),

$$B = \phi / S \quad \text{韦伯/米}^2 \text{ (特斯拉)} \quad (1-5)$$

$1 \text{ 高斯} = 1 \text{ 麦克斯尔/厘米}^2 = 10^{-4} \text{ 特斯拉}$ 。

在匀强磁场中各点的 B 相等且方向相同,否则为非匀强磁场。

1.2.2 电流的磁场

载流导体周围存在着磁场,磁场是物质的一种特殊形态。磁场有两种表现:一是对电流有作用力,并能使对磁场相对运动的导体产生感应电动势;二是磁场中具有能量。

1. 直导线电流的磁场

如图1-10、1-11、1-12所示,直导线电流所生的磁场之大小(ϕ 或 B)与电流(I)成正比,其方向可用右手螺旋定则

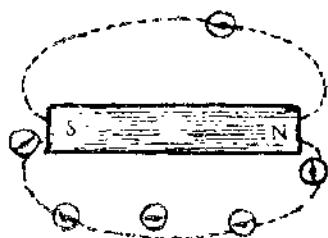


图1-9 用指南针确定磁力线方向

(安培定则) 确定, 即右手姆指表示电流方向, 其余四指表示磁力线的方向, 如图 1-13 所示。

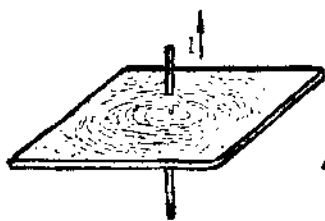


图1-10 通电导线周围的磁场

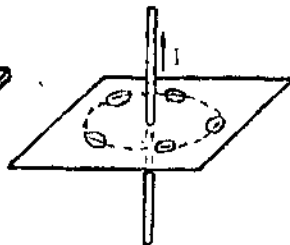


图1-11 通电导线周围磁场的方向

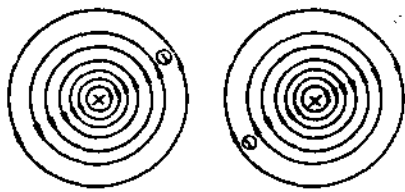
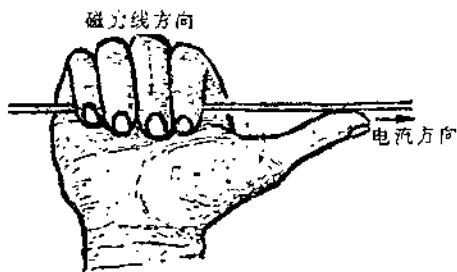


图1-12 导线中电流方向和导线周围磁力线的方向



单导线右手定则——姆指的方向表示电流方向, 其余四指的方向表示磁力线方向

图1-13

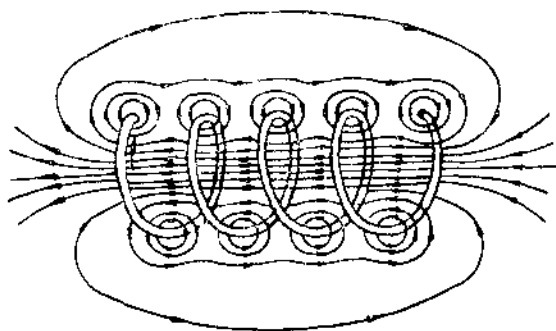


图1-14

2. 载流线圈的磁场

如图 1-14 所示, 也可以用安培定则确定其方向, 即右手四指表示电流方向, 其姆指指磁力线方向, 如图 1-15 所示。

1·2·3 磁场对载流导体之作用

1. 电磁力

如前所述, 既然指南针靠近条形磁铁时会偏转 (即受力), 那么另一种磁体 (载流导体) 在磁场中也将受力的作用。当载流导体与磁场方向 (B) 垂直时受力最大, 这时

$$F = BLI \quad (1-6)$$

如不垂直而成一角度 α 时则电磁力

$$F = BLI \sin \alpha \text{ (牛顿)} \quad (1-7)$$

式中 B —磁感应强度 (韦伯/米²)

L —导线长度 (米)

I —流过导体的电流 (安培)

α —一直导线与磁场方向的夹角 (见图 1-16)

电磁力 F 的方向可用左手定则 (电动机定则) 确定: 如图 1-17 所示, 左手掌心对着磁场方向, 其余四指顺着电流方向, 则其姆指指电磁力 F 的方向。

例 1—3: 有一单匝矩形线圈绕在矩形框架上如图 1-18, $QS = TP = 6 \text{ cm}$, $PQ = ST =$

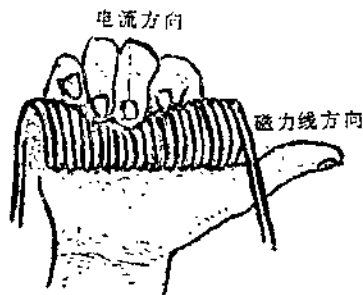


图1-15 线圈右手定则——卷曲四指的方向表示电流方向, 姆指所指的方向表示磁力线方向

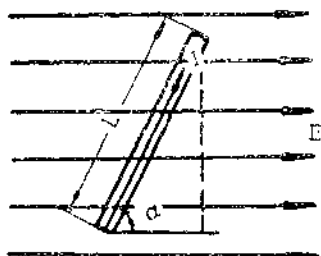


图1-16 载流导体的电磁力

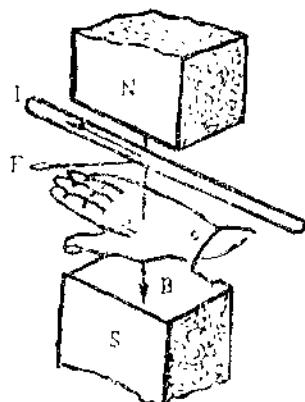


图1-17 左手定则

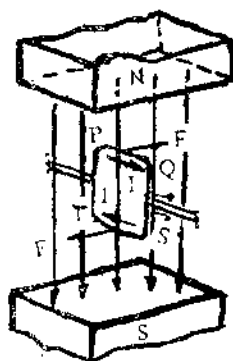


图1-18

5 cm, 线圈中的电流为1安, 方向如图, 磁极之间为均匀磁场 $B = 8000$ 高斯, 求磁场作用在此线圈的总力矩。

解: (1) 因PQ、ST均与B垂直, 作用力最大。

$$F_1 = F_2 = BIL = 0.8 \times 0.05 \times 1 = 0.04 \text{ (牛顿)}$$

(2) QS和PT与磁力线平行, 不受力。

(3) 用左手定则确定 F_1 、 F_2 之方向, 知其方向相反, 对轴形成力矩。

$$M = F_1 \cdot \frac{QS}{2} + F_2 \cdot \frac{QS}{2} = 2F \cdot \frac{QS}{2} = 0.04 \times 0.06 = 0.0024 \text{ (牛顿米)}$$

2. 洛伦兹力

磁场对运动电荷的作用力叫洛伦兹力 (f)。由 $F = BLI \sin \alpha$

$$\therefore F = Nf \text{ 和 } I = nqvS$$

$$\text{得 } f = Bqv \sin \alpha \text{ (牛顿)}$$

(1-8)

式中 N —直导线中运动电荷的总数 (个)

f —磁场对每个运动电荷的作用力 (牛顿)

n —直导线中单位体积含有的电荷数 (个)

q —每个电荷的电量 (库仑)

v —每个电荷的定向运动速率 (米/秒)

S —直导线横截面积 (米²)

B —磁感应强度, 特斯拉。

α —电荷运动方向与磁场方向夹角。

若电子 (带负电) 射入一个匀强磁场中, 在洛伦兹力的作用下, 电子将作圆周运动, 如图1-19所示, 这就是电视显象管的电子枪偏转原理。

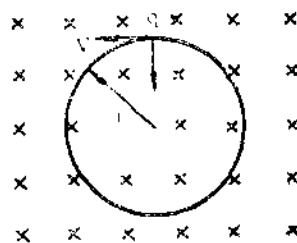


图1-19

1.2.4 铁磁材料的磁性能

1. 导磁率

为什么在收音机高、中频变压器中放进磁芯, 在电力变压器、电机、继电器线圈中放

进铁芯？原来不同的物质不但有不同的导性能，还有不同的对磁场原磁场的影响。有的使原磁场略减弱叫反磁物质，如铜、银等；使原磁场略增强，叫顺磁物质，如空气、锡、铝等；有的使原磁场大大加强，叫铁磁物质，是电机、电器的重要材料，如用于直流磁场的纯铁、用作电机电器铁芯的硅钢片、用于弱磁场的铁镍合金、用于高频磁场的软磁铁氧体等。

衡量导磁性能的物理量称导磁率（又叫导磁系数），用 μ 表示，单位为：亨利/米（即韦伯/安米），而真空中导磁率为常数： $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ （亨/米）。

各种物质之导磁率 μ 与真空导磁率 μ_0 之比称相对导磁率 μ_r ， $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$

则 $\mu = \mu_0 \mu_r$ (1-9)

软铜 $\mu_r = 7500$ ，硅钢片 $\mu_r = 2180-7000$ ，铁镍铝锰合金的 $\mu_r = 11500$ ，玻莫合金 $\mu_r = 10^6$ ，空气 $\mu_r = 1.00002-1.00004$ ；铜、银等之 $\mu_r = 0.99$ 。可见，铁磁物质可使原磁场之 B 增强几千几万倍，所以广泛使用铁芯和磁芯，以提高效率。

2. 磁场强度与磁化曲线

为简化计算，令

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-10)$$

H 称磁场强度，单位为安/米。

$$\text{由 } H = \frac{B}{\mu} \text{ 得 } B = \mu H$$

这是一条曲线，叫做磁化曲线，它表明 B 随 H 之变化而变化。如图1-20所示， oa 段上升最快，这是物质内的分子电流形成的无数小“磁畴”，在不太强的磁场作用下转向与磁场方向一致的结果； ab 段（膝部） B 随 H 之增加较慢，因为大部份小“磁畴”已转向外磁场方向了； b 以后几乎 B 不随 H 之增加而变，因为所有小“磁畴”已转向完毕。这段称磁饱和阶段。到 C 点时 B 达最大值。 $oabc$ 称起始磁化曲线。

3. 磁滞回线

在电机、变压器等交流电路中，铁芯受反复磁化，即铁磁质在大小和方向不断变化的外磁场作用下的磁化。其磁化过程如图1-21所示：当使 H 由0上升到 H_m 时， B 沿起始磁化

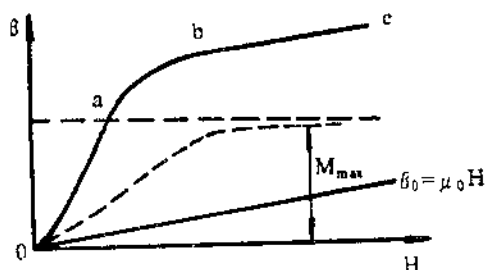


图1-20 磁化曲线

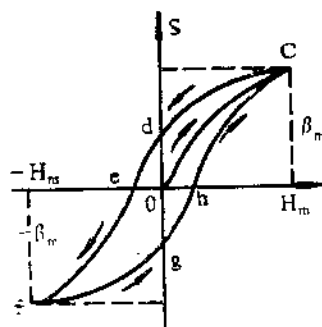


图1-21 磁滞回线

曲线上升到饱和值 B_m ，这是磁化过程。当 H 渐下降时， B 并不沿原曲线下降而沿 cd 下降，此为去磁过程，这时 H 虽降至0而 B 并不降回到零，保留一个 B 值（ od ），此值称为剩磁（ B_s ）。

为消灭剩磁，必须加反向磁场，当 H 加到 oc 时， B 才降至零，这个使 B 降回零的 H 值称矫顽磁力。当 H 再继续反向增加到 H_m 时， B 也反向增加到饱和值 $-B_m$ （ f 点），即铁芯被反向磁化。当 H 返回零时， B 又不回零而有剩磁 og 。当 H 从零增加到 oh 时， B 才又回到零。 H 再增加，铁芯又被正向磁化， B 沿 hc 到达 C （ B_m 值），形成一封闭曲线，称磁滞回线。曲线 $B = \mu H$ 表明在反复磁化过程中， B 的变化落后于 H 的变化，此现象称磁滞现象。

4. 磁滞损耗

在交流电路中，铁芯的反复磁化要消耗能量，使铁芯发热。此损耗称磁滞损耗。磁滞损耗与频率、磁通 ϕ 成正比，且与铁磁材料有关。不同的铁磁材料磁滞回线不同，即剩磁和矫顽力不同。一般铁磁材料分为两类：（1）软磁材料如铸铁铸钢、玻莫合金、硅钢等，其剩磁和矫顽力较小，磁滞回线较窄，易磁化也易去磁，导磁力大，磁阻小，磁滞损耗也小。适宜做变压器、电机、继电器等的铁芯。另一种软磁材料如铁氧体，导磁率大，磁阻也很大，磁滞损耗极小，用作高频交流电路中的线圈磁芯。（2）硬磁性材料如碳钢、铝镍硅合金等。它们的剩磁与矫顽力大，磁滞回线宽，磁滞损耗也大。一经磁化，保留很大剩磁，适宜做永久磁铁。

录音机在录音时要利用磁化曲线近似直线的区段，以避免非线性失真，而在磁带抹音时，则利用全部磁滞回线，逐渐减弱抹音交流电流到零，最后磁滞回线回到0，即完全抹音（消磁）。

1·2·5 磁路

使绝大部份磁力线（磁通）集中通过的路径称磁路。由于铁磁材料的导磁率很高，它做成的铁芯使绝大部分磁通从铁芯断面通过，这个磁通叫主磁通 ϕ ，少量磁通从铁芯外通过，这叫漏磁通 ϕ_s ，见图1—22；近似计算时 ϕ_s 可以略去。

$$\text{则 } \phi = BS = \mu H S = \frac{\mu S N I}{l} = \frac{N I}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{N I}{R_c} \quad (1-11)$$

式中符号除前述外，

l —铁芯平均长度（厘米）

R_c —磁阻，单位为

$$\frac{1}{\text{亨利}} \left(\frac{1}{H} \right)$$

NI —磁通势单位为安匝（ $A \cdot N$ ）

式 $\phi = \frac{NI}{R_c}$ 称磁路的欧姆定律

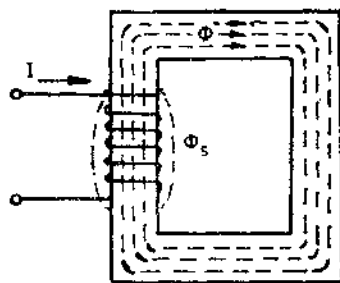
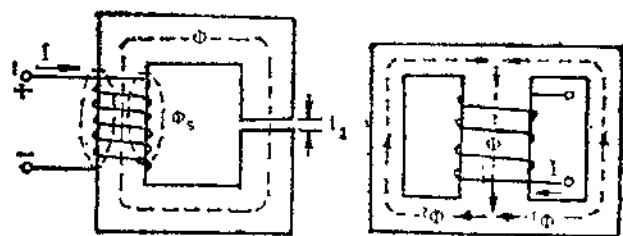


图1-22 磁路

磁路又分简单磁路（无分支）和复杂磁路（有分支）。见图1-23，因为磁力线是闭合的，所以在同一支路上处处有相同的磁通。而在分支点上，有 $\phi = \phi_1 + \phi_2$ 或 $\sum \phi = 0$ 。这叫磁路的克希荷夫第一定律。即进入分支处（节点）的磁通与离开分支处的磁通是相等的。

在同一磁路中，也可能各段截面、材料、导磁率都不同，而磁路的总磁阻等于各段磁阻之和。如图1·24所示；



(a) 不分支磁路 (b) 分支磁路

图1-23 不分支磁路与分支磁路

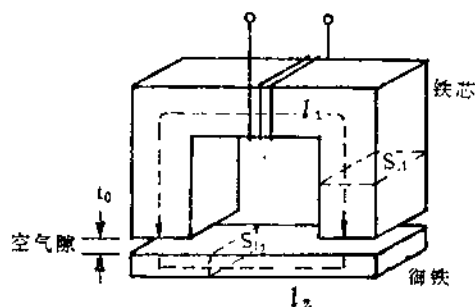


图1-24 有气隙的磁路

$$R_r = R_{r0} + R_{r1} + R_{r2} \quad (1-12)$$

$$= \frac{2l_0}{\mu_0 S_0} + \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} \text{ 代入 } \phi \text{ 式}$$

$$\text{得 } \phi = \frac{2l_0}{\mu_0 S_0} + \frac{NI}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2}$$

整理后得

$$NI = H_0 2l_0 + H_1 l_1 + H_2 l_2 \quad (1-13)$$

式中 $2l_0, l_1, l_2$ — 为各段磁路长 (厘米)

S_0, S_1, S_2 — 为各段磁路截面积 (平方厘米)

H_0, H_1, H_2 — 为各段磁场强度 (安/厘米)

HI 称磁压降, 上式称磁路的克希荷夫第二定律, 即对任一闭合磁路而言, 在任一绕行方向上, 磁通势的代数和恒等于磁压降的代数和。表为

$$\sum NI = \sum HI \text{ (也叫全电流定律)} \quad (1-14)$$

例1-4 有一均匀磁路 (图 1-25), 其中心长度为 50cm, 横截面积为 16cm², 所用材料为硅钢片, 线圈匝数为 500, 电流为 300mA, 求该磁路的磁通势和磁通量。若保持磁通量不变, 改用铸钢片作铁芯, 那末磁路的磁通势是多少?

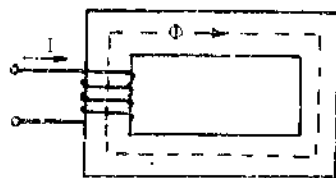


图1-25

解: (1) 磁通势 $\phi = NI = 500 \times 300 \times 10^{-3} = 150$ 安匝

$$(2) H = \frac{NI}{l} = \frac{150}{50} = 3 \text{ 安匝/厘米}$$

从磁化曲线 (图 1-26) 找出与 H 对应的 $B = 9300$ 高斯

$$\text{则 } \phi = BS = 9300 \times 16 = 14.88 \times 10^4 \text{ 麦} = 14.88 \times 10^{-4} \text{ 韦}$$

(3) 如果保持 ϕ 不变, 即磁路中的 B 也不变, 若改用铸钢, 从它的磁化曲线上查得 $B = 9300$ 高斯时对应的 H 为 5.3 安匝/厘米, 所以磁通势 $\phi = NI = HL = 5.3 \times 50 = 265$ 安匝, 可见, 铸钢代替硅钢片时, 如要维持同样的磁通, 则所需安匝数增加了, 在 N 不变情况下, 电流强度

$$I = \frac{\phi}{N} = \frac{265}{500} = 0.53 = 530 \text{ mA}$$

也增加了近一倍,因而在导线截面相同条件下发热量也增加。

例1-5 磁路如图1-24所示的直流电磁铁,铁芯和衔铁都用铸钢做成,尺寸为:

$$l_0 = 0.5\text{cm}, l_1 = 30\text{cm}, l_2 = 12\text{cm}$$

$$S_1 = 10\text{cm}^2, S_2 = 5\text{cm}^2$$

为了对衔铁有足够的吸力,要求空气隙的 $B = 0.5\text{韦/米}^2$,问需多大的磁通势?这时磁路各段的磁阻是多少?

解:略去漏磁通不计,磁路中之磁通

$$\phi = B_0 S_1 = 0.5 \times 0.001 = 0.0005\text{韦}$$

磁路中各段的 B 为:

$$B_1 = \frac{\phi}{S_1} = \frac{0.0005}{0.001} = 0.5\text{韦/米}^2$$

$$B_2 = \frac{\phi}{S_2} = \frac{0.0005}{0.0005} = 1\text{韦/米}^2$$

磁化曲线上与 B_1 、 B_2 对应的 H_1 、 H_2 分别为1.8、6.8安/厘米,而空气隙的

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.5}{4\pi \times 10^{-7}} = 398000\text{安/米} = 3980\text{安/厘米}$$

因此需要的磁通势(即励磁安匝数):

$$NI = 2H_0 l_0 + H_1 l_1 + H_2 l_2 = 3980 \times 0.5 \times 2 + 1.8 \times 30 + 6.8 \times 12 = 4115\text{安·匝}$$

铁芯的磁阻

$$R_{c1} = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} = \frac{H_1 l_1}{B_1 S_1} = \frac{180 \times 0.3}{0.5 \times 0.001} = 108000 \frac{1}{\text{韦}}$$

衔铁的磁阻

$$R_{c2} = \frac{l_2}{\mu_2 S_2} = \frac{H_2 l_2}{B_2 S_2} = \frac{680 \times 0.12}{1 \times 0.0005} = 163200 \frac{1}{\text{韦}}$$

空气隙的磁阻

$$R_{c0} = \frac{2l_0}{\mu_0 S_0} = \frac{2H_0 l_0}{B_0 S_0} = \frac{2 \times 398000 \times 0.005}{0.5 \times 0.001} = 7960000 \frac{1}{\text{韦}}$$

计算表明:空气隙长度只占磁路全长约1/43,但其磁阻却是其它部分的29倍,所需励磁安匝数占全部的96%。

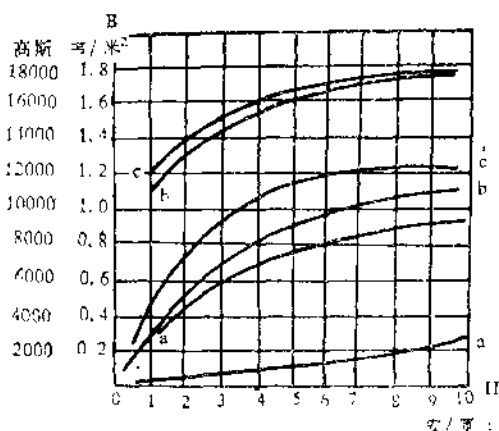


图1-26 铸钢材料的磁化曲线

1.3 电磁感应

1.3.1 直导线中的感应电动势

实验证明,垂直于磁场的直导线与磁场作相对运动时(导线相对切割磁力线),检流计指针偏转,说明导体中产生了电动势,它叫感生电动势($\mathcal{E}$)如图1-27所示;感生电动势的方向可用右手定则判定如图1-28所示;即掌心对着磁力线方向,拇指指导体移动方向,四指即表示感生电动势的方向。

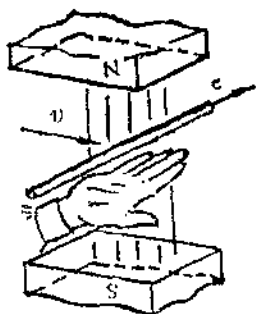


图1-27 实验与观察

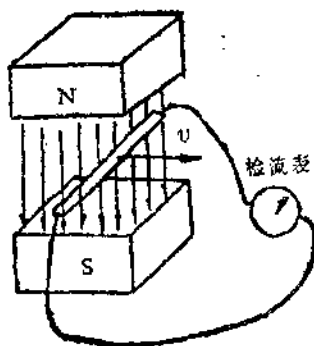


图1-28 右手定则

感生电动势之大小为：
当 B 、 L 、 v 三者相垂直时。

$$E = BLv \text{ (V)} \quad (1-15)$$

当 B 与 L 有一角度 α 时

$$E = BLv \sin \alpha \quad (1-16)$$

式中 B —磁场之磁感应强度 (特斯拉)

L —导体切割有效长度 (米)

v —切割速度 (米/秒)

α — L 与 B 之夹角

当有感生电动势 E 时，若该导体在磁场外闭合，则导体中有感生电流。

例1—6 在 $B = 8000$ 高斯的均匀磁场中，有一根长 0.15 米的直导线以恒定速度 $v = 20$ 米/秒运动，试求图1-29所示三种情况下，在导体中的感生电动势。

解：(1) $B \perp v \perp L$ 时感应电动势方向为 $a \rightarrow b$ ，

$$E = BLv = 0.8 \times 20 \times 0.15 \times 2.4 \text{ V}$$

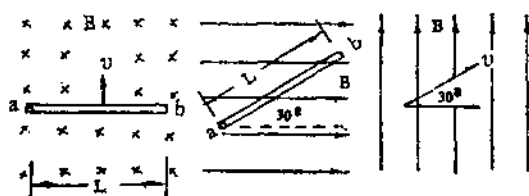
(2) $v \perp B$ ，导线与磁力线夹角为 30° ，感生电动势方向为 $b \rightarrow a$ ，

$$E = BLv \sin \alpha = 0.8 \times 20 \times 0.15 \times \frac{1}{2} = 1.2 \text{ (V)}$$

(3) $L \perp B$ ， v 与 B 夹角为

$\beta = (90^\circ - 30^\circ)$ ，产生的感应电动势方向为：从纸内向读者穿出。

$$E = BLv \sin \beta = 0.8 \times 20 \times 0.15 \times \sin (90^\circ - 30^\circ) = 2.08 \text{ (V)}$$



(a) $L \perp B \perp v$ (b) $v \perp B$ (v 方向朝向纸里) (c) $L \perp B$

图1-29

1.3.2 线圈中的感应电动势

交链于线圈中之磁通发生变化时，则线圈产生电动势，而其在闭合回路中产生的感生电流的磁通总是阻碍原来磁通的变化。这个规律称楞次定律。

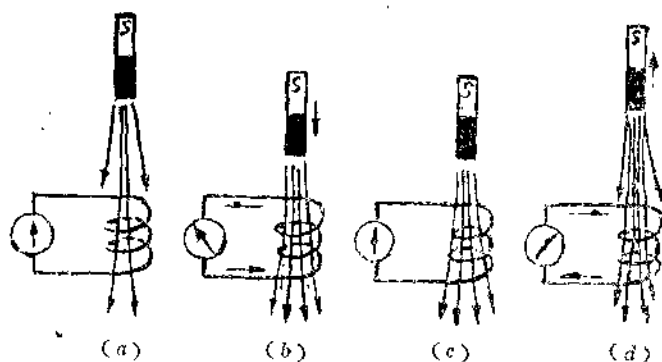


图1-30 感应电动势和感应电流的方向

据楞次定律，应用右手螺旋定则可判断感生电动势和感生电流的方向。即姆指指感生电流之磁场方向（其磁力线抵消原来磁场的磁力线之变化），其余四指表示感生电流之方向。如图1-31所示：

感生电动势之大小与磁通之变化率成正比：

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{V}) \quad (1-17)$$

此式称法拉第电磁感应定律。式中

N ——线圈匝数。

$\frac{d\phi}{dt}$ ——磁通对时间的变化率。

负号表示感生的磁通阻碍原磁通的变化。

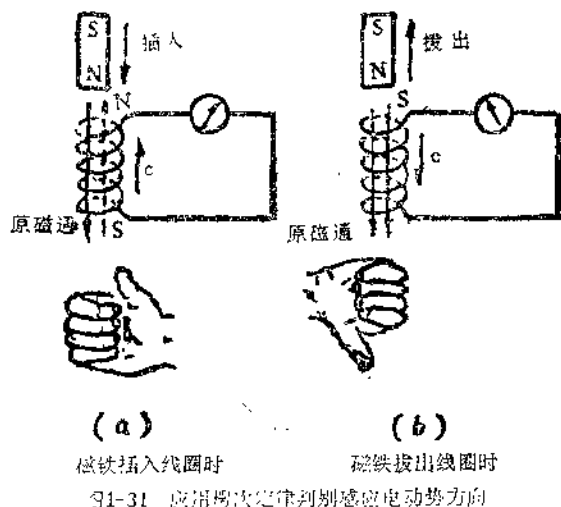
$$\text{令 } \psi = N\phi, \text{ 则 } E = -\frac{d\psi}{dt} \quad (1-18)$$

例1-7 有一线圈匝数 $N = 100$ ，穿过该线圈的磁通在 0.001 秒内均匀地减少了 0.005 韦伯，求线圈中的感生电动势。

$$\text{解：据公式得 } \varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} = -100 \times \left(\frac{-0.005}{0.001} \right) = 500 \quad (\text{V})$$

1-3-3 自感

一个线圈通以电流，按电流的磁效应，线圈的周围一定产生磁场，若电流是交变的，磁场也是交变的。一个线圈置于交变的磁场中，或称与交变的磁通交链，线圈就会产生感应电动势。若线圈是闭合的，则在线圈中就会出现感应电流。由此可知，当一个通电线圈中的电流变化时，由该电流所产生的穿过线圈的磁通量也随着变化，这个变化的磁通反过来又在线圈中产生感应电动势。由于这个感应电动势是由线圈本身所通过的电流的变化所引起的，故称



(a)

(b)

磁铁插入线圈时

磁铁拔出线圈时

图1-31 应用楞次定律判别感应电动势方向

为自感电动势，用 e_L 表示。这种现象，称为自感。

自感电动势的大小和方向可以通过电磁感应定律（即右手螺旋定则）来确定。对于一个单匝线圈其大小为：

$$e_L = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (1-19)$$

对于一个多匝线圈，则其大小为：

$$e_L = - \frac{\Delta \psi}{\Delta t} \quad (1-20)$$

其中， ψ 称多匝线圈的磁链， $\psi = N\phi$ ， N 为线圈的匝数， ϕ 为通过一匝线圈的磁通量。

可见，线圈的自感电动势的大小与通过线圈的磁通的变化率成正比。式中的负号表示线圈中自感电动势的方向总是反抗线圈中磁通的变化。

2. 自感系数及电感线圈

由上述知道。线圈自感电动势的大小与穿过线圈的磁通量成正比，而穿过线圈的磁通量又与通过线圈的电流成正比，所以：

$$\psi = iL \quad (1-21)$$

$$\text{或 } L = \frac{\psi}{i}$$

式中，线圈磁链 ψ 与通过线圈电流 i 的比值称为自感系数，简称电感，用 L 表示。电感的单位是亨（H）、毫亨（mH）和微亨（ μH ），它们之间的关系是：

$$1 \text{ 亨} = 10^3 \text{ 毫亨} = 10^6 \text{ 微亨}$$

凡是线圈都具有电感。因此，一般把线圈又称为电感线圈。线圈电感的大小决定于线圈的匝数、尺寸、有无铁芯、铁芯的形状等。例如一个多匝线圈的电感比单匝的大；一个有铁芯线圈的电感要比无铁芯的电感大得多等。

有了电感这个参数，我们就可以直接把线圈中的自感电动势和电流之间的关系表达出来，即：

$$e_L = - \frac{\Delta \psi}{\Delta t} = - \frac{\Delta Li}{\Delta t} = - L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (1-22)$$

可见，线圈中自感电动势的大小与线圈中的电流的变化率成正比。当线圈的电流变化率相同情况下，电感大的线圈所产生的自感电动势就大，反之就小。

如果用电压来代替线圈中产生的自感电动势，则可写为：

$$U_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (1-23)$$

此处无负号，表示线圈中电动势的方向正好与电压方向相反。

1.3.4 互感

当两个邻近（或一个套在另一个的外面）的线圈中的一个通入电流时，在另一个线圈中便产生感应电动势。如果这个线圈是闭合回路，则在线圈中便产生感应电流。这种由于一个

线圈中的电流变化，而在另一个线圈中引起的感应电动势，称为互感电动势，简称互感，用 e_M 表示。

我们可以通过一个简单的实验来说明互感的存在。如图 1-32 所示，为证实互感存在的实验电路图。图中有 A 、 B 两个线圈，线圈 B 套在具有铁芯的线圈 A 的外面，线圈 A 与电源相连接，而线圈 B 与检流计相连接，当将开关 K 闭合时，线圈 A 中的电流从 0 增大到一定值，这时与线圈 B 相连接的检流计的指针也随着偏转，表明在线圈 B 中有电流通过。线圈 A 与线圈 B 没有电的联系，但当线圈 A 通以电流后，线圈 B 中会出现电流，这是因为线圈 A 中的电流所产生的磁通穿过线圈 B ，当线圈 A 中的电流变化时，穿过线圈 B 的磁通也随之变化，因而在线圈 B 中便产生互感电动势，当然也就会在线圈 B 中产生互感电流。上面所说到的变压器、互感器都是根据这种互感原理制成的。

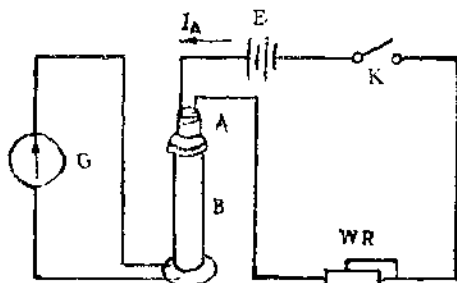


图1-32 证明互感存在的实验电路

互感电动势的大小及方向同样可以通过电磁感应定律来确定。如图 1-33 所示为两耦合线圈产生互感电动势的示意图。图中线圈 1 中的电流 i_1 ，产生磁通 ϕ_1 和 ϕ_{12} （其中 ϕ_1 为仅穿过线圈 1 的磁通， ϕ_{12} 为同时穿过线圈 1 和线圈 2 的磁通）。根据电磁感应定律，变化磁通 ϕ_{12} 在线圈 2 中所产生的互感电动势为：

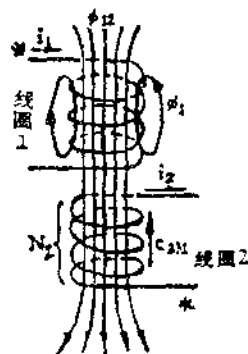


图1-33 两耦合线圈产生互感电动势

$$e_{2M} = -N_2 \frac{\Delta \phi_{12}}{\Delta t} \quad (1-24)$$

式中 e_{2M} ——磁通 ϕ_{12} 在线圈 2 中所产生的互感电动势 (V)

$\frac{\Delta \phi_{12}}{\Delta t}$ ——由线圈 1 产生穿过线圈 2 的变化磁通的变化

率 (韦/秒)

N_2 ——线圈 2 的匝数

由于， $\psi_{12} = N_2 \phi_{12}$ 称为互感磁链，上式可改写为：

$$e_{2M} = - \frac{\Delta \psi_{12}}{\Delta t} \quad (1-25)$$

由上述可知，穿过线圈 2 的互感磁链的多少与线圈 1 中的电流的大小成正比，所以：

$$\psi_{12} = M_{12} i_1 \quad (1-26)$$

$$\text{或 } M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_1}$$

式中 M_{12} 称为两线圈间的互感系数，简称互感。同理，如果在线圈 2 中通以电流 i_2 ，则在线圈 1 中产生的互感为：

$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_2}$$

可以证明 $M_{12} = M_{21}$ 。因此两线圈互相产生的互感均用 M 表示，因此得出线圈 1 或线圈 2 中产生的互感电动势分别为：

$$e_{2M} = -M \frac{\Delta i_1}{\Delta t} \quad (1-27)$$

$$e_{1M} = -M \frac{\Delta i_2}{\Delta t} \quad (1-28)$$

由上式可见，互感电动势的大小不仅与相邻线圈的电流变化率成正比，还与互感系数成正比。而 M 的大小不仅与线圈的参数，还与线圈间的相互位置有关。所以在两个线圈中其中一个的电流的变化率一定的情况下，改变另一个线圈的匝数(或相对位置)，就可以改变它的互感电动势的大小，从而达到改变线圈的端电压的高低。这就是变压器的工作原理。

决定了互感电动势的大小，那末它的方向又如何确定呢？

互感电动势的方向不仅决定于互感磁通的增多还是减少，同时还决定于线圈的绕向。习惯上，我们用极性标号“*”来表示线圈的绕向，即当两耦合线圈的线圈 1 的电流自“*”号流入，线圈 2 中的电流亦自“*”号流入(如图 1-33 所示)，这时，带有“*”号的线圈 1 和线圈 2 的端钮称为同名端或同极性端。

1.3.5 涡流

变压器、电机等的铁芯，不是成块的金属而是由硅钢片迭成，原因是假如用整块金属做铁芯(电阻很小)，则线圈中变化的电流产生的变化的磁通，穿过铁芯，会在铁芯各断面上，形成许多绕芯轴的环形感生电流，这种电流象旋涡，所以叫做涡流。如图 1-34 所示。

这种涡流也产生焦耳热，使温度升高，绝缘老化，缩短设备寿命，消耗能量。这种电能的损失叫涡流损耗，与磁滞损耗合称铁损。

因热量 $\propto I^2 \propto \phi^2 \propto f^2$ ，所以要注意使用频率要相符。

在变压器、电机中应减小涡流，方法如图 1-35。用相互绝缘的薄片硅钢片代替整块的铁芯而另外一些场合又要利用涡流，如高频感应炉熔化金属，仪表利用涡流制动等。

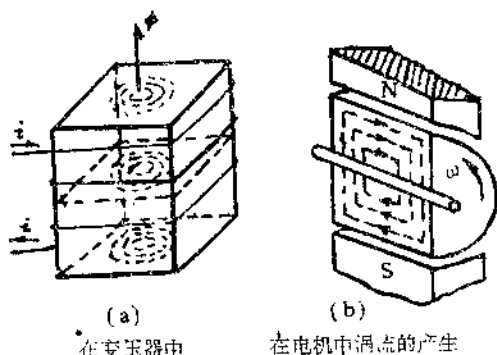


图 1-34

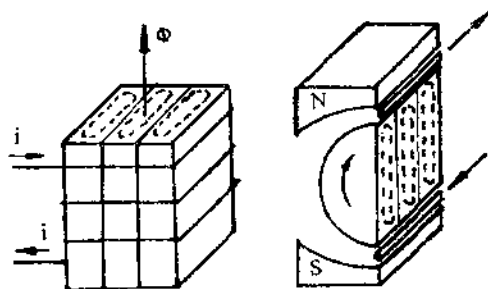


图 1-35 减少涡流的方法

本章小结

磁铁有N和S两个磁极。磁极相互之间有磁力的作用，同性极相斥，异性极相吸。

磁力通过磁场来传递。磁场是一种特殊物质，它具有能量，磁体在磁场中会受磁场力的作用。磁场是电流产生的，电流生磁，磁动生电。电与磁在一定条件下可以互相转化。

描述磁场的基本物理量是磁感应强度 $\vec{B}$ 。

$$B = \frac{\phi}{S}$$

各点的 B 大小相等、方向相同的磁场叫均匀磁场。磁场又可形象地以磁力线来描绘。磁力线上每点的切线方向是该点的磁场方向，磁力线的密度与 B 成正比，磁力线都是不相交的闭合曲线。

电流所生的磁场的方向用右手螺旋定则确定。磁场对电流有力的作用，这种电磁力的大小为： $F = BLI \cdot \sin\alpha$ 其方向用左手定则确定。

在均匀磁场中，与磁场方向垂直，面积为 S 的平面的磁通 $\phi = BS$ 。

回路中的磁通发生变化时，回路中就产生感应电动势，其大小为：

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{V})$$

它叫法拉第电磁感应定律。

导线在磁场中运动时也产生感生电动势。当导线方向、 B 和导体运动速度 v 三者相垂直时，所产生的电动势为：

$$e = BLv$$

其方向也由右手定则确定。

$$\text{对线圈磁通则有 } e = - \frac{d\phi}{dt}$$

线圈的电流增加时，自感电动势的方向与电流方向相反，起反电势作用。线圈从电源吸取能量转为磁场能储存着；线圈的电流减小时，自感电动势的方向和电流的方向一致，起电源作用，线圈将磁场能转换为电能释放出来。

线圈的自感系数 $L = \frac{\psi}{i}$ ，它反映了线圈产生磁场、自感电动势和储存磁场能量的能力。

$$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}$$

自感应磁场能量：

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2$$

互感系数 $M = \frac{\phi_{12}}{i_1} = \frac{\phi_{21}}{i_2}$ ，它反映了一个线圈在另一个线圈中产生链磁的能力和线圈产生互感电动势的能力。