

# 1 磁路与变压器

上篇讨论了分析与计算各种电路的基本定律和基本方法。但在电气工程中广泛地应用着各种机电能量转换设备和机电信号转换器件如电机、变压器、继电器、电磁铁及电磁仪表等，其不仅有电路的问题，同时还有磁路的问题，因此讨论磁与电的关系，掌握磁路的基本规律具有非常重要的意义。

本章先复习磁场中的基本概念和基本物理量，然后讨论导磁材料的磁性。磁路和电路往往是关联的，本章将研究磁路和电路的关系以及磁和电的关系。并讨论、分析计算磁路的基本方法。此外，还把变压器以及电压互感器、电流互感器和特殊变压器作为应用实例来讨论。

## 1.1 磁性材料

磁性材料主要指铁、镍、钴及其合金，磁性材料的性能是通过磁路分析来了解的。磁路问题实质上是局限在一定范围内的磁场问题。所以，先复习物理学中有关磁场的基本概念和基本物理量。

### 1.1.1 磁场中的基本概念和基本物理量

#### 1) 磁感应强度 $B$

磁感应强度是表示磁场内某点磁场强弱和方向的物理量，它是一个空间矢量，用符号  $B$  表示，其方向可以用右螺旋定则来确定。实验指出，当载有电流  $I$ 、长度为  $L$  的导体与磁感应强度方向垂直时，受到的磁场力  $F$  为最大，且

$$F = BLI \quad (1.1)$$

因此，
$$B = \frac{F}{LI}$$

如果磁场内各点的磁感应强度的大小相等，方向相同，这样的磁场则称为匀磁场。

在国际单位制 (SI) 中，磁感应强度的单位是特斯拉 (T)。

## 2) 磁通 $\phi$

磁感应强度  $\mathbf{B}$  与垂直于磁场方向的面积  $S$  的标量积，称为通过该面积的磁通  $\phi$  即

$$\phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$$

或 
$$B = \phi/S \quad (1.2)$$

由上式可见，磁感应强度在数值上可以看成与磁场方向相垂直的单位面积所通过的磁通，故又称磁通密度。如果不是均匀磁场，则磁通是磁感应强度对某一面积的积分，即

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.3)$$

磁通是一个标量，它没有方向，但有正负， $\mathbf{B}$  与  $d\mathbf{S}$  的夹角大于  $90^\circ$  时， $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$  为负。

如果用磁力线来描述磁场，使磁力线的疏密反映磁通量和磁感应强度的大小。通过某一面积的磁力线的总数越多则磁通量越大。反之，磁通量越小。通过垂直于磁场方向的单位面积的磁力线数越多则该点的磁感应强度就越大。反之，磁感应强度就越小。由于磁通的连续性，磁力线应是闭合的无头无尾的空间曲线。

根据电磁感应定律的公式：

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

在国际单位制 (SI) 中，磁通的单位是  $V \cdot s$  通常称为韦 [伯] ( $Wb$ )，在工程上有时用电磁制单位麦克斯韦 ( $Mx$ )。两者的关系是：

$$1Wb = 10^8 Mx$$

磁感应强度的单位用特 [斯拉] (T 表示外，也用韦 [伯] 每平方米 ( $Wb/m^2$ ) 表示， $1T = 1Wb/m^2$ 。

### 3) 磁场强度 $H$

磁场强度  $H$  是描述磁场的另一个重要的物理量，是矢量，通过它来确定磁场与电流之间的关系，即

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (1.4)$$

式(1.4)是安培环路定律(或称全电流定律)的数学表示式。它是计算磁路的基本公式。

式中  $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$  是磁场强度矢量  $\mathbf{H}$  沿任意闭合曲线  $L$  的线积分 这里  $L$  常取磁力线作闭合回线;  $\sum I$  是穿过该闭合回线所围面积的电流的代数和。由于不同导线内的电流的流向不同，所以规定任意选定一个闭合回线的围绕方向，凡是电流方向与闭合回线围绕方向之间符合右螺旋定则则电流作为正，反之则为负。

今以环形线圈(见图 1.1)为例 其中媒质是均匀的，应用式 1.4) 来计算线圈内部各点的磁场强度。取磁力线作为闭合回线，且以其方向作为回线的围绕方向，于是

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = H_x L_x = H_x \cdot 2\pi x$$

$$\sum I = IN$$

所以

$$H_x \cdot 2\pi x = IN$$

即

$$H_x = \frac{IN}{2\pi x} = \frac{IN}{L_x} \quad (1.5)$$

式中： $N$ 是线圈的匝数；

$L_x = 2\pi x$ 是磁环的平均圆周长；显然  $L_x$  是磁路的平均长度；

$H_x$  是半径  $x$  处的磁场强度。

式(1.5)中电流与线圈匝数的乘积  $IN$  称为磁动势，用字母  $F$  代

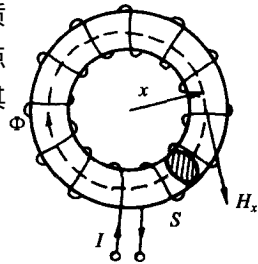


图 1.1 环形线圈

表 即

$$F = IN \quad (1.6)$$

磁通就是由它产生的。它的单位是安[培](A)

这里必须指出，安培环路定律的成立与场中介质的分布无关。

#### 4) 磁导率 $\mu$

磁导率  $\mu$  是一个用来表示磁场媒质磁性的物理量，它是用来衡量物质导磁能力的物理量。它与磁场强度的乘积就等于磁感应强度。

$$B = \mu H \quad (1.7)$$

由式 (1.7) 可知，在场中某一处的磁场强度  $H$  处相同时而磁感应强度  $B$  会随着介质的不同而不同， $\mu$  越大  $B$  也越大。

如在图 1.1 中线圈内部半径为  $x$  处各点的磁感应强度可以从式 (1.2) 得出，即

$$B_x = \mu H_x = \mu \frac{IN}{L_x} \quad (1.8)$$

$$H_x = \frac{IN}{L_x} \quad (1.9)$$

由式 (1.7) 或式 (1.8) 可见，磁场内某一点的磁场强度  $H$  只与电流大小、线圈匝数以及该点的几何位置有关，而与磁场媒质的磁性  $\mu$  无关，即在一定电流值下，同一点的磁场强度不因磁场媒质的不同而有异。而磁感应强度是与磁场媒质的磁性有关的。当线圈的媒质不同时则磁导率  $\mu$  不同，在同样电流值下，同一点的磁感应强度的大小就不同，线圈内的磁通也就不同了。

磁场强度  $H$  的国际单位制单位是 A/m (安 / 米)，磁导率  $\mu$  在国际单位制中的单位是 H/m (亨 / 米)

由实验测出真空的磁导率

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$\mu_0$  是一个常数，所以任意一种物质的磁导率  $\mu$  与真空磁导率  $\mu_0$  的比值称为该物质的相对磁导率，用符号  $\mu_r$  表示即

即

$$\mu_r = \frac{\mu H}{\mu_0 H} = \frac{B}{B_0}$$

$\mu_r$  由式 (1.7) 可知, 相对磁导率也就是当磁场媒质是某种物质时, 某点的磁感应强度  $B$  与在同样电流值下真空时该点的磁感应强度  $B_0$  之比所得的倍数。

按照导磁性能的不同, 物质可大体分为三类: 一类为顺磁物质, 此类物质  $\mu_r$  稍大于 1 属于此类物质的有铅、铂、锰、铬等。另一类是反磁物质 其  $\mu_r$  稍小于 1 属于此类物质的有铋、铜、锌、汞、金、银等。虽然这两类物质的相对磁导率有些不同, 但他们都很接近 1, 所以, 工程上把这两类物质的  $\mu_r$  皆看作 1。这两类物质也可称为非磁性材料 对  $\mu \approx \mu_0$  的非磁性材料而言, 差不多不具有磁化的特性, 而且每一种非磁性材料的磁导率都是常数。因此, 当磁场媒质是非磁性材料时,  $B = \mu_0 H$ ,  $B$  与  $H$  成正比, 即它们之间有线性关系 见图 1.2 又因

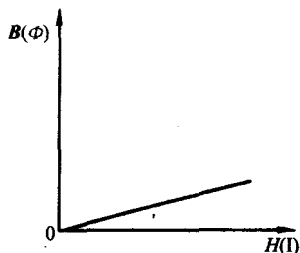


图 1.2  $B$  与  $H$  成正比

所以磁通  $\phi$  与产生此磁通的电流  $I$  也成正比, 即它们之间也有线性关系。第三类物质称为铁磁物质 其  $\mu \gg \mu_0$  对于磁性材料的磁性能 我们将在下节进行讨论。

### 1.1.2 磁性材料的磁性能

磁性材料主要是指铁、钴、镍及其合金而言。它们具有下列磁性能。

#### 1) 高导磁性

磁性材料的磁导率很高,  $\mu_r \gg 1$ , 可达数百、数千、乃至数万之值。这就使它们具有被强烈磁化的特性。

为什么磁性物质具有被磁化的特性呢? 因为磁性物质不同于其他

物质，有其内部特殊性。由以前所学的物理知识知道电流产生磁场，在物质的分子中电子环绕原子核运动和本身自转运动而形成分子电流，分子电流也会产生磁场，每个分子相当于一个基本小磁铁。因此，在铁磁物质内部存在着很多自发磁化的小区域，称为磁畴。在没有外磁场的作用时 各个磁畴排列混乱 磁场互相抵消 所以 对外就显不出磁性来 如图 1.3(a)所示。

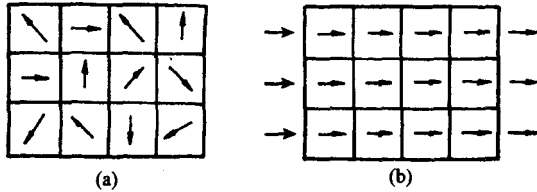


图 1.3 磁性物质的磁化

在外磁场的作用下，磁畴就顺外磁场方向转动，显示出磁性来。随着励磁电流的增大，外磁场也越来越强。磁畴的方向逐渐转到与外磁场相同的方向上如图 1.3(b)所示。这样，便产生了一个很强的与外磁场同方向的磁化磁场，而使物质内的磁感应强度大大增加。即磁性物质被强烈地磁化了。

磁性物质的这一性能被广泛地应用于电气设备中，例如电机、变压器及各种铁磁元件的线圈中都放有铁芯。在这种具有铁芯的线圈中通入不大的励磁电流，便可产生足够大的磁通和磁感应强度。这样就解决了我们既要磁通大，又要励磁电流小的矛盾。显而易见，利用优质的磁性材料可使同一容量的电机或变压器的重量大大减轻，体积大大减小。

由于非磁性材料没有磁畴的结构，所以不具有磁化的特性。

## 2) 磁饱和性

磁性物质由于磁化能产生磁场，但由此而产生的磁化磁场不会随着外磁场的增强而无限地增强。当外磁场增大到一定值时，全部磁畴的磁场方向都转向与外磁场的方向一致时，磁化磁场的磁感应强度  $B_T$  就达到饱和值，磁性物质的这种性质称为磁饱和性。如图 1.4 所示。图中的

$B_0$  是在外磁场作用下，但磁场内不存在磁性物质时的磁感应强度。

将磁感应强度  $B_T$  曲线和  $B_0$  直线的纵坐标相加，便得出  $B-H$  磁化曲线。各种磁性材料的磁化曲线可通过实验得出，这在磁路计算上是极为重要的。这曲线可以分成三段： $0a$  段—— $B$  与  $H$  差不多成正比地增加； $ab$  段—— $B$  的增加缓慢下来； $b$  以后一段—— $B$  增加得很少，几乎达到了磁饱和。

从图 1.4 和图 1.5 中可看出，当有磁性物质存在时， $B$  与  $H$  不成正比，即磁性物质的磁导率  $\mu$  不是常数随  $H$  而变化。某磁性物质的  $B-H$  曲线如图 1.5 所示。

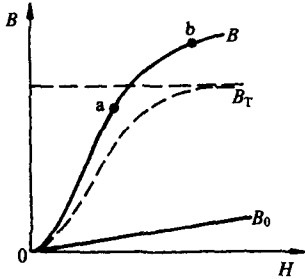


图 1.4 磁化曲线

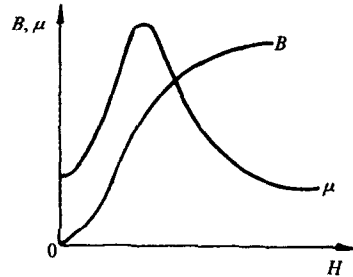


图 1.5  $B, \mu$  与  $H$  的关系

### 3) 磁滞性

当铁芯线圈中通有交变电流（如通以其大小和方向都变化的单相正弦电流）时；铁芯就受到交变磁化。在电流变化一周时，磁感应强度  $B$  随磁场  $H$  而变化的关系如图 1.6 所示。由图可见，当  $H$  由 0 增加时， $B$  亦随之增加，当  $B$  增加到一定值时， $H$  虽增加而  $B$  增加的数值很小，即铁芯达到了饱和状态，如图 1.6 中 线段  $0-1$  所示；但当  $H$  减小时， $B$  亦随之减小，但当  $H$  已减到

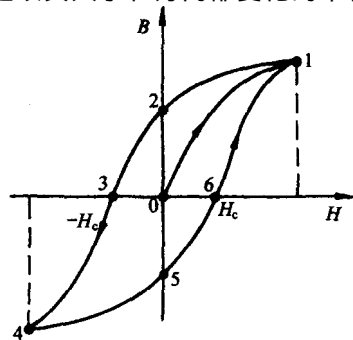


图 1.6 磁滞回线

零值时,  $B$  并未回到零值。即曲线 1—2 段所示, 这种磁感应强度变化总是落后于磁场强度变化的性质称为磁性物质的磁滞性。

当线圈中电流减到零值 (即  $H=0$ ) 时, 铁芯在磁化时所获得的磁性还未完全消失。这种在铁芯中所保留的磁感应强度称为剩磁感应强度  $B_r$  (剩磁) 在图 1.6 中即为纵坐标标号 2 和 5 处, 永久磁铁的磁性就是由剩磁产生的。这种特性在电气中常会被人类所利用, 如自励直流发电机的磁极, 为了使电压能够建立, 也必须具有剩磁。但对剩磁也需一分为二, 有时它是有害的。如, 当工件在平面磨床上加工时, 利用磁力将加工件吸住, 但加工完毕后, 由于电磁场吸盘有剩磁, 仍将工件吸住。为此需通入反向去磁电流, 去掉剩磁, 才能将工件取下。

如果要使铁芯的剩磁消失, 可以用改变线圈中励磁电流方向的方法, 即改变磁场强度  $H$  的方向来进行反向磁化。使  $B=0$  的  $H$  值, 在图 1.6 中标号 3 和 6 处, 该反向磁场强度的大小称为矫顽磁力  $H_c$ 。

在铁芯反复交变磁化的情况下, 表示  $B$  与  $H$  变化关系的闭合曲线 1234561 (图 1.6) 称为磁滞回线。

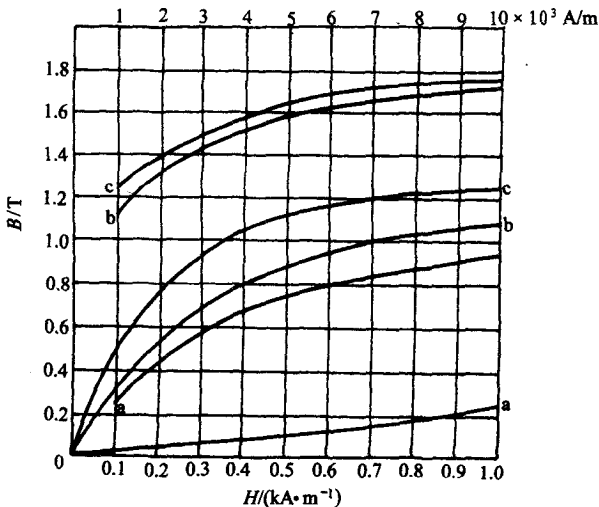
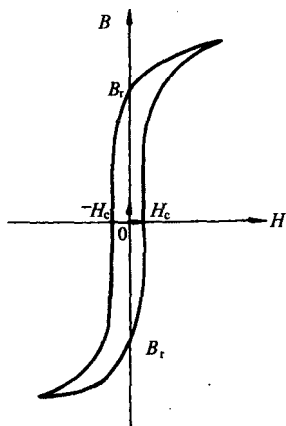


图 1.7 磁化曲线  
a—铸铁 b—铸钢;c—硅钢片

不同的磁性物质，其磁滞回线和磁化曲线也不同。图 1.7 中画出了三种磁性材料的磁化曲线。

注意 当  $H$  大到一定程度时，再增大  $H$ ，得到的磁滞回线的形状也几乎不变了（只是增大了饱和区的长度），这样的磁滞回线称为极限磁滞回线。对于同一种铁磁物质而言，极限磁滞回线是确定的。所以，一般就用极限磁滞回线作为该种材料磁特性的代表。如图 1.6 所示。通常所说的材料磁滞回线就是指极限磁滞回线而言。反映一种铁磁材料的磁滞回线基本情况的几个典型数据是饱和磁感应强度  $B_s$ ，矫顽力  $H_c$ ，剩磁  $B_r$  和磁场强度  $H_s$ 。按其磁滞回线的形状宽窄不同，磁性材料可分成三种类型，软磁材料、硬磁材料和永磁材料。



(1) 软磁材料：具有较小的矫顽磁力，磁滞回线较窄，如图 1.8 所示。一般

用来制造电机，电器用变压器等铁芯。常图 1.8 软磁材料的磁滞回线

用的有铸铁、硅钢、坡莫合金用铁氧体等。铁氧体在电子技术中应用也很广泛，例如可做计算机的磁芯，磁鼓以及录音机的磁带、磁头。

(2) 硬磁材料（永磁材料）：具有较大矫顽磁力，磁滞回线较宽 如图 1.9 所示。一般用来制造永久磁铁。常用的有碳钢、钴钢及铁镍合金。

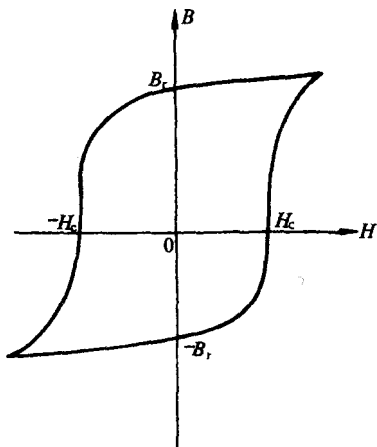


图 1.9 硬磁材料的磁滞回线

(3) 矩磁材料：具有较小的矫顽力和较大的剩磁，磁滞回线接近矩形，其稳定性好。在计算机控制系统中可用作记忆元件、开关和

逻辑元件。常用的有镁锰铁氧体及 1J51 型铁镍合金等材料。

常用的几种磁性材料的最大相对磁导率  $\mu_{\max}$ 、剩磁  $B_r$  和矫顽磁力  $H_c$  列在表 1.1 中。

表 1.1 常用磁性材料的磁性参数

材料名称	$\mu_{\max}$	$B_r/T$	$H_c/(A \cdot m^{-1})$
铸铁	200	0.475~0.500	800~1040
硅钢片	800~10 000	0.800~1.200	32~64
坡莫合金(78.5%Ni7)	2 000~200 000	1.100~1.400	4~24
碳钢(0.45%C)		1.800~1.100	2 400~3 200
钴钢		0.750~0.950	7 200~20 000
铁镍铝合金		1.100~1.350	40 000~52 000

### 思 考 题

1-1-1 写出图 1.10 所示磁场的安培环路定律的表达式。图中  $l$  为指定的闭合路径。 $N_1, N_2, N_3$  分别为各线圈的圈数。(  $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = N_1 i_1 + N_2 i_2 - N_3 i_3$  )

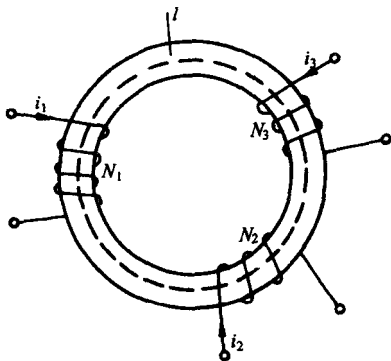


图 1.10 题 1-1-1 图

1-1-2 什么叫软磁材料和硬磁材料？各用于何处？

1-1-3 试根据磁动势平衡关系，说明电源的能量如何通过磁通的耦合作用传递给负载。

## 1.2 磁路的欧姆定律及直流磁路的计算

为了使较小的励磁电流产生足够大的磁通或磁感应强度，必须用  $\mu_r \gg 1$  的材料作介质。通常在电机、变压器及各种铁磁元件中把磁性材料制成一定形状的铁芯来提高磁感应强度。

由表 1.1 可见，铁芯的磁导率比周围空气或其他物质的磁导率高得多，因此绝大部分磁通能经过铁芯形成一个闭合通路。这种人为地造成磁通易通过的路径，称为磁路。图 1.11 和图 1.12 分别表示四极直流电机和交流接触器的磁路（不计漏磁通）。磁路通过铁芯（磁路的主要部分）和空气隙（有的磁路中没有空气隙）而闭合。由此可见对磁路的讨论、研究极为重要，这里先讨论磁路的计算。主要有两种方法：一种是已知磁通求磁势，一种是已知磁势求磁通。

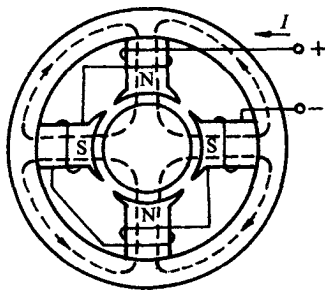


图 1.11 直流电机的磁路

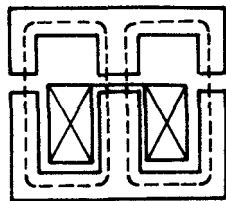


图 1.12 交流接触器的磁路

### 1.2.1 磁路的欧姆定律

对磁路进行分析与计算，最基本的定律是磁路的欧姆定律。

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$

以图 1.1 环形线圈为例，根据式 1.4) 有

$$IN = HL = \frac{B}{\mu}L = \frac{\phi}{\mu S}L$$

$$\phi = \mu S \frac{IN}{L}$$

即

$$\phi = \frac{F}{R_m} \quad (1.10)$$

式中： $F=IN$  为磁动势，即由此而产生磁通；

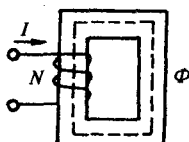
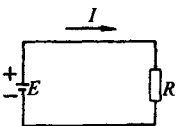
$R_m = \frac{L}{\mu S}$  称为磁阻，是表示磁路具有阻碍作用的物理量；

$L$  为磁路的平均长度；

$S$  为磁路的截面积。

式(1.10)与电路的欧姆定律，形式上相似，所以称为磁路的欧姆定律。两者对照见表 1.2。这里必须指出：虽然磁路与电路具有对照关系，但两者的物理本质是不同的。

表 1.2 磁路与电路对照表

磁 路	电 路
磁动势 $F$ 磁通 $\Phi$ 磁感应强度 $B$ 磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$	电动势 $E$ 电流 $I$ 电流密度 $J$ 电阻 $R = \frac{l}{\gamma S}$
	
$\Phi = \frac{F}{R_m}$	$I = \frac{E}{R}$

### 1.2.2 直流磁路的计算

在计算电机、电器等的磁路时，往往预先给定铁芯中的磁通（或磁感应强度），再按照所给的磁通及磁路各段的尺寸和材料去求产生预定

磁通所需的磁动势  $F=IN$ 。

注意磁路计算，初看起来好像利用式 (1.10) 即可解决，但由于磁性物质的磁导率  $\mu$  不是常数，它随励磁电流变化而变化，所以不能直接用上式计算。往往用磁场强度  $H$  这个物理量来计算，根据式

$$HL = IN$$

则有 
$$H = \frac{IN}{L} \quad (1.11)$$

上式是对匀磁路而言的。如果磁路由不同的材料或不同长度和不同截面积的几段组成的，即磁路由磁阻不同的几段串联而成，则

$$IN = H_1L_1 + H_2L_2 + \dots = \sum_i H_iL_i \quad (1.12)$$

$$(i = 1, 2, \dots)$$

这是计算磁路的基本公式。式中  $H_1L_1$ 、 $H_2L_2$ 、 $\dots$  也常称为磁路各段的磁压降。

如图 1.13 所示继电器的磁路由三段串联而成的，其中一段是空气隙，另外两段的截面积不一样，分别为  $S_1$ 、 $S_2$ ，且  $B-H$  曲线饱和。如已知磁通和各段的材料尺寸，则可用下述步骤直接求磁动势。

(1) 由于各种磁路的截面积不同，但其中又通过同一磁通，因此各段磁路的磁感应强度也就不同，可分别按下列各式计算：

$$B_1 = \frac{\phi}{S_1}, \quad B_2 = \frac{\phi}{S_2}, \quad B_3 = \frac{\phi}{S_3}$$

(2) 根据各段磁路材料的磁化曲线  $B=f(H)$ ，找出与上述  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $\dots$  相对应的磁场强度  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $\dots$ 。因为  $B$  不同，所以各段磁路的  $H$  也是不同的。

注意：计算空气隙或其他非磁性材料的磁场强度  $H_0$  时，可直接应用下式：

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{4\pi \times 10^{-7}}$$

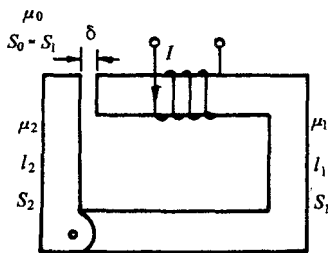


图 1.13 继电器的磁路

式中  $B_0$  是用特斯拉 (T) 计量的。

(3) 计算各段磁路的磁压降  $HL$ 。

(4) 应用式 (1.12) 求出磁动势  $IN$ 。

**例 1.1** 一个闭合的均匀铁芯的线圈，其匝数为 300 匝，铁芯中磁感应强度为 0.9T，磁路的平均长度为 45cm 试求：(1) 铁芯材料为铸铁时线圈中的电流；(2) 铁芯材料为硅钢片时线圈中的电流。

**解** 本题是由铁磁材料组成的，磁路只是一个回路，而且回路中各处的材料和截面积均相同，这种磁路为无分支均匀磁路。

先从图 1.7 的磁化曲线中查出磁场强度  $H$  然后根据式 (1.11) 算出电流。

$$(1) H_1 = 900 \text{ A/m}, I_1 = \frac{H_1 L_1}{N} = \frac{900 \times 0.45}{300} = 1.35 \text{ A}$$

$$(2) H_2 = 260 \text{ A/m}, I_2 = \frac{H_2 L_2}{N} = \frac{260 \times 0.45}{300} = 0.39 \text{ A}$$

可见由于所用铁心材料的不同，要得到同样的磁感应强度，则所需要的磁动势或励磁电流的大小相差就非常悬殊。由此可见采用磁导率高的铁芯材料，可使线圈的用铜量大大降低。

如果在上面 (1)、(2) 两种情况下，线圈中有同样大小的电流 0.39A 则铁心中磁场强度是相等的 都是 260A/m。但从图 1.7 的磁化曲线可查出的：

$$B_1 = 0.05 \text{ T}, B_2 = 0.9 \text{ T}$$

两者相差 17 倍， $\phi = BS$ ，可见磁通也相差 17 倍。在这种情况下，如果要得到相同的磁通，那么铸铁铁芯的截面积就必须增加 17 倍。由此可见，采用磁导率高的铁芯材料，可使铁芯的用铁量也大为降低。

**例 1.2** 有一环型铁芯线圈，其内径为 10cm 外径为 15cm 铁芯材料为铸钢。磁路中含有一空气隙，其长度等于 0.2cm。设线圈中通过 1A 的电流 如要得到 0.9T 的磁感应强度，试求线圈匝数。

**解** 本题为由铁磁材料组成的铁芯，磁路只是一个回路，但此回路中各处由不同的材料组成，此题属无分支不均匀磁路类题，解法如下：

磁路的平均长度为：

$$L = \frac{10+15}{2} \cdot \pi = 39.2\text{cm}$$

从图 1.7 中铸钢的磁化曲线查出，当  $B=0.9\text{T}$  时， $H_1=500\text{A/m}$ ，于是：

$$H_1 L_1 = 500 \times (39.2 - 0.2) \times 10^{-2} = 195\text{A}$$

空气隙中的磁场强度为

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.9}{4\pi \times 10^{-7}} = 7.2 \times 10^5 \text{ A/m}$$

则有  $H_0 \delta = 7.2 \times 10^5 \times 0.2 \times 10^{-2} = 1440\text{A}$

总磁动势为：

$$IN = \sum(HL) = H_1 L_1 + H_0 \delta = 195 + 1440 = 1635 \text{ A}$$

线圈匝数为：

$$N = \frac{IN}{I} = \frac{1635}{1} = 1635 \text{ 匝}$$

可见，当磁路中含有空气隙时，由于其磁阻较大，磁动势差不多都用在空气隙上面。

### 思 考 题

1-2-1 有一铁磁材料制成的均匀无分支磁路，其长度为  $L$  截面积为  $A$  当作用一个磁通势  $F$  时，已知其中磁感应强度  $B=1\text{T}$  现欲使磁路中的磁通  $\phi$  增加一倍，问下述三种办法哪种可行？

- (1) 磁通势增加到  $2F$ ；
- (2) 截面积增加到  $2A$ ；
- (3) 磁路长度减小到  $\frac{L}{2}$ 。

## 1.3 交流铁芯线圈电路

铁芯线圈根据所通电流的不同可分为两种；直流铁芯线圈与交流铁芯线圈。直流铁芯线圈通直流电来励磁，如直流电机的励磁线圈，电磁吸盘及各种直流电器的线圈。交流铁芯线圈通交流电来励磁，如交

流电机、变压器及各种交流电器的线圈。

分析直流铁芯线圈比较简单些。因为励磁电流是直流，产生的磁通是恒定的，在线圈和铁芯中间不会感应出电动势来；在一定电压  $U$  下，线圈中的电流  $I$  只和线圈本身的电阻  $R$  有关；功率损耗也只和铜耗有关，即  $I^2 R$ 。

交流铁芯线圈在电磁关系、电压关系、电流关系及功率损耗等几个方面和直流铁芯线圈是不同的，图 1.14 为铁芯线圈的交流电路。

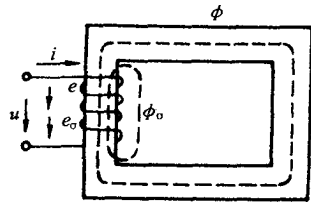


图 1.14 铁芯线圈的交流电路

### 1.3.1 交流铁芯线圈的电磁关系

磁动势  $iN$  产生的磁通绝大部分通过铁芯闭合，这部分磁通称为主磁通  $\phi$  或工作磁通。此外，还有很少的一部分磁通主要经过空气或其他非导磁媒质而闭合，这部分磁通称为漏磁通  $\phi_0$ （以上各节所讨论的铁芯线圈中实际上也存在漏磁通，但未计及）。这两个磁通在线圈中分别产生两个感应电动势：主磁通电动势  $e$  和漏磁通电动势  $e_0$ 。它们的电磁关系表示如下：

$$U \rightarrow i(iN) \begin{cases} \phi \rightarrow e = -N \frac{d\phi}{dt} \\ \phi_0 \rightarrow e_0 = -N \frac{d\phi_0}{dt} = -L_o \frac{di}{dt} \end{cases}$$

因为漏磁通主要不经过铁芯，所有励磁电流  $i$  与  $\phi_0$  之间可以认为成线性关系，当铁芯线圈的大小、形状已确定后，漏磁电感大小。

$$L_o = \frac{N\phi_0}{i} = \text{常数}$$

其中假设  $\phi_0$  是一等效漏磁通，与线圈各匝相链。

主磁通通过铁芯，所以  $i$  与  $\phi$  之间如

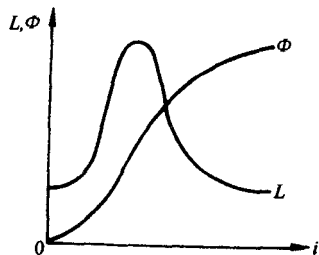


图 1.15  $\phi, L$  与  $i$  的关系

图 1.15 所示不存在线性关系。由于铁芯线圈的主磁电感  $L$  是随励磁电流变化而变化的，它与磁导率  $\mu$  随磁场强度而变化的关系相似，由图 1.15 可见  $L$  不是一个常数，因此铁芯线圈是一个非线性电感元件。

### 3.2 铁芯线圈交流电路的伏安关系

图 1.14 的电压和电流之间的关系也可由克希荷夫电压定律得出，这里设  $u, e, e_s$  三者的正方向一致。

$$u + e + e_s = iR$$

或

$$u = iR + (-e_s) + (-e) = iR + L_s \cdot \frac{di}{dt} + (-e) = u_R + u_s + u \quad (1.13)$$

当  $u$  为正弦电压，则式中各量可视作正弦量。于是上式可用相量表示

$$\dot{U} = \dot{I}R + (-\dot{E}_s) + (-\dot{E}) = \dot{I}R + j\dot{I}X_s + (-\dot{E}) = \dot{U}_R + \dot{U}_s + \dot{U}' \quad (1.14)$$

式中漏磁感应电动势  $E_s = -j\dot{I}X_s$ 。其中  $X_s = \omega L_s$  称为漏磁感抗，它是由漏磁引起的  $L_s$  为常数； $R$  是铁心线圈的电阻。

对于主磁感应电动势，由于主磁电感或相应的主磁感抗不是常数，所以应按下法计算。设主磁通

$$\phi = \phi_m \cdot \sin \omega t \quad (1.15)$$

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d(\phi_m \cdot \sin \omega t)}{dt} = -N \omega \phi_m \cos \omega t$$

$$= -2\pi f N \phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_m \cdot \sin(\omega t - 90^\circ)$$

其中  $E_m = 2\pi f N \phi_m$  是主磁动势  $e$  的幅值，而其有效值则为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi f N \phi_m = 4.44 f N \phi_m \quad (1.16)$$

上式是常用的公式，应特别注意，由式 (1.13) 或式 (1.14) 可知，电源电压  $u$  可分为三个分量：电阻上的电压降  $u_R = iR$ ；平衡漏磁电动势