

第一章 磁路、变压器、电感器基础

1-1 磁路与电路的比较

1 磁路—电路有关物理量对比

磁路与电路有许多相似之处,为加深理解,现把恒定磁通磁

路与直流电阻电路中有关的物理量和基本定律作一对比,如表 1 所示。

表 1

电 路			磁 路		
基本物理量 或基本定律	符号或表达式	单 位	基本物理量 或基本定律	符号或表达式	单 位
电 流	I	安(A)	磁 通	Φ	韦伯(Wb)
电 压	$U = El$	伏(V)	磁压(磁位差)	$U_m = Hl$	安(A)
电源电压	U_s	伏(V)	磁通势	F_m	安(A)
电 阻	$R = \frac{l}{\gamma A}$	欧(Ω)	磁 阻	$R_m = \frac{l}{\mu A}$	1/亨(1/H)
电 导	$G = \frac{1}{R}$	西门子(S)	磁 导	$A = \frac{1}{R_m}$	亨(H)
电流密度	$J = \frac{I}{A}$	安/米 ² (A/m ²)	磁通密度	$B = \frac{\Phi}{A}$	韦伯/米 ² (Wb/m ² = 1T)
电 导 率	γ	西门子/米(S/m)	磁导率	μ	亨/米(H/m)
KCL	$\sum I = 0$		磁通连续性原理	$\sum \Phi = 0$	
KVL	$\sum U = 0$		安培环路定律	$\sum Hl = \sum NI$ $= \sum U_m$	
欧姆定律	$U = RI$		磁路欧姆定律	$U_m = R_m \Phi$	

磁路与电路有一些相似之处,这只是问题的一个方面。应指出,它们还有很多不同之处,即磁路还有许多特点,认识这些特点对于正确地对磁路进行分析是有帮助的。

磁路特点

除前述磁压降与电压降的区别之外,与电路比较,磁路有以下特点

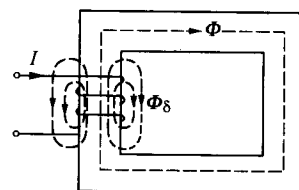
(1) 电流表示带电质点的运动,它在导体中运动时,电场力对带电质点做功而消耗能量,其功率损失为 RI^2 ; 磁通并不代表带电质点的运动, $R_m \Phi^2$ 也不代表什么功率损失,这是磁路与电路的一个本质区别。实际上,磁路与电路的上述相似之处只是形式上的。

(2) 自然界存在有良好的对电流绝缘的材料,但却尚未发现对磁通绝缘的材料。就目前所知,磁导率最小的铍的磁导率约为 $0.999824 \mu_0$, 空气的磁导率约为 $1.000038 \mu_0$, 因此,空气的磁导率几乎可以看作是最低的了。导磁性能最好的铁磁材料的磁导率也只约在 10^6 数量级。但是,在电的绝缘材料中,橡

胶的电导率约为铜的电导率的 10^{-20} 倍。这就给磁路带来下面两个特点:

1) 磁路中没有断路情况,即不存在有磁势无磁通的现象。众所周知,空气也是导磁的。

2) 磁路中有所谓漏磁现象。例如在图 1 所示的磁路中,若线圈中通以电流 I , 在铁心中将产生磁通 Φ , 但是,由于空气与铁



Φ ——主磁通 Φ_δ ——漏磁通

图 1 主磁通与漏磁通

磁性物质的磁导率相差得不是非常悬殊,所以铁心不能把磁通完全限制在铁心里,空气中还会有少量的磁通,通常把其闭合磁力线完全在按人为安排的磁路中分布的磁通称为主磁通,而把

其闭合磁力线分布在周围空气中的磁通称为漏磁通。它们分别如图 1 中的 Φ 与 Φ_0 所示。在有些要求准确度较高的磁路计算或某些特殊的场合中需要考虑漏磁。例如,电源变压器的漏磁会带来低频干扰,在谐振变换中漏磁感抗参与谐振,研究这些问题时,必须研究漏磁的规律。

(3)磁路几乎都是非线性的。这是因为铁磁材料的磁特性都是非线性的缘故。一般地讲,磁路分析问题是非线性分析的问题。前面引入的磁阻的概念和磁路的欧姆定律只有在磁路中

各段的材料都是线性或可以作为线性处理的情况下才是适用的。因此,实际上,在稍微精确一点的磁路计算中也不用磁阻的概念和磁路欧姆定律,而是直接用安培环路定律和各段磁路材料的 $B-H$ 曲线。当然,磁阻的概念和磁路的欧姆定律,对于定性地分析磁路问题还是很有用和很方便的。

介绍磁路的特点是为了更好地了解磁路。从分析的角度看,最值得注意的是非线性这一特点。

1-2 铁磁性物质的磁特性

1 铁磁性物质的磁化过程

铁磁性物质有很强的导磁能力,即在外磁场作用下很容易被磁化。这是因为它们的内部结构与非铁磁性物质有很大的不同的缘故。由物理学得知,在铁磁性物质内部存在着很多自发饱和磁化的小区域,称为磁畴。每个磁畴相当于自发磁化的小永磁体,具有相当大的磁矩,这个磁矩比非铁磁性物质中的所谓分子电流的磁矩大得多。在没有外磁场作用时,磁畴在物质中杂乱排列,对外不显磁性。在外磁场作用下,这些磁畴在不同的条件下:(1)可以发生体积的变化,即原与外磁场方向接近的磁畴体积扩大,原与外磁场方向近于相反的磁畴体积缩小;(2)可以发生翻转,即与外磁场方向不接近的磁畴翻转到与其接近的方向;(3)还可以发生旋转,使磁畴逐渐旋转到与外磁场一致的方向上来,因而显示出很强的磁性。

物质的磁特性的外部表现是该物质的磁感应强度 B 与磁场强度 H 的关系,这个关系可由实验测得。

下面便是实验表明铁磁性物质的磁化过程及其简单的物理解释。

把一个完全退了磁的样品(即实验前 $H=0, B=0$)拿来实验。当 H 值从零逐渐增加时, B 值也随之增加。当 B 增加到某一较高的数值后,其值虽仍随 H 值的增加而增加,但增加的数值却很少了,这就是铁心磁化到了饱和状态。这一变化情况如图 1 中曲线 $oabc$ 所示。这条从样品完全退了磁的状态开始磁化测得的 $B-H$ 曲线称为原始磁化曲线。这一曲线可分为四个部分,即:(1) oa 段:此段 H, B 值都较小, B 随 H 的变化量也较小,而且基本上是可逆的,即如果把 H 值又减小到零, B 值仍按原曲线回到零。这是由于此段磁化主要是在较弱的外磁场作用下铁磁物质内部发生磁畴体积的变化而引起的,磁畴体积变化引起的附加磁场不强,因此, B 值较小,当外磁场减小时,磁畴体积的变化还可复原,因此,此段特性是可逆的。图 1 右边部分为与曲线上相应点对应的磁畴变化示意图。对应于完全退磁状态即 BH 坐标的原点的磁畴示意图如图 1 中(o)所示,其各磁畴体

积相同,磁矩方向均等。对应于曲线 a 点的磁畴示意图如图 1 中(a)所示。该段曲线始点的斜率,称为初始磁导率。用符号 μ_i 表示,即 $\mu_i = \left. \frac{dB}{dH} \right|_{H=0}$ 。(2) ab 段:此段 B 值随 H 值变化最快,即曲线斜度最大,而且这个变化是不可逆的。这是因为此段磁化主要是在较强的外磁场作用下,铁磁物质内部除原与外磁场方向一致的磁畴外,其余磁畴都陆续发生翻转变而而引起的。

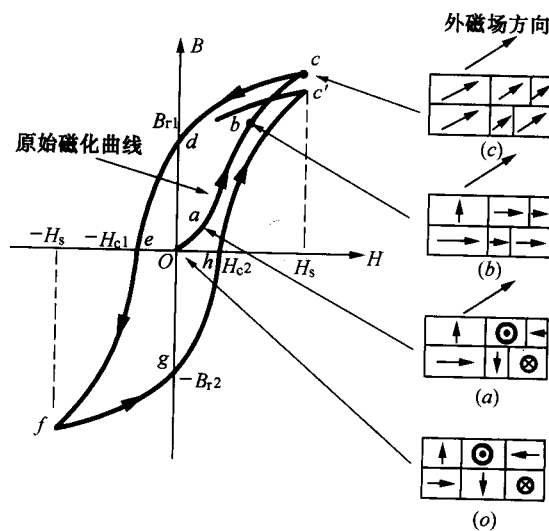


图 1

由于磁畴翻转到与外磁场一致方向上,附加磁场大增,因此, B 值变化很大。但磁畴翻转时,相互间的摩擦要消耗能量,所以此段变化过程是不可逆的,即外磁场消失后,磁畴不能恢复原来状态。相应于曲线上 b 点的磁畴示意图如图 1 中(b)所示。(3) bc 段:此段中虽外磁场更强,但 B 值随 H 值增加却变缓慢,即曲线斜度比前段减小。这是由于在此段始点 b ,物质内磁畴已基本上转到接近外磁场的方向上,此段中只是随着外磁场的增加进一步旋转,并转到与外磁场完全一致的方向上来为止。对应于曲线 c 点的磁畴示意图如图 1 中(c)所示。这时,磁化过程达到了饱和。达到饱和的磁感应强度和磁场强度称为饱和磁感应强度

饱和磁场强度,可分别用符号 B_s 和 H_s 表示。(4) c 点以上, B 值随 H 值变化更小,接近真空中的情况, $\frac{dB}{dH} \approx \mu_0$ 。这是由于此段中,铁磁物质中磁畴状态不再变化, B 随 H 的变化情况与真空中相近。显然,此段特性也是可逆的。

当磁场强度 H 增加到足使磁化达到饱和状态的 H_s 值(如图中的 c 点)以后再逐渐减小时, B 值也将随之减小。但是,是沿着比原始磁化曲线稍高的曲线减小的,如图 1 中曲线 cd 段所示。当 H 减小到零时, B 并不减小到零,而是大于零的值 B_r ,这个对应于 $H=0$ 的 B 值称为剩余磁感应强度,简称剩磁,要使 B 继续减小,需加反向磁场, B 随 H 沿 de 段下降,当 B 重新为零时,需加反向磁场 $-H_c$,即 e 点。这个对应于 $B=0$ 的磁场强度,称为矫顽力。如果继续增加反向磁场, B 将沿 ef 段下降, f 点以下与 c 点以上情况相同,也是饱和状态,称为反向饱和。如果从 f 点逐渐减小反向磁场, B 值将沿 fg 段上升,当 $H=0$ 时, B 为 $-B_r$,对应于 g 点。 B_r 也称剩余磁感应强度。如果再把 B 从零正向增加, B 将沿 gh 段上升, h 点对应的磁场强度值 H_c 称为矫顽力。如果 H 从 h 点再次增加到 H_s , B 将沿 hc' 上升到 c' 点, c' 点比 c 点稍低一些,这个差别是由于 c 点是 B 为 0 开始磁化得到的,而 c' 点是从 $-B_r$ 开始磁化得到的。这样反复磁化十多次,便可得到一个差不多是闭合的对称回线,这个回线称为磁滞回线。

应该指出,上述的磁化过程,只是能较全面体现铁磁性物质磁化特点的一种典型的磁化过程。实际上,一个具体的磁化器件中铁心的磁化过程除与铁磁材料本身有关外,还与激磁条件,即激磁电流的大小及其变化情况有关。例如,铁磁性物质磁化过程还可能有下列几种情况:

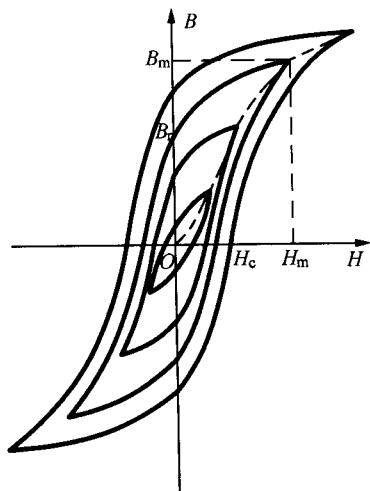


图 2

(1) 铁心被外磁场反复磁化时,其磁化过程虽然都使它们的 B 、 H 关系曲线形成磁滞回线的形状,但其回线的具体形状是随

着外磁场最大值 H_m 的不同而有所不同的。如图 2 所示。 H_m 大的,相应的磁感应强度最大值 B_m 、剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 和磁滞回线面积也大。当 H_m 大到一定程度时,再增大 H_m ,磁滞回线的形状几乎不变。这样的磁滞回线称为极限磁滞回线。

这就是说,当铁心被反复磁化时,若 H_m 较大,磁状态沿极限磁滞回线变化; H_m 较小时,磁状态沿不饱和的磁滞回线变化。

(2) 当对于一个具有剩磁 B_r 而未退磁的铁心进行反复磁化时,第一个周期的磁化过程将如图 3 所示。即由 B_r 开始,沿曲线 $o'c$ 增加到 B_m ,再沿曲线 cf ,经 B_r 、 $-H_c$ 到 $-B_m$,再沿曲线 fg 上升到 $-B_r$,此后的过程将如前所述,最后形成闭合的磁滞回线。

(3) 如果铁心在反复磁化过程中,磁场强度由 H_1 降到 H_2 ,然后增到 H_m ,磁感应强度 B 将先沿一条小回线改变,然后增到 B_m ,如图 4 所示。这个小回线称为局部磁滞回线。局部磁滞回线是相对极限磁滞回线而言的。因此,例 1 中所述不饱和的磁滞回线也可认为是一种局部磁滞回线。

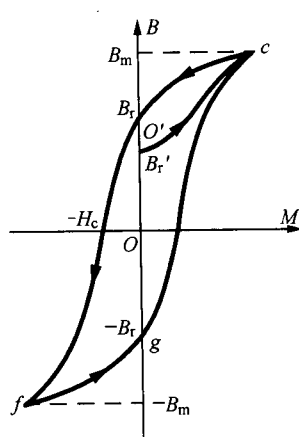


图 3

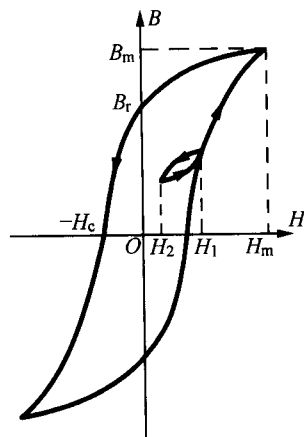


图 4

(4) 如果铁心在恒定磁场强度 H 磁化的同时,还受到一个小的交变磁场 $\pm \frac{1}{2} \Delta H$ 的反复磁化,如图 5 所示。则磁感应强度 B 将随 H 增加 $\frac{1}{2} \Delta H$ 而增加到 B_p ,以后沿局部磁滞回线 PQ 变化。

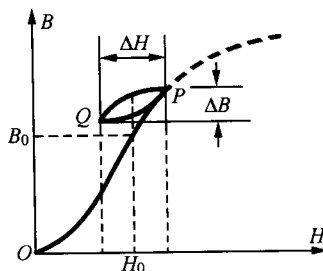


图 5

类似的例子无需再举。总之,铁磁材料制成的器件在运行

中的具体磁化过程可能是多种多样的。

2 铁磁性物质磁特性的表征

如前所述,铁磁性物质的磁特性可用它的 $B-H$ 曲线来表征,但随着激磁条件不同,磁化过程也不同,形成的 $B-H$ 曲线的形状也不同。用哪条曲线来代表某种铁磁性物质的磁特性呢?

对于同一种铁磁性物质而言,其极限磁滞回线是确定的,一般用极限磁滞回线来作为该种材料的磁特性的代表,如图 6 所示。通常所说的磁滞回线就是指极限磁滞回线而言的,通常所说的某种铁磁物质的剩余磁感应强度和矫顽力,就是指这个曲线上的 B_r 和 H_c 而言的,今后本书除需特别强调外,均略去“极限”二字。

由磁滞回线的形状可见,铁磁性物质磁特性有如下特点:

(1) B 、 H 关系是非线性的,有磁饱和现象,在饱和段 B 、 H 关系是可逆的;

(2) 在不饱和段, B 、 H 关系是不可逆的。磁感应强度上升和下降不是沿同一条曲线变化的, B 、 H 关系是多值函数。

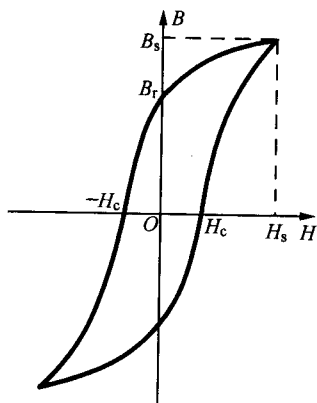


图 6

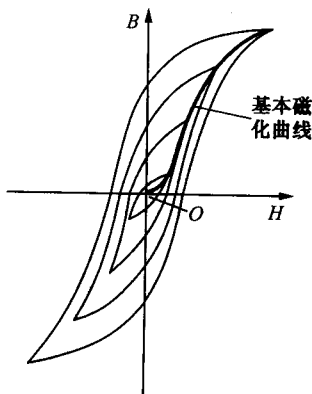


图 7

如果磁滞回线形状是狭窄的,该物质的磁特性还可利用它的基本磁化曲线来表征。所谓基本磁化曲线是指由许多不饱和的磁滞回线的正顶点的连线所形成的曲线,如图 7 所示。基本磁化曲线对某一物质而言也是确定的。基本磁化曲线常简称磁化曲线。不难看出,基本磁化曲线可以理解为由略去了铁磁物质磁特性的不可逆性而保留了饱和和非线性特征的曲线。它具有平均的意义。因此,基本磁化曲线也叫平均磁化曲线,它与初始磁化曲线相连。

由基本磁化曲线可决定各点的静态磁导率,即曲线上各点的 B 与 H 的比值 $\frac{B}{H}$,如图 8 所示。显然,铁磁性物质的磁导率不是常数,是随 B 值的不同而不同的。图中 $\mu_i = \frac{B}{H} \Big|_{H=0}$, μ_m 是磁导率中的最大值,称为最大磁导率。磁化曲线上各点切线的斜率称为动态磁导率 $\mu_d = \frac{dB}{dH}$,表示该点附近 B 随 H 变化的情况。

应该指出,磁滞回线和基本磁化曲线只是铁磁物质磁特性的典型代表。而对于由铁磁物质制成的实际器件进行分析时,应该尽量选取与铁心中实际磁化过程相近的特性曲线或特性参数作为依据。当然,上述两种特性曲线是最基本的。

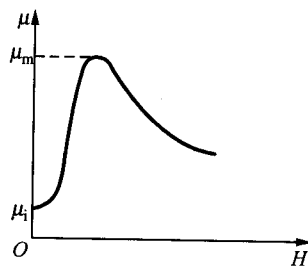


图 8

1-3 铁磁材料的分类

1 软磁材料和硬磁材料

铁磁材料按其磁滞回线的宽窄可分为两大类:即软磁材料和硬磁材料。磁滞回线较窄者,亦即磁导率大,矫顽力小者,称为软磁材料;磁滞回线较宽者,亦即矫顽力大,剩磁也大者,称为硬磁材料。目前,软磁材料的 H_c 可以做到约为 0.0010Oe ,硬磁材料的 H_c 可以做到约为 90000Oe 。软磁材料一般用来作电机、变压器、电磁铁、继电器等电磁设备的铁心,硬磁材料主要用来制造永久磁铁。

2 软磁材料按磁滞回线特点分类

随着科学技术的发展,磁性材料的种类越来越多,其中软磁材料的发展尤其迅速。目前,软磁材料就其磁滞回线或基本磁

化曲线的特点又可以分为如下几种。

(1) 高饱和磁感应强度、高磁导率材料

这种材料要求饱和磁感应强度要高,磁导率也要高,对剩磁大小和磁特性不饱和段的线性程度没有严格要求。软铁,硅钢,铁镍合金属于此种。

图 1 所示为铸铁,铸钢,硅钢片和铁镍合金的磁化曲线。

图 1 中几种高饱和磁感应强度、高磁导率材料,其性能的比较如下:从磁导率和 H_c 看,铸铁,铸钢一般,硅钢较好,铁镍合金最好;从饱和磁感应强度看,前两种较高,铁镍合金稍低;价格后者较前者贵。一般讲,铸铁,铸钢适于作大功率电磁铁铁心,硅钢片适用作中功率电磁设备性能要求较高的铁心,例如各种电