

高等学校教学用书

电机学

袁世鹰 江长青 焦留成 编

焦作矿业学院

前 言

电机学是一门技术基础课。目前电机学教材种类较多,各具特色。但都是以讲四种基本电机为主。根据适用的专业不同,取材各有侧重。本书主要适合于工业电气自动化、电力工程、电气技术及矿山机电等非电机专业的本科学生使用。

学习电机学所必须的基础知识,涉及到很多学科。除必须具有坚实的数学基础外,还可以用“电、磁、热、力、材”五个字来加以概括。“电”是指电路基本理论;“磁”是指磁场及磁路基本理论;“热”是指热力学基本理论;“力”是指运动学、力学基本理论;“材”是指材料学与材料力学基本理论。电机是机电能量转换的元件,它既是一个较成熟的机器又是一个大有潜力可挖的不断发展着的机器。只有熟练地掌握了电机的基本理论经过严格的实践训练,才能较好地掌握它。

本书参考学时为100学时。控制微电机及特种电机部分由“控制电机”课程来解决;电机实验部分由“电机实验”课程来解决。但是,电机学课程教学仍然要注意实践性环节的加强。例如组织学生参观发电厂、变电站以及电机制造与修理的工厂等;组织学生拆装小型电机;组织学生观看录像以及进行原理演示等等。这些都不是课时以内的任务。

本书第一篇磁路和变压器由袁世鹰编写,第二篇异步电机和第三篇同步电机由江长青编写,第四篇直流电机由焦留成编写。由于水平所限,错误在所难免,望读者批评指正。

编者

1989年10月1日

目 录

第一篇 磁路和变压器

第一章 磁路

§ 1—1 磁路的基本概念.....	1
§ 1—2 铁磁物质的磁性能.....	9
§ 1—3 交流铁芯线圈.....	12
§ 1—4 小 结.....	14
习题和思考题.....	15

第二章 变压器的基本原理

§ 2—1 变压器的主要类别和基本结构.....	16
§ 2—2 变压器的额定值.....	24
§ 2—3 变压器的空载运行.....	25
§ 2—4 变压器的负载运行.....	34
§ 2—5 变压器的参数测定.....	46
§ 2—6 变压器的标么值和百分值.....	52
§ 2—7 小 结.....	56
习题和思考题.....	57

第三章 三相变压器

§ 3—1 三相变压器的磁路系统.....	61
§ 3—2 三相变压器的连接组.....	63
§ 3—3 三相变压器的空载电势波形.....	69
§ 3—4 小 结.....	71
习题和思考题.....	72

第四章 变压器的运行问题

§ 4—1 变压器的并联运行.....	74
§ 4—2 变压器的运行特性.....	80
§ 4—3 变压器的不对称运行.....	85
§ 4—4 变压器的瞬变过程.....	94
§ 4—5 小 结.....	100
习题与思考题.....	100

第五章 特种变压器

§ 5—1 自耦变压器	1 0 3
§ 5—2 互感器	1 0 5
§ 5—3 电焊变压器	1 0 8
§ 5—4 小 结	1 1 0
习题与思考题	1 1 0

第二篇 异步电机

第六章 交流旋转电机基础

§ 6—1 交流旋转电机电枢绕组的电势	1 1 1
§ 6—2 交流旋转电机电枢绕组	1 1 8
§ 6—3 交流旋转电机电枢绕组的磁势	1 2 3
§ 6—4 小 结	1 2 8
思考题与习题	1 2 8

第七章 异步电机

§ 7—1 异步电机的工作原理	1 3 0
§ 7—2 异步电机的等值电路图与向量图	1 3 3
§ 7—3 异步电机的转矩方程式	1 4 2
§ 7—4 异步电动机几个运行问题	1 4 7
§ 7—5 小 结	1 5 3
思考题与习题	1 5 3

第三篇 同步电机

第八章 同步电机

§ 8—1 同步电机结构和基本原理	1 5 5
§ 8—2 同步发电机的基本电磁关系与运行	1 5 7
§ 8—3 同步电动机的基本电磁关系	1 6 9
§ 8—4 同步电动机的几个运行问题	1 7 2
§ 8—5 小 结	1 7 6
思考题与习题	1 7 6

第四篇 直流电机

第九章 直流电机基础

§ 9—1 直流电机工作原理和基本结构	178
§ 9—2 直流电机的空载磁场	182
§ 9—3 直流电机电枢绕组	186
§ 9—4 直流电机的感应电势及电磁转矩	193
§ 9—5 直流电机电枢反应	194
§ 9—6 直流电机的换向	197
§ 9—7 直流电机的励磁方式、分类及铭牌	202
§ 9—8 小结	203
习题与思考题	205

第十章 直流发电机

§ 10—1 直流发电机基本方程式	207
§ 10—2 并励发电机的电势建立	209
§ 10—3 直流发电机运行特性	211
§ 10—4 小结	214
习题与思考题	214

第十一章 直流电动机

§ 11—1 直流电机的可逆性	216
§ 11—2 直流电动机基本方程式	216
§ 11—3 直流电动机的运行特性	218
§ 11—4 直流电动机起动、反转、调速与制动	223
§ 11—5 小结	234
习题与思考题	235

第一篇 磁路和变压器

第一章 磁路

不论是电机还是变压器，电磁感应是它们工作的基础，因此要想了解电机和变压器的工作原理、电磁关系及性能，必须具备电、磁方面的基础理论知识。前者在电路课程中已经进行了详细研究。下面对电机学课程中要用到的磁路方面的有关知识作一些必要的补充。

§ 1—1 磁路的基本概念

变压器和绝大多数电机的磁场都是由线圈中通入电流产生的，在某些小型电机中的磁场是永久磁体产生的。为了获得在空间按一定规律分布、有足够强度的磁场，通常电机和变压器都采用铁磁材料构成一定形状的磁路。

广义地讲磁通所经过的路径，就叫磁路。实际上，在电机、变压器和一般电工设备中，常常把磁通的绝大部分集中在铁磁材料构成的铁芯内，形成闭合的磁路。

图 1—1 表示单相变压器的磁路，图 1—2 表示四极直流电机的主磁路，前者的磁路全部由铁芯组成，后者的磁路中包含有两小段空气隙。

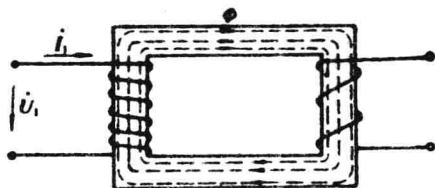


图 1—1 单相变压器的磁路

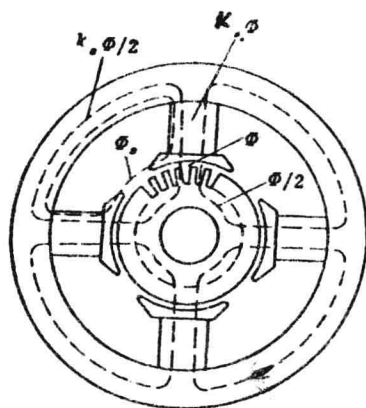


图 1—2 四极直流电机的主磁路

产生磁通的电流叫励磁电流，相应的线圈称为励磁线圈或励磁绕组。如励磁电流为恒定直流，则由它励磁产生的磁通也是恒定不变的，这样的磁路称为直流磁路。直流电机的磁路属于这种磁路。如励磁电流是交流，则磁路中产生的磁通也是随时间交变的，这种磁路称为交流磁路。变压器、异步机的磁路属于这种磁路。

一、磁感应强度

磁场最基本的特性就是对在场域中的载流导体有力的作用，作用力的大小表征了磁场的强弱。当载流导体线段 ΔL 与磁力线相垂直时，作用在该导线段上的电磁力为

$$\Delta F = B I \Delta L \quad (1-1)$$

所以
$$B = \frac{\Delta F}{I \Delta L} \quad (1-2)$$

式中 ΔF ——电磁力，单位是牛顿； I ——电流，单位是安培；

ΔL ——导线段长度，单位是米； B ——磁感应强度，单位是特斯拉。

$$1 \text{ 特斯拉} = 1 \frac{\text{牛顿}}{\text{安培} \cdot \text{米}} \quad (1-3)$$

也就是说，1米长的导线，通过1安培的电流，在磁场中受到的作用力为1牛顿时，磁感应强度就是1特斯拉。磁感应强度又叫磁通密度。

二、磁通

磁感应强度 B 描述的只是空间某一点的磁场，如果要描述一个给定面上的磁场，就要引入另一个物理量，叫磁通量，简称为磁通。如果在均匀磁场中有一个与磁场方向垂直的平面，面积为 A ，则磁通 Φ 为

$$\Phi = B A \quad (1-4)$$

式中 B 的单位是特斯拉， A 的单位是米²，则 Φ 的单位便是韦伯。

式(1-4)还可以写成下面的形式，即

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (1-5)$$

由式(1-5)可知，磁感应强度可以看成是单位面积内的磁通，所以磁感应强度又称为磁通密度。

三、磁导率

通电线圈所产生的磁场强弱与线圈中的介质有关。在同样条件下，当线圈中放入铁磁物质时，磁场将大大增强，当把铁磁物质取出时（线圈内的介质是空气），磁场将大大减弱。表征物质这样一种磁性的物理量叫做导磁率，用符号 μ 来表示，单位是

亨/米。

根据物质磁性质的不同，可以将它们分为三类：一类叫顺磁性物质，如空气、铝等，它们比真空的磁导率（ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米）略大。另一类叫逆磁性物质，如氢铜等，它们的磁导率略小于真空的磁导率。还有一类叫铁磁物质，如铁、钢、钴、镍等，它们的磁导率是真空磁导率的几百倍甚至几千倍，并且与磁场强弱有关，不是一个常数。

某种物质的磁导率 μ ，与真空的磁导率 μ_0 之比称为该物质的相对磁导率，用符号 μ_r 来表示，它是一个无量纲的数。几种常用铁磁物质的相对磁导率如表 1—1 所示。

表 1—1 几种铁磁物质的 μ_r 值

物质名称	μ_r 值	物质名称	μ_r 值
铸 铁	200—400	锰锌铁氧体 (用于 1MHz 以下)	300—500
铸 钢	500—2200	镍锌铁氧体 (用于 1MHz 以上)	10—1000
硅钢片	7000—10000	坡莫合金	20000—100000

四、磁场强度

磁场强度的定义是

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-6)$$

式中 B 的单位是特斯拉， μ 的单位是亨/米，则 H 的单位就是安/米。由于磁势的单位是安，从而可知磁场强度就是单位长度磁路上所消耗的磁势，或单位长度磁路上的磁压降。

五、常用基本定律

电机和变压器的工作原理都是建立在电磁感应定律、全电流定律和电磁力定律等的基础上，在磁路计算中常用到磁路基尔霍夫第一定律、磁路基尔霍夫第二定律和磁路欧姆定律，所以，熟练地掌握这些基本定律，是深入研究电机基本理论的基础。下面扼要地说明这些定律

(一) 电磁感应定律

设有一个匝数为 W 的线圈放入磁场中，不论什么原因，例如线圈本身的移动或转动、磁场强度本身发生变化等，造成了和线圈交链的磁通 Φ 随时间发生变化时，线圈内就会感应电势，这种现象就叫做电磁感应。如果把感应电势的正方向与磁通的正方向规定得符合右手螺旋关系，则感应电势 e 可用下式表示：

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -W \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-7)$$

式中 $\psi = W\phi$ ——线圈所交链的磁链。

这是一个实验定律，其含义为：由电磁感应产生的电势与线圈的匝数和磁通的变化率成正比。式(1—7)右边的负号表示，如果在感应电势的作用下在线圈内流过电流，则该电流所产生的磁通起着反对磁通变化的作用。当磁通增加时（此时 $d\phi/dt$ 为正值，而 e 为负值），它企图减少磁通；而当磁通减少时（此时 $d\phi/dt$ 为负值，而 e 为正值），则它企图增加磁通。这个规律，常称为楞次定律。

在(1—7)式中，当 ϕ 的单位为韦伯， t 的单位用秒时，则电势的单位为伏。

设和线圈交链的磁通随时间按正弦规律变化，即

$$\phi = \phi_m \sin \omega t \quad (1-8)$$

则感应电势为：

$$\begin{aligned} e &= -W \frac{d\phi}{dt} = -W \omega \phi_m \cos \omega t \\ &= E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中 E_m ——感应电势的幅值， $E_m = W\omega\phi_m$ 。

式(1—9)表明，当磁通随时间按正弦规律变化时，线圈内的感应电势也随时间按正弦规律变化，但电势在相位上滞后于磁通 90° ，如图1—3所示感应电势有效值

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{W\omega\phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} W\phi_m = 4.44 f W\phi_m \quad (1-10)$$

式中 ϕ_m ——按正弦规律变化的磁通幅值，韦；

f ——磁通变化频率，赫；

W ——线圈匝数；

E ——感应电势有效值，伏。

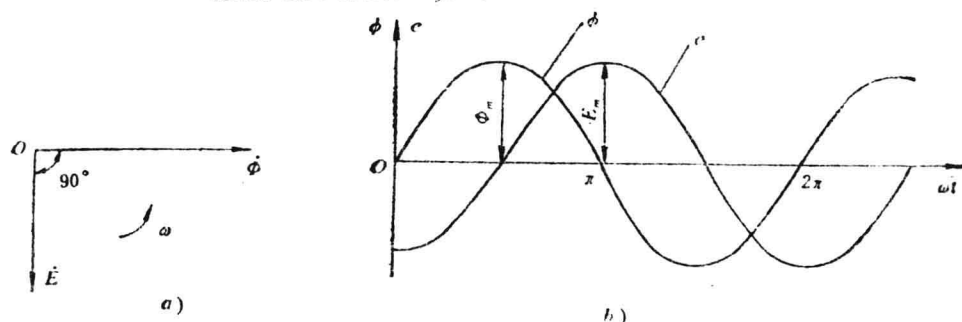


图1—3 电势与磁通的相位关系

若线圈与磁场相对静止,如变压器的情况一样,它的感应电势是由于和线圈交链的磁通本身随时间变化而产生的,这种感应电势称为变压器电势。

如果磁场是恒定的(即它不随时间变化),而感应电势是由于线圈和磁场之间有相对运动,因而引起和线圈交链的磁通发生变化而产生,则称这种感应电势为运动电势或速率电势。

对于运动电势,可以看成是由构成线圈的导体与恒定磁场相“切割”而产生。从这一思想出发,可以从式(1-7)导出运动电势的计算公式如下:

图1-4表示在金属架上,一头放一根导体AB,另一头接一盏灯泡。将导体和金属架放在磁通密度为B的恒定磁场里,并使导体和金属架构成的平面与磁力线垂直。图中⊙号表示磁力线的方向是进入纸面的。当导体在外力作用下从左向右平行移动时,设在dt时间内移动的距离为dx,则由导体和金属架构成的回路所交链的磁通量的变化为 $d\Phi = -BLdx$ (负号表示磁通减少),于是根据式(1-7),感应电势为:

$$\begin{aligned} e &= -W \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt} \\ &= BL \frac{dx}{dt} \\ &= BLV \quad (1-11) \end{aligned}$$

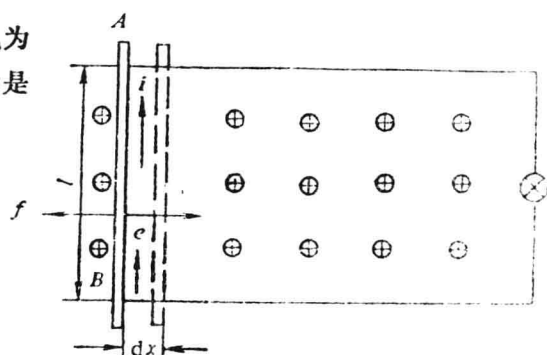


图1-4 运动电势的产生

式中 V ——导体运动的线速度, $V = \frac{dx}{dt}$ 。

由此可得下述定律:

当导体在恒定磁场中运动而切割磁力线时,若磁力线、导体和运动方向三者互相垂直,则导体内的感应电势为

$$e = BLV \quad (1-12)$$

式中 B ——磁通密度,特斯拉;

L ——导体切割磁力线的有效长度,米;

V ——导体相对于磁场运动的线速度,米/秒;

e ——感应电势,伏。

应当指出,式(1-7)是电磁感应定律的普遍形式,式(1-12)仅是计算运动电势的一种特殊形式。运动电势方向可以用图1-5的右手定则确定:把右手伸开,使大拇指和其余四指互相垂直,用手心对着磁力线,大拇指指向导体相对于磁场的运动

方向，则四指所指方向即为运动电势方向。

(二) 全电流定律

设空间有 n 根载流导体，导体中的电流分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 ……，则沿任何闭合路径 L ，磁场强度 $\vec{H}$ 的线积分 $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l}$ 等于闭合回路所包围的电流的代数和，即

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Sigma I \quad (1-13)$$

这就是全电流定律。 ΣI 是回路所包围的电流。在式

(1-13) 中，若导体中电流的方向与积分路径的方向符合右手螺旋关系，该电流取正号，反之取负号。对图 1-6 所示电流方向， I_1 和 I_2 取正号，而 I_3 取负号。

在图 1-6 中，还绘了另外一条积分路径 l' ，从全电流定律讲，不论沿积分路径 l 还是 l' ，磁场强度的线积分的结果相等。这是因为无论线积分路径的长度和形状如何，只要闭合回路所包围的全电流相同，积分的结果就必然相等。在图 1-6 中，虽然 l' 的积分路径较长，但它距离载流导体较远，磁场强度较弱，所以

$$\oint_{l'} \vec{H} \cdot d\vec{l}' = \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

(三) 电磁力定律

实验表明，载流导体在磁场中受到力的作用由于这种力是磁场和电流相互作用产生的，所以称为电磁力。若磁场与导体相互垂直，则作用在导体上的电磁力为：

$$f = B l i \quad (1-14)$$

式中 B ——磁通密度，特斯拉；

i ——导体中的电流，安；

l ——导体在磁场中的长度，米；

f ——作用在导体上的电磁力，牛顿。

电磁力的方向可由左手定则确定：把左手掌伸开，大拇指与其余四指垂直，用掌心迎接磁力线，四指指着电流的方向，则大拇指方向就是电磁力的方向，如图 1-7 所示。

确定电磁力方向的另一方法是：根据右手螺旋法则画出电流 i 产生的磁力线，把这种磁力线与导体所在处的外磁场的磁力线迭加，将使导体一边的磁力线增加，另一边减少，则电磁力的方向是从磁力线密的一边指向磁力线疏的一边，如图 1-8 所示。

(四) 磁路的基尔霍夫第一定律

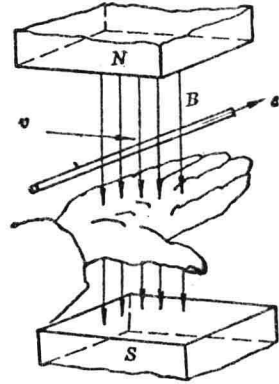


图 1-5 右手定则

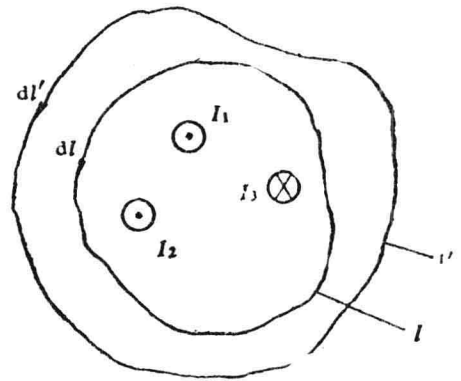


图 1-6 全电流定律

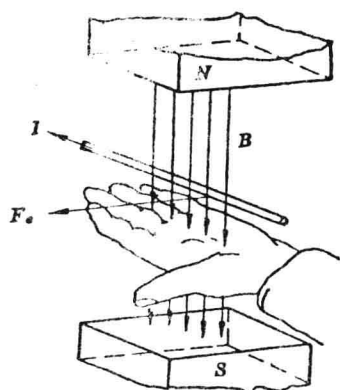


图 1—7 左手定则

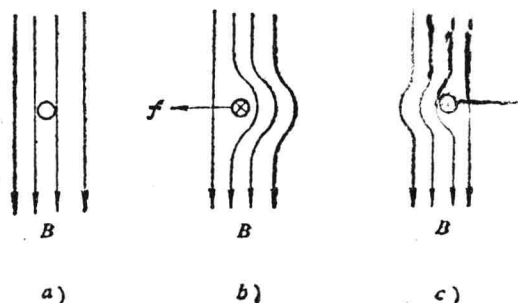


图 1—8 确定电磁力方向的另一种方法

a) $i = 0$ b) i 流入纸面 c) i 流出纸面

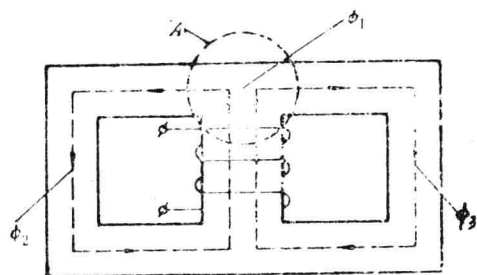


图 1—9 磁路基尔霍夫第一定律

图 1—9 是一台三相芯式变压器的铁芯，如果在中间铁芯柱的线圈中通以电流，则产生磁通，其路径为虚线所示，从图中显然可以看出：

$$\phi_1 = \phi_2 + \phi_3$$

或 $-\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0$

即 $\Sigma \phi = 0$ (1—15)

这就是磁路的基尔霍夫第一定律。式 (1—15) 也可以这样来理解：在该图中取一闭合面 A，如果令穿出闭合面 A 的磁通取正值，进入闭合面 A 的磁通取负值，则通过闭合面磁通的代数和为零。亦即

进入闭合面的磁通，必须等于离开闭合面的磁通。

(五) 磁路的基尔霍夫第二定律

在磁路计算中，总是将磁路分成若干段，凡材料及截面相同的取为一段。在每一段磁路中，由于截面积相同，所以磁通密度 B 必定处处相等，且由同一材料做成，磁导率一样，所以磁场强度也相等。例如在图 1—10 所示的磁路中，其磁路由铁磁材料及空气隙两部分构成，而铁磁材料这部分的截面积又分别为 A_1 及 A_2 ，故整个磁路应分为三段，每段长度为 l_1 、 l_2 及 l_3 。每段的磁场强度分别为 H_1 、 H_2 及 H_3 。根

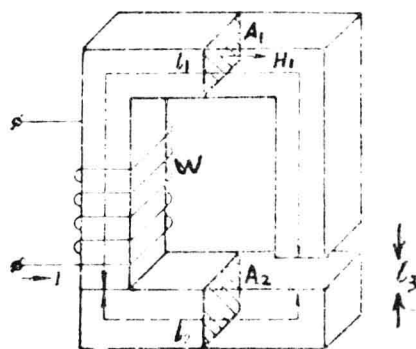


图 1—10 磁路基尔霍夫第二定律

据安培环路定律可得

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 = \sum W I$$

或 $\sum H l = \sum W I \quad (1-16)$

当H的方向与电流的方向符合右手螺旋规律时，取正号，否则取负号。H是单位磁路长度的磁压降，H l便是一段磁路上的磁压降， $\sum H l$ 是整个闭合回路上总的磁压降。 $\sum W I$ 是磁通所包围的总电流，由它产生磁通，所以称为磁动势，或简称磁势。式(1-16)是磁路基尔霍夫第二定律的表达式，它是由全电流定律演变来的。

(六) 磁路欧姆定律

如果某段匀强磁路的长度为 l，则该段磁路上的磁压降 U_m 便为

$$U_m = H l \quad (1-17)$$

由于 $H = \frac{B}{\mu}$ ，而 $B = \frac{\Phi}{A}$ ，将此两式代入式(1-17)中，得

$$U_m = H l = \frac{B}{\mu} l = \frac{1}{\mu A} \Phi = R_m \Phi \quad (1-18)$$

式中 $R_m = \frac{l}{\mu A}$ ，它与电阻的计算公式形式类似，故我们称它为磁阻。式(1-18)

与电路的欧姆定律 $U = R I$ 在形式上完全一样，故称为磁路欧姆定律。

磁阻与磁路的长度 l 成正比，与磁路的截面积 A 及磁导率 μ 成反比。由于铁磁材料的磁导率 μ 不是一个常数，故铁磁材料的磁阻是非线性的。

磁阻的倒数是磁导，用 Λ 来表示，于是

$$\Lambda = \frac{1}{R_m}$$

在工程计算中，采用国际单位制，它与电磁单位制的换算关系如表 1-2 所示。

表 1-2 磁路计算的单位

物理量	单位制	国际单位制	电磁单位制	换算关系
磁通物理量 B		特 (T), 韦伯/米 ²	高斯 (GS) 麦/厘米 ²	1 特 = 10 ⁴ 高斯
磁场强度 H		安匝/米 (A/m)	安匝/厘米 (A/cm)	
真空导磁率 μ_0		4 $\pi \times 10^{-7}$ 亨/米	0.4 π	
磁通 Φ		韦伯 (Wb)	麦 (MX)	1 韦 = 10 ⁸ 麦
磁势 F		安匝 (A)	安匝 (A)	
磁阻 R_m		安匝/韦 (A/Wb)	安匝/麦 (A/MX)	
长度 l		米 (m)	厘米 (cm)	
面积 A		米 ² (m ²)	厘米 ² (cm ²)	

§ 1—2 铁磁物质的磁性能

如前所述,电机和各种电气设备的磁路主要是由铁磁物质构成,这是因为铁磁物质具有特殊的磁性能,简要介绍如下。

一、铁磁物质的磁化

将铁磁材料铁、钴、镍以及它们的合金放入磁场后,磁场将显著增强,铁磁物质呈现很强的磁性,这种现象,称为铁磁物质的磁化。铁磁材料之所以有高导磁性能,在于铁磁材料内部存在着很多很小的强烈磁化了的自发磁化区域,相当于一块块小磁铁,称为磁畴。在铁磁物质未放入磁场以前,这些磁畴杂乱无章地排列着,磁效应互相抵消,故对外不呈现磁性,如图 1—11 a) 所示。当铁磁物质放入磁场后,在外磁场的作用下,这些磁畴沿着外磁场的方向作有规则的排列,如图 1—11 b) 所示,于是形成一个附加磁场迭加在外磁场上,从而使磁场大大增强。

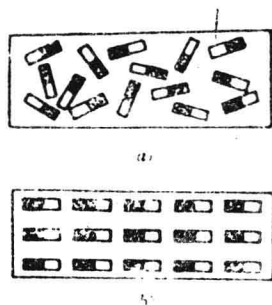


图 1—11 磁畴

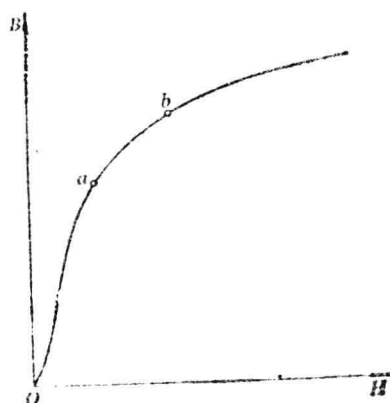


图 1—12 初始磁化曲线

二、铁磁物质的初始磁化与磁饱和

将一块尚未磁化的铁磁物质进行磁化,在磁场强度 H 由零逐渐增加时,磁感应强度 B 也随着逐渐增加,其形状如图 1—12 所示。在 a 段, H 值增加时, B 值增加较快,这是因为随着 H 值的增加,有越来越多的磁畴趋向于外磁场的方向,使磁场增强。在 ab 段,随着 H 值的继续增加,大部分磁畴已趋向外磁场方向,可以转向的磁畴越来越少,故 B 值增加越来越慢,这段曲线称为磁化曲线的膝部。 b 点以后已经很少有磁畴可以转向,因为 H 增加 B 值增加非常缓慢,最后近乎于平行于横坐标的水平线,这种现象称为磁饱和现象。

三、磁滞现象

在初始磁化之后,如果减少励磁电流将会发现:当磁场强度从最大值 H_m 逐渐减小时,磁通密度 B_m 相应减少,但不从原路返回,而沿图 1—13 中的曲线 cd 下降,当 $H = 0$ 时, $B \neq 0$,保留一定的磁通密度 B_r ,称为剩余磁通密度,简称剩磁。要消除

剩磁,须使励磁电流反向,并从零逐渐增加。这时, B 随着 $|-H|$ 的增加而减小,如曲线上 $d e$ 段所示。当 $H = -H_c$ 时, $B = 0$ 。由上述可以看出,在改变 H 的过程中, B 的变化总是滞后于 H 的变化,这种现象称为磁滞现象。这是由于在外磁场作用下,磁畴在取向或恢复原状的过程中存在着阻碍作用所致。 H_c 称为矫顽磁场强度,又称矫顽力。它代表着消除剩磁所需要的反向磁场强度,反映磁性物质保持剩磁的能力。继续增加反向励磁电流,当 $|-H| > |-H_c|$ 以后, B 反向,并随 $|-H|$ 的增

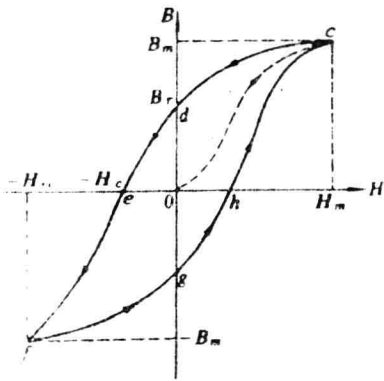


图 1—1 3 磁滞回线

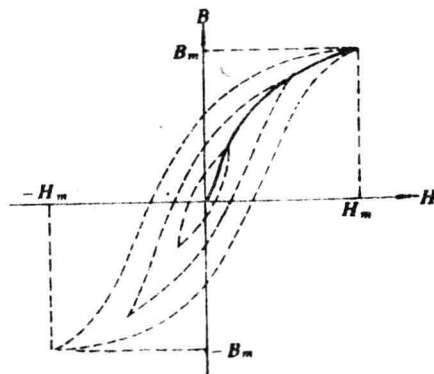


图 1—1 4 基本磁化曲线

加而增加,当 $H = -H_m$ 时, $B = -B_m$ 。依同理,减小反向励磁电流到零,并使磁场强度从零增加到 H_m 值,则 BH 曲线沿 $f g h \dots$ 上升。经多次反复可得到一条对称于原点的闭合回线,称为磁滞回线,如图 1—1 3 所示。

如果取不同的 H_m 值,重复前述过程,可以得到一组磁滞回线,如图 1—1 4 所示。将这些磁滞回线的顶点连接起来形成一条曲线,称为基本磁化曲线。它是磁路计算的依据。不同的铁磁物质它的基本磁化曲线是不同的,可以从手册中查到或经实验得到。

具有高剩磁和较大矫顽力的铁磁性物质,如碳钢、钨钢和铁钴镍合金,是制造永久磁铁的好材料。剩磁可使自励发电机发电,也会由于剩磁使控制系统复杂化。剩磁的大小不是恒定不变的,当铁芯受到震动、温度升高或长期存放时,有规则排列的磁畴会逐渐变成杂乱无章的状态,使剩磁减弱或消失。这种情况会造成磁电式仪表的误差增加,或并励直流发电机不能自励。为了恢复剩磁,可以在线圈中通入电流,建立外磁场,迫使磁畴重新取向,恢复剩磁,这种办法叫做充磁。

四、磁滞损耗和涡流损耗

(一) 磁滞损耗

前已述及,当铁磁材料被反复磁化时,即形成磁滞回线。在交流励磁情况下,也

会出现类似的磁滞回线,但由于涡流的存在,磁滞回线会更宽一些,如图1—15所示,这个磁滞回线a—b—c—d—e—f—a比虚线形成的磁滞回线要宽些。当沿a—b—c上升曲线磁化时,磁场强度由零增到 $+H_m$,同时磁感应强度由 $-B_r$ 增至 $+B_m$ 。在此过程中,磁场吸收的能量可用abcgoa这个曲面所包围的面积来表示。当磁场强度由 $+H_m$ 减到零时,由于磁滞作用工作点将沿回线cd下降,磁感应强度也将从 $+B_m$

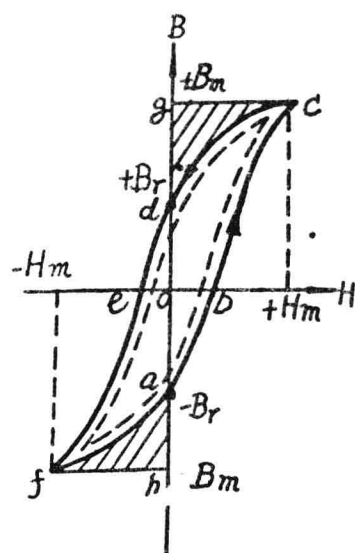


图1—15 磁滞损耗

降到 $+B_r$ 。由曲面c g d c所表示的这部分能量将被送回给电源,曲面a b c d o a所表示的这部分能量即为磁滞损耗。同理,当磁场强度由零减到 $-H_m$ 时,磁感应强度由 $+B$ 变到 $-B_m$,磁场吸收的能量可用d—e—f—h—a—o—d曲面所包围的面积来表示,当磁场强度由 $-H_m$ 沿回线的fa部分变为零时,磁感应强度由 $-B_m$ 变到 $-B_r$,曲面f h a f所代表的能量送回电源。f a o d e f即为磁滞损耗。

由上可见,磁场强度由 $+H_m$ 变到 $-H_m$,又从 $-H_m$ 回到 $+H_m$ 时,完成一个周期。磁路系统从电源所吸收的能量(上升过程),将大于返回电源的能量(下降过程),二者之差,即等于磁滞回线所包围的面积。将该面积乘以磁性材料的体积,这就是磁场变化一周期的磁滞损耗。

工程计算中所称的磁滞损耗,是指铁芯内每秒钟消耗的能量,即功率损耗,因此单位体积铁芯的磁滞损耗正比于磁通的交变频率和磁滞回线所包围的面积。实验证明,磁滞回线的面积与 B_m^n 成正比,n约为 $1.6 \sim 2.3$,所以磁滞损耗

$$p_h = C_h f B_m^n \quad (1-19)$$

式中的 C_h 为磁滞损耗系数,因材料不同而不同,f为磁化频率; B_m 为磁通密度最大值。

(二)、涡流损耗

当磁场交变时,铁芯内会产生环流,叫做涡流,如图1—16所示。涡流在铁芯中引起的电阻损耗叫做涡流损耗。铁芯的电阻率越大,涡流所经路径越长,涡流损耗就越小。因此,电机和变压都采用含硅量较高的硅钢片迭成,其目的就是为了减少涡流损耗。涡流损耗的计算较复杂,经过分析得出

$$P_{Fe} = C_{Fe} \Delta^2 f^2 B_m^2 \quad (1-20)$$

式中 Δ 为铜片厚度； f 为磁通交变频率； B_m 为磁密的最大值； C_{Fe} 为涡流损耗系数，与材料的性质有关。

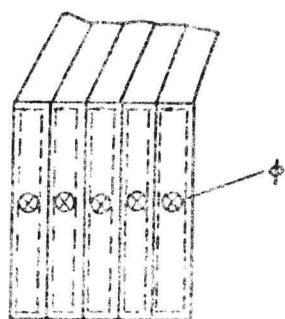


图 1—1 6 迭片铁芯中的
涡流损耗

磁滞损耗和涡流损耗之和总称为铁芯损耗，简称铁耗。它的热效应使铁芯发热，从而降低了电气设备的效率。所以，设法降低铁耗是改善电机和变压器性能指标的一项重要措施。

§ 1—2 交流铁芯线圈

一、交流铁芯线圈的电压方程式和等效电路

当铁芯线圈接入正弦交流电源时，线圈中就有电流流过，如图 1—1 7 所示。若由电流产生的磁通全部通过铁芯，并忽略线圈本身的电阻，则按基尔霍夫定律，外加正弦交流电压 $\dot{U}$ 将近似地与线圈的感应电势 $\dot{E}$ 相平衡，即

$$\dot{U} \approx -\dot{E} \quad (1-21)$$

如不计铁耗，线圈中流过的电流全是励磁电流，用以建立铁芯中的磁通 Φ_m ，此时

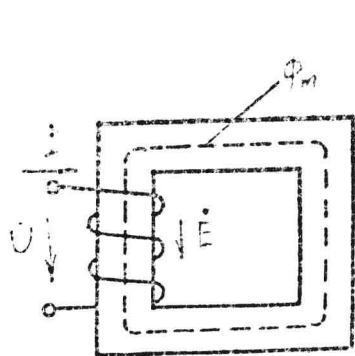


图 1—1 7 铁芯线圈接入交流电源

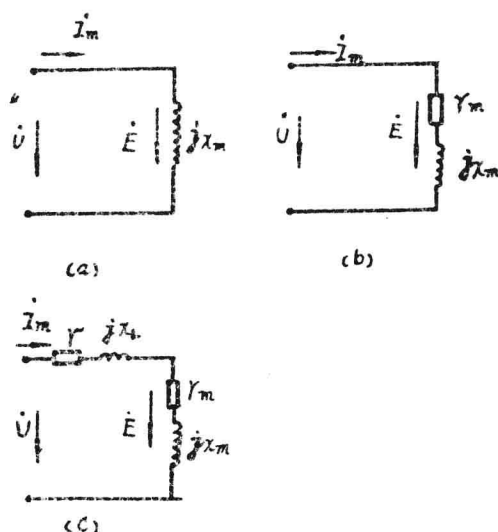


图 1—1 8 交流铁芯线圈的等效电路