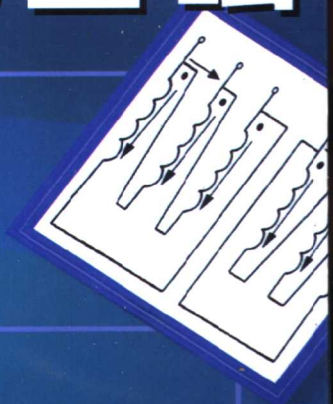
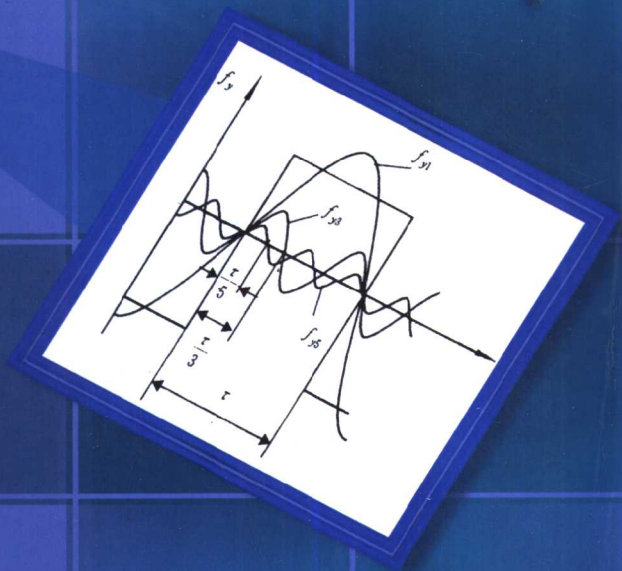


高等学校（矿业）“十五”规划教材

电机原理及拖动基础

方荣惠 邓先明 上官璇峰 编著



DIANJI YUANLI JI
TUODONG JICHU

中国矿业大学出版社



China University of Mining and Technology Press

TM301

F-679

高等学校(矿业)“十五”规划教材

电机原理及拖动基础

方荣惠 邓先明 上官璇峰 编著

中国矿业大学出版社

责任编辑 何 戈

责任校对 杜锦芝

图书在版编目(CIP)数据

电机原理及拖动基础/方荣惠等编著. —徐州:中国矿业大学出版社,2001. 12

ISBN 7-81070-446-X

I. 电… II. ① 方… ② 邓… III. ① 电机学 ② 电力传动 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 076364 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

中国矿业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 18.25 字数 441 千字

2001 年 12 月第 1 版 2001 年 12 月第 1 次印刷

印数 1~2000 册 定价 25.00 元

前 言

为了适应社会主义市场经济和科学技术发展的需要,培养面向 21 世纪具有更强适应性的高科技人才,高等学校电工学科的原有专业正在合并为统一的宽口径专业——电气工程与自动化专业。《电机原理及拖动基础》作为宽口径专业的一门专业基础课,是电机与拖动系列课程建设中的主要教材之一,在学时比原来有所削减的情况下,担负为多门后续课程打好基础的任务,其教学内容也相应地进行了调整。为配合教学内容的变化,我们编著了《电机原理及拖动基础》一书,并制作了配套的多媒体网络课件。

本书是根据新的教学大纲,集作者多年的教学经验编著而成。本书力求做到内容精选、重点突出、努力创新、适合教学。在论述上力求由浅入深、循序渐进,以便于读者理解、掌握和运用。

全书共分十章。其中,第一章、第六章、第七章、第八章由中国矿业大学方荣惠编著,第三章、第四章、第五章由中国矿业大学邓先明编著,第二章、第九章、第十章由焦作工学院上官璇峰编著。

本书编写时曾参阅了许多专家、教授的教材和专著,得到了中国矿业大学信息与电气工程学院领导和有关老师的热情帮助,得到了谭得健教授的大力支持,在此一并致以深深的谢意。

由于编著者的水平有限,书中定有不少缺点和错误,敬请读者批评指正。

编著者

2001 年 9 月

目 录

第一章 磁路.....	(1)
第一节 磁路的基本概念和基本定律.....	(1)
第二节 铁磁材料的性质.....	(8)
小结	(12)
习题	(12)
第二章 电力拖动的动力学基础	(13)
第一节 机械特性	(13)
第二节 拖动系统的运动方程式	(15)
第三节 拖动系统的启动和停车时间	(20)
小结	(23)
习题	(23)
第三章 直流电机原理	(25)
第一节 直流电机的用途、结构及基本工作原理.....	(25)
第二节 直流电机的励磁磁场	(31)
第三节 直流电机的电枢绕组	(33)
第四节 直流电机的负载磁场及电枢反应	(38)
第五节 直流电机的感应电势与电磁转矩	(41)
第六节 直流发电机	(43)
第七节 直流电动机	(50)
第八节 直流电机的换向	(60)
小结	(69)
习题	(69)
第四章 直流电动机的电力拖动	(72)
第一节 他励直流电动机的机械特性	(72)
第二节 他励直流电动机的启动和反转	(76)
第三节 他励直流电动机的调速	(81)
第四节 他励直流电动机的制动	(89)
小结	(97)
习题	(98)
第五章 变压器.....	(101)

第一节	变压器的用途、工作原理及结构	(101)
第二节	变压器的空载运行	(105)
第三节	变压器的负载运行	(111)
第四节	标么值和百分值	(120)
第五节	变压器参数的测定	(121)
第六节	变压器的运行性能	(124)
第七节	三相变压器	(126)
第八节	变压器的并联运行	(135)
第九节	特种变压器	(139)
小结		(143)
习题		(143)
第六章	交流电机的共同理论	(147)
第一节	概述	(147)
第二节	三相交流电机的定子绕组	(150)
第三节	在正弦分布磁场下的绕组电势	(155)
第四节	交流绕组的磁势	(159)
小结		(167)
习题		(168)
第七章	三相异步电动机原理	(171)
第一节	三相异步电动机的构造及作用原理	(171)
第二节	三相异步电动机的电磁分析	(174)
第三节	三相异步电动机的功率和转矩平衡	(185)
第四节	三相异步电动机的工作特性	(187)
第五节	三相异步电动机参数的测定	(189)
小结		(193)
习题		(193)
第八章	三相异步电动机的电力拖动	(196)
第一节	三相异步电动机的机械特性	(196)
第二节	笼形转子异步电动机的启动	(205)
第三节	绕线转子异步电动机的启动	(212)
第四节	三相异步电动机的调速	(220)
第五节	三相异步电动机的电气制动	(229)
第六节	三相异步电动机的不正常运行	(233)
第七节	单相异步电动机	(239)
小结		(242)
习题		(242)

第九章 同步电动机..... (246)

第一节 同步电动机的基本结构和工作原理..... (246)

第二节 同步电动机内部的电磁关系..... (248)

第三节 同步电动机的功率和转矩关系..... (251)

第四节 同步电动机的特性..... (255)

第五节 同步电动机的启动..... (258)

第六节 同步调相机..... (259)

小结..... (261)

习题..... (262)

第十章 电动机容量的选择与验算..... (263)

第一节 电动机的发热与冷却过程..... (264)

第二节 电动机的工作制..... (266)

第三节 连续工作方式时电动机容量的验算..... (268)

第四节 短时工作方式时电动机容量的验算..... (274)

第五节 间歇工作方式时电动机容量的验算..... (277)

第六节 选择电动机时应考虑的几个问题..... (280)

小结..... (282)

习题..... (282)

参考文献..... (284)

第一章 磁 路

电机和变压器是机电能量转换、电能输送或信息传递的器件。在这些器件中,常常利用铁磁性材料构成各种几何形状的磁路,建立磁场,利用磁场作为能量(或信息)传递和转换的媒介。

磁场总是伴随着电流而存在的,磁路是电机、变压器的一个很重要的组成部分。磁性材料的好坏直接决定了电工设备的尺寸大小和功率输出的多少。由于铁磁性材料磁饱和及铁损耗的存在,影响了设备的特性,并使磁路计算复杂化。本章将较系统地讲述磁路的基本概念、基本定律和铁磁性材料的性质等内容,为学习变压器和旋转电机奠定基础。

第一节 磁路的基本概念和基本定律

一、磁路的基本概念

电流产生磁场。有关磁场的性质可从麦克斯韦方程得到较为全面的描述。电机和变压器的磁场往往局限在由磁性材料及空气隙等组成的磁路中,因此本课程仅用磁路的观点来研究它。

广义地说,磁通所经过的路径就叫磁路。实际上,在一般电工设备中,磁通的绝大部分集中在由铁磁性材料组成的铁心内,形成闭合磁路。图 1-1(a)所示为变压器铁心组成的磁路,图 1-1(b)所示为直流电机的磁路。前者的磁路全部由铁心组成,后者的磁路中包含有两小段空气隙。当线圈中有电流通过时,由于铁心的导磁性能较好,绝大部分磁通集中在铁心内,因而能获得较强的磁场。

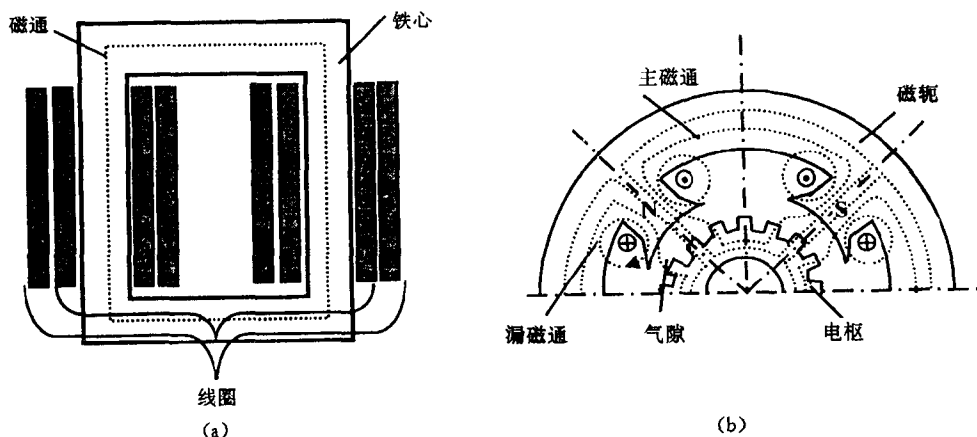


图 1-1 变压器和直流电机的磁路

(a) 变压器磁路;(b) 直流电机的磁路

产生磁通的电流称为励磁电流,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,则由它激励产生的磁通也是恒定不变的,这样的磁路称为直流磁路,直流电机的磁路就属于这一种。如果励磁电流是交流,则磁路中的磁通也随时间而交变,这种磁路称为交流磁路。变压器、异步机的磁路就属于这种。

图 1-2 所示是由闭合铁心组成的最简单的磁路。铁心的截面为 A ,磁路平均长为 l ,铁心上绕的线圈匝数为 N ,流过的电流为 I ,由电流所产生的磁通绝大部分经过铁心而闭合,这部分磁通称为主磁通 Φ_m 。还有一小部分磁通被挤出铁心之外,经部分线圈和空气而闭合,这一小部分磁通称为漏磁通 Φ_o 。如不考虑漏磁通,则可认为铁心内的磁通都是同一磁通 Φ 。因铁心各段的截面积相等,所以各处的磁通密度(或磁感应强度) B 也相等,即:

$$B = \frac{\Phi}{A} \tag{1-1}$$

可以认为各处的磁感应强度都与铁心截面 A 垂直。磁感应强度 B 与磁场强度 H 间有以下关系:

$$B = \mu H \tag{1-2}$$

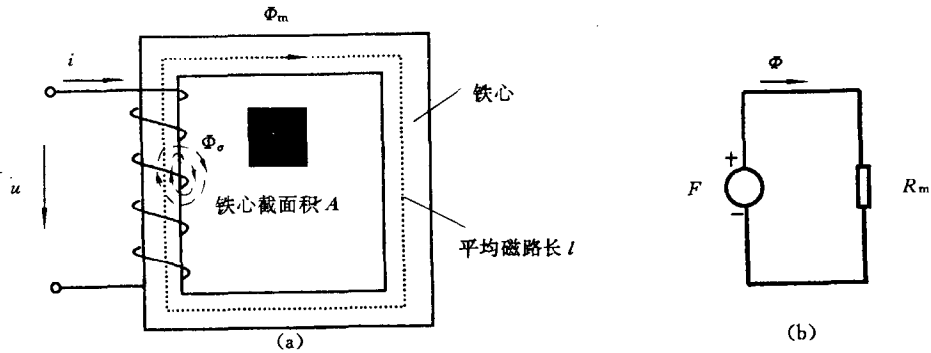


图 1-2 闭合铁心组成的最简单磁路

二、磁路的基本定律

(一) 安培环路定律

电流和磁场之间的关系由安培环路定律来确定。从物理学我们已经知道,磁场强度 H 沿任意闭合回路 l 的线积分,等于该闭合回路所包围的全部电流,这就是磁路的安培环路定律,即:

$$\oint H \cdot dl = \sum i \tag{1-3}$$

式中: i 是指回路 l 所包围的全部电流。

应该指出,由于一般电机、变压器的频率不高,位移电流可以忽略不计,上式中的全部电流实际上是指全部传导电流,如图 1-3 所示。这些电流与回路间符合右手螺旋关系者为正,反之为负,故上式中的 $\sum i = i_1 - i_2 + i_3$ 。

图 1-2 中铁心各处的磁感应强度 B 相等,若铁心磁导率 μ 为定值,则铁心的磁场强度 H 也处处相等。按安培环路定律 $\oint H \cdot dl = Hl = Ni$ 可得:

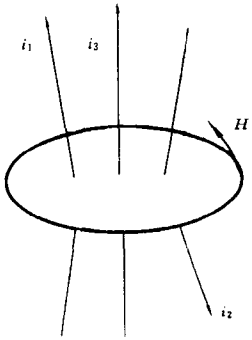


图 1-3 右安培环路定律

$$H = \frac{Ni}{l} \quad \Phi = BA \quad (1-4)$$

由此可见,磁场强度 H 也可理解为磁路中产生一定的磁通 Φ 时,单位磁路长所需要的安匝数。在国际单位制中,它的单位为安 / 米,符号为 A/m(有时在工程上也用安 / 厘米,符号为 A/cm)。与此相应的磁感应强度,是表示磁路上该点磁场强弱和方向的物理量,在国际单位制中,它的单位为特斯拉,简称特(T)。1 特 = 1 韦伯 / 米²(Wb/m²) = 10⁴ 高斯(GS)。这是因为磁通 Φ 的单位在国际单位制中为韦伯(简称韦),而在工程上有时也采用电磁单位制,它的单位为麦克斯韦(MX),简称麦,1Wb = 10⁸MX。又 1GS = 10⁴MX/m²,所以 1T = 10⁴GS。顺便说一下,如 B 的单位用特, H 的单位用安匝 / 米(安 / 米),则磁导率 μ 的单位为亨利 / 米(H/m)。空气的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m,电机中所用铁磁材料的磁导率 μ 比空气的大 2000 ~ 6000 倍。关于铁磁材料的性质及其与 B 和 H 的关系将在本章第二节详细论述。

本书采用国际单位制,与工程上常用的电磁单位制的换算关系如表 1-1 所示。

表 1-1 磁路计算的单位

单位制 物理量	国 际 单 位 制	电 磁 单 位 制	换 算 关 系
磁感应强度 B	特(T), 韦伯/米 ² (Wb/m ²)	高斯(GS), 麦/厘米 ² (MX/cm ²)	1T=10 ⁴ GS
磁场强度 H	安/米(A/m)	安/厘米(A/cm)	
真空磁导率 μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	0.4 π	
磁通 Φ	韦伯(Wb)	麦(MX)	1Wb=10 ⁸ MX
磁势 F	安(A)	安(A)	
磁阻 R_m	安/韦(A/Wb)	安/麦(A/MX)	
长度 l	米(m)	厘米(cm)	
面积 A	米 ² (m ²)	厘米 ² (cm ²)	

(二) 磁路欧姆定律

不分支磁路的磁通等于作用于该磁路的磁势与磁阻之比,此即磁路欧姆定律。图 1-2 (a)所示闭合铁心中的磁通为:

$$\Phi = BA = \mu HA \quad \Phi = BA = \mu HA$$

将 $H = \frac{Ni}{l}$ 代入上式,得:

$$\Phi = \frac{Ni}{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{A}} \quad (1-5)$$

如果将磁路和电路类比,磁路中的磁通 Φ 相当于电路中的电流 I ,导磁铁心相当于载流导体。电流是产生磁通的源泉,上式中的 Ni 即与电动势相当,称为磁动势(简称磁势),用 F 来表示。 $\frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{A}$ 反映组成磁路的材料的性质和几何尺寸,与电路中的电阻($R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{A}$)相似,称为磁阻,以 R_m 表示。以之代入式(1-5),则可写出磁路的欧姆定律公式:

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1-6)$$

图 1-2(b)所示为与图 1-2(a)相对应的模拟磁路。

上式中的磁势 $F = Ni$, 励磁线圈匝数愈多, 电流愈大, 则磁势也愈大, 磁势的单位为 A 。磁阻 $R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{A}$, 磁路的截面愈小, 路径愈长, 则磁阻愈大。磁阻的单位为 A/Wb (或 A/MX), 或用 $(1/H)$ 表示。与电导相对应的磁导 $G_m = \frac{1}{R_m}$, 它的单位为 H 。

应该指出, 式(1-6)是安培环路定律在不分支磁路上的表示形式, 它虽然和电路上的欧姆定律公式相似, 但这种近似仅仅是形式上的, 磁路和电路的本质是不相同的, 不要混淆。还应该注意: 利用式(1-6)直接进行磁路计算较困难, 由于铁磁性材料的磁导率 μ 并非常数, 而是随 B 或 H 的大小而改变, 因此, 必须借助于材料的磁化曲线 ($B-H$ 曲线) 才能进行计算。但是, 利用磁路的欧姆定律来进行定性分析则得到了广泛的应用。

(三) 磁路基尔霍夫第一定律

在分支磁路中 (图 1-4), 按磁通连续性原理, 进入分支处的磁通等于离开分支处的磁通。即:

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3 \quad (1-7)$$

这一情况与电路中的基尔霍夫第一定律相对应, 因此, 有时也称它为磁路中的“基尔霍夫第一定律”。

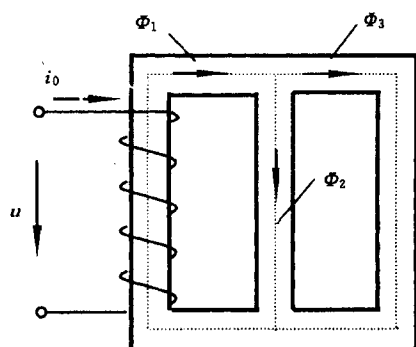


图 1-4 分支磁路

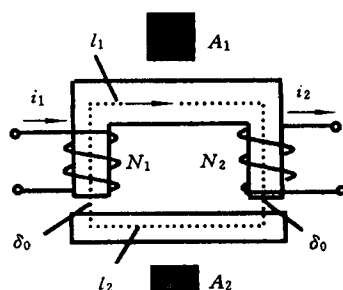


图 1-5 不同材料组成的不分支磁路

(四) 磁路基尔霍夫第二定律

如果在不分支磁路中同时有几个励磁线圈励磁, 磁路各段的几何尺寸及材料性质又不尽相同 (图 1-5), 各段的磁阻大小也不相同, 那么式(1-6)可以写成:

$$\Phi = \frac{\sum F}{\sum R_m} \quad (1-8)$$

式中

$$\begin{aligned} \sum F &= N_1 i_1 + N_2 i_2 \\ \sum R_m &= \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{l_1}{A_1} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{l_2}{A_2} + \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta_0}{A_1} \right) \times 2 \end{aligned}$$

图 1-5 中, 磁路有两段空气隙, 长度为 δ_0 , 截面为 A_1 , 其余两段分别为磁导率不同的磁性材料 (μ_1 和 μ_2) 组成, 两个励磁线圈的磁势为 $N_1 i_1$ 和 $N_2 i_2$, 二者产生的磁通方向一致。将磁

阻代入上式,得出:

$$\Phi \left(\frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{l_1}{A_1} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{l_2}{A_2} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta_0}{A_1} \times 2 \right) = N_1 i_1 + N_2 i_2$$

或 $H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 \delta_0 \times 2 = N_1 i_1 + N_2 i_2$

式中: $H_1 l_1 = \Phi R_{m1}$, $H_2 l_2 = \Phi R_{m2}$, $H_0 \delta_0 = \Phi R_0$, 分别代表磁路中各段的磁压降。所以沿不分支磁路各段的磁压降之和, 等于作用于该磁路上的磁势之和, 即:

$$\sum Hl = \sum Ni \quad (1-9)$$

当 i 的方向与 Φ 的方向符合右手螺旋关系时, F 为正, 反之 F 为负。上式与电路中的基尔霍夫第二定律在形式上相似, 有时也称它为磁路中的基尔霍夫第二定律。

由以上分析可以看出, 安培环路定律是计算磁路的基础, 磁路的欧姆定律和基尔霍夫定律都是从安培环路定律推演出来的, 后者也是用来分析磁路的基本方法。

例 1-1 图 1-6 所示为一带空气隙的不分支磁路。气隙长 $\delta = 0.05 \text{ cm}$, 面积 $A_\delta = 9 \text{ cm}^2$ 。铁心部分的平均磁路长 $l_c = 30 \text{ cm}$, 截面 $A_c = 9 \text{ cm}^2$ 。线圈匝数 $N = 500$ 。设铁心的磁导率 $\mu_c = 5000 \mu_0$ 。要想获得气隙磁感应强度 B_δ 为 1 T 时, 励磁电流应为多少安?

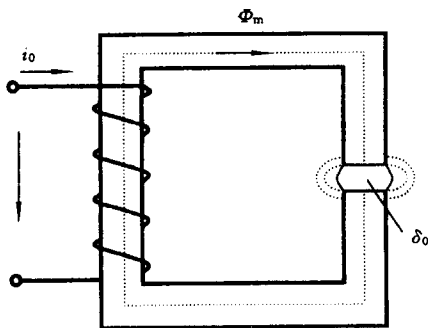


图 1-6 带空气隙的不分支磁路

解 忽略漏磁, 并且认为气隙磁通与铁心内的磁通相等, 则气隙磁通密度与铁心磁通密度相等。气隙磁通为:

$$\Phi = B_\delta A_\delta = 1 \times 9 \times 10^{-4} = 9 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

按全电流定律 $\sum Hl = Ni$

$$\text{即} \quad \frac{B_c}{\mu_c} \cdot l_c + \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta = Ni$$

代入数据, 得:

$$\frac{(9 \times 10^{-4} / 9 \times 10^{-4})}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7}} \times 30 \times 10^{-2} + \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} \times 0.05 \times 10^{-2} = 500i$$

$$47.77 + 398.08 = 500i$$

由此求得

$$i = 0.891 \text{ A}$$

如果从磁路欧姆定律出发, 可先求出磁路铁心的磁阻:

$$R_{cm} = \frac{l_c}{\mu_c A_c} = \frac{30 \times 10^{-2}}{(5000 \times 4\pi \times 10^{-7})(9 \times 10^{-4})} = 0.53 \times 10^5 \text{ 1/H}$$

$$\text{气隙磁阻 } R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 A_\delta} = \frac{0.05 \times 10^{-2}}{(4\pi \times 10^{-7})(9 \times 10^{-4})} = 4.42 \times 10^5 \text{ 1/H}$$

$$\text{总磁阻 } R_m = R_{cm} + R_\delta = 0.53 \times 10^5 + 4.42 \times 10^5 = 4.95 \times 10^5 \text{ 1/H}$$

$$\text{由式(1-5)} \quad \Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{Ni}{R_m}$$

$$\text{代入数据, 得} \quad 9 \times 10^{-4} = \frac{500i}{4.95 \times 10^5}$$

$$\text{故} \quad i = 0.891 \text{ A}$$

从计算结果可以看出: 气隙虽短(只有 0.05 cm), 但它的磁阻却远远大于铁心磁阻 ($4.42/0.53=8$), 所以气隙磁压降远远大于铁心的磁压降, 绝大部分安匝消耗在空气隙中。

因此在磁路计算中有时忽略铁心磁阻的影响,其原因就在这里。实际上,磁力线经过空气隙时有向外弯曲的趋势,这一现象叫做气隙磁通的边缘效应(图 1-6),由于边缘效应使得气隙磁密较铁心磁密略低。

三、基本电磁定律

(一) 电磁感应定律

有一个匝数为 N 的线圈放在磁场中,不论什么原因,例如线圈本身的移动、转动或磁场本身发生变化等,只要造成了和线圈交链的磁链 Ψ 随时间发生变化,则线圈内都会感应出电势,这种现象叫做电磁感应。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关系,则感应电势可用下式表示:

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-10)$$

式中: $\Psi = N\Phi$ 为与线圈所交链的磁链。

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(1-10)右边的负号表示,如果在感应电势的作用下在线圈内产生电流,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 $\frac{d\Phi}{dt}$ 为正值,而 e 为负值),它企图减少磁通;而当磁通减少时(此时 $\frac{d\Phi}{dt}$ 为负值,而 e 为正值),则企图增加磁通。这个规律常称为楞次定律。

在式(1-10)中,当 Φ 的单位用韦伯(Wb)而 t 的单位用秒(s)时,则电势的单位为伏特(V)。

设与线圈交链的磁通随时间按正弦规律变化,即:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1-11)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为磁通变化的角频率。

则感应电势为:

$$e = - N \frac{d\Phi}{dt} = - N\omega\Phi_m \cos \omega t = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-12)$$

式中: E_m 为感应电势的幅值, $E_m = N\omega\Phi_m$ 。

式(1-12)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° ,见图 1-7。感应电势的有效值为:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{N\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f N \Phi_m = 4.44 f N \Phi_m \quad (1-13)$$

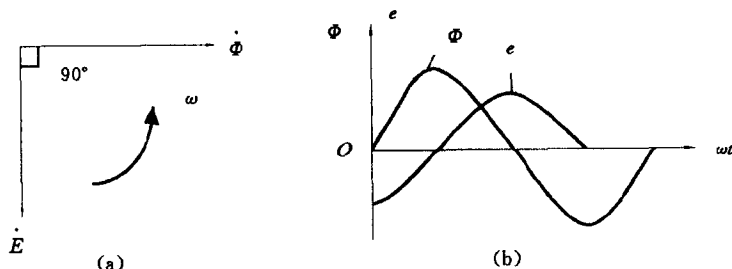


图 1-7 电势与磁通的相位关系

式中 Φ_m ——按正弦规律变化的磁通幅值；

f ——磁通变化频率；

N ——线圈的匝数；

E ——感应电势有效值。

式(1-13)为电机学中经常用到的感应电势计算公式。

如果磁场是恒定的(即不随时间变化),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的,则称这种感应电势为运动电势或速率电势。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:

$$e = Blv \quad (1-14)$$

式中 B ——磁通密度；

l ——导体切割磁力线的有效长度；

v ——导体相对于磁场运动的线速度；

e ——感应电势。

应当指出,式(1-10)是电磁感应定律的普遍形式,式(1-14)仅是计算运动电势的一种特殊形式。当磁力线、导体和运行方向三者互相垂直时,运动电势的方向可以用图 1-8 所示的右手定则确定: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。

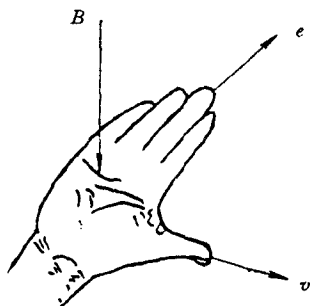


图 1-8 右手定则

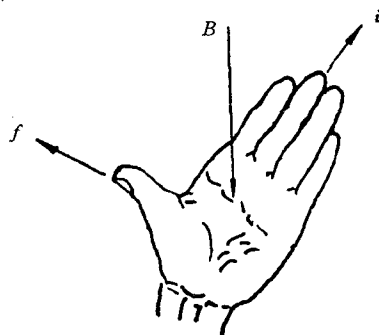


图 1-9 左手定则

(二) 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。若磁场与导体互相垂直,则作用在导体上的电磁力为:

$$f = Bli \quad (1-15)$$

式中 B ——磁场的磁通密度,T;

i ——导体中的电流,A;

l ——导体在磁场中的长度,m;

f ——作用在导体上的电磁力,N。

当导体与磁力线互相垂直时,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,则大拇指所指方向就是电磁力

的方向,见图 1-9。

在旋转电机里,作用在转子载流导体上的电磁力将使转子受到一个力矩(等于力乘以转子半径),这个力矩称为电磁转矩。电磁转矩在电机进行机电能量转换的过程中起着重要作用,在后面的有关章节中将做详细论述。

第二节 铁磁材料的性质

磁性是物质的基本属性,根据其不同的特点,物质的磁性可以分为弱磁性和强磁性两大类。弱磁性仅在有外磁场的情况下才能表现出来,并随外磁场的增大而增强。按照磁化方向与磁场的异同,弱磁性又分为抗磁性和顺磁性。强磁性主要表现为在无外加磁场时仍存在自发磁化,在外磁场作用下,由于磁畴内自发磁化方向的改变而表现出很强磁性的材料中的一类,如硅钢片、钢板、铸钢或铸铁等,我们统称为铁磁性材料。

一、高导磁性

物质是由原子组成的,原子又是由原子核和围绕原子核运动的电子组成的。正像电流能够产生磁场一样,原子内部电子的运动也要产生磁矩^①。由于物质内部自身的力量,使任一小区域内的所有原子磁矩都按一定的规则排列起来的现象,称为自发磁化。铁磁体内分成的这些小区,称为磁畴。用金相显微镜能观察到磁畴的形状,其宽度约为 10^{-3} cm,体积约为 10^{-9} cm³。磁畴与磁畴之间有一过渡层称为畴壁。畴壁的厚度约为 10^{-5} cm。若一个原子的体积为 10^{-23} cm³,则在一个磁畴内,包含的原子便有百万亿个(10^{14}),就是说,交换作用使这百万亿个原子的磁矩都整齐地排列起来了。

磁畴的形状、大小及它们之间的搭配方式,统称为磁畴结构。磁性材料的技术性能,都是由磁畴结构的变化决定的(从理论上研究磁畴结构的形式和变化,对磁性材料的改善有着指导性的作用)。

铁磁性物质放在外磁场中,由于磁畴的结构发生了变化而对外显示出了很强的磁性,这一特点表示铁磁材料可以用不大的励磁电流获得很强的磁场,此即电机、变压器等电工设备乐于采用铁磁材料组成磁路的原因。含硅量仅为 3%~5% 的电工钢片,导磁能力却很强。导磁能力不仅与材料含硅量有关,还与钢片厚度及冶炼工艺等有关。采用优质磁性材料,可使电工设备的尺寸减小、重量减轻,从而大大提高了电工设备的效率和功率因数等技术经济指标。

二、磁化过程及磁化曲线

磁畴结构在外磁场的作用下,从磁中性状态到饱和状态的过程,称为磁化过程。磁畴结构在外磁场的作用下从饱和状态返回到退磁状态的过程,称为反磁化过程。磁化过程的畴结构变化,与反磁化过程中的畴结构变化是不同的。磁化过程大致分为以下四个阶段:

第一阶段是畴壁的可逆位移。在外磁场较小时,通过畴壁的移动,使某些磁畴的体积扩大,造成样品的磁化。如图 1-10 所示的磁化曲线的起始部分。这时若把磁场去掉,畴壁又会退回原地,整个样品回到磁中性状态。由此可见,畴壁在这个阶段的移动是可逆的。

^① 一个靠近原子核的电子绕原子核运动时,约相当于形成 38 A 的环形电流。这个环形电流的磁矩称为玻尔磁子
 $M_B = \frac{M_0 e h}{2m} = 9.274 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 (\text{J/T})$ 。

第二阶段是不可逆的磁化。随着外磁场的增大,磁化曲线上升很快,即样品的磁化强度急剧增加,这是因为畴壁的移动是跳跃式的,或者因为磁畴结构突然改组了。前者称为巴克好森跳跃(Barkhausen jump),后者称为磁畴结构的突变,这两个过程都是不可逆的。就是说,外磁场即使降到了原来的数值,畴壁的位置或磁畴的结构也并不恢复到原来的样子。

第三阶段是磁畴磁矩的转动。随着外磁场的进一步增加,样品内的畴壁移动已经基本完毕,这时只有靠磁畴磁矩的转动,才能使磁化强度增加。也就是说,磁畴磁矩的方向,由远离外磁场的方向逐渐向外磁场靠近,结果在外磁场方向的磁化强度便增加了。磁畴磁矩的转动,既可以是可逆的,也可以是不可逆的。在一般情况下,两种过程(可逆与不可逆)同时发生于这一阶段。

第四阶段是趋近饱和的阶段。这一阶段的特点是:尽管外磁场的增加很大,磁化强度的增加却很小。磁化强度的增加都是由于磁畴磁矩的可逆转动造成的。

以上是磁化过程四个阶段的大致情况。每一阶段中的磁化强度随外磁场的变化情况见图 1-10。

铁磁物质经过外磁场的磁化,达到饱和以后,若将外磁场去掉,则其磁化强度并不为零,而是具有一数值 M_r —— 剩余磁化强度。只有在反方向再加外磁场后,才能使磁化强度逐渐回复到零,这时的外磁场称为内禀矫顽力 H_{cm} 。以上这些过程就是反磁化过程,它在各个阶段的情况大致与磁化过程相类似,但畴结构的变化形式却是彼此不同的。

在确定磁性材料的技术特性时,往往涉及一些名词术语的定义,现将有关定义介绍如下:

(1) 初(起)始磁化曲线—— 在热退磁的磁中性状态下,当磁场绝对值单调增加时,磁化强度 M (或磁通密度 B) 随磁场 H 变化的轨迹。

(2) 磁滞回线 —— 当磁场循环变化时($H \leftrightarrow 0 \leftrightarrow -H$) B 或 M 的变化轨迹,它是与原点对称的闭合曲线,又称正常磁滞回线,以区别于与原点不对称的其他反常磁滞回线。

(3) 换向(正常)磁化曲线—— 将不同磁场下得到的正常磁滞回线的顶点连接起来的曲线(图 1-11)。样品测量前需要事先退磁(热退磁或交流退磁均可)。

(4) 饱和磁滞回线—— 在饱和磁场下的磁滞回线,一个样品只有一条饱和磁滞回线。

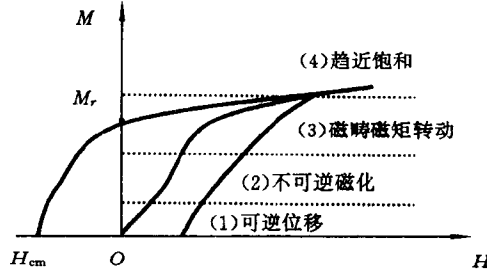


图 1-10 磁化和反磁化过程的各个阶段

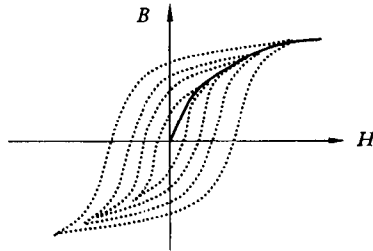


图 1-11 换向(正常)磁化曲线

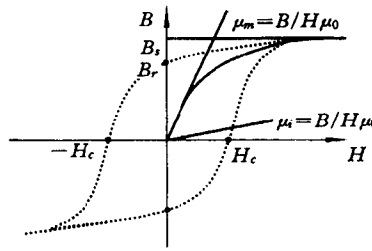


图 1-12 饱和磁滞回线与换向磁化曲线上的各有关磁学量

(5) 矫顽力 H_c 、内禀矫顽力 H_{cm} ——饱和磁滞回线上 $B = 0$ 和 $M = 0$ 时所对应的磁场。
 (6) 剩余磁通密度(剩余磁感应强度、剩磁) B_r ——饱和磁滞回线上 $H = 0$ 所对应的磁通密度。

(7) 初(起)始磁导率 μ_i ①——在换向磁化曲线上, 磁场接近于零时的斜率 $\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H}$ 。

(8) 最大磁导率 μ_m ——换向磁化曲线的最大斜率 $\mu_m = (\frac{B}{\mu_0 H})_{\max}$ 。

(9) 饱和磁通密度(饱和磁感应强度) B_s ——饱和磁场下相应的磁通密度。由于同一材料的饱和磁场取值不同, 因此 B_s 往往是指某一共同商定磁场下的 B 。

铁磁材料的磁性与温度有极大关系。当磁场强度一定时, 温度升高则磁导率下降。每种铁磁材料的温度升到居里点以上时, 它们的磁性就会被剧烈的热运动所破坏。

磁性材料的技术特性往往集中表现在磁化曲线和磁滞回线的形状和面积上。不同的磁化曲线和磁滞回线可以满足应用上的不同需要。磁化曲线和磁滞回线的测定则较晚(1871年斯托列托夫(A. Г. СТОПЕТОВ)测定了铁的磁化曲线, 1880年瓦堡(E. G. Warburg)测量了铁丝的磁滞回线), 这是一类比较复杂的现象, 直到目前为止, 磁滞回线的形状大体上有六种形式(图 1-13): ① 狭长型; ② 肥胖型; ③ 长方型; ④ 退化型(近似平行线); ⑤ 蜂腰型; ⑥ 不对称型

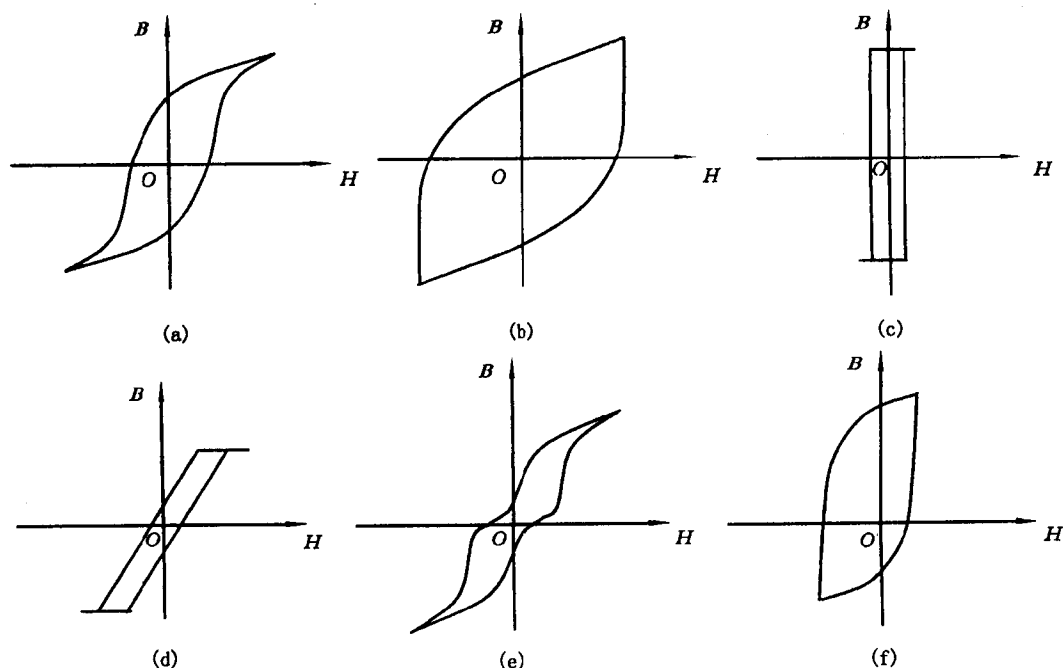


图 1-13 六种不同类型的磁滞回线

(a) 狭长型; (b) 肥胖型; (c) 长方型; (d) 退化型; (e) 蜂腰型; (f) 不对称型

① 这里的各种磁导率的定义, 实际上是相对磁导率, 为了工程技术上使用磁性材料的方便, 把“相对”二字省掉, 使具体材料的磁导率的数量在两种单位制中一样。