

高等教育“十二五”规划教材

电机原理及 拖动基础

第三版

Dianji Yuanli Ji Tuodong Jichu

方荣惠 邓先明 胡 堃 韩 丽 编著

中国矿业大学出版社

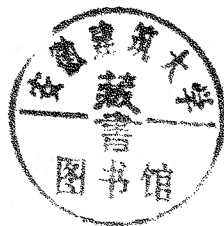


高等教育“十二五”规划教材

电机原理及拖动基础

(第三版)

编著 方荣惠 邓先明
胡 堃 韩 丽



中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电机原理及拖动基础/方荣惠等编著. —3版. —徐州:
中国矿业大学出版社, 2012. 8
ISBN 978 - 7 - 5646 - 1574 - 1

I. ①电… II. ①方… III. ①电机学—高等学校—教材
②电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 185429 号

392312

书 名 电机原理及拖动基础
编 著 方荣惠 邓先明 胡 堃 韩 丽
责任编辑 仓小金
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 21 字数 524 千字
版次印次 2012 年 8 月第 3 版 2012 年 8 月第 1 次印刷
定 价 29.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

“电机原理及拖动基础”是电气工程及自动化专业的一门专业基础课,是电机与拖动系列课程中的主要课程之一,它在整个专业教学计划中起着承前启后的作用,担负着为多门后续课程打好基础的任务。随着技术的发展和教学课时数的调整,该教材的内容也作了一定的调整。

本书根据相关专业对电机原理及拖动基础的要求,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,适合教学。在论述上力求深入浅出、循序渐进,以便于读者理解、掌握和运用。

全书共分八大部分。第一部分是基础知识预备,包括磁路和电力拖动的动力学基础;第二部分是直流电机,包括直流电机原理及其电力拖动;第三部分是变压器;第四部分是交流电机的共同理论;第五部分是异步电机,包括三相异步电动机原理及其拖动;第六部分是同步电动机;第七部分是电动机容量的选择与验算;第八部分是附录,包括习题参考答案和电机词汇表。第一、第六、第七部分由方荣惠编著,第四、第五部分由邓先明编著,第三部分由胡堃编著,第二部分由韩丽编著。

本书可作为高等院校相关专业本科生的教材,并可供从事电气工程的技术人员及其他工科院校师生参考。

本书编写时参阅了多位专家、教授的教材和专著,在此一并致以深深的谢意!

由于编著者的水平所限,书中定有缺点和错误,敬请读者批评指正,不吝赐教。

编著者

2012年5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	8
小结	15
习题	15
第二章 电力拖动的动力学基础	16
第一节 机械特性	16
第二节 拖动系统的运动方程式	18
第三节 拖动系统的启动和停车时间	24
小结	27
习题	27
第三章 直流电机原理	30
第一节 直流电机的用途、结构及基本工作原理	30
第二节 直流电机的励磁磁场	36
第三节 直流电机的电枢绕组	38
第四节 直流电机的负载磁场及电枢反应	43
第五节 直流电机的感应电势与电磁转矩	47
第六节 直流发电机	49
第七节 直流电动机	56
第八节 直流电机的换向	67
小结	72
习题	72
第四章 直流电动机的电力拖动	75
第一节 他励直流电动机的机械特性	75
第二节 他励直流电动机的启动和反转	79
第三节 他励直流电动机的调速	84
第四节 他励直流电动机的制动	93
小结	101
习题	101

第五章 变压器	104
第一节 变压器的用途、工作原理及结构	104
第二节 变压器的空载运行	108
第三节 变压器的负载运行	115
第四节 标么值和百分值	125
第五节 变压器参数的测定	127
第六节 变压器的运行性能	130
第七节 三相变压器	134
第八节 变压器的并联运行	144
第九节 特种变压器	149
小结	153
习题	153
第六章 交流电机的共同理论	157
第一节 概述	157
第二节 三相交流电机的定子绕组	160
第三节 在正弦分布磁场下的绕组电势	165
第四节 交流绕组的磁势	169
小结	179
习题	180
第七章 三相异步电动机原理	183
第一节 三相异步电动机的构造及作用原理	183
第二节 三相异步电动机的电磁分析	186
第三节 三相异步电动机的功率和转矩平衡	197
第四节 三相异步电动机的工作特性	199
第五节 三相异步电动机参数的测定	202
小结	206
习题	207
第八章 三相异步电动机的电力拖动	209
第一节 三相异步电动机的机械特性	209
第二节 笼形转子异步电动机的启动	220
第三节 绕线转子异步电动机的启动	228
第四节 三相异步电动机的调速	237
第五节 三相异步电动机的电气制动	254
小结	259
习题	260

第九章 同步电动机	264
第一节 同步电动机的基本结构和工作原理	264
第二节 同步电动机内部的电磁关系	267
第三节 同步电动机的功率和转矩关系	271
第四节 同步电动机的特性	276
第五节 同步电动机的启动	281
小结	285
习题	285
第十章 电动机容量的选择与验算	287
第一节 电动机的发热与冷却过程	288
第二节 电动机的工作制	290
第三节 连续工作方式时电动机容量的验算	292
第四节 短时工作方式时电动机容量的验算	298
第五节 间歇工作方式时电动机容量的验算	301
第六节 选择电动机时应考虑的几个问题	304
小结	306
习题	306
附录一 电机词汇表	308
附录二 习题参考答案	324
参考文献	328

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芯内,形成闭合磁路。图 1-1(a)所示为变压器铁芯组成的磁路,图 1-1(b)所示为直流电机的磁路。前者的磁路全部由铁芯组成,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,由于铁芯的导磁性能较好,绝大部分磁通集中在铁芯内,因而能获得较强的磁场。

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。若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

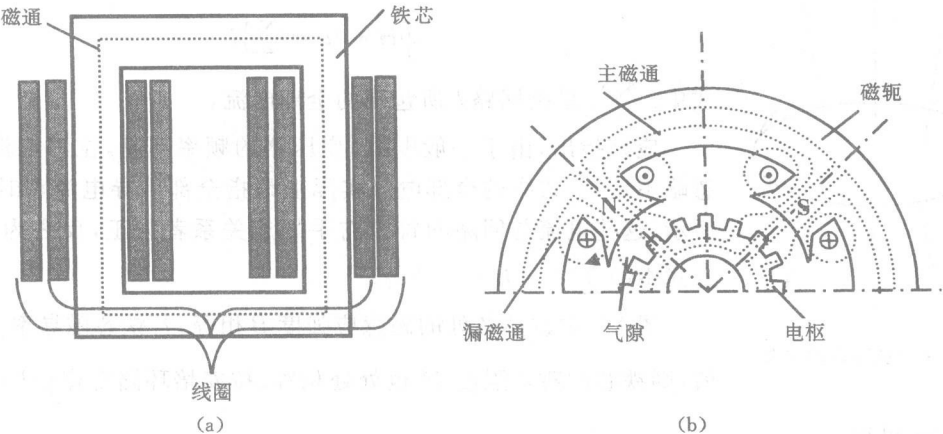


图 1-1 变压器和直流电机的磁路
(a) 变压器磁路; (b) 直流电机的磁路

路。变压器、异步机的磁路就属于这种。

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

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

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

$$B = \mu H \quad (1-2)$$

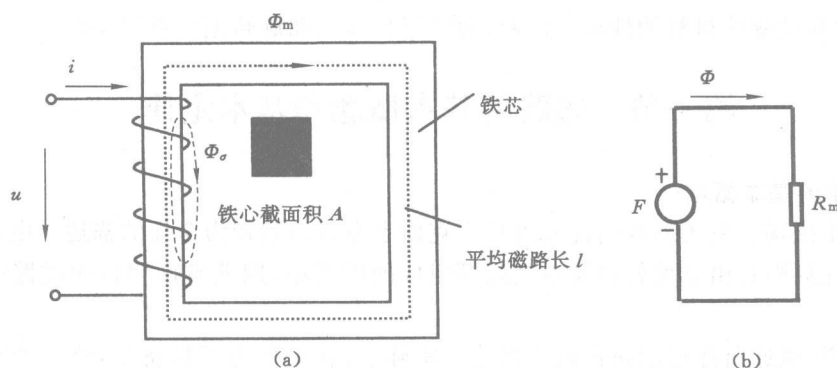


图 1-2 闭合铁芯组成的最简单磁路

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:

$$\oint H \cdot dl = \sum i \quad (1-3)$$

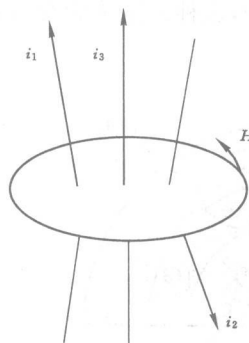


图 1-3 安培环路定律

式中: $\sum i$ 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 中铁芯各处的磁感应强度 B 相等, 若铁芯磁导率 μ 为定值, 则铁芯的磁场强度 H 也处处相等。按安培环路定律 $\oint H \cdot dl =$

$Hl = Ni$ 可得:

$$H = \frac{Ni}{l} \tag{1-4}$$

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,1 Wb = 10⁸ MX。又 1 GS = 10⁴ MX/m²,所以 1 T = 10⁴ GS。顺便说一下,如 B 的单位用特(T), H 的单位是安培 / 米(A/m),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 2 000 ~ 6 000 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)	1 T = 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 $\pi \times 10^{-7}$ 亨利/米(H/m)	4 $\pi \times 10^{-5}$ (H/cm)	
磁通 Φ	韦伯(Wb)	麦(MX)	1 Wb = 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)所示闭合铁芯中的磁通为:

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

将 $H = \frac{Ni}{l}$ 代入上式,得:

$$\Phi = \frac{Ni}{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{A}} \tag{1-5}$$

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 ,导磁铁芯相当于载流导体。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:

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \tag{1-6}$$

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。还应该注意的是, 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。

(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:

$$\sum F = N_1 i_1 + N_2 i_2$$

$$\sum R_m = \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{l_1}{A_1} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{l_2}{A_2} + \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta_0}{A_1} \right) \times 2$$

图 1-5 中, 磁路有两段空气隙, 长度为 δ_0 , 截面积为 A_1 , 其余两段分别由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。

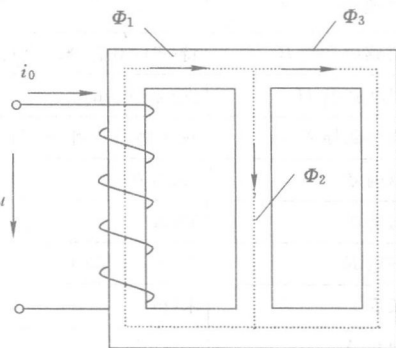


图 1-4 分支磁路

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 $\delta = 0.05 \text{ cm}$, 截面积 $A_\delta = 9 \text{ cm}^2$ 。铁芯部分的平均磁路长 $l_c = 30 \text{ cm}$, 截面积 $A_c = 9 \text{ cm}^2$ 。线圈匝数 $N = 500$ 。设铁芯的磁导率 $\mu_c = 5\,000 \mu_0$ 。要想使气隙磁感应强度 B_δ 为 1 T , 励磁电流应为多少安?

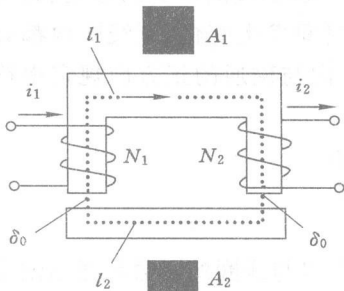


图 1-5 不同材料组成的不分支磁路

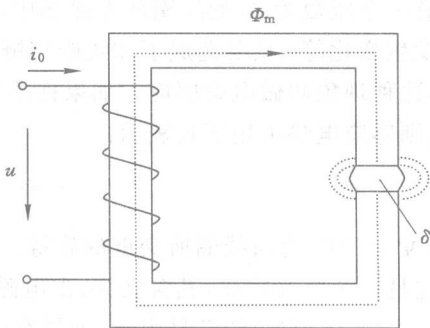


图 1-6 带空气隙的不分支磁路

解 忽略漏磁,并且认为气隙磁通与铁芯内的磁通相等,则气隙磁通密度与铁芯磁通密度相等。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

$$\sum Hl = Ni$$

即

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

代入数据,得:

$$\frac{1}{5\,000 \times 4\pi \times 10^{-7}} \times 30 \times 10^{-2} + \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} \times 0.05 \times 10^{-2} = 500i$$

$$47.77 + 398.08 = 500i$$

由此求得

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

如果从磁路欧姆定律出发,可先求出磁路铁芯的磁阻:

$$R_{cm} = \frac{l_c}{\mu_c A_c} = \frac{30 \times 10^{-2}}{(5\,000 \times 4\pi \times 10^{-7})(9 \times 10^{-4})} = 0.53 \times 10^5 (1/\text{H})$$

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

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

由式(1-5)

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{Ni}{R_m}$$

$$\text{代入数据,得 } 9 \times 10^{-4} = \frac{5\,000i}{4.95 \times 10^5}$$

故

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

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芯磁阻 ($4.42/0.53=8$ 倍),所以气隙磁压降远远大于铁芯的磁压降,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芯磁阻的影响,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芯磁密略低。

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阻碍磁通变化的作用。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:

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

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

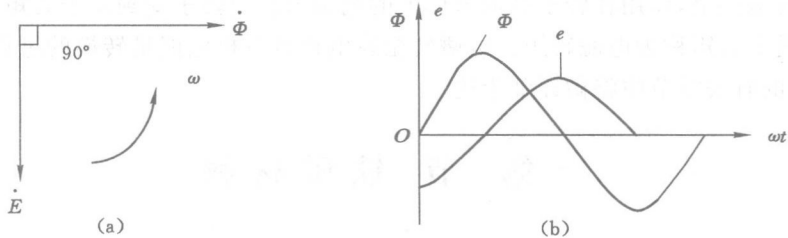


图 1-7 电势与磁通的相位关系

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。

(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。

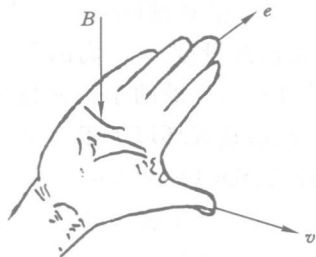


图 1-8 右手定则

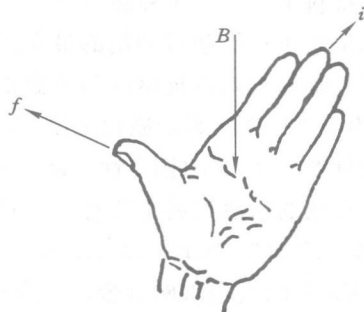


图 1-9 左手定则

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

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。

顺磁性物质是一种非铁磁性物质(如铂、铝、氧),把它们移近磁场时,可依磁场方向发生磁化,但很微弱。其磁化率平常也很小,室温下约为 10^{-5} 。逆磁性物质也是一种非铁磁性物质,如金、银、铜、铅、二氧化碳、水等。它们移进磁场,就会发生反向磁化,其磁化强度也很弱,磁化率平常约为 -10^{-5} ,为负值。

反铁磁性是磁性材料磁学性质的一种。在这种材料中,其磁化率接近于零。通常情况下,反铁磁性材料在低温表现为抗磁性,而在温度达到尼尔温度(1932年由 Louis Néel 首次发现)以上的时候,转变为顺磁性。

铁磁性物质能在弱磁场下强烈地磁化。并且当外磁场移去后,仍可保留很强的磁性。其磁化率可达 10^{-3} 数量级,如 Fe、Co、Ni 等物质,在室温下称这类物质的磁性为铁磁性。铁磁性物质具有很强的磁性,是源自于其自发磁化的基础特性,铁磁体的铁磁性只在某一温度以下才显示出来,超出这一温度,铁磁性转变为强顺磁性,铁磁性消亡,这一温度称为居里点。在居里点以上,材料显示为强顺磁性,其磁化率与温度的关联遵从居里-外斯定律。铁磁性材料被广泛地应用于工业领域,以下作重点介绍。

一、铁磁材料的分类

铁磁材料有很强的导磁性,但不同的用途,对性能的要求也不同,下面按用途对铁磁材料进行分类。

(一) 硬磁材料(hard magnetic material)

是指磁化后不易退磁而能长期保留磁性的一种材料,也称为永磁材料或恒磁材料。常用的永磁材料主要具有 4 种磁特性:① 高的最大磁能积。最大磁能积[符号为 $(BH)_m$]是永磁材料单位体积存储和可利用的最大磁能量密度的量度。② 高的矫顽(磁)力。矫顽力[符号为 H_c]是永磁材料抵抗磁的和非磁的干扰而保持其永磁性的量度。③ 高的剩余磁通密度(符号为 B_r)和高的剩余磁化强度(符号为 M_r)。它们是具有空气隙的永磁材料气隙中磁场强度的量度。④ 高的稳定性。即对外加干扰磁场和温度、震动等环境因素变化的高稳定性。目前常用的永磁材料主要有:① 稀土永磁材料(Nd-Fe-B、Sm-Fe-N、 Sm_2Co_{17} 、 $SmCo_5$),② 铁氧体永磁材料($BaFe_{12}O_{19}$ 、 $SrFe_{12}O_{19}$ 等),③ 金属永磁材料(铝镍钴 Al-Ni-Co 系和铁铬钴 Fe-Cr-Co 系两大类永磁合金,④ 其他永磁材料(非晶,纳米、塑料)。

(二) 软磁材料(soft magnetic material)

是指易于磁化,也易于退磁的材料。常用的软磁材料主要具有 4 种磁特性:① 低的矫

顽(磁)力,② 高的磁导率,③ 低的磁损耗,④ 高的稳定性,目前常用的软磁材料主要有:大功率低频率应用的高 B_s 软磁材料(Fe-Si 合金、Fe-Si-B 系非晶合金),低功率高灵敏应用的高磁导率 μ 软磁材料(Fe-Ni 合金、 MnFe_2O_4 系、 NiFe_2O_4 非晶合金)非晶软磁材料,其他软磁材料,纳米薄膜、纳米晶粒等。以金属软磁材料(以硅钢片,坡莫合金等为代表,包括 Fe 系,FeSiAl 系和 FeCo 系等)和铁氧体软磁材料(如 MnZn 系, NiZn 系和 MgZn 系等)为代表的晶体材料,非晶态软磁合金(主要分为 Fe 基和 Co 基两种)以及近年来发展起来的纳米晶软磁合金,如纳米粒状组织软磁合金,纳米结构软磁薄膜和纳米线等。应用最多的软磁材料是铁硅合金(硅钢片)以及各种软磁铁氧体等。

(三) 信磁材料

在当前信息社会中,除传统的通信技术外,又发展了计算机、微波通信和光通信等高新信息技术。在这些高新信息技术中需要应用多种信息磁功能材料(简称信磁材料),主要有磁记录材料、磁存储材料、磁微波材料和磁光材料等。

磁记录材料是磁记录技术所用的磁性材料,包括磁记录介质材料和磁记录头材料(简称磁头材料)。在磁记录(称为写入)过程中,首先将声音、图像、数字等信息转变为电信号,再通过记录磁头转变为磁信号,磁记录介质便将磁信号保存(记录)在磁记录介质材料中。当需要取出记录在磁记录介质材料中的信息时,只要经过同磁记录(写入)过程相反的过程(称为读出过程),即将磁记录介质材料中的磁信号通过读出磁头,将磁信号转变为电信号,再将电信号转变为声音(类似电话)、图像(类似电视)或数字(类似计算机)。对磁记录介质材料的磁特性要求主要是:① 适当高的矫顽力 H_c ;② 高的饱和磁化强度 M_s ;③ 高的剩磁比;④ 高的稳定性。目前应用的磁记录介质材料主要有:① 铁氧体磁记录材料,如 γ 型三氧化二铁($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)等。② 金属磁膜磁记录材料,如铁—钴(Fe—Co)合金膜等。③ 钡铁氧体($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$)系垂直磁记录材料等。对磁记录头材料的磁特性要求主要是:① 高的磁导率 μ ;② 高的饱和磁化强度 M_s ;③ 低的矫顽力 H_c ;④ 高的磁稳定性。目前应用的磁记录头材料主要有:① 铁氧体磁头材料,如锰—锌—铁氧体($\text{Mn,ZnFe}_2\text{O}_4$ 系统);② 高硬度磁性金属磁头材料,如铁—镍—铌(Fe—Ni—Nb)系磁性合金等;③ 非晶磁头材料,如铁—镍—硼(Fe—Ni—B)系非晶合金等。

磁存储材料是电子计算机存储器所用的磁性材料。较早应用的是磁滞回线接近矩形的矩磁材料,利用其两个剩磁态 $+B_r$ 和 $-B_r$ 表示计算机中的“1”和“0”状态,再利用两个电流重合便可以“写入”(W_x, W_y)和“读出”(R_x, R_y)二进位制的“1”和“0”(如图 1-10 所示)。

对矩磁材料的磁特性要求主要是:① 高的剩磁比 B_r/B_m ;② 低的矫顽力 H_c ;③ 短的开关时间;④ 高的信号/噪声比。可以应用的矩磁材料有:① 铁氧体磁芯材料,如锰—镁铁氧体($\text{Mn,MgFe}_2\text{O}_4$ 系统);② 金属磁膜材料,如铁—镍(Fe—Ni)系金属磁膜等。

巨磁电阻材料是正在研究和试验的一类新型磁存储材料,这种磁存储器同目前应用的半导体磁存储器相比还有其特点和优点,因而受到多方面的重视。

磁微波材料是微波电子学技术中常用的材料。雷达、卫星通信、电子战和射电天文学等都是微波电子学技术的重要应用。在这些应用中一般要应用三大类磁性材料。第一类是旋

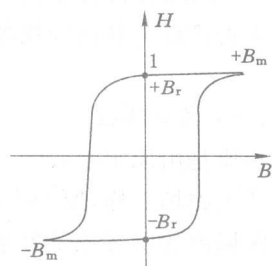


图 1-10 磁滞回线接近矩形

磁材料,应用于各种正反传播方向的特性不同的非互易微波器件,如正反传播方向的阻抗很不相同的旋磁隔离器和旋磁环行器等,所用的旋磁材料主要是高旋磁性高电阻率的旋磁铁氧体材料,如石榴石型的钇铁氧体($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$)系统,磁铅石型的钡铁氧体($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$)系统等。第二类是磁微波吸收材料,应用于各种吸收微波的器件和设备中,要求磁微波吸收材料具有高的电磁波吸收系数和宽的电磁波吸收频带,在这方面应用的有以磁性金属粉末或薄膜为组元的复合吸收材料,六角晶系复合铁氧体等。第三类是多种应用磁场的微波电子管如磁控管、行波管、返波管和自由电子激光器中所用的永磁材料等。

磁光材料是激光、光电子学和正在发展的光子学中所用多种磁光效应器件使用的磁性材料。对磁光材料的磁特性要求主要是:① 高的磁光效应,如高的法拉第磁光旋转角和克尔磁光旋转角;② 低的磁光损耗;③ 宽的磁光效应频带;④ 高的稳定性。当前应用的磁光材料有三大类:① 金属磁光材料,如锰—铋($\text{Mn}-\text{Bi}$)系合金等;② 铁氧体磁光材料,如石榴石型铋—钆—铁—镓—氧($\text{Bi}-\text{Gd}-\text{Fe}-\text{Ga}-\text{O}$)系铁氧体等;③ 非晶磁光材料,如钆—钴($\text{Gd}-\text{Co}$)系非晶合金等。

(四) 多功能磁性功能材料

当代科学的多方面发展和高新技术的多种需要,要求磁性材料不仅具有优良的磁性功能,而且具有优良的其他物理功能,这就促进了多功能磁性功能材料的发展。如:① 同时具有铁磁性和铁电性的铁磁—铁电功能材料,可以得到高的磁导率和电容率(介电常数),如 $\text{BiFeO}_3(\text{Ba}, \text{Pb})(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$ 系材料。② 同时具有铁磁性和半导体的铁磁—半导功能材料,可以得到高的磁导率和高载(电)流子迁移率,如铈—硫($\text{Eu}-\text{S}$)系和铈—硒($\text{Eu}-\text{Se}$)系材料。③ 磁—电材料,是一类由磁场可产生磁化强度和电极化强度,由电场可产生电极化强度和磁化强度的磁性材料,如 DyAlO_3 和 GaFeO_3 。④ 铁磁—有机材料,是一类不含磁性金属的纯有机化合物磁性材料,如聚三氨基苯 $[\text{C}_6\text{H}_5(\text{NH}_2)_n]$ 等。可以说多功能磁性材料是正在发展和扩大的新型磁性材料。这些多功能磁性材料从广义看包含多功能的铁磁、亚铁磁和反铁磁材料,可统称为多功能序磁(磁有序)材料,同样,电偶极矩有序也包含铁电、亚铁电和反铁电有序,统称为序电(电有序)材料。

二、铁磁材料的性能

无论铁磁材料的应用场合是什么,它们都有一些共同的特性,下面就其主要特性做简单介绍。

(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域,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} cm^3 。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} cm^3 ,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

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

$$M_B = \frac{M_0 eh}{2m} = 9.274 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 (\text{J/T}).$$