

高等学校教材
符合STCW 78/10公约要求

船舶电机与拖动基础

CHUANBO DIANJI YU TUODONG JICHU

甘世红 林叶春 主编
褚建新 主审



上海浦江教育出版社

高等学校教材
符合 STCW 78/10 公约要求

船舶电机与拖动基础

甘世红 林叶春 主编
褚建新 主审



上海浦江教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

船舶电机与拖动基础/甘世红,林叶春主编. —上海:上海浦江教育出版社有限公司,2015.1

ISBN 978-7-81121-388-1

I. ①船… II. ①甘… ②林… III. ①船舶—电机 ②船舶—电力传动
IV. ①U665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 305533 号

上海浦江教育出版社出版

社址:上海市海港大道 1550 号上海海事大学校内 邮政编码:201306
电话:(021)38284910/12(发行) 38284923(总编室) 38284910(传真)

E-mail: cbs@shmtu.edu.cn URL: <http://www.pujiangpress.cn>

上海图宇印刷有限公司印装 上海浦江教育出版社发行

幅面尺寸:185 mm×260 mm 印张:14.25 字数:346 千字

2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

责任编辑:黄丽芬 封面设计:赵宏义

定价:38.00 元

前言 Preface

《船舶电机与拖动基础》是船舶电子电气工程专业学生的专业基础必修课,该课程也是中华人民共和国海事局船舶电子电气工程专业人员适任考试科目《船舶电气与自动化》的重要组成部分。

本书是为满足中华人民共和国教育部和交通运输部关于高等教育和水上教育的要求而编写的。其内容立足于船舶电子电气工程和轮机工程专业人员的职业技能的培养,侧重于对现代船舶常用电机特点的分析,旨在使读者掌握船舶常用电机的基本知识、原理和方法,满足国际公约和国内立法对高等教育的基本要求。本书力求简明扼要,通俗易懂,便于教学和自学,有较强的针对性、适用性和先进性;篇幅适中,取材切题,联系实际,内容新颖,适合作为高等航海院校船舶电子电气工程专业本科生的专业教材,亦可作为海船轮机人员适任考试培训和船厂相关机电工程师的参考用书。

本书由上海海事大学甘世红、林叶春主编,褚建新主审。全书共分10章,分别是第一章电磁学基本知识、第二章电力拖动系统动力学基础、第三章变压器、第四章直流电机、第五章直流电动机的电力拖动、第六章异步电动机、第七章交流异步电机的电力拖动、第八章同步电机、第九章控制电机、第十章电力拖动系统中电动机的选择。第一章、第二章、第五章、第六章、第七章、第八章由甘世红编写,第三章、第四章、第九章、第十章由林叶春编写。参加本书编写工作的还有李军军、孙永明、李精明、陈泰山等。

本书在编写和出版过程中得到上海海事大学教务处、船舶机舱综合实验室、商船学院,上海浦江教育出版社,上海远洋运输有限公司技术部以及“育明”轮等有关单位或部门领导、同人的鼎力支持和悉心帮助,兄弟院校大力支持并提供宝贵资料,上海海事大学科学研究院沈爱弟高工提出很多宝贵的意见,在此向以上单位和个人致以诚挚的谢意。

由于本书内容涉及面广,加之编者的水平和时间所限,难免有不当和误漏之处,敬请同行和读者批评指正。

编者
2014年5月

目录

Contents

第一章 电磁学基本知识	(1)
第一节 磁路	(1)
第二节 磁场的基本物理量	(2)
第三节 电磁学的基本定律	(3)
第四节 铁磁材料	(7)
第五节 永磁材料的应用	(9)
思考与练习题	(10)
第二章 电力拖动系统动力学基础	(13)
第一节 电力拖动系统运动方程	(13)
第二节 多轴电力拖动系统的简化	(14)
第三节 电力拖动系统的负载特性	(18)
第四节 电力拖动系统稳定运行的条件	(20)
思考与练习题	(21)
第三章 变压器	(22)
第一节 变压器的基本工作原理和结构	(22)
第二节 单相变压器的运行	(26)
第三节 等效电路参数的测定	(35)
第四节 变压器的运行特性	(39)
第五节 三相变压器	(41)
第六节 其他用途的变压器	(46)
第七节 变压器常见故障分析及维护	(50)
思考与练习题	(55)
第四章 直流电机	(58)
第一节 直流电机的工作原理与结构	(58)
第二节 直流电机的电枢绕组	(62)
第三节 直流电机的电枢反应	(70)
第四节 直流电机的电枢电动势与电磁转矩	(74)
第五节 直流发电机	(77)

第六节 直流电动机	(80)
思考与练习题	(82)
第五章 直流电动机的电力拖动	(86)
第一节 他励直流电动机的机械特性	(86)
第二节 他励直流电动机拖动时的运行状态	(92)
思考与练习题	(103)
第六章 异步电动机	(106)
第一节 三相异步电动机的基本结构和工作原理	(106)
第二节 三相异步电动机的空载运行	(114)
第三节 三相异步电动机的负载运行	(118)
第四节 三相异步电动机的功率平衡、转矩平衡和工作特性	(126)
第五节 单相异步电动机	(131)
思考与练习题	(133)
第七章 交流异步电机的电力拖动	(136)
第一节 三相异步电动机的机械特性	(136)
第二节 三相异步电动机的起动	(140)
第三节 笼型异步电动机的起动	(142)
第四节 绕线转子异步电动机的起动	(145)
第五节 异步电动机的调速	(147)
第六节 异步电动机的制动	(150)
思考与练习题	(154)
第八章 同步电机	(158)
第一节 同步电机的基本结构和运行状态	(158)
第二节 同步电机的电磁关系	(161)
第三节 同步电动机的功率关系与特性	(166)
第四节 同步电动机的功率因数调节和 V 形曲线	(170)
第五节 同步电动机的起动	(173)
第六节 空载和负载时同步发电机的磁场	(174)
第七节 隐极式同步发电机的电压方程、相量图和等效电路	(177)
第八节 凸极式同步发电机的电压方程和相量图	(180)
第九节 同步发电机的功率方程和转矩方程	(181)
第十节 同步发电机的运行特性	(182)
第十一节 永磁同步电动机	(185)
第十二节 船用同步电机的应用	(189)
思考与练习题	(191)

第九章 控制电机	(195)
第一节 测速发电机的种类和用途	(195)
第二节 伺服电动机的种类和用途	(197)
第三节 步进电机	(200)
第四节 自整角机	(203)
思考与练习题	(206)
第十章 电力拖动系统中电动机的选择	(208)
第一节 电动机的发热和冷却	(208)
第二节 电动机的工作制分类	(209)
第三节 电动机容量的选择	(211)
第四节 电动机电流种类、形式、电压、转速的选择	(215)
思考与练习题	(217)
参考文献	(218)

第一章 电磁学基本知识

第一节 磁路

一、电路与磁路

对于电路系统来说,在电动势 E 的作用下电流 i 从电流的正极通过导体流向负极。一个完整的电路系统需要电动势、电导体,并可以形成电流。

在磁路系统中,也有一个磁动势 F (类似于电路中的电动势),在 F 的作用下产生一个磁通 Φ (类似于电路中的电流), Φ 从磁动势的 N 极通过一个通路(类似于电路中的导体)到 S 极,这个通路就是磁路。由于铁磁材料磁导率比空气磁导率大几千倍,即空气磁阻比铁磁材料磁阻大几千倍,所以构成磁路的材料均使用磁导率高的铁磁材料。然而非铁磁物质如空气也能通过磁通,这就造成铁磁材料构成的磁路的周围空气中也必然会有磁通 Φ_0 。由于空气磁阻比铁磁材料磁阻大几千倍,从而 Φ_0 比 Φ 小得多。 Φ_0 常常被称为漏磁通, Φ 称为主磁通。因此,磁路问题比电路问题要复杂得多。

二、电机电器中的磁路

磁路系统广泛应用在电器设备之中,如变压器、电机、继电器等,并且在电机和某些电器的磁路中,一般还需要一段空气隙,或者说空气隙也是磁路的组成部分。

图 1-1 是几种常用电器的典型磁路。图 1-1a 是普通变压器的磁路,它全部由铁磁材料组成;图 1-1b 是电磁继电器磁路,它除铁磁材料外,还有一段空气隙;图 1-1c 表示电机的磁路,也由铁磁材料和空气隙组成。图 1-1b 是无分支的串联磁路,由空气隙段与铁磁材料串联组成;图 1-1a 是有分支的并联磁路。图中实(或虚)线表示磁通的路径。

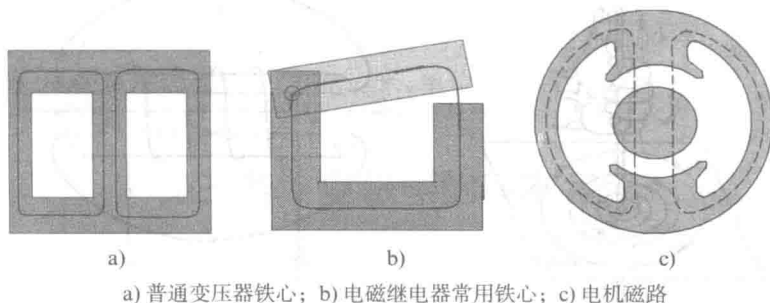


图 1-1 几种常用电器的典型磁路

三、电气设备中磁动势的产生

为产生较强的磁场,在一般电气设备中都使用电流产生磁场。电流产生磁场的方法是:把绕制好的 N 匝线圈套装在铁心上,并在线圈内通入电流 i ,这样在铁心和线圈周围的空中就会形成磁场,其中大多数磁通通过铁心,称为主磁通 Φ ,小部分磁通围绕线圈,称为漏磁通 Φ_{σ} ,如图 1-2 所示。套装在铁心上用于产生磁通的 N 匝线圈称为励磁线圈,励磁线圈中的电流 i 称为励磁电流。若励磁电流为直流,则磁路中的磁通是恒定的,不随时间变化,这种磁路称为直流磁路,直流电机的磁路属于这一类;若励磁电流为交流,则磁路中的磁通是交变的,随时间变化,这种磁路称为交流磁路,交流电机、变压器的磁路属于这一类。

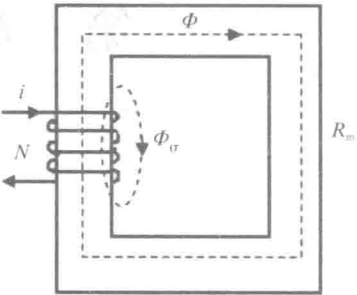


图 1-2 单框线圈铁心磁路示意

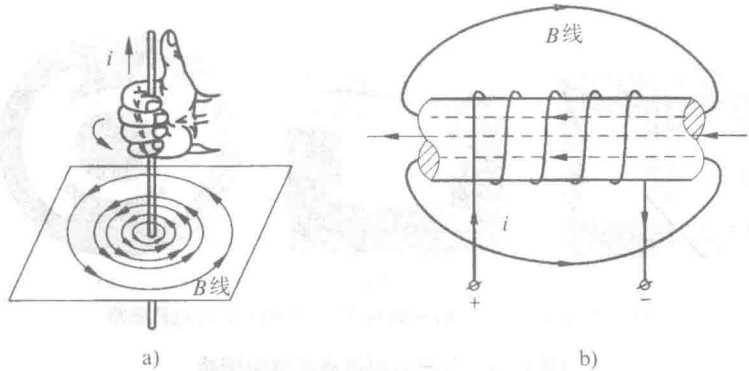
值得注意的是,除电流产生磁场外,电机电器中还使用大量的永久磁铁,而且随着科学技术的发展,永久磁铁的磁性也越来越强,可以预见,永久磁铁将在电机电器中得到广泛的应用。

第二节 磁场的基本物理量

为准确描述磁场的大小、方向及性质,便于分析、计算和设计磁路,常用如下物理量描述磁场。

一、磁感应强度 B

描述磁场强弱及方向的物理量称为磁感应强度 B 。为形象地描绘磁场,往往采用磁感应线,常称为磁力线,磁力线是无头无尾的闭合曲线。图 1-3 中画出直线电流及螺线管电流产生的磁力线。



a) 直线电流; b) 螺线管电流

图 1-3 电流磁场中的磁力线

磁力线的方向与产生它的电流方向满足右手螺旋关系,如图 1-3a 所示。在国际单位制中,磁感应强度 B 的单位名称为特(特斯拉),单位符号为 T,即 $1\text{ T}=1\text{ Wb/m}^2$ (韦伯/米²)。

二、磁通 Φ

穿过某一截面 S 的磁感应强度 B 的通量,即穿过截面 S 的磁力线根数称为磁感应通量,简称磁通,用 Φ 表示,则

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (1-1)$$

在均匀磁场中,如果截面 S 与 B 垂直(如图 1-4 所示),则上式变为

$$\Phi = BS \text{ 或 } B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-2)$$

式中: B 为磁通密度,简称磁密; S 为面积。在国际单位制中,磁通 Φ 的单位名称为韦(韦伯),单位符号为 Wb。

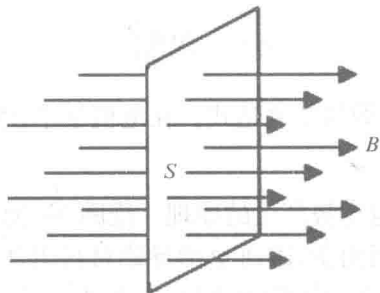


图 1-4 均匀磁场中的磁通

三、磁场强度 H

当计算导磁物质中的磁场时,引入辅助物理量磁场强度 H ,它与磁密 B 的关系为

$$B = \mu H \quad (1-3)$$

式中: μ 为导磁物质的磁导率。真空的磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。铁磁材料的 $\mu \gg \mu_0$, 例如,铸钢的 μ 约为 μ_0 的 1 000 倍,各种硅钢片的 μ 为 μ_0 的 6 000~7 000 倍。在国际单位制中,磁场强度 H 的单位名称为安(安培)/米,单位符号 A/m。

第三节 电磁学的基本定律

一、安培环路定律

导体中有电流流过时,就会产生与该载流导体相交链的磁通。在磁场中,沿任意一个闭合磁回路的磁场强度线积分等于该回路所交链的所有电流的代数和,即

$$\oint_l H dl = \sum i \tag{1-4}$$

式中： $\sum i$ 就是该磁路所包围的全电流。因此，式(1-4)也称全电流定律。

如图 1-5 所示，电流 i_1, i_2, i_3 产生的磁场沿封闭曲线磁场强度满足 $\oint_l H dl = i_1 + i_2 - i_3$ ，其中与磁力线(闭合回线)符合右手螺旋关系的电流取正号，反之取负号。

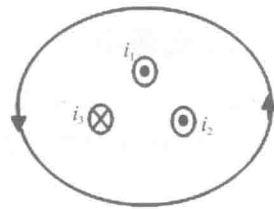


图 1-5 安培环路定律

二、电磁感应定律

当导体处于变化的磁场(磁通)中时，导体中会产生感应电动势，这就是电磁感应现象。这个感应电动势的大小和磁通与时间的变化率的负值成正比，这就是电磁感应定律。例如，匝数为 N 的线圈所交链的磁通为 Φ ，当该磁通随时间发生变化时，线圈产生的感应电动势为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \tag{1-5}$$

式(1-5)为电磁感应定律的数学表达式。在电机学中，电磁感应现象有两个方面。

(一) 变压器电动势

如图 1-6 所示为变压器电动势产生的原理。线圈 N_1 通入随时间而变的电流 i_1 ，这时由 i_1 所产生的磁通 Φ 也随时间而变，磁通 Φ 沿导磁材料闭合。这时线圈 N_1 和 N_2 同时交链磁通 Φ ，从而在线圈 N_1 和 N_2 中都会感应电动势 e_1 和 e_2 ，感应电动势的正方向如图 1-6 所示，其表达式为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \tag{1-6}$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \tag{1-7}$$

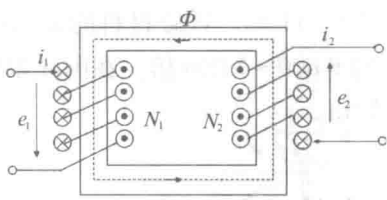


图 1-6 变压器电动势产生原理

在图 1-6 中，由线圈 N_1 中电流 i_1 的变化在自身线圈 N_1 内感应的电动势 e_1 称为自感电动势，而在另一线圈 N_2 内感应的电动势 e_2 称为互感电动势。

感应电动势还可以表示为磁链的方式，如式(1-6)和式(1-7)可表示为 $e_1 = -d\Psi_1/dt$ 和 $e_2 = -d\Psi_2/dt$ ，其中 Ψ_1 和 Ψ_2 为磁链，分别为 $\Psi_1 = N_1 \times \Phi$ ， $\Psi_2 = N_2 \times \Phi$ 。

通常把单位电流产生的磁链定义为线圈的电感，用符号 L 表示，单位名称为亨(亨利)，单位符号为 H，于是有 $L = \Psi/i$ 。

(二) 旋转电动势

旋转电动势是由于线圈(或导体)和磁场之间存在的运动，使得线圈中的磁通发生变化

而产生电动势,所以称之为旋转电动势。当线圈(或导体)所处的磁通密度 B 为均匀磁密时,旋转电动势值的计算公式为

$$e = B \cdot v \cdot l \quad (1-8)$$

式中: v 为导体运动的线速度, m/s ; B 为导体所处的磁通密度, T ; l 为导体的有效长度, m ; e 为导体中感应电动势, V 。

旋转电动势方向由右手定则决定,即伸开右手,使大拇指与其余四指互相垂直并在一个平面内,让磁力线穿过手心,大拇指指向导体相对于磁场的运动方向,则四指所指的方向为旋转电动势的方向。右手定则法如图 1-7 所示。

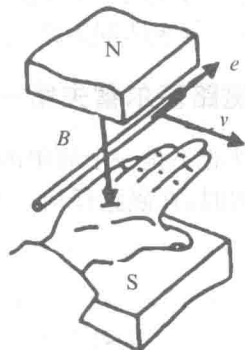


图 1-7 确定旋转电动势方向的右手定则

载流导体在磁场中会受到力的作用,这种力是磁场与电流相互作用所产生的,故称为电磁力。若磁场与导体相互垂直,则作用在导体上的电磁力值为

$$f = B \cdot i \cdot l \quad (1-9)$$

式中: B 为导体所处的磁通密度, T ; i 为导体中的电流, A ; l 为导体在磁场中的有效长度, m ; f 为作用在导体上的电磁力, N 。

电磁力的方向可用如图 1-8 所示的左手定则确定,即伸开左手,大拇指与其余四指互相垂直,并保持在一个平面,让磁力线穿过手心,四指指向电流的方向,则大拇指所指的方向为电磁力的方向。

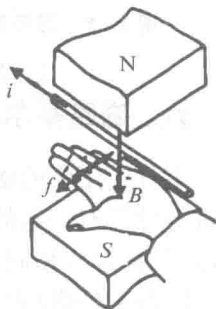


图 1-8 左手定则

四、磁路欧姆定律

如图 1-2 所示是一个单框线圈铁心磁路的示意。铁心上绕有 N 匝线圈,通以电流 i 产生沿铁心闭合的主磁通 Φ ,沿空气闭合的漏磁通 Φ_s 。设铁心截面积为 S ,平均磁路长度为 l ,铁磁材料的磁导率为 μ (μ 不是常数,随磁感应强度 B 的变化而变化)。

假设漏磁通可以不考虑(即令 $\Phi_s = 0$,磁通全部通过铁心),并且认为磁路 l 上的磁场强度 H 处处相等,于是,根据全电流定律有

$$\oint_l H dl = Hl = Ni \quad (1-10)$$

因 $H = B/\mu$, $B = \Phi/S$, 可得

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{Ni}{l/(\mu S)} = \Lambda_m F$$

或

$$F = Ni = Hl = \frac{Bl}{\mu} = \Phi \frac{l}{\mu S} = \Phi R_m = \frac{\Phi}{\Lambda_m} \quad (1-11)$$

式中： $F=Ni$ 为磁动势； $R_m=\frac{l}{\mu S}$ 为磁阻； $\Lambda_m=\frac{1}{R_m}=\frac{\mu S}{l}$ 为磁导。

式(1-11)即磁路欧姆定律，与电路欧姆定律相似。它表明：当磁阻 R_m 一定(即磁路确定)时，磁动势 F 越大，则所激发的磁通量 Φ 也越大；当而磁动势 F 一定时，磁阻 R_m 越大，则产生的磁通量 Φ 越小。在磁路中，磁阻 R_m 与磁导率 μ 成反比，空气的磁导率 μ_0 远小于铁心的磁导率 μ_{Fe} ，这表明漏磁路(空气隙)的 R_m 远大于铁心的 R_m ，故分析中可忽略漏磁通 Φ_s 。

五、磁路基尔霍夫第一定律

如果铁心不是一个简单的回路，而是带有并联分支的磁路，从而形成磁路的节点，则当忽略漏磁通时，在磁路任何一个节点处，磁通的代数和恒等于零，即

$$\sum \Phi = 0 \tag{1-12}$$

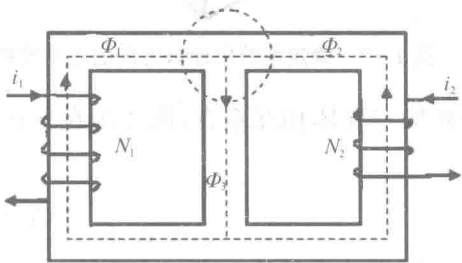


图 1-9 磁路基尔霍夫第一定律

式(1-12)与电路第一定律 $\sum i = 0$ 在形式上相似，因此称为磁路的基尔霍夫第一定律。若令流入节点的磁通定为(+)，则流出该节点的磁通定为(-)。如图 1-9 所示封闭面处有

$$\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

磁路基尔霍夫第一定律表明，进入或穿出任一封闭面的总磁通量的代数和等于零，或穿入任一封闭面的磁通量恒等于穿出该封闭面的磁通量。

六、磁路基尔霍夫第二定律

工程应用中的磁路，其几何形状往往是比较复杂的，直接利用安培环路定律的积分形式进行计算有一定的困难。为此，在计算磁路时，要进行简化。简化的办法是：先把磁路分段，几何形状相同的分为一段，找出它的平均磁场强度，再乘以这段磁路的平均长度，求得该段的磁位降(也可理解为一段磁路所消耗的磁动势)；然后把各段磁路的磁位降相加，结果就是总磁动势，即沿任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁位降的总和。此称为磁路基尔霍夫第二定律，即

$$\sum_k H_k l_k = \sum i = iN \tag{1-13}$$

式中： H_k 为磁路里第 k 段磁路的磁场强度，A/m； l_k 为第 k 段磁路的平均长度，m； iN 为作用在整个磁路上的磁动势，即全电流数(安匝)； N 为励磁线圈的匝数。上式也可以理解为，消耗在任一闭合磁回路上的磁动势，等于该磁路所交链的全部电流。

如图 1-10 所示，磁路可分为 2 段：一段为铁磁材料组成的铁心，总长度为 $2l_1 + 2l_2 - \delta$ ，磁场强度为 H_1 ；另一段为气隙，长度为 δ ，磁场强度为 H_δ 。铁心上有 2

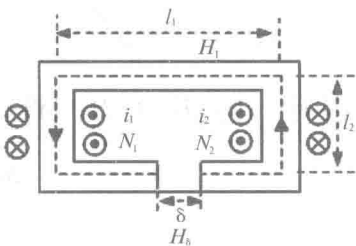


图 1-10 磁路基尔霍夫第二定律

组线圈：一组线圈的电流为 i_1 ，线圈的匝数为 N_1 ；另一组线圈的电流为 i_2 ，线圈的匝数为 N_2 。由磁路基尔霍夫第二定律可得 $H_1(2l_1+2l_2-\delta)+H_\delta\delta=i_1N_1+i_2N_2$ 。

第四节 铁磁材料

铁磁材料一般由铁或铁与钴、钨、镍、铝及其他金属的合金构成，是迄今为止最通用的磁性材料。虽然这些材料的性能差异很大，但决定其性能的基本现象却是共同的。

一、铁磁材料的磁化

研究发现，铁磁材料由许多磁畴构成，每个磁畴相当于一个小永磁体，具有较强的磁矩，如图 1-11 所示。在未磁化的材料样品中，所有磁畴摆列杂乱，因此材料对外不显磁性，如图 1-11a 所示。当外部磁场施加到这一材料时，磁畴就会沿施加的磁场方向转向，所有的磁畴平行，铁磁材料对外表现出磁性，如图 1-11b 所示。因此，当外磁场加到铁磁材料时，随着外部磁场强度 H 的增加，这些磁畴逐渐沿外磁场方向偏移，直到所有的磁矩沿施加的磁场排列，磁畴将不再能使磁通密度 B 增加，也就是说材料完全饱和。这也是铁磁材料的磁导率比非铁磁材料大得多的原因。

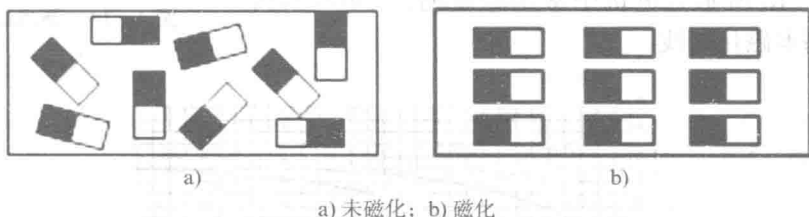


图 1-11 铁磁材料的磁化

二、磁化曲线

将一块没有磁化的铁磁材料进行磁化，当磁场强度由零逐渐增大时，磁通密度随之增大，用 $B=f(H)$ 描述的曲线称为铁磁材料的起始磁化曲线，如图 1-12 所示。

由图 1-12 可见：当磁场强度从零增大初期，磁通密度 B 随磁场强度 H 增加较慢（图中 $0a$ 段）；之后， B 随 H 的增加而加快增大（ ab 段）；过了 b 点， B 的增加减慢（ bc 段）；最后为 cd 段，又呈直线。过了饱和点 c ，铁磁材料的磁导率趋近于 μ_0 。在各种电机和变压器的主磁路中，为获得较大的磁密，又不过分增大磁动势，通常把铁心内的工作点磁通密度选择在 c 点附近。

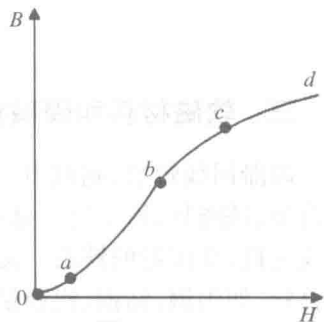


图 1-12 起始磁化曲线

若将铁磁材料进行周期性磁化，则 B 与 H 之间的变化关系就会变成如图 1-13 中的 $abcdefa$ 所示形状。当 H 开始从零增加到 H_m 后逐渐减小磁场强度 H ， B 值将沿曲线 ab 下

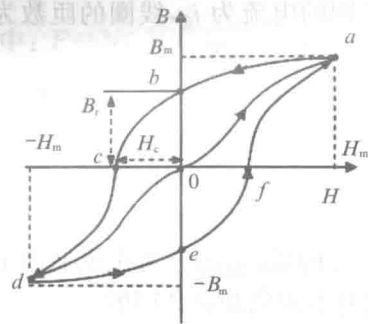


图 1-13 铁磁材料的磁化特性

平均磁化曲线。起始磁化曲线与平均磁化曲线相差甚小，如图 1-14 的虚线所示。

铁磁材料，如铁、镍等的磁导率 μ 比空气的磁导率 μ_0 大几千到几万倍。磁导率 μ 除比 μ_0 大得多外，还与磁场强度以及物质磁状态的历史有关，因此铁磁材料的 μ 不是一个常数。在工程计算时，不按 $H=B/\mu$ 进行计算，而是按铁磁材料的基本磁化曲线计算的。

如图 1-15 所示为电机中常用的硅钢片 DR530，铸铁，生铁的基本磁化曲线。

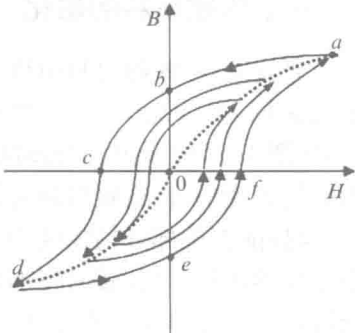


图 1-14 基本磁化曲线

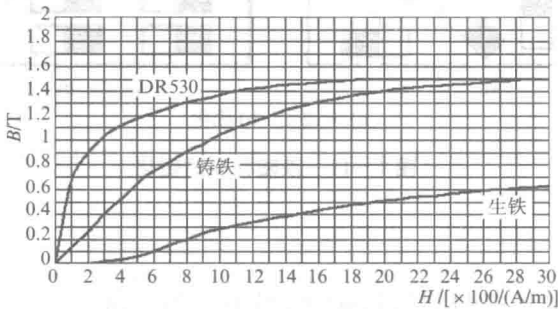


图 1-15 电机中常用的基本磁化曲线

三、软磁材料和硬磁材料

磁滞回线较窄、剩磁 B_r 和矫顽磁力 H_c 都小的铁磁材料属于软磁材料，如硅钢片、铁镍合金、铁淦氧、铸钢等。这些材料磁导率较高，磁滞回线包围面积小、磁滞损耗小，多被制作成电机、变压器的铁心。磁滞回线较宽、剩磁 B_r 和矫顽磁力 H_c 都大的铁磁材料属于硬磁材料，如钨钢、钴钢、铝镍钴、铁氧体、钕铁硼等，主要用作永久磁铁。

四、磁滞损耗和涡流损耗

(一) 磁滞损耗

磁滞现象的产生是由于铁磁材料中的磁畴在外磁场作用下，发生移动和倒转时，彼此

之间产生“摩擦”。由于这种“摩擦”的存在,当外磁场停止作用后,磁畴与外磁场方向一致的排列便被保留下,不能恢复原状,形成磁滞现象和剩磁。

铁磁材料在交变磁场的作用下反复磁化过程中,磁畴之间不停地互相摩擦,消耗能量,因此引起损耗,这种损耗称为磁滞损耗。磁滞回线面积越大,损耗越大。磁通密度最大值 B_m 越大时,磁滞回线面积也越大。试验表明,交变磁化时,磁滞损耗 p_h 与磁通的交变频率 f 成正比,与磁通密度的幅值 B_m 的 n 次方成正比,与铁心质量 G 成正比,即

$$p_h = C_h f B_m^n G \quad (1-14)$$

式中: C_h 为磁滞损耗系数;对一般的电工用硅钢片, $n=1.6\sim 2.3$ 。由于硅钢片的磁滞回线面积较小,所以电机和变压器的铁心都采用硅钢片。

(二) 涡流损耗

当通过铁心的磁通发生交变时,根据电磁感应定律,在铁心中将产生感应电动势,并引起环流。这些环流在铁心内部围绕磁通呈旋涡状流动,称为涡流,如图 1-16 所示。涡流在铁心中引起损耗,称为涡流损耗。设涡流为 i_e ,涡流回路的电阻为 R_e ,涡流感应电动势为 $E_e \propto f \cdot B_m$,涡流损耗 $p_e = i_e^2 R_e = E_e^2 / R_e \propto f^2 B_m^2$,频率越高,磁通密度越大,感应电动势越大,涡流损耗也越大;铁心的电阻越小,涡流损耗越小。对电工钢片,涡流损耗还与钢片厚度 d 的平方成正比,经推导可知,涡流损耗为

$$p_e = C_e d^2 f^2 B_m^2 G \quad (1-15)$$

式中: C_e 为涡流损耗系数。可见,为减小涡流损耗,首先是减小钢片的厚度,故将电工钢片的厚度做成 $0.35\sim 0.5\text{ mm}$;其次是增加涡流回路的电阻,故在电工钢片中常加入 4% 左右的硅,变成硅钢片。

在电机和变压器中,通常把磁滞损耗和涡流损耗合在一起,称为铁心损耗,简称铁耗。

对于一般的电工钢片,正常工作点的磁通密度 B 为 $1\text{ T} < B_m < 1.8\text{ T}$,铁心损耗可近似为

$$p_{Fe} = p_h + p_e \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G \quad (1-16)$$

式中: C_{Fe} 为铁心的损耗系数; G 为铁心质量。可见,铁心损耗与频率的 1.3 次方、磁通密度的平方、铁心质量成正比。

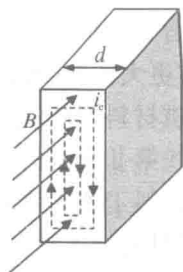


图 1-16 硅钢片中的涡流

第五节 永磁材料的应用

剩磁的意义在于,当没有外部励磁存在时,它也能在磁路中产生磁通。对用小磁体把留言条贴在电冰箱上的人来说,这是一个很熟悉的现象。剩磁也广泛用于喇叭及永磁电机等装置中。

几种常用永磁材料的磁化特性如图 1-17 所示。铝镍钴 5 为一种广泛应用的铁、镍、铝及钴的合金,最初发现于 1931 年,具有相对较大的剩余磁通密度。与铝镍钴 5 相比,铝

镍钴 8 有较低的剩余磁通密度和较高的矫顽磁力,因此比铝镍钴 5 更少去磁。铝镍钴合金的缺点是其有相对较低的矫顽磁力以及机械脆性。

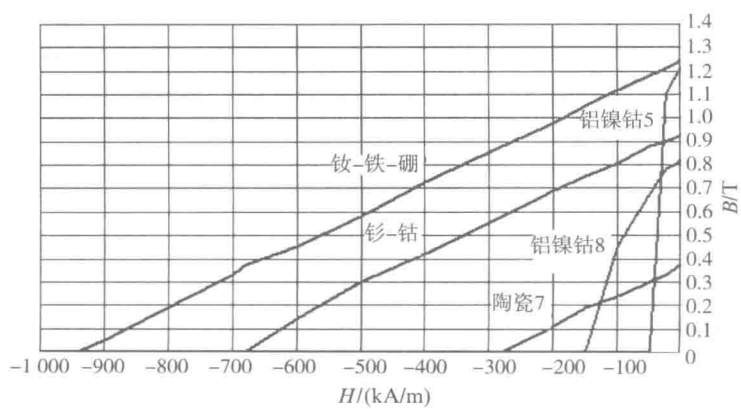


图 1-17 常用永磁材料的磁化曲线

陶瓷永磁材料用氧化铁及钡或碳酸锶粉末制成,比铝镍钴合金剩余磁通密度低,但矫顽磁力明显要高。因而此类材料更少趋于去磁。在图 1-17 中,陶瓷 7 的磁化特性几乎为一条直线。陶瓷体具有良好的机械性能,制造成本也不高,因而广泛用于许多永磁应用场合。

随着稀土永磁材料的发现,永磁材料技术从 20 世纪 60 年代开始取得重大进步,其中以钐-钴为典型代表,从图 1-17 中看出,钐-钴具有像铝镍钴合金那样的高剩余磁通密度,同时又有更高的矫顽磁力及最大磁能积。最新的稀土永磁材料是钕-铁-硼材料,它表现出比钐-钴更大的剩余磁通密度、矫顽磁力及最大磁能积。

永磁材料性能的一个有用的衡量标准为最大磁能积,这对应于 $(B-H)_{\max}$,相应于在磁滞回线第 II 象限的一点。 B 和 H 的乘积具有能量密度的量纲(焦耳每立方米, J/m^3)。若永磁材料工作于该点,则使得在气隙中产生一定磁通密度所需要的材料体积最小。因此,选取具有最大可利用的最大磁能积的材料可使需要的磁体体积最小。

思考与练习题

- 1-1 电机和变压器的磁路常采用什么材料制成? 这种材料有哪些主要特性?
- 1-2 磁滞损耗和涡流损耗是什么原因引起的? 它们的大小与哪些因素有关?
- 1-3 变压器电动势、运动电动势(速率电动势)、自感电动势和互感电动势产生的原因有什么不同? 其大小与哪些因素有关?
- 1-4 试比较磁路与电路的相似点和不同点。
- 1-5 什么是软磁材料? 什么是硬磁材料?
- 1-6 磁路的基本定律有哪些?
- 1-7 简述铁磁材料的磁化过程。
- 1-8 磁路计算的步骤是什么?
- 1-9 说明交流磁路与直流磁路的异同点。