

电机学

姚舜才 等编著

与电力拖动技术



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电机学与电力拖动技术

姚舜才 付巍 赵耀霞 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电机学与电力拖动技术 / 姚舜才等编著. —北京:国防工业出版社, 2006.1

ISBN 7-118-04221-8

I. 电... II. 姚... III. ①电机学②电力传动
IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 133652 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 410 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

电机是自动控制系统中很重要的执行元件,是构成整个系统不可或缺的组成部分。要对控制系统进行研究,就必须对电机和电力拖动技术有足够的了解。本书对电机学和电力拖动技术的基本内容进行了整合,并将其相互结合起来,特别注重工程实践和应用,尽量避免一些与工程实际联系不太紧密的理论推导,以便于自学。因此,本书对电气工程、自动化和其他相关专业的专业技能培养以及后续课程的学习都有很大的帮助。

本书内容主要包括:电机和电力拖动技术的一些基本电磁理论和力学基础理论;直流电机的理论与电力拖动技术;变压器;感应电动机的基本理论与电力拖动技术;同步电机的理论与应用以及控制电机的相关问题。考虑到还有一些其他相关的知识不便归纳到这些章节中,本书专门列出了附录。附录包括常用电机和拖动技术术语的中英文对照、Matlab/Simulink 仿真分析、电机选择以及经典文献介绍。其中姚舜才编写第一、第七、第八、第九、第十章以及附录部分;付巍编写第二、第五、第六章;赵耀霞编写第三、第四章。全书由姚舜才统稿。

由于时间仓促以及编者水平有限,难免存在一些错误和不当之处,恳请广大读者及同行不吝赐教。

在本书的编写过程中得到了中北大学自动控制系统领导的大力支持,在此一并表示感谢!

编 者
2005 年 10 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 电机与拖动的历史与发展现状	1
1.3 本课程所涉及的电磁学基本理论	3
习题	9
第二章 直流电机基本理论	10
2.1 直流电机基本工作原理与结构	10
2.2 直流电机的磁场	15
2.3 直流电机的电枢绕组	19
2.4 直流电动机的感应电动势和电磁转矩	24
2.5 直流电机的运行原理	26
习题	31
第三章 电力拖动系统的机械动力学基础	34
3.1 电力拖动系统的基本方程	34
3.2 多轴电力拖动系统的简化	36
3.3 电力拖动系统负载特性及相关问题	45
习题	50
第四章 直流电动机的电力拖动	52
4.1 他励直流电动机的机械特性	52
4.2 他励直流电动机的启动	58
4.3 他励直流电动机的四象限运行	61
4.4 他励直流电动机的调速与控制	72
4.5 串励直流电动机的拖动问题	82
4.6 他励直流电动机的瞬态分析与控制	86
习题	89
第五章 变压器	91
5.1 变压器的分类、基本结构、额定值	91
5.2 单相变压器的空载运行	95
5.3 单相变压器的负载运行	98
5.4 变压器等效电路参数的测定	102
5.5 三相变压器的相关问题	104
5.6 标幺值	106

5.7 变压器的主要运行特性	109
5.8 变压器的并联运行	110
5.9 其他特殊变压器	112
习题	117
第六章 交流电机理论的共同问题	122
6.1 交流电机的电枢绕组	122
6.2 交流电机电枢绕组的感应电动势	127
6.3 在非正弦分布磁场下电动势中得高次谐波及削弱方法	131
6.4 交流电机单相电枢绕组的磁动势	133
6.5 交流电机三相电枢绕组的磁动势	136
习题	138
第七章 感应电动机的基本原理	140
7.1 感应电动机的基本工作原理与结构	140
7.2 转子静止时感应电动机的电磁关系与等效电路	146
7.3 转子旋转时感应电动机的电磁关系与等效电路	152
7.4 感应电动机的工作特性与参数测试方法	158
7.5 单相感应电动机	161
习题	164
第八章 三相感应电动机的电力拖动技术	167
8.1 三相感应电动机的机械特性	167
8.2 三相感应电动机的启动	176
8.3 三相感应电动机的四象限运行	187
8.4 三相感应电动机的调速与控制技术	196
8.5 三相感应电动机的瞬态分析与控制	208
习题	212
第九章 同步电机基本原理与运行基础	215
9.1 同步电动机的基本工作原理与结构	215
9.2 同步电动机的电磁关系	217
9.3 同步电动机的运行分析	220
9.4 同步电动机的电力拖动技术	231
9.5 同步发电机的基本原理与相关技术	234
习题	241
第十章 控制电机专题	243
10.1 伺服电动机	243
10.2 步进电动机	248
10.3 开关磁阻电动机	252
10.4 自整角机	254
10.5 旋转变压器	257
10.6 测速发电机	258

10.7 直线电机..... 260

习题..... 263

附录..... 264

附录 A 常用电机与拖动技术术语的中英文对照..... 264

附录 B 基于 Matlab/Simulink 的电机及拖动系统的计算机仿真 268

附录 C 电机的选择..... 271

附录 D 20 世纪后期电机学与拖动经典文献推荐 274

参考文献..... 276

第一章 绪 论

1.1 概 述

电能是一种现代的主要能源。其易于分配、转换、传输和控制的优良性质,是很多能源不能比拟的。而电能的生产和作为动力方面的利用,则主要靠电机来实现。

电机是发电机和电动机的总称。发电机由水轮机、汽轮机或其他原动机拖动,将一次能源转化而来的机械能进一步转化为电能,再由变电设备和覆盖广大地域的电网传输到各生产和生活用户的用电现场。目前,我国提供给发电机原动机的一次能源主要是煤炭燃烧所产生的热能,水利资源经人工改造的机械势能;风力资源、太阳能、核能、以及潮汐能等也占有一定的比例。

电动机可以将一定的电能转换为机械能,用来作为各种机械设备的动力装置,拖动其按照一定的要求进行运转。根据使用的要求和场合不同,已经具有了各种类型的电动机,从直流电动机、交流电动机、各种特殊功用的控制电动机到新型超导电动机等不一而足;而且新型电动机的开发和研制也方兴未艾,有着广阔的开发和应用前景。

由于电动机的电力拖动具有良好的性能,控制较为简单方便,因此广泛应用到各种拖动控制场合。近年来,随着自动控制理论和技术、计算机技术以及电力电子技术和大功率驱动器件的不断发展和涌现,电力拖动技术有了很大的发展,其应用领域仍然还在不断拓宽。

本课程是一门典型的理论与实践相结合的课程,既有相当强的理论性,也很强的实践性。其先修课程是“电路原理”和“电工技术”等基础课;在专业课程方面,又承前启后,为后续课程的学习奠定一定的基础。

1.2 电机与拖动的历史与发展现状

电机与拖动技术的发展历史是相互促进的,两者既独立发展,又彼此紧密联系;电机理论和制造技术不断提高为电力拖动技术提供了可能的基础和平台,而电力拖动的不断发展又为电机理论和电机制造提供了实际的工程来源,它们密不可分,相得益彰。电机的发展历史大致经过三个阶段:第一个阶段是直流电机的工程实践与理论创立的时期,这个阶段主要是直流电机的发明与应用,与之相应,直流电机的相关理论也基本完善;第二个阶段是交流电机理论和工程实践发展时期,这个阶段主要是人们将电力拖动的注意力逐渐集中到交流电机上来,交流发电站、交流电动机的广泛使用,相应的理论也建立了起来;第三阶段是电机理论与技术大发展的一个时期,除了交直流电力拖动的电机不断改善外,各种功能和用途的控制电机也大量涌现,而且电机理论受到很多交叉学科的影响,有了长

足的进步。

与之相适应,电力拖动的发展也可以大致分为这样几个阶段:第一阶段是单一电机的拖动控制阶段。在这个阶段,很多工作机械都由一台主电机来作为动力,通过天轴和机械传动的方式进行,往往一个车间就只有一台电动机进行拖动,对其的控制采用继电—接触器,这种工作方式噪声大,效率低,制造精度差,但由于当时技术所限也只能如此;第二阶段,电机拖动走向了单电机拖动的时代,一台电机拖动一台机械设备,采用模拟电路与晶闸管等电力电子器件进行控制,与第一阶段相比,电机的利用率、加工精度有了很大提高,但也有很多问题;第三阶段,电机的拖动控制向单独的器件发展,即一个旋转部件由一台电机拖动,采用数字电子计算机等数字控制设备进行控制,先进的控制方法也逐渐在电力拖动上得到日益广泛应用。

表 1.1 是电机拖动的发展历史简表,可以使读者一目了然地了解电机拖动的发展历史。

表 1.1 电机拖动的发展历史

时间区段	人物与技术发展
1821 年	法拉第发现带电导体的在磁场中要受到电磁力的作用
1825 年	阿兰果(Arago)利用金属环旋转使位于其磁场内的磁针旋转,异步电机的基础
1831 年	法拉第发现电磁感应定律
1833 年	楞次证明了电机的可逆原理
1834 年—1869 年	励磁方式得到改善,由永磁到电流励磁,由他励到自励
1870 年	格拉姆(Gramme)提出环形绕组代替凸极绕组
1879 年	拜义立(Bailey)使用电的方法获得了旋转磁场
1880 年	爱迪生提出由叠钢片代替整块铁芯,减少涡流损耗
1882 年	德普莱茨(Deprez)实现了较长距离的直流输电
1884 年—1885 年	直流电枢换向问题改善,采用换向极及补偿绕组;使用石墨做电刷;闭合磁路变压器发明
1886 年	磁路的欧姆定律确立
1888 年	特斯拉(Tesla)发明了感应电动机
1889 年	交流电三相制的确立,长距离交流输电得以改善
1891 年	直流电机电枢绕组理论确立
1893 年—1899 年	交流电机理论基本建立并逐渐完善
1918 年	交流电机不对称运行的分析方法基本确立
1926 年—1930 年	同步电机功角特性、瞬态分析方法以及凸极双反应理论的建立
1935 年—1938 年	克龙(Kron)将张量分析引入到电机的相关研究中来
1954 年	空间矢量方法引入到电机的分析中
1959 年—1969 年	控制理论的基本方法,如传递函数、方框图、状态方程等理论和工具渐渐被用来分析和设计电机与拖动系统
20 世纪 70~80 年代	矢量变换控制逐渐成为交流电机控制方法的主流
20 世纪 90 年代	有限元分析也介入到电机理论中,形成了所谓“有限元—状态空间耦合时步”法,使电机分析理论又上了一个台阶

在法拉第刚刚发明第一台发电机的时候,这台小小的装置只能使电流表的指针轻微地偏离一个角度。因此有人问他,费尽心机地发明这种玩意儿究竟有什么用途,法拉第反问到,新生的婴儿又有什么用途呢?法拉第预见到这个“新生的婴儿”必将推动技术领域的革新。正是这个新生的婴儿在以后的不断成长中,推进了以电气化革新为代表的第二次技术革命,使人类的生产力水平提高了一大步,同时也造就了一大批电机理论学者和象爱迪生这样致力于在电气应用的各个方面不断创新的发明家。

目前,随着计算机技术、控制理论和技术以及电力电子技术的不断发展和完善,电机与电力拖动技术正如虎添翼向着更高的层次不断发展,相信在不远的将来电机与电力拖动技术将会向数字化、高智能化的方向迈进,其发展前景是非常可观的。

1.3 本课程所涉及的电磁学基本理论

从能量转换角度来看,电机是一种能量转换装置。其能量转换的主要基本原理主要来自于电磁感应的基本理论。要研究电机与拖动的理论和技术必须掌握这些电磁学的基本理论,尽管在学习本课程之前,很多读者已经进行过这方面的学习,但我们认为仍然有必要将本课程中所用到的一些电磁理论重新列一下,以便复习和查阅。

1.3.1 电磁感应的基本概念

我们知道,当一定大小的电流流过时,就会产生一定的磁场。磁场的强弱以及磁场的方向一般使用磁感应强度来表示。在实际的分析过程当中,也常常使用磁力线来形象地表示磁场的强弱和方向:磁力线密,磁场的强度就大;磁力线疏,磁场的强度就小。磁场的方向与产生这种磁场电流的方向是有关系的,这种方向关系可以使用右手螺旋定则来描述:当我们握紧拳头,并竖起大拇指做表示称赞的手势时,就是右手螺旋定则的判别手势,大拇指所指的方向是电流的方向,其他四指所指向的方向是这个电流所引起磁场的方向。如图 1.1 所示。磁感应强度用来描述磁场的大小和方向,是一个矢量,用 B 来表示,在国际单位制中,其单位是特斯拉(Tesla),在实际的使用过程中通常用 T 表示。磁感应强度又叫做磁感应强度,这源于它和磁通的关系,在实际使用中也常将其简称为“磁密”。

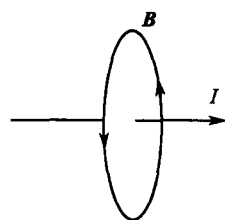


图 1.1 电流与其所产生磁场之间的方向关系(右手螺旋定则)

1.3.2 磁通

磁通[量]是另一个在电磁理论中非常重要的物理量,它表示在某个特定的截面内穿过这个截面的磁感应强度的通量,用 Φ 表示。它和磁感应强度之间的关系用数学语言描述如下:

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

式中 Φ ——磁通,单位:韦[伯][Wb];

B ——磁感应强度,单位:特[斯拉][T];

S ——磁力线所穿过区域的面积,单位:平方米(m^2)。

在国际单位制中,磁通的单位是韦[伯](Weber)。在实际的使用过程中通常写作 Wb 。

假如通过一定截面的磁场是均匀的,而且所有磁力线的走向均于此截面正交,则式(1-1)的积分形式可以写做代数形式,即

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

从这个式子可以看出,磁感应强度是单位面积上的磁通,是磁通的面密度,这也是磁感应强度又叫做磁通[量]密度(简称磁密)的来历。

1.3.3 磁场强度

在处理近似线性磁场的时候,还有一个很重要的物理量需要经常用到,这就是磁场强度 H 。一般来讲,在线性磁性材料的一定范围内,磁场强度与磁感应强度(磁感应强度)之间的关系是线性的,即

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

磁场强度是用来衡量在单位长度上的电流大小的,在国际单位制中磁场强度 H 的单位名称是安培/米。实际应用中一般用符号写作 A/m 。式(1-3)中磁场强度与磁感应强度之间的比例系数 μ 是衡量各种物质对于磁的传导能力大小的物理量,叫做磁导率。在国际单位制中,磁导率的单位名称是亨利/米。实际应用中一般用符号写作 H/m 。在真空中,磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。把这个磁导率的数值作为基准,其余物质的磁导率与之相比,得到的系数,我们称为相对磁导率,用符号 μ_r 表示。一般来讲,铁磁物质的相对磁导率 μ_r 比较大,例如电机定转子铁芯的硅钢片的相对磁导率在 6000~7000 左右,而非磁物质的相对磁导率则比较小。

1.3.4 磁路的基本定律

1. 安培环路定律

在物理学中,我们知道沿闭合曲线 l ,磁场强度的线积分等于此回路所包围的导体电流的代数和。即

$$\oint_l H dl = \sum I \quad (1-4)$$

式中,对电流方向的定义是:如果导体中电流的方向和积分环路的方向一致,取为正值;如果方向相反则取为负值。例如在图 1.2 中,式(1-4)就可以写做

$$\oint_l H dl = \sum I = -i_1 + i_2 - i_3 + i_4$$

如果沿闭合回路 l ,磁场强度的方向总与 l 的切线方向处处相同,换句话说也就是闭合回路所形成的曲面与它所包含的电流方向处处正交的话,式(1-4)还可以进一步简化为

$$\sum Hl = \sum I = Ni \quad (1-5)$$

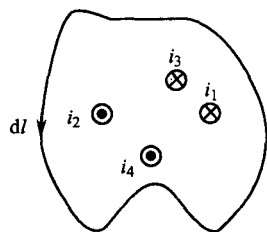


图 1.2 安培环路定律示意图

式中,第二个等号是螺线管的情况; N 为线圈的匝数。

2. 磁路中的欧姆定律

在电路中有一个非常基本和重要的定律,就是欧姆定律,反映了电流、电阻和电压(电动势)之间的关系。在磁路中也有与之非常相似的关系,我们把它叫做磁路中的欧姆定律。

将式(1-5)中所形成的关系表示为一个物理量,把它称做磁动势,用 F 表示,即

$$F = \sum Hl = \sum I = Ni \quad (1-6)$$

将式(1-2)与式(1-3)的关系代入式(1-6),就可以得到

$$F = Ni = Hl = \frac{B}{\mu}l = \Phi \frac{l}{\mu S} \quad (1-7)$$

式中 Φ ——磁路的磁通;

l ——磁力线所经过的长度;

μ ——磁路经过的磁介质的磁导率;

S ——磁力线所穿过的截面积。

将 $\Phi \frac{l}{\mu S}$ 用磁路的磁阻 R_m 表示,即

$$R_m = \Phi \frac{l}{\mu S} \quad (1-8)$$

这样,式(1-7)可以写成

$$F = \Phi R_m \quad (1-9)$$

它表示在磁路中,磁路的磁动势等于磁路的磁通与磁路总磁阻的乘积。而由式(1-8)可知,磁阻在一个确定的磁路中只与磁介质材料本身的性质有关,与其他方面均无关系,因此可以说磁路的磁动势与磁路的磁通之间是一个线性正比的关系。

再来回顾一下电路中的欧姆定律:

$$E = IR$$

这个公式与式(1-9)相对比非常相似:磁动势 F 相对于电动势 E ,磁通 Φ 相对于电流 I ,磁阻 R_m 相对于电阻 R 。因此式(1-9)称为磁路中的欧姆定律。

3. 磁路中的基尔霍夫定律

在电路分析中还有一个很重要的定律,就是基尔霍夫定律。在磁路的基本理论中也有相应的磁路基尔霍夫定律。在电路分析中,基尔霍夫定律有两种形式,第一种形式是基尔霍夫电流定律(KCL)它说明了在一个电路的节点上其

电流的代数和为零,即

$$\sum I = 0$$

与之相应,在磁路中,如果磁力线所经过的路径不是一个简单的回路,有多个分支,例如变压器的铁芯,图 1.3 所示。在铁芯中间的柱中磁通为 Φ_1 ,方向如图所示,在铁芯两侧的柱中磁通分别为 Φ_2 和 Φ_3 。设有一闭合曲面 Σ ,

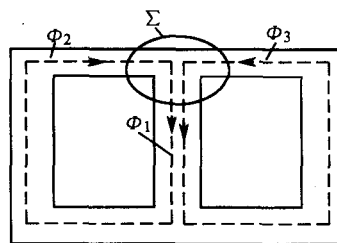


图 1.3 磁路基尔霍夫第一定律

流出曲面的磁通为正,流入曲面的磁通为负,对于曲面 Σ 有

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

即

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-10)$$

这个公式说明,对于一个闭合曲面来讲,流入(流出)这个曲面的磁通代数和为零。对照电路中的基尔霍夫电流定律,一个闭合曲面就相当于电路中的独立节点,而磁通就相当于电流(与磁路欧姆定律相同),二者非常相似,因此将这个表达式称为磁路中的基尔霍夫第一定律,也叫磁通连续性定律。

在电路分析中,基尔霍夫定律还有另一种形式,就是基尔霍夫电压定律(KVL)。在一个电路的简单回路中,电路的总电动势等于在各个电气元件上的电压降,或者表述为在闭合回路中电路各部分的电压降代数和为零,即

$$0 = -E \neq U_1 + U_2 + \cdots + U_N = IR_1 + IR_2 + \cdots + IR_N$$

在电机和变压器中,其磁路是连续闭合的,但是磁力线经过的磁介质却并不处处相等,这时计算整个磁路的磁动势时,需要分段计算,然后在将其叠加起来,如图 1.4 所示的磁路中就有

$$\sum_1^n H_k l_k = \sum I = IN = F$$

式中 H_k ——各段磁介质的磁场强度;

l_k ——各段磁介质的长度;

I ——产生磁场电流的电流强度;

N ——线圈的匝数。

根据磁路欧姆定律,式(1-9),可以写为

$$F = Hl + H_0 \delta = \Phi_1 R_m + \Phi_2 R_{m\delta} \quad (1-11)$$

式中 δ ——空气隙的长度;

l ——磁力线所经过磁钢的总长度;

R_m ——均匀磁钢的磁阻;

$R_{m\delta}$ ——空气隙的磁阻。

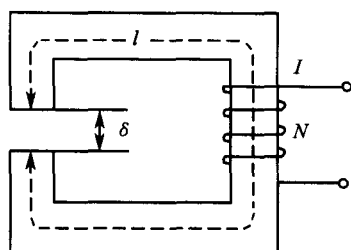


图 1.4 磁路基尔霍夫第二定律

这说明了在闭合磁路中,总的磁动势等于在磁路上各段磁路磁位降的代数和。对照电路中的基尔霍夫电压定律,一个闭合磁路就相当于电路中的闭合回路,而磁通就相当于电流(与磁路欧姆定律相同),磁阻相当于电阻,二者非常相似,因此将这个表达式称为磁路中的基尔霍夫第二定律。

需要说明的是,将磁路与电路这样对照只是为了使有电路知识的读者便于记忆磁路中的定律,实际上,电路与磁路的物理意义是不同的。

1.3.5 电磁力定律

当一端带电的导线放置在磁场中的时候,它会受到电磁力的作用,如果磁力线的方向与导体相互垂直,则导线所受电磁力的大小为

$$f = BIl \quad (1-12)$$

式中 f ——电磁力,单位:牛[顿](N);
 B ——磁场的磁感应强度,单位:特[斯拉](T);
 I ——导线中的电流强度,单位:安[培](A);
 l ——导线的长度,单位:米(m)。

电磁力的方向可以使用左手定则来确定:平伸左手,让磁力线从掌心穿过,四指所指的方向是电流的方向,而左手大拇指所指的方向即为电磁力的方向。如图 1.5 所示。

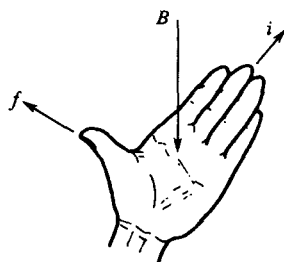


图 1.5 电磁力定律
(左手定则)

1.3.6 电磁感应定律

变化着的磁场也会产生电场,在导体中会产生电动势,如果是一个闭合回路的话,还会产生感应电流,这种现象就是电磁感应现象。电磁感应现象表现在两个方面:一是导体在磁场中如果做切割磁力线的运动会产生感应电动势;二是在螺线管中,如果磁通发生变化时,在螺线管的线圈中会产生电动势。

1. 导体切割磁力线所产生的电动势

设有一根导体在磁场中做切割磁力线的运动,其长度为 l ,做切割磁力线的运动速度为 v ,而且磁场的磁力线、导体的运动方向以及导体的走向,三者相互正交时,所产生的感应电动势大小可以用下面的公式来计算,即

$$E = Blv \quad (1-13)$$

式中 E ——感应电动势,单位:伏[特](V);
 B ——磁场的磁感应强度,单位:特(T);
 l ——导体的长度,单位:米(m);
 v ——导体切割磁力线的速度,单位:米/秒(m/s)。

感应电动势的方向可以由右手定则来确定:平伸左手,让磁力线垂直穿过掌心,右手大拇指的方向是导体切割磁力线的运动方向,四指所指的方向就是感应电动势的方向。如图 1.6 所示。

2. 螺线管中磁通变化所产生的电动势

设有一个线圈匝数为 N 的螺线管位于磁场中,当螺线管线圈所环链的磁通发生变化时,在线圈中也会有感应电动势产生,感应电动势的大小为

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-14)$$

式中 E ——感应电动势,单位:伏(V);
 Φ ——螺线管线圈所环链的磁通,单位:韦(Wb);
 N ——螺线管线圈的匝数。

这种情况下,感应电动势的方向由楞次定律决定:感应电动势的方向始终与磁通的变化相反,如式(1-14)中的负号所表示。

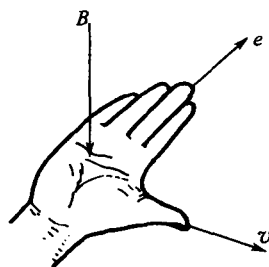


图 1.6 导体切割磁力线所
产生的电动势(右手定则)

1.3.7 铁磁材料的特性及其相关损耗

在电机和变压器中,为了能够使磁场能比较强,一般都使用铁磁材料作为磁路的导磁材料,下面我们要讨论一下这些材料的基本特性。铁磁材料一般包括铁、钴、镍以及这些材料的合金,它们都有良好的导电性,在磁的方面主要有两个非线性特性:一是饱和特性,二是滞回特性。

1. 饱和特性

铁磁材料之所以有较强的导磁性能,从微观角度来讲,是因为在这些材料的内部有很多自发的磁化单元,叫做磁畴。在一般情况下,磁畴的排列是杂乱的,在外界磁场的作用下,磁畴的排列就会渐趋规律,形成一个磁场。在不同励磁电流的作用下,磁感应强度会随励磁电流不断变化,对其进行测量就会得到磁感应强度与磁场强度之间的曲线,即 $B-H$ 曲线,也叫铁磁材料的磁化特性曲线。如图 1.7 所示。图中,曲线 1 为铁磁材料的磁化特性曲线,曲线 2 为铁磁材料的磁导率随磁场强度变化的曲线。从铁磁材料的磁化特性曲线上可以看出,在一定范围内 $(0, a)$,磁感应强度与磁场强度呈线性关系,但在超过这个范围以后,就不再有线性关系了:尽管磁场强度不断增大,但是磁感应强度的变化却并不大。这就是铁磁材料的饱和特性。这种特性说明,在铁磁材料的磁感应强度达到一定值之后,在靠加强励磁电流的方法是不能够使铁磁材料的磁感应强度的增大的。另外,铁磁材料的磁导率也会随励磁的变化而不同。

2. 磁滞回线与磁滞损耗

在测量铁磁材料的磁化曲线时,如果改变测量励磁的大小和方向,就会发现,在励磁增大或减小的不同路径上,铁磁材料的磁化曲线会出现不重合的现象,如图 1.8 所示。这种现象就叫做铁磁材料的滞回现象,这种曲线叫做铁磁材料的磁滞回线。从图 1.8 中可以看出,在磁场强度从 0 开始增大到 H_m 时,其磁化特性曲线沿 oa 段上升,达到最大值 B_m ;此后如果减小磁场强度,磁感应强度自然会下降,但是它不会沿着原来的 ao 曲线下降,而是沿着 ab 曲线下降,当磁场强度减为 0 时,磁感应强度并不为 0,而是等于 B_r ,称为剩磁;同样当磁感应强度降为 0 时,磁场强度也不为 0,而等于 $-H_c$,这个反向的磁场强度称为矫顽力;当磁场强度和磁感应强度降到最小,又开始增大时,将沿 $defa$ 的方向增大。

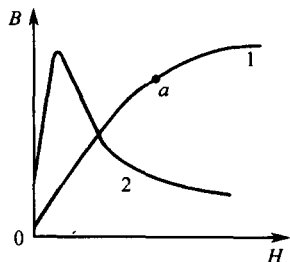


图 1.7 铁磁材料的磁化特性曲线

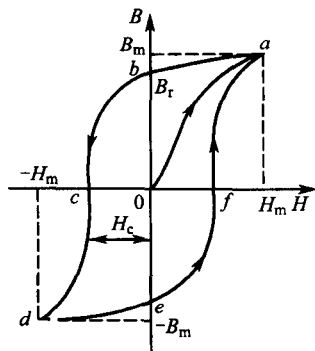


图 1.8 铁磁材料的磁滞回线

不同材料的磁滞回线是各不相同的。磁滞回线较窄的材料称为软磁材料,如铸铁、硅钢片等,导磁率比较高,可以用来制作各种电机的定转子铁芯;磁滞回线比较宽的材料称为硬磁材料,可以制成永磁体,用来制造永磁电机。

在对铁磁材料进行反复的磁化时,铁磁材料内部的磁畴不断被改变方向,相互之间产生摩擦,从而引起一定程度的能量损耗,这种能量损耗叫做磁滞损耗。试验证明,铁磁材料磁滞损耗的大小与磁化磁场的磁感应强度和交变磁场的频率成正比。

3. 涡流损耗

除了铁磁材料的磁滞损耗外,在电机或变压器铁芯中的磁通发生变化时,铁芯会产生感应电动势,进而产生电流,这种电流形状呈旋涡状,故称其为涡流。涡流在铁芯中会产生热量,造成一定的损耗,这种损耗称为涡流损耗。试验证明,涡流损耗的大小与铁芯的厚度平方成正比。因此为了减少涡流损耗,一般都采用薄的硅钢片来制作电机或变压器的铁芯。

铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗合称为铁芯损耗。

习 题

- 1.1 磁感应强度为何又叫做磁感应强度?它与磁通的关系如何?
- 1.2 磁路的磁阻如何计算?磁阻的单位是什么?
- 1.3 电机或变压器铁芯中的损耗包括那些?它们都是怎样产生的?
- 1.4 设有两个线圈的匝数相同,一个缠绕在软磁材料上,而另一个缠绕在非磁物质上,若两个线圈通以相同的交变电流。此时自感电动势若相等,则哪个线圈上的电流大?
- 1.5 为何电机或变压器的铁芯要使用薄的硅钢片叠成?
- 1.6 简述电机与拖动的历史发展进程。

第二章 直流电机基本理论

直流电机是指能输出直流电流的发电机,或通入直流电流而产生机械运动的电动机。

直流电动机具有良好的启动性能和宽广平滑的调速特性,因而被广泛应用于电力机车、无轨电车、轧钢机、机床和启动设备等需要经常启动并调速的电气传动装置中。直流发电机主要作直流电源。此外,小容量直流电机大多在这种控制系统中以伺服电动机、测速发电机等形式作为测量、执行元件使用。

目前,虽然由晶闸管整流元件组成的静止固态直流电源设备已基本上取代了直流发电机,但直流电动机以其良好调速性能的优势在许多传动性能要求高的场合占据一定的地位。

2.1 直流电机基本工作原理与结构

2.1.1 直流发电机的工作原理

为了说明直流发电机的工作原理,我们先从一个最简单的直流发电机模型开始介绍。如图 2.1 所示,在两个固定的永久磁铁北极(N 极)和南极(S 极)之间,放置一个铁质的圆柱体(称为电枢铁芯)。电枢铁芯与磁极之间的间隙称为空气隙。图中两根导体 ab 和 cd 连接成为一个线圈,并敷设在电枢铁芯表面。线圈的首末端分别连接到两片圆弧形的(称为换向片)铜片上。换向片固定在转轴上,换向片之间以及换向片与转轴之间均相互绝缘。这种由换向片构成的整体称为换向器。整个转动部分称为电枢。为了接通电枢和外电路,设置了两个空间固定不动的电刷 A 和 B ,见图 2.1。当电枢转动时,电刷 A 只能与转到上面的一片换向片相接处;而电刷 B 只能与下面的一片换向片相接触。

现假设有一原动机以恒定转速 n 拖动电枢逆时针方向旋转。根据法拉第电磁感应定律,每一导体均有感应电动势,其方向符合右手定则。如图

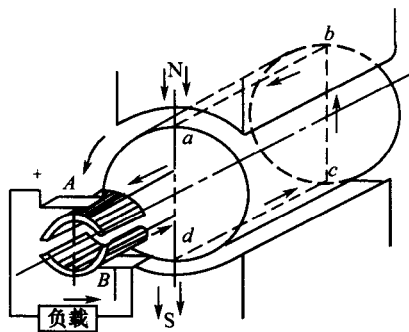


图 2.1 直流发电机的工作原理

2.1所示。导体 ab 处于 N 极下,电动势方向由 b 到 a ;而导体 cd 处于 S 极下,电动势方向由 d 到 c 。从整个线圈来看,导体 ab 与导体 cd 的电动势方向恰好是相反的。设每一根导体的感应电动势为 e ,则线圈电动势为 $2e$ 。电动势 e 的瞬时值为

$$e = B_x l v \quad (2-1)$$

式中 B_x ——导体所处位置的磁感应强度;

l ——导体的有效长度,即导体切割磁力线部分的长度;