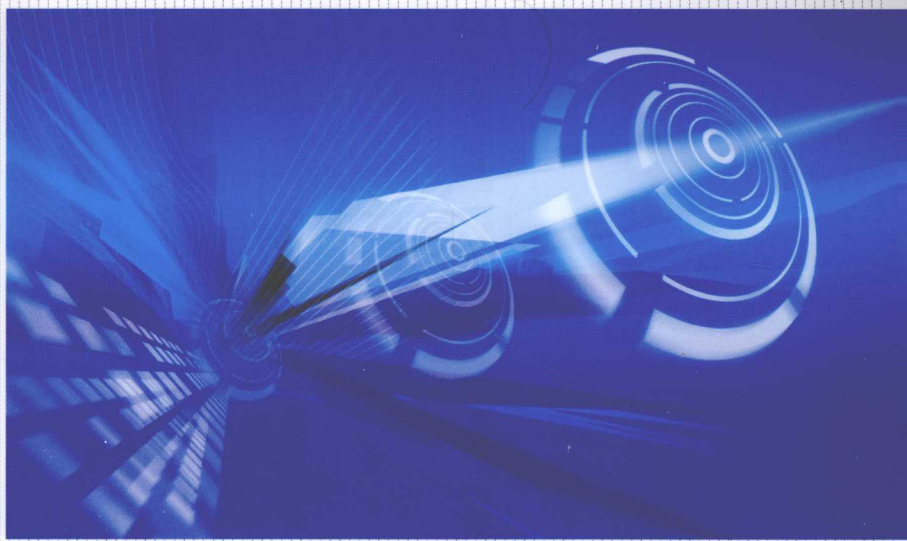


# 电机

# 与电力拖动



主 编 吕 锋  
副主编 邸敏艳 李淑娥

### 本书特色：

1. 突出当前电机学科技
2. 每章设置针对性练习
3. 附赠光盘中的课件和动画获得过国家课件制作团队指导



随书附赠精美课件光盘  
( 板书、仿真和动画演示三位一体 )

● DIANJI YU DIANLI TUODONG



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 电机与电力拖动

主编 吕锋

副主编 邸敏艳 李淑娥

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书主要包括电机与电力拖动两部分。在电机中,重点介绍了直流电机、变压器、异步电动机和同步电动机的基本理论、电磁关系、运行特性及工程计算方法;在控制电机中重点讲述了伺服电动机、测速发电机和步进电动机等微型电机的控制原理、控制方式和控制系统的应用。

在电力拖动中,重点分析了直流电动机和交流电动机电力拖动系统的基础理论,特别是工程应用中的电动机启动、制动、调速方法,控制方式及实现的途径。此外还介绍了电力系统中电动机的选择和发热问题。

本书适用于高等学校电气工程与电子信息等专业使用,既可以作为大专院校电类专业学习教材,亦可供有关工程技术人员的学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电机与电力拖动 / 吕锋主编. —北京: 国防工业出版社, 2011. 1  
ISBN 978-7-118-06610-4

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 003025 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 100048)  
北京奥鑫印刷厂印刷  
新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 16 字数 368 千字  
2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422  
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474  
发行业务:(010)68472764

# 前 言

近年来,随着科学技术的发展,社会对人才的培养提出了更高的要求,学生需要不断地学习和了解新的技术知识及专业知识,具备一定的专业能力和职业技能。为了适应新形势和新要求,本教材本着以培养高素质专业人才为出发点,在保证基础知识、理论深度和强化实践应用的前提下,对教材内容和叙述方法等方面作了进一步的改革和更新。首先在教学内容上,在电机理论部分,强化了电路与磁路之间的关系及内在联系,突出了从应用角度分析难点,以定性分析为主。在电机拖动部分,围绕着电机领域的新技术和生产实践中的热点问题,从理论方法、运行特性、工程应用及计算分析等方面出发,具有系统性、完整性和紧密结合生产实践等特点。为了便于学生对概念的理解,提高分析和解决问题的能力,本书在学习训练方面作了调整和充实,设有例题、思考题、练习题、实验和实训五部分,突出了重点和难点,加强了动手能力的训练。在学习方法上为了给教师和学生自主学习提供完整的教学资源,最大限度的满足教学需要,我们还编写和制作了多媒体教学光盘,利用电机图片和计算机三维动画相结合,生动、形象和直观,以启发学生创造性思维和调动学生学习积极性,同时减少了本课程所占学时,从而形成了较完整的立体化教学软件。

本书由河北师范大学吕锋教授主编,邸敏艳、李淑娥副主编。具体分工:吕锋、付超编写第3章~第6章,邸敏艳编写绪论和第2章,李淑娥编写第1章和第7章,句希源编写第8章,辛涛编写第9章。全书由河北科技大学孙克军副教授担任主审,孙克军副教授对本书初稿作了仔细审阅,并提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。

本书是在总结长期教学和教材建设经验基础上,参考李发海教授、唐介教授和许国章教授等编著的有关教材,吸取了近年来国内外教材的长处编写完成的。由于编者水平有限,书中难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

编者  
2010年7月

# 目 录

绪论	1
0.1 电机在国民经济中的重要作用	1
0.2 铁磁材料的基本特性	2
0.2.1 铁磁材料的 $B-H$ 曲线	2
0.2.2 磁滞现象与磁滞回线	2
0.2.3 铁芯损耗	3
0.3 电机理论中的基本电磁定律	4
0.3.1 电磁感应定律	4
0.3.2 电磁力定律	5
0.3.3 全电流定律	5
0.3.4 磁路的欧姆定律	6
第1章 直流电机	8
1.1 直流电机的工作原理	8
1.1.1 直流电动机的基本工作原理	8
1.1.2 直流发电机的基本工作原理	9
1.1.3 可逆原理阐述	9
1.2 直流电机的结构和铭牌	10
1.2.1 直流电机的主要结构	10
1.2.2 直流电机的铭牌	11
1.3 电枢绕组	12
1.3.1 元件与绕组	12
1.3.2 单叠绕组	13
1.3.3 单波绕组	15
1.4 直流电机的磁场	16
1.4.1 励磁方式	16
1.4.2 空载磁场的分布	17
1.4.3 负载磁场与电枢反应	18
1.5 直流电机的感应电势和电磁转矩	20
1.5.1 电枢绕组的感应电势	20

1.5.2	电枢绕组的电磁转矩	20
1.6	直流电机的运行	22
1.6.1	直流发电机的运行	22
1.6.2	直流电动机的运行	24
1.7	直流电机的换向	27
1.7.1	换向的电磁现象	27
1.7.2	改善换向的方法	28
1.7.3	环火与补偿绕组	29
	练习题、实验与实训	30
<b>第2章</b>	<b>直流电动机的电力拖动</b>	<b>33</b>
2.1	电机拖动系统的运动方程式	33
2.2	负载转矩特性	34
2.2.1	恒转矩负载特性	34
2.2.2	恒功率负载特性	35
2.2.3	风机泵类负载转矩	35
2.2.4	稳定运行条件	35
2.3	他励直流电动机的机械特性	36
2.3.1	他励直流电动机的机械特性方程	36
2.3.2	他励直流电动机的机械特性曲线	37
2.3.3	他励直流电动机的人为机械特性	37
2.4	他励直流电动机的启动	41
2.4.1	他励直流电动机的启动方法	41
2.4.2	电枢回路串变阻器启动	41
2.5	他励直流电动机的制动	44
2.5.1	能耗制动	44
2.5.2	反接制动	46
2.5.3	回馈制动	49
2.6	他励直流电动机的调速	50
2.6.1	调速指标	51
2.6.2	电枢串电阻调速	52
2.6.3	改变电枢电压的调速	52
2.6.4	改变主磁通的调速	53
2.6.5	电动机调速时的允许输出	53
	练习题、实验、实训	55
<b>第3章</b>	<b>变压器</b>	<b>58</b>
3.1	变压器的基本工作原理和结构	58

3.1.1	变压器的基本工作原理	58
3.1.2	变压器的分类	59
3.1.3	变压器的基本结构	59
3.1.4	变压器的额定值和型号	62
3.2	单相变压器的空载运行	63
3.2.1	空载运行的各物理量	63
3.2.2	主磁通与感应电势	64
3.2.3	励磁电流	65
3.2.4	空载运行时的电压平衡方程	66
3.2.5	空载运行时的相量图和等效电路	67
3.3	单相变压器的负载运行	69
3.3.1	负载运行时的磁势平衡	69
3.3.2	负载运行时的电压平衡	70
3.3.3	绕组折算	71
3.3.4	负载运行时的等效电路	72
3.3.5	负载运行时的相量图	73
3.4	变压器参数测定	75
3.4.1	空载实验	75
3.4.2	短路实验	76
3.4.3	标么值	77
3.5	变压器的运行特性	81
3.5.1	外特性和电压变化率	81
3.5.2	损耗与效率特性	82
3.6	三相变压器	85
3.6.1	三相变压器的磁路系统	85
3.6.2	三相变压器的电路系统	86
3.6.3	变压器的并联运行	88
3.7	其他用途变压器	92
3.7.1	自耦变压器	92
3.7.2	电流互感器与电压互感器	94
	练习题、实验、实训	95
<b>第4章</b>	<b>交流电机绕组、磁势和电势</b>	<b>98</b>
4.1	三相异步电动机工作原理与结构	98
4.1.1	三相异步电动机工作原理	98
4.1.2	三相异步电动机的基本结构	100
4.1.3	三相异步电动机的额定值和主要系列	102

4.2	交流电机的绕组	104
4.2.1	交流绕组的基本要求	104
4.2.2	交流绕组的分类	104
4.2.3	交流绕组的常用术语	104
4.2.4	三相单层绕组	105
4.2.5	三相双层叠绕组	106
4.3	交流电机绕组的磁势	108
4.3.1	单相绕组产生的磁势——脉振磁势	108
4.3.2	三相绕组合成的基波旋转磁势	114
4.3.3	三相绕组合成的 $\gamma$ 次谐波旋转磁势	118
4.4	交流绕组的感应电势	121
4.4.1	导体中的感应电势	121
4.4.2	线圈的感应电势	122
4.4.3	一相绕组的感应电势	124
4.4.4	感应电势与绕组交链磁通的相位关系	124
	练习题、实验、实训	126
<b>第五章</b>	<b>异步电动机</b>	<b>128</b>
5.1	三相异步电动机的三种运行状态	128
5.1.1	电磁制动运行状态	128
5.1.2	电动运行状态	129
5.1.3	发电运行状态	129
5.2	转子静止时的三相异步电动机	129
5.2.1	定子绕组接在三相对称电源,转子绕组开路	130
5.2.2	定子绕组接在三相对称电源,转子绕组短路并堵转	132
5.3	转子旋转时的三相异步电动机	134
5.3.1	转子转动时的各物理量	134
5.3.2	平衡方程式	135
5.3.3	异步电动机转子的折算	137
5.3.4	异步电动机的等效电路	140
5.4	三相异步电动机的参数测定	144
5.4.1	空载实验与励磁参数的测定	144
5.4.2	短路实验与短路参数测定	145
5.5	三相异步电动机的功率平衡和转矩平衡	146
5.5.1	功率平衡方程	146
5.5.2	转矩平衡方程	147
5.6	三相异步电动机的工作特性	149



5.6.1	转速特性 $n=f(P_2)$ .....	149
5.6.2	定子电流特性 $I_1=f(P_2)$ .....	149
5.6.3	电磁转矩特性 $T=f(P_2)$ .....	150
5.6.4	功率因数特性 $\cos\varphi_1=f(P_2)$ .....	150
5.6.5	效率特性 $\eta=f(P_2)$ .....	150
5.7	单相异步电动机 .....	150
5.7.1	单相异步电动机的分类及其结构 .....	151
5.7.2	单相异步电动机的工作原理 .....	152
5.7.3	单相异步电动机的启动方法 .....	153
	练习题、实验与实训 .....	155
<b>第6章</b>	<b>异步电动机的电力拖动</b> .....	<b>157</b>
6.1	机械特性的三种表达式 .....	157
6.1.1	机械特性的物理表达式 .....	157
6.1.2	机械特性的参数表达式 .....	157
6.1.3	机械特性的实用公式 .....	159
6.2	固有机械特性与人为机械特性 .....	161
6.2.1	固有机械特性 .....	161
6.2.2	人为机械特性的分析 .....	162
6.3	三相异步电动机的启动 .....	164
6.3.1	笼型异步电动机的启动 .....	164
6.3.2	三相绕线型异步电动机的启动 .....	168
6.4	三相异步电动机的制动 .....	172
6.4.1	异步电动机的能耗制动 .....	172
6.4.2	异步电动机的反接制动 .....	173
6.4.3	异步电动机的回馈制动 .....	174
6.4.4	异步电动机的各种运行状态 .....	176
6.5	三相异步电动机的调速 .....	180
6.5.1	变极调速 .....	180
6.5.2	变频调速 .....	184
6.5.3	转子电路串接电阻调速 .....	187
6.5.4	串级调速* .....	188
	练习题、实验与实训 .....	189
<b>第7章</b>	<b>同步电动机</b> .....	<b>192</b>
7.1	三相同步电机 .....	192
7.1.1	同步电机的基本结构 .....	192

7.1.2	同步电机的工作原理 .....	192
7.1.3	同步电机的运行特性 .....	196
7.2	无换向器电动机——自控式同步电机 .....	199
7.2.1	分类 .....	199
7.2.2	工作原理 .....	200
7.2.3	无换向器电动机的特点 .....	203
7.3	其他同步电机 .....	204
7.3.1	磁阻同步电机 .....	204
7.3.2	永磁同步电动机 .....	205
<b>第8章</b>	<b>控制电机与特种电机 .....</b>	<b>207</b>
8.1	伺服电动机 .....	207
8.1.1	交流伺服电动机 .....	207
8.1.2	直流伺服电动机 .....	211
8.2	测速发电机 .....	213
8.2.1	直流测速发电机 .....	213
8.2.2	交流测速发电机 .....	214
8.3	步进电动机 .....	218
8.3.1	步进电动机工作原理 .....	218
8.3.2	步进电动机的典型结构 .....	220
8.3.3	步进电动机的运行特性 .....	222
8.4	自整角机 .....	224
8.4.1	力矩式自整角机 .....	224
8.4.2	控制式自整角机 .....	226
8.5	磁滞电动机 .....	228
8.5.1	基本结构 .....	228
8.5.2	工作原理 .....	228
8.5.3	机械特性 .....	229
8.6	直线异步电动机 .....	230
8.6.1	直线异步电动机的基本结构 .....	230
8.6.2	工作原理 .....	231
8.6.3	直线异步电动机的特点 .....	232
8.6.4	直线电动机的应用 .....	232
<b>第9章</b>	<b>电力拖动系统中电动机的选择 .....</b>	<b>234</b>
9.1	电动机应用中的发热问题 .....	234
9.1.1	电机的最高允许温升 .....	234

9.1.2	温度的测量 .....	235
9.1.3	电机发热的原因 .....	236
9.2	电动机工作制 .....	237
9.2.1	连续工作制 .....	237
9.2.2	短时工作制 .....	237
9.2.3	断续周期工作制 .....	238
9.3	电动机的选择 .....	238
9.3.1	电动机选择的一般原则 .....	238
9.3.2	电动机选择的主要步骤 .....	239
9.3.3	电动机种类、结构型式、电压和转速的选择 .....	239
9.4	电动机额定功率的选择 .....	240
9.4.1	连续工作制电动机额定功率的选择 .....	240
9.4.2	短时工作制下电动机功率的选择 .....	241
9.4.3	断续周期工作制下电动机功率的选择 .....	242
<b>参考答案</b> .....		243
<b>参考文献</b> .....		246

# 绪 论

## 0.1 电机在国民经济中的重要作用

电能是能量的一种形式,与其他形式的能量相比,它适宜于大量生产、远距离传输和自动控制,因此,被广泛应用在工农业及人类生活中。电机是电能生产、输送和应用的能量转换装置,在电力工业、工矿企业、农业、交通运输业、国防、科学文化及日常生活等方面都是十分重要的设备。发电厂发出的电能通过电力网可以实现远距离传送,为了减少线路损耗,常用变压器将发电机发出的电压升高,实现高压输送,电力系统示意图如图 0-1 所示。发电机、变压器和电动机是电力系统的主要设备。

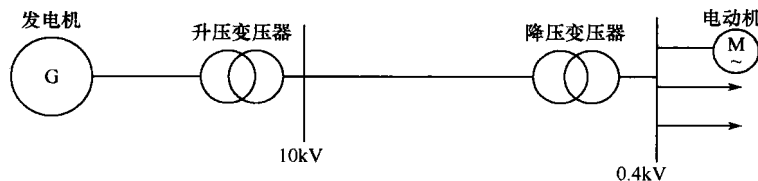


图 0-1 电力系统示意图

在工矿企业中,各种工作母机、压缩机、起重机、水泵和风机;交通运输中的汽车电器和电力机车;农业中的电力排灌和农产品加工;日常生活中的各种电器以及国防、文教和医疗等领域都需要不同特性的电机来驱动和控制。在国民经济中所应用的电机是多种多样的,但其基本工作原理都是基于法拉第电磁感应定律和安培力定律。因此,其构成的一般原理为:采用相应的导磁和导电材料构成能相互进行电磁感应的磁路和电路,以产生感应电势和电磁转矩,从而达到转换能量形态的目的。工业中常用电机的主要类型,按其结构形式及其产生感应电势和电磁转矩的电磁感应方式来看,可进行如下形式的分类。

如果按其功能来分类,可分为:发电机、电动机、变压器和控制电机等。

- (1) 发电机:用于把机械能转换成电能。
- (2) 电动机:用于把电能转换成机械能。
- (3) 变压器、变频器和移相器:分别用于改变电源电压、频率和相位。
- (4) 控制电机:作为控制系统中的控制元件或执行元件。

电机还可以按照电流的种类分为直流电机和交流电机两种。按它的运动方式分为旋转电机(直流电机和交流电机(异步电机和同步电机))和静止变压器。用电动机拖动生产机械工作的称为电力拖动。由电动机和生产机械组成的系统称为电力拖动系统。电力拖动系统组成如图 0-2 所示。电力拖动系统主要由电动机、传动机构、生产机械、控制装置和电源组成,电动机作为动力设备,将电能转变为机械能作功,生产机械是电动机负载,

按工艺要求完成各种工作的装置。依靠传动结构,将电动机和机械装置进行有效的连接,实现能量的传递。控制装置作用是对电动机运行的自动控制以至整个生产过程的自动化。

随着工业生产的发展和科学技术水平的不断提高,更多的用于工业自动化的新设备、新装置及新的控制技术,电机和电力拖动技术将在国民经济建设中起着重要的作用。

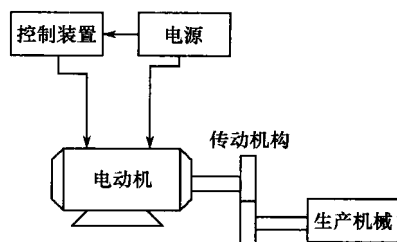


图 0-2 电力拖动系统组成

## 0.2 铁磁材料的基本特性

电机是通过电磁感应原理来实现能量变换的机械,因此,电和磁是构成电机的两大要素,相互关联,缺一不可。电在电机中主要是以路的形式出现,即由电机内的线圈(或绕组)构成电机的电路。磁在电机中是以场的形式存在的,一般工程分析计算时,常把磁场简化为磁路来处理。电机是以磁场为媒介,利用电磁感应作用实现能量转换的。因此,作为构成电机磁路的铁磁材料,其性能的优劣对电机性能的好坏起着关键作用。下面我们来介绍铁磁材料的基本特性,为今后研究电机的磁路和运行特性打下基础。

### 0.2.1 铁磁材料的 $B-H$ 曲线

在电机中,常用的铁磁材料有铁、钴、镍以及它们的合金;而常见的非铁磁材料有空气和变压器油。我们用  $\mu_{Fe}$  来表示铁磁材料的导磁系数;用  $\mu_0$  表示非铁磁材料的磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$  可视为常量。通常  $\mu_{Fe} = (10^3 \sim 10^5)\mu_0$ 。因此,在同样大小的电流下,铁芯线圈的磁通比空心线圈的磁通大得多。

在非铁磁材料中,由于磁导率  $\mu_0$  为一常量,所以,磁感应强度(磁通密度)  $B$  与磁场强度  $H$  表现为线性关系( $B = \mu_0 H$ )。而在铁磁材料中,由于  $\mu_{Fe}$  是一个变量,因此,  $B$  与  $H$  的关系表现为非线性关系。通常,我们把描述铁磁材料  $B-H$  关系的曲线称为铁磁物质的磁化曲线,如图 0-3 所示。在磁化初期随着  $H$  的增加,  $B$  缓慢增加,如图中  $Oa$  段所示,这时候材料的磁导率较小,之后,随着  $H$  的增加,  $B$  迅速增加,如图中  $ab$  段所示,  $B-H$  关系近似为直线,称为线性区;之后,随着  $H$  的增加,  $B$  的增加又会慢下来,如图中  $bc$  段所示;过  $c$  点之后,随着  $H$  的增加,  $B$  基本不变,通常,我们把过  $b$  点之后  $H$  的增加,  $B$  的增加变缓直至基本不变的现象称为磁饱和,  $c$  点称饱和点,该区称为饱和区。由于不同的磁性材料有不同的磁导率,同一材料当其磁通密度不同时,亦有不同的磁导率。为了充分利用铁磁材料,在电机设计时,通常把铁芯中磁通密度选在曲线拐弯  $b$  点附近。

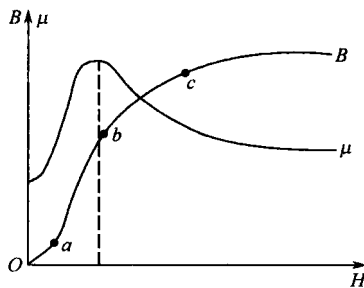


图 0-3 铁磁物质的磁化曲线

### 0.2.2 磁滞现象与磁滞回线

如果将铁磁材料进行周期性磁化,外磁场增加的上升磁化曲线与相应外磁场减少的

下降磁化曲线不会重合,如图 0-4 所示,这种现象称为磁滞现象。如果磁场强度  $H$  缓慢地循环变化,当到达某个最大值  $H_m$  时, $B$  不是沿着磁化曲线  $a$  上升,当  $H_m$  下降时, $B$  不是沿着磁化曲线  $a$  下降,图中  $H-B$  曲线便是一封闭曲线,称为磁滞回线。返回点  $H$  不同,回线的宽度和高度亦不相同,当  $H$  和  $B$  充分饱和后,回线不再增大,此最大的回线称为极限磁滞回线。从磁滞回线可以看出,上升磁化曲线与下降磁化曲线并不重合,下降时, $B$  的变化总是滞后于  $H$  的变化,当  $H$  下降到零时, $B$  不是下降到零,而是下降到某一个数值  $B_r$ ,这种现象称为磁滞, $B_r$  称为剩余磁感应强度。要使磁通密度减小至零,必须加上反向磁场,其数值为回线与横坐标的交点  $H_c$  称为矫顽磁力。 $B_r$  与  $H_c$  是磁性材料的重要参数。不同的铁磁材料有不同的磁滞回线。同一铁磁材料, $H_m$  越大,则磁滞回线的面积越大。常用铁磁材料基本磁化曲线如图 0-5 所示,图中给出了硅钢、铸铁和铸钢材料的磁化曲线。

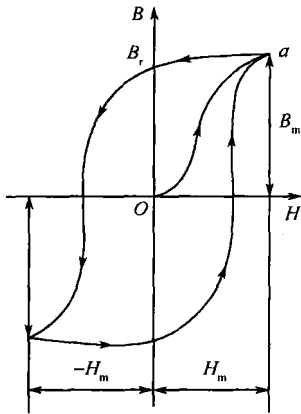


图 0-4 铁磁材料的磁滞回线

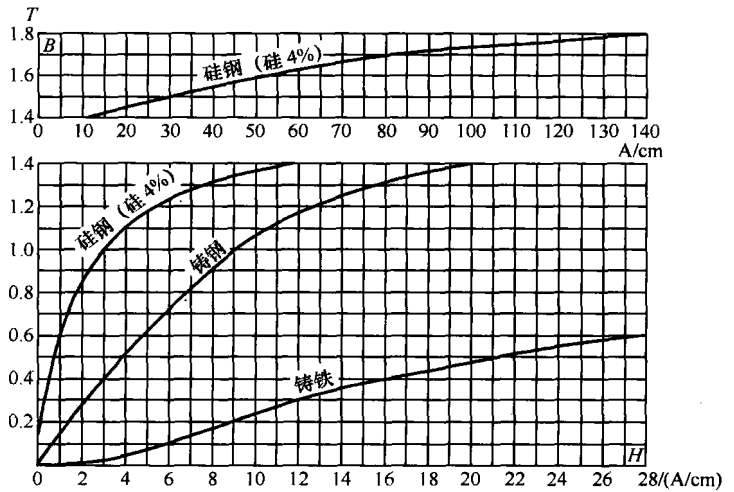


图 0-5 常用铁磁材料基本磁化曲线

### 0.2.3 铁芯损耗

交流铁芯线圈电路通入交流电时,会产生交变的磁场,于是在铁芯中产生损耗,称为铁芯损耗。铁芯损耗主要包括磁滞损耗和涡流损耗。

#### 0.2.3.1 磁滞损耗

在铁磁材料处于交变磁场作用下反复磁化的过程中,磁畴之间不停地相互摩擦,从而产生能量消耗,这种能量消耗称为磁滞损耗。磁滞回线面积越大,损耗越大。实验表明,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  $\alpha$  次方也成正比,即

$$p_h \propto f B_m^\alpha \quad (0-1)$$

对常用的硅钢片,当  $B = 1.0T \sim 1.5T$  时, $\alpha \approx 2$ 。由于硅钢片的磁滞回线面积较小所以电机的铁芯大都采用硅钢片。

### 0.2.3.2 涡流损耗

依据电磁感应定律,当铁芯内的磁通发生交变时,铁芯内将产生感应电势和感应电流。这些电流将在铁芯内部围绕磁通呈漩涡状流动,我们称之为涡流,如图0-6所示。涡流在铁芯中引起的损耗称为涡流损耗。设 $I_w$ 和 $E_w$ 分别为涡流和产生涡流的电势, $r_w$ 为涡流回路的等效电阻,则涡流损耗为

$$p_w = I_w^2 r_w = \left( \frac{E_w}{r_w} \right)^2 r_w = \frac{E_w^2}{r_w} \quad (0-2)$$

由于感应电势 $E$ 与磁通交变频率 $f$ 和磁通幅值成正比,而后者又与磁通密度的幅值 $B_m$ 成正比,于是,涡流损耗与 $f^2 B_m^2$ 成正比,即 $p_w \propto \frac{f^2 B_m^2}{r_w}$ 。进一步分析表明,对于电工钢片,涡流损耗还与其厚度 $d$ 的平方成正比,故得

$$p_w \propto \frac{f^2 B_m^2 d^2}{r_w} \quad (0-3)$$

由式(0-3)可见,为了减小涡流损耗,首先是减小钢片的厚度。所以,电工钢片通常做成0.5mm和0.35mm。在分析电机和变压器铁芯材料时,通常把磁滞损耗和涡流损耗合并在一起,统称为铁芯损耗。

单位质量的铁芯损耗通常为

$$p_{Fe} = K_{Fe} f^\beta B_m^2 \quad (\text{W/kg}) \quad (0-4)$$

式中: $K_{Fe}$ 为铁芯损耗系数,表示当 $B_m = 1\text{T}$ ; $f = 50\text{Hz}$ 时,每千克硅钢片的损耗; $\beta$ 为频率系数, $\beta = 1.2 \sim 1.6$ 。

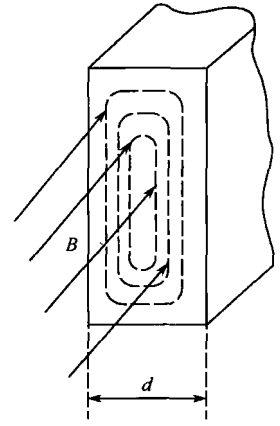


图0-6 硅钢片中的涡流

## 0.3 电机理论中的基本电磁定律

### 0.3.1 电磁感应定律

设有一个单匝线圈放置在磁场中,当线圈本身转动或交变的电流在线圈中建立变化的磁场,即只要引起该线圈相交链的磁通 $\Phi$ 随时间发生变化,则在该线圈中必然有感应电势 $e$ 产生,我们称这种现象为电磁感应。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,则感应电势为

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-5)$$

式(0-5)是法拉第电磁感应定律的数学描述。

当线圈中磁通量发生变化时,每匝中都将产生感应电势。由于匝与匝之间是相互串联的,整个线圈的总电势就应等于各匝线圈所产生的电势之和。令 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N$ ,分别是通过各匝线圈的磁通量,则

$$e = -\frac{d\Phi_1}{dt} - \frac{d\Phi_2}{dt} - \dots - \frac{d\Phi_N}{dt}$$

$$= -\frac{d}{dt}(\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_N) = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (0-6)$$

式中： $\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_N$  称为全磁通或匝链数，简称为磁链。

如果穿过每匝线圈的磁通量相同，均为  $\Phi$ ，则  $\Psi = N\Phi$ ，有

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-7)$$

上述电磁感应定律的物理含义可解释为：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(0-7)右边的负号表明，如果在感应电势的作用下有电流在线圈中流过，则该电流产生的磁通起着阻碍磁通变化的作用。当磁通增加时，它企图减少磁通；而当磁通减少时，则企图增加磁通。这个规律通常被称为楞次定律。

在式(0-7)中，当磁通的单位为 Wb，时间的单位为 s 时，则电势的单位为 V。

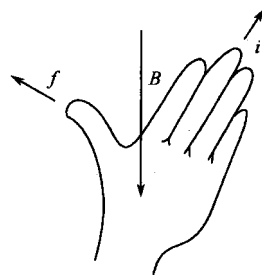


图 0-7 左手定则

### 0.3.2 电磁力定律

当一载流导体处在磁场中，该导体将受到一个力作用。由于该力是磁场和电流相互作用产生的，所以称其为电磁力。若磁场与导体相互垂直，则作用在导体上的电磁力为

$$f = Bli \quad (0-8)$$

式中： $B$  为载流导体处磁通密度(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)。

电磁力的方向可由左手定则确定：把左手掌平直伸开，大拇指与其余四指垂直，磁力线由掌心穿过，四指指向电流方向，则大拇指所指方向就是电磁力的方向，如图 0-7 所示。在旋转电机中，作用在转子载流导体上的电磁力将使转子受到一个力矩(力乘以转子半径)的作用，该力矩称为电磁转矩，电磁转矩在电机的能量转换过程中起着重要作用。

### 0.3.3 全电流定律

全电流定律又称安培环路定律，是用来描述电流与所产生磁场之间关系的定律。设空间有  $n$  根载流导体，导体中的电流分别为  $I_1, I_2, \dots, I_n$ ，则沿任一闭合路径  $l$  的磁场强度  $H$  的线积分等于该闭合回路所包围的导体电流的代数和，即

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (0-9)$$

该定律称为全电流定律。 $\sum I$  是回路所包围的

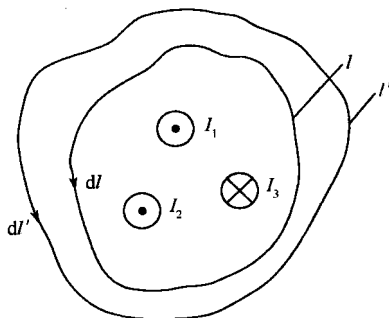


图 0-8 全电流定律



全部电流。在式(0-9)中,若导体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。如图0-8所示,另一条闭合路径为 $l'$ ,它所包围的电流不变,根据全电流定律有

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

有时磁力线所通过的闭合路径,并非均是铁磁材料,如电机和变压器中是多段磁路,对于这种情况,全电流定律可改写成

$$\sum_1^n H_k l_k = \Sigma I = NI = F \quad (0-10)$$

式中: $H_k$ 为第 $k$ 段磁路的磁场强度(A/m); $l_k$ 为第 $k$ 段磁路的平均长度(m); $F = NI$ 为磁势(A)。

式(0-10)中每一段的 $HI$ 值称为该段磁路上的磁压降,而 $NI$ 是作用在整个磁路上的磁势,在电机中就是励磁绕组的安匝数。所以,式(0-10)表明,作用在磁路上的总磁势等于各段磁路的磁压降之和。

### 0.3.4 磁路的欧姆定律

在电机和变压器里,为了得到强的磁场,线圈是绕在铁芯上,其中铁芯由铁磁材料构成,导磁性能比空气好得多,磁通几乎全部汇集在铁芯中流通,而在空气中只存在少量分散的磁通。所以在一般工程计算中,电机中的磁场常简化为磁路来处理。

若将磁路分为 $k$ 段,由于 $B = \mu H$ ,  $\Phi = SB$ ,根据公式(0-10)整理得

$$F = \Sigma H_k l_k = \Sigma \frac{B_k}{\mu_k} l_k = \Sigma \frac{1}{\mu_k} \frac{\Phi}{S_k} l_k = \Phi \Sigma \frac{1}{\mu_k S_k} l_k = \Phi \Sigma R_{mk} \quad (0-11)$$

式中: $S_k$ 为第 $k$ 段磁路的截面积( $m^2$ ); $R_{km} = \frac{l_k}{\mu_k S_k}$ 为第 $k$ 段磁路的磁阻( $H^{-1}$ ),它与磁路的长度成正比,与磁导率成反比。

如果磁路的材料相同,截面积相等,长度为 $l$ ,则

$$F = HI = \frac{\Phi}{S\mu} l = \Phi R_m \quad \text{或} \quad \Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{NI}{R_m} \quad (0-12)$$

式中: $R_m = \frac{l}{S\mu}$ 称为磁阻。

由式(0-12)可见,磁路的磁通等于作用在磁路上的总磁势 $F$ 除以磁路的总磁阻 $R_m$ ,称为磁路欧姆定律,其中, $\Phi$ 相当于电路中的电流, $F$ 相当于电势, $R_m$ 等同于电阻,磁路的磁阻 $R_m$ 主要决定于磁路的几何尺寸和所用材料的磁导率。

如图0-9所示无分支磁路,根据磁路欧姆定律,得

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2}} = \frac{NI}{R_{m1} + R_{m2}}$$

式中: $R_{m1}$ 为磁路材料的磁阻; $R_{m2}$ 为气隙磁阻。

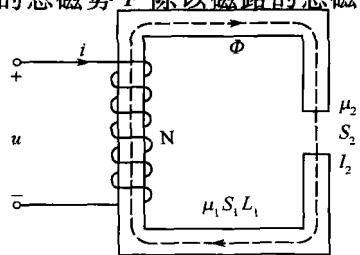


图0-9 无分支磁路