



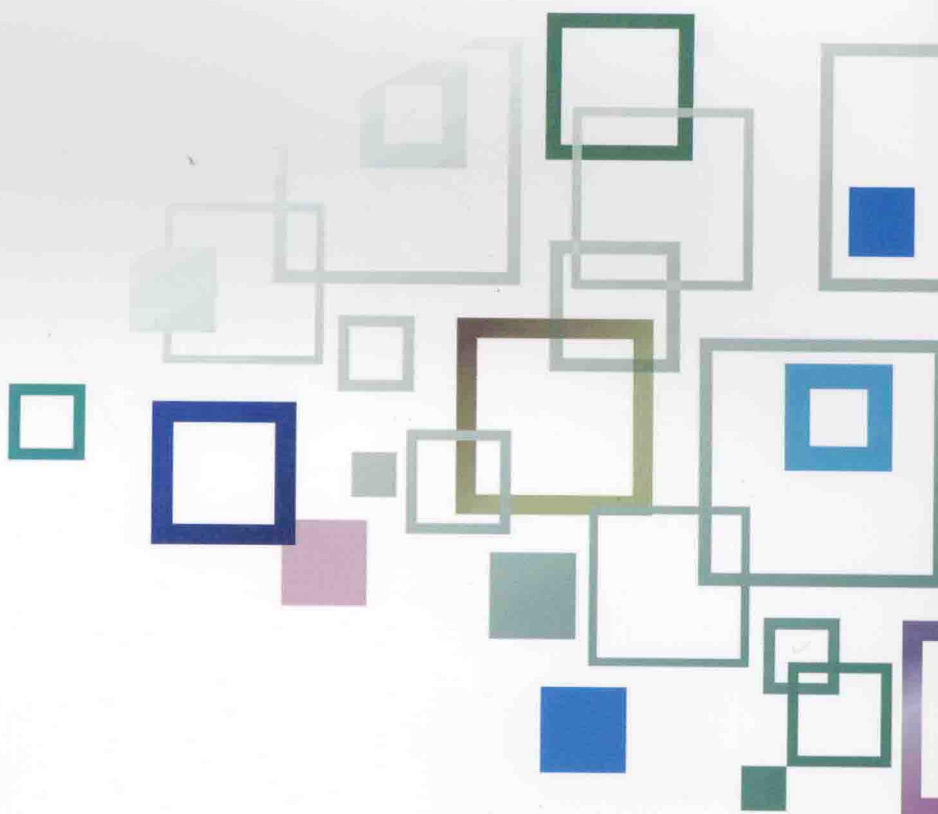
普通高校“十二五”规划教材

电机与拖动基础

主 编 白皓然

副主编 姚广芹 姜秋鹏

DIANJI YU TUODONG JICHU



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



配有课件



普通高校“十二五”规划教材

电机与拖动基础

主 编 白皓然

副主编 姚广芹 姜秋鹏

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书主要讲述电机与电力拖动课程的基本理论和基本知识。全书共分9章,内容包括磁路、直流电机、直流电机的电力拖动、变压器、异步电机、三相异步电动机的电力拖动、三相同步电机、驱动与控制用微特电机和电力拖动系统中的电动机选择;简要介绍了“电机与拖动”课程中常用的基本知识和基本定律,着重讲述了各类电机和变压器的基本结构、基本工作原理、等效电路及功率转矩等,并讨论了电力拖动系统的启动、调速及制动时的运行性能等。

本书可作为普通高等院校自动化、电气工程及机电一体化专业的教材,也可作为其他相关专业的电机学课程和电力拖动基础课程的教材,还可供有关技术人员参考。

本书配有教学课件供任课教师参考,请发邮件到 goodtextbook@126.com 或致电 010-82317037 申请索取。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础 / 白皓然主编. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.8
ISBN 978-7-5124-1448-8

I. ①电… II. ①白… III. ①电机—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(2014)第 137036 号

版权所有,侵权必究。

电机与拖动基础

主 编 白皓然

副主编 姚广芹 姜秋鹏

责任编辑 董云凤 张金伟

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316524

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:14.75 字数:378 千字

2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-1448-8 定价:29.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:010-82317024

前 言

本书的编写是遵照国家高等教育的培养目标,并按照应用型人才培养特色名校建设工程纲要,以电气自动化、机电一体化技术专业的能力需求为依据,突出技术应用性和针对性,努力培养素质高、应用能力与实践能力强、富有创新精神的应用型复合人才。

基于以上背景,编写了本教材。本书共9章,包括磁路、直流电机、直流电机的电力拖动、变压器、异步电机、三相异步电动机的电力拖动、三相同步电机、控制电机、电动机容量的选择等内容。书中简要介绍了“电机与拖动”课程中常用的基本知识和基本定律;着重讲述了各类电机和变压器的基本结构、基本工作原理、等效电路及功率转矩等;并讨论了电力拖动系统的启动、调速及制动时的运行性能与相关问题,并对电动机的容量选择进行了一般介绍。

本书可作为普通高等院校自动化、电气工程及自动化、机电一体化等相关专业的本科教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

本书第1、5、6章由白皓然编写;第3、4、8章由姚广芹编写;第9章由姜秋鹏编写;第2章由张清鹏编写;第7章由谷雷编写。本书编写过程中,刘立山、赵丽清、刘慧敏老师提出了宝贵的意见,全书由刘立山教授主审。本教材由于编写仓促,难免有缺点甚至错误,敬请广大教师和学生不吝赐教和批评指正,以便及时修正和完善。本教材的编审和出版得到了北京航空航天大学出版社以及各主审、主编和参编学校的大力支持和配合,在此一并表示衷心感谢。

作 者

2014年4月于青岛

目 录

第 1 章 磁 路	1
1.1 磁路的基本定律	1
1.1.1 磁场的几个常用物理量	1
1.1.2 磁路的概念	1
1.1.3 磁路的基本定律	2
1.2 常用的铁磁材料及其特性	5
1.2.1 铁磁物质的磁化	5
1.2.2 磁化曲线和磁滞回线	5
1.2.3 铁芯损耗	8
1.3 直流磁路的计算	9
1.4 交流磁路的特点	11
习 题	11
第 2 章 直流电机	13
2.1 直流电机的工作原理	13
2.1.1 直流电动机的工作原理	13
2.1.2 直流发电机的工作原理	14
2.2 直流电机的主要结构及用途	15
2.2.1 直流电机的基本结构	15
2.2.2 直流电机的额定数据	17
2.2.3 直流电机的用途与分类	18
2.3 直流电机的电枢绕组	19
2.3.1 直流电枢绕组的基本概念	20
2.3.2 单叠绕组	21
2.3.3 单波绕组	23
2.4 直流电机的励磁方式与磁场	25
2.4.1 直流电机的励磁方式	25
2.4.2 直流电机空载时的磁场	26
2.4.3 直流电机负载时的磁场	27
2.4.4 直流电机的电枢反应	29
2.5 直流电机的感应电动势、电磁转矩与电磁功率	30
2.5.1 直流电机的感应电动势	30
2.5.2 直流电机的电磁转矩	31
2.5.3 直流电机的电磁功率	31
2.6 直流电机的基本方程式和功率流程图	32
2.6.1 直流电机的功率流程图	32

2.6.2 直流电机的基本方程式	33
2.7 直流电动机的工作特性	34
2.7.1 他励直流电动机的工作特性	35
2.7.2 串励和复励直流电动机的工作特性	36
2.8 直流发电机的运行原理	37
2.8.1 直流发电机的基本方程式	37
2.8.2 直流发电机的运行特性	38
2.9 直流电机的换向	40
2.9.1 换向过程的物理现象	40
2.9.2 改善换向的方法	43
2.9.3 环火及其防止	43
习 题	44
第 3 章 直流电机的电力拖动	47
3.1 电力拖动系统的动力学方程式	47
3.1.1 单轴电力拖动系统的动力学方程式	47
3.1.2 多轴电力拖动系统的等效	48
3.2 各类生产机械的负载转矩特性	50
3.2.1 恒转矩负载特性	50
3.2.2 恒功率负载特性	51
3.2.3 通风机、泵类负载特性	51
3.3 电力拖动系统的稳定运行条件	51
3.3.1 稳态运行点与稳定运行的概念	51
3.3.2 电力拖动系统的稳定运行条件	52
3.4 他励直流电动机的机械特性	53
3.4.1 他励直流电动机的固有机机械特性	53
3.4.2 他励直流电动机的人为机械特性	53
3.5 他励直流电动机的启动和反转	54
3.5.1 电枢回路串电阻启动	55
3.5.2 降低电枢电压启动	57
3.5.3 他励直流电动机的反转	57
3.6 他励直流电动机的调速	58
3.6.1 他励直流电动机常用的调速方法	58
3.6.2 评价调速方法的主要指标	60
3.7 他励直流电动机的制动	62
3.7.1 能耗制动	62
3.7.2 反接制动	64
3.7.3 回馈制动	65
3.8 直流电机的四象限运行	66
习 题	67
第 4 章 变压器	69
4.1 变压器的结构、分类与额定值	69

4.1.1	变压器的结构	69
4.1.2	变压器的分类	70
4.1.3	变压器的额定值	71
4.2	变压器的空载运行	72
4.2.1	变压器各电磁量的参考方向	72
4.2.2	变压器空载运行时的电磁关系	72
4.2.3	变压器的空载电流	73
4.2.4	感应电动势和电压平衡方程式、相量图	73
4.2.5	变压器的等效电路图	75
4.3	变压器的负载运行	75
4.3.1	变压器负载运行时的电磁关系	75
4.3.2	变压器负载运行的磁动势平衡方程式	76
4.3.3	变压器负载运行时的电压方程	76
4.4	变压器的等效电路与相量图	77
4.4.1	变压器绕组的折算	77
4.4.2	变压器负载运行时的等效电路	78
4.4.3	变压器负载运行时的相量图	79
4.4.4	标么值	79
4.5	变压器的参数测定	80
4.5.1	空载试验	80
4.5.2	短路试验	81
4.6	变压器稳态运行特性的计算	82
4.6.1	变压器的外特性与电压变化率	82
4.6.2	变压器的功率关系与效率特性	83
4.7	三相变压器的联结组	84
4.7.1	三相变压器的类型及磁路系统	84
4.7.2	三相变压器的联结方式与联结组	86
4.8	变压器的并联运行	87
4.8.1	变压器的理想并联运行条件	88
4.8.2	变比对变压器并联运行的影响	88
4.8.3	短路阻抗对并联运行的影响	89
4.9	特殊变压器	89
4.9.1	自耦变压器	89
4.9.2	互感器	90
	习 题	91
第 5 章	异步电机	93
5.1	三相异步电动机的基本理论	93
5.1.1	三相异步电动机的工作原理	93
5.1.2	三相异步电动机的 3 种运行状态	96
5.2	三相异步电机的结构及额定值	96
5.2.1	三相异步电机的结构	96
5.2.2	三相异步电机的额定值	98

5.3 三相交流电机的电枢绕组	99
5.3.1 交流绕组的构成原则和分类	99
5.3.2 三相单层绕组	101
5.3.3 三相双层绕组	102
5.4 三相交流绕组感应电动势	105
5.4.1 导体感应电动势	105
5.4.2 线圈的电动势	106
5.4.3 分布绕组电动势	107
5.4.4 一相绕组的感应电动势	108
5.4.5 相绕组的高次谐波感应电动势	108
5.5 三相交流绕组的磁动势	110
5.5.1 单相绕组的磁动势——脉振磁动势	111
5.5.2 三相绕组所产生的基波合成磁势	117
5.5.3 三相合成磁势中的高次谐波磁势	119
5.5.4 三相定子绕组建立的磁场	120
5.5.5 交流电机的时一空矢量图	121
5.6 三相异步电动机转子静止时的运行分析	122
5.6.1 三相异步电动机转子堵转时的基波磁动势	123
5.6.2 三相异步电动机转子堵转时的基本方程式	125
5.7 三相异步电动机转子转动时的运行分析	126
5.7.1 三相异步电动机转子转动时的物理情况	127
5.7.2 转子绕组频率折算	128
5.7.3 转子侧各物理量的折算	129
5.7.4 三相异步电机的等效电路和相量图	130
5.7.5 笼型转子的绕组数据	132
5.8 三相异步电动机的功率流程图与转矩平衡方程式	132
5.8.1 功率平衡方程式	132
5.8.2 转矩平衡方程式	134
5.8.3 三相异步电动机的电磁转矩表达式	134
5.9 三相异步电动机的工作特性和参数测定	137
5.9.1 工作特性	137
5.9.2 空载试验	138
5.9.3 堵转(或短路)试验	139
5.10 应用实例	140
5.10.1 电动机绕组展开图的画法	140
习 题	141

第6章 三相异步电动机的电力拖动

6.1 三相异步电动机的机械特性	144
6.1.1 机械特性的3种表达式	144
6.1.2 三相异步电动机的固有机机械特性	146
6.1.3 三相异步电动机的人为机械特性	147
6.2 三相异步电动机的启动	149

6.2.1 三相异步电动机的固有启动特性	149
6.2.2 三相笼型异步电动机的启动方法	149
6.2.3 三相绕线式异步电动机的启动方法	153
6.3 三相异步电动机的调速	155
6.3.1 变极调速	156
6.3.2 变频调速	158
6.3.3 改变转差率的调速	160
6.3.4 转子串电阻调速	162
6.3.5 串级调速	162
6.3.6 异步电动机调速中的矢量控制和直接转矩控制	164
6.4 三相异步电动机的制动	167
6.4.1 回馈制动	167
6.4.2 反接制动	169
6.4.3 能耗制动	170
6.4.4 软停车与软启动	172
6.5 三相异步电动机的 4 象限运行状态分析	172
习 题	172
第 7 章 三相同步电机	176
7.1 三相同步电机的基本运行原理、结构与额定值	176
7.1.1 同步电机的基本运行原理	176
7.1.2 同步电机的基本结构	176
7.1.3 同步电机的额定值	177
7.2 三相同步发电机的电枢反应	178
7.2.1 三相同步电机空载运行	178
7.2.2 三相同步电机负载后的电枢反应	178
7.3 三相同步发电机的稳态分析	181
7.3.1 隐极式同步电机的基本方程式、等值电路和相量图	181
7.3.2 凸极同步电机的基本方程式、等值电路和相量图	183
7.4 三相同步发电机的功率和转矩	185
7.4.1 功率平衡方程	185
7.4.2 电磁功率与功角特性	185
7.5 同步发电机有功功率调节和静态稳定、无功功率调节和 V 形曲线	186
7.5.1 有功功率调节和静态稳定	186
7.5.2 无功功率调节和 V 形曲线	187
7.6 三相同步电动机分析	189
7.6.1 同步电动机的功率和转矩	189
7.6.2 同步电动机的运行特性	189
7.6.3 同步电动机的启动	190
7.6.4 永磁同步电动机调速系统	190
习 题	191
第 8 章 驱动与控制用微特电机	193
8.1 单相异步电动机	193

8.1.1	单相异步电机的工作原理	193
8.1.2	单相异步电机的启动	194
8.1.3	单相异步电动机的类型	195
8.2	伺服电动机	196
8.2.1	直流伺服电动机	196
8.2.2	交流伺服电动机	197
8.3	测速发电机	199
8.3.1	直流测速发电机	199
8.3.2	交流测速发电机	200
8.4	步进电动机	201
8.4.1	永磁式步进电动机	201
8.4.2	反应式步进电动机	203
8.5	永磁无刷直流电动机	203
8.5.1	基本结构和工作原理	203
8.5.2	永磁无刷直流电动机的运行特性	207
8.6	其他驱动和控制电机	208
8.6.1	开关磁阻电动机	208
8.6.2	自整角电动机	209
8.6.3	旋转变压器	212
习 题		214
第 9 章	电力拖动系统中的电动机选择	215
9.1	电动机选择的基本原则	215
9.1.1	类型的选择	215
9.1.2	额定功率和电压等级的选择	216
9.1.3	额定转速的选择	216
9.1.4	结构形式的选择	217
9.2	电机的发热与冷却	217
9.2.1	电机的发热过程与温升	217
9.2.2	电机的冷却过程	218
9.3	电动机的工作制	219
9.3.1	连续工作制	219
9.3.2	短时工作制	219
9.3.3	断续周期性工作制	220
9.4	电动机额定功率的选择	220
9.4.1	电动机的允许输出功率	220
9.4.2	连续运行电动机额定功率的选择	221
9.4.3	短时运行电动机额定功率的选择	222
9.4.4	断续周期运行电动机额定功率的选择	223
参考文献		224

第1章 磁 路

1.1 磁路的基本定律

磁场作为电机实现机电能量转换的耦合介质,其强度和分布状况不仅关系到电机的参数和性能,还决定电机的体积和质量。由于电机的结构、形状比较复杂,且铁磁材料和气隙并存,很难用麦克斯韦方程直接求解。因此,在实际工程中,将电机各部分磁场等效为各段磁路,并认为各段磁路中磁通沿其截面积均匀分布,各段磁路中磁场强度保持为恒值,其意义是各段磁路的磁压降等于磁场内对应点之间的磁位差。从工程观点来说,将复杂的磁场问题简化为磁路计算,其准确度是足够的。

1.1.1 磁场的几个常用物理量

1. 磁感应强度 B

磁场是电流通入导体后产生的,表征磁场强度及方向的物理量是磁感应强度 B ,它是一个矢量。磁场中各个点的磁感应强度可以用闭合的磁感应矢量线来表示,它与产生它的电流方向可以用右手螺旋定则来确定。

在国际单位制中, B 的单位为 T(特[斯拉]), $1\text{ T}=1\text{ Wb/m}^2$ 。

2. 磁通 Φ

在均匀磁场中,磁感应强度 B 与垂直于磁场方向面积 A 的乘积,为通过该面积的通量,称为磁通量,简称磁通 Φ (一般情况下,磁通量定义为 $\Phi = \int B \cdot dA$)。由于 $B = \Phi/A$, B 也称为磁通量密度,可简称磁通密度。若用磁感应矢量线来描述磁场,则通过单位面积磁感应矢量线的疏密反映了磁感应强度(磁通密度)的大小以及磁通量的多少。

在国际单位制中, Φ 的单位为 Wb(韦[伯])。

3. 磁场强度 H

磁场强度 H 是计算磁场时所引用的一个物理量,它是一个矢量。用来表示物质磁导能力大小的量称为磁导率 μ ,它与磁场强度 H 的乘积等于磁感应强度,即

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

真空的磁导率为 μ_0 ,在国际单位制中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{ H/m}$,铁磁材料的磁导率 $\mu_{\text{Fe}} \gg \mu_0$ 。

在国际单位制中, H 的单位为 A/m。

1.1.2 磁路的概念

如同把电流流过的路径称为电路一样,磁路所通过的路径称为磁路。不同的是磁通的路径可以是铁磁物质,也可以是非磁体,如图 1-1 所示为常见的磁路。

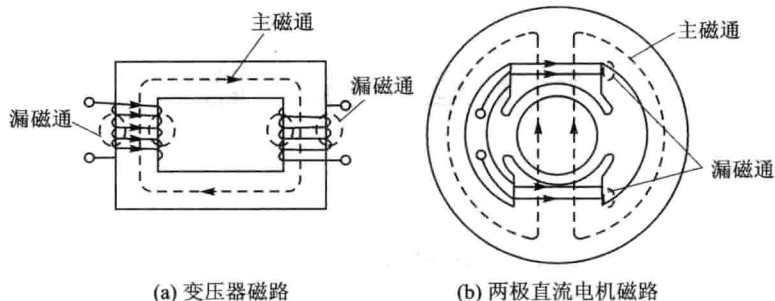


图 1-1 两种常见的磁路

在电机和变压器里,常把线圈套装在铁芯上,当线圈内通有电流时,在线圈周围的空间(包括铁芯内、外)就会形成磁场。由于铁芯的导磁性能比空气要好得多,所以绝大部分磁通将在铁芯内通过,这部分磁通称为主磁通,用来进行能量转换或传递。围绕载流线圈,在部分铁芯和铁芯周围的空间,还存在少量分散的磁通,这部分磁通称为漏磁通,漏磁通不参与能量转换和传递。主磁通和漏磁通所通过的路径分别构成主磁路和漏磁路,图 1-1 中示出了这两种磁路。

用以激励磁路中磁通的载流线圈称为励磁线圈,励磁线圈中的电流称为励磁电流。若励磁电流为直流,磁路中的磁通是恒定的,不随时间变化而变化,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,磁路中的磁通随时间变化而变化,这种磁路称为交流磁路,交流铁芯线圈、变压器、感应电机的磁路都属于这一类。

1.1.3 磁路的基本定律

进行磁路分析和计算时,常用到以下几条定律。

1. 安培环路定律

沿着任何一条闭合回线 L , 磁场强度 $\mathbf{H}$ 的线积分值, $\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L}$ 等于该闭合回线所包围的总电流值 $\sum i$ (代数和), 这就是安培环路定律, 如图 1-2 所示, 用公式表示为

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \sum i \quad (1-2)$$

式中, 若电流的正方向与闭合回线 L 的环行回线符合右手螺旋关系, 则 i 取正号, 否则取负号。

若沿着回线 L , 磁场强度的大小 H 处处相等(均匀磁场), 且闭合回线所包围的总电流是通有电流 i 的 N 匝线圈所提供, 则式(1-2)可简写成

$$HL = Ni \quad (1-3)$$

2. 磁路的欧姆定律

图 1-3(a)所示是一个等截面无分支的铁芯磁路, 铁芯上有励磁线圈 N 匝, 线圈中通有电流 i ; 铁芯面积为 A , 磁路的平均长度为 l , μ 为材料的磁导率。若不计漏磁通, 则认为各截面上磁通密度均匀, 且垂直于各截面, 磁通量将等于磁通密度乘以面积, 即

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = BA \quad (1-4)$$

而磁场强度等于磁通密度除以磁导率,即 $H=B/\mu$,于是(1-3)可改写成如下形式:

$$Ni = lB/\mu = \Phi l/(\mu A) \quad (1-5)$$

或

$$F = \Phi R_m = \Phi/\Lambda \quad (1-6)$$

式中, F 为作用在铁芯磁路上的安匝数,称为磁路的磁动势, $F=Ni$, 单位为 A; R_m 为磁路的磁阻, $R_m=l/(\mu A)$, 它取决于磁路的尺寸和所用材料的磁导率, 单位为 H^{-1} , $1 H^{-1}=1 A/Wb$; Λ 为磁路的磁导, $\Lambda=1/R_m$, 它是磁阻的倒数, 单位为 H, $1 H=1 Wb/A$ 。

式(1-6)表明,作用在磁路上的磁动势 F 等于磁路内的磁通量 Φ 乘以磁阻 R_m , 此关系与电路中的欧姆定律在形式上十分相似,因此式(1-6)称为磁路的欧姆定律。这里,我们把磁路中的磁动势 F 类比于电路中的电动势 E , 磁通量 Φ 类比于电流 I , 磁阻和磁导分别类比于电阻 R_m 和电导 G 。图 1-3(b)所示为相应的模拟电路图。

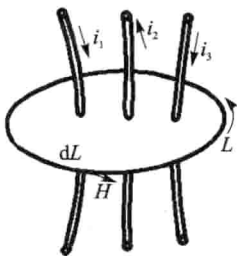
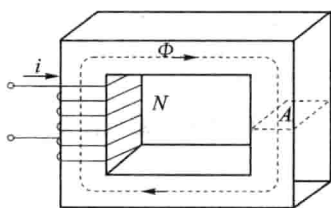
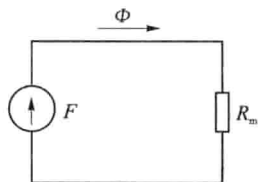


图 1-2 安培环路定律



(a) 磁路



(b) 模拟电路

图 1-3 无分支铁芯磁路

磁阻 R_m 与磁路的平均长度 l 成正比,与磁路的截面积 A 及构成磁路材料的磁导率 μ 成反比。需要注意的是,导电材料的电导率 γ 是常数,则电阻 R 为常数;而铁磁材料的磁导率 μ 和磁阻 R_m 均不为常数,是随磁路中磁感应强度 B 的饱和程度大小而变化的。这种情况称为非线性,因此用磁阻 R_m 定量对磁路计算时就很不方便,但一般用它定性说明磁路问题还是可以的。

【例 1-1】 有一闭合铁芯磁路,铁芯的截面积 $A=12.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$,铁芯的平均长度 $l=0.4 \text{ m}$,铁芯的磁导率 $\mu_{Fe}=5000 \mu_0$,套在铁芯上的励磁绕组的匝数为 600 匝,试求产生磁通 $\Phi=10.9 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 时所需的励磁磁动势和励磁电流。

解 用安培环路定律求解:

$$\text{磁密} \quad B = \frac{\Phi}{A} = \frac{10.9 \times 10^{-4}}{12.25 \times 10^{-4}} \text{ T} = 0.89 \text{ T}$$

$$\text{磁场强度} \quad H = B/\mu_{Fe} = \frac{0.89}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 141.51 \text{ A/m}$$

$$\text{磁动势} \quad F = Hl = 141.51 \times 0.4 \text{ A} = 56.6 \text{ A}$$

$$\text{励磁电流} \quad i = F/N = \frac{56.6}{600} \text{ A} = 9.43 \times 10^{-2} \text{ A}$$

3. 磁路的基尔霍夫定律

(1) 磁路的基尔霍夫第一定律

如果铁芯不是一个简单回路,而是带有并联分支的磁路,如图 1-4 所示。当在中间铁芯

柱上加有磁动势 F 时,磁路的路径将如图中虚线所示。若令进入闭合面 A 的磁通为负,穿出闭合面的磁通为正,从图 1-4 可见,对闭合面 A 显然有

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

或

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-7)$$

式(1-7)表明,穿出或进入任何一闭合面的总磁通恒等于零,这就是磁通连续性定律。比拟于电路中的基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$,该定律亦称为磁路的基尔霍夫第一定律。

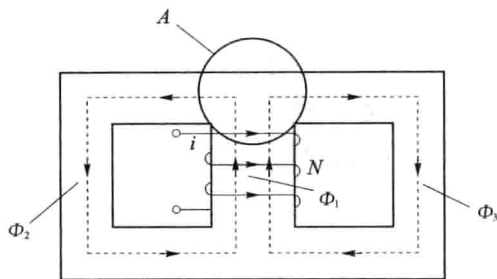


图 1-4 磁路的基尔霍夫第一定律

(2) 磁路的基尔霍夫第二定律

电机和变压器的磁路总是由数段不同截面、不同铁磁材料的铁芯组成,还可能含有气隙。磁路计算时,总是把整个磁路分为若干段,每段由同一材料构成、截面积相同且段内磁通密度处处相等,从而磁场强度亦处处相等。例如,如图 1-5 所示磁路由 3 段组成,其中两段为截面不同的铁磁材料,第 3 段为气隙。若铁芯上的励磁磁动势为 Ni ,根据安培环路定律(磁路欧姆定律)可得

$$Ni = \sum_{k=1}^3 H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_\delta \delta = \Phi_1 R_{m1} + \Phi_2 R_{m2} + \Phi_\delta R_{m\delta} \quad (1-8)$$

式中, l_1 、 l_2 分别为 1、2 两段铁芯的平均长度,其截面积各为 A_1 和 A_2 ; δ 为气隙长度; H_1 、 H_2 分别为 1、2 两段磁路内的磁场强度; H_δ 为气隙内的磁场强度; Φ_1 、 Φ_2 分别为 1、2 两段铁芯内的磁通; Φ_δ 为气隙内磁通; R_{m1} 、 R_{m2} 分别为 1、2 两段铁芯磁路的磁阻; $R_{m\delta}$ 为气隙磁阻。

由于 H_k 亦是磁路单位长度上的磁位差, $H_k l_k$ 则是一段磁路上的磁位差,它也等于 $\Phi_m R_{mk}$,是作用在磁路上的总磁动势,故(1-8)式表明:沿任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁路磁位差的代数和。类比于电路中的基尔霍夫第二定律,该定律就称为磁路的基尔霍夫第二定律,此定律实际上是安培环路定律的另一种表达式。

必须指出,磁路和电路虽然具有类比关系,但是二者性质却不相同。在分析计算时,也是有以下几点差别:

- 电路中有电流 I 时,就有功率损耗 $I^2 R$;而在直流磁路中,维持一定的磁通量 Φ 时,铁芯中没有功率损耗。
- 在电路中可以认为电流全部在导线中流通,导体外

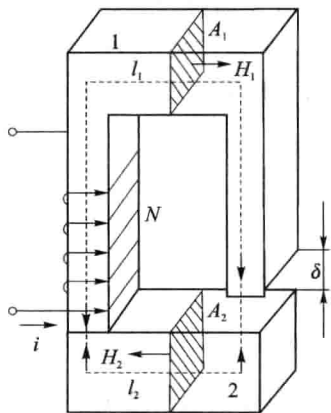


图 1-5 磁路的基尔霍夫第二定律

没有电流;在磁路中,则没有绝对的磁绝缘体,除了铁芯中的磁通外,实际上总有一部分漏磁通散布在周围的空气中。

- 电路中导体的电阻率 ρ 在一定的温度下是不变的,而磁路中铁芯的磁导率 μ_{Fe} 却不是常值,它是随着铁芯的饱和度大小而变化的。
- 对于线性电路,计算时可以应用叠加原理,但对于铁芯磁路,计算时不能应用叠加原理,因为铁芯饱和时磁路为非线性。

因此,磁路与电路仅是一种形式上的类似,而不是物理本质的相似。

1.2 常用的铁磁材料及其特性

为了在一定的励磁磁动势作用下能激励较强的磁场,以使电机和变压器等装置的尺寸缩小、质量减轻、性能改善,必须增加磁路的磁导率。当线圈的匝数和励磁电流相同时,铁芯线圈激发的磁通量比空气线圈大得多,所以电机和变压器的铁芯常用磁导率较高的铁磁材料制成。下面对常用的铁磁材料及其特性进行简要说明。

1.2.1 铁磁物质的磁化

铁磁物质包括铁、镍、钴等以及它们的合金。将这些材料放入磁场中,磁场会显著增强。铁磁材料在外磁场中呈现出很强的磁性,此现象称为铁磁物质的磁化。铁磁物质能被磁化的原因是在它内部存在着许多很小的被称为磁畴的天然磁化区。在图1-6中,磁畴用一些小磁铁来示意表明。在没有外磁场的作用时,各个磁畴排列紊乱,磁效应相互抵消,对外不显示磁性,如图1-6(a)所示。在外磁场的作用下,磁畴就顺外磁场方向而转向,排列整齐并显示出磁性来。这就是说铁磁物质被磁化了,如图1-6(b)所示。由此形成的磁化磁场,叠加在外磁场上,使合成磁场大为加强。由于磁畴产生的磁化磁场比非铁磁物质在同一磁场强度下所激励的磁场强得多,所以铁磁材料的磁导率要比非铁磁材料大得多。非铁磁材料的磁导率接近于真空的磁导率,电机常用的铁磁材料磁导率 $\mu_{Fe} = (2\,000 \sim 6\,000)\mu_0$ 。

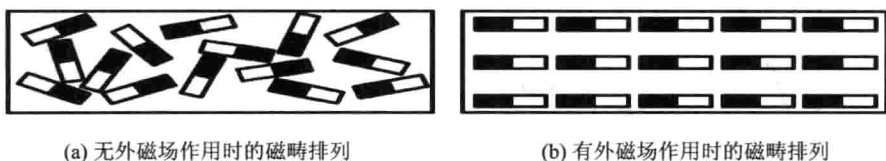


图1-6 铁磁物质的磁化

1.2.2 磁化曲线和磁滞回线

1. 起始磁化曲线

在非铁磁材料中,磁通密度 B 和磁场强度 H 之间呈直线关系,直线的斜率就等于 μ_0 ,如图1-7中虚线所示。铁磁材料的 B 与 H 之间则为非线性关系。将一块未磁化的铁磁材料进行磁化,当磁场强度 H 由零逐渐增大时,磁通密度 B 将随之增大。用 $B=f(H)$ 描述的曲线称为起始磁化曲线,如图1-7所示。

起始磁化曲线基本上可分为 4 段:开始磁化时,外磁场较弱,磁通密度增加得不快,见图 1-7 中 Oa 段。随着外磁场的增强,铁磁材料内部大量磁畴开始转向,趋向于外磁场方向,此时, B 值增加得很快,见图 1-7 中 ab 段。若外磁场继续增加,大部分磁畴已趋向外磁场方向,可转向的磁畴越来越少, B 值亦增加得越来越慢,见图 1-7 中 bc 段,这种现象称为饱和。达到饱和以后,磁化曲线基本上成为与非铁磁材料的 $B=\mu_0 H$ 特性相平行的直线,见图 1-7 中 cd 段。磁化曲线开始拐弯的 b 点,称为膝点或饱和点。

由于铁磁材料的磁化曲线不是一条直线,所以磁导率 $\mu_{Fe}=B/H$ 也不是常数,将随着 H 值的变化而变化。进入饱和区后, μ_{Fe} 急剧下降,若 H 再增大, μ_{Fe} 将继续减小,直至逐渐趋近于 μ_0 ,图 1-7 中同时还示出了曲线,这表明在铁磁材料中,磁阻随饱和度增加而增大。

各种电机、变压器的主磁路中,为了获得较大的磁通量,又不过分增大磁动势,通常把铁芯内工作点的磁通密度选择在膝点附近。

2. 磁滞回线

若将铁磁材料进行周期性磁化, B 和 H 之间的变化关系就会变成如图 1-8 中曲线 $abc-defa$ 所示形状。由图可见,当 H 开始从零增加到 H_m 时, B 相应地从零增加到 B_m ;以后逐渐减小磁场强度 H , B 值将沿曲线 ab 下降。当 $H=0$ 时, B 值并不等于零,而等于 B_r 。这种去掉外磁场之后,铁磁材料内仍然保留的磁通密度 B_r 称为剩余磁通密度,简称剩磁。要使 B 值从 B_r 减小到零,必须加上相应的反向外磁场。此反向磁场强度称为矫顽力,用 H_c 表示。 B_r 和 H_c 是铁磁材料的两个重要参数。铁磁材料所具有的这种磁通密度 B 的变化滞后于磁场强度 H 变化的现象,叫做磁滞。呈现磁滞现象的 $B-H$ 闭合曲线,称为磁滞回线,见图 1-8 中的 $adcdefa$ 。磁滞现象是铁磁材料的另一个特性。

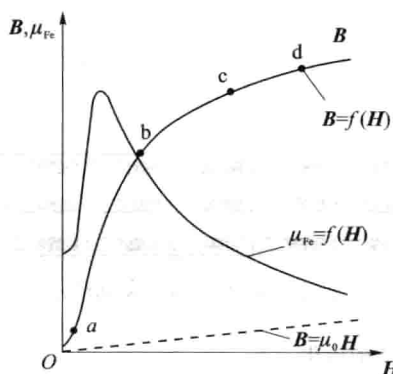


图 1-7 铁磁材料的起始磁化曲线和 $B=f(H)$ 、 $\mu_{Fe}=f(H)$

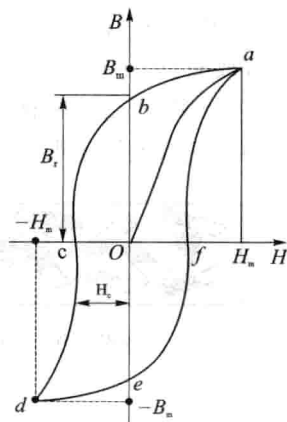


图 1-8 铁磁材料的磁滞回线

3. 基本磁化曲线

对于同一铁磁材料,选择不同的磁场强度 H_m 反复进行磁化时,可得不同的磁滞曲线。磁路计算时所用的磁化曲线都是基本磁化曲线。如图 1-9 所示为电机中常用的硅钢片 (DR320、DR530)、铸铁、铸钢的基本磁化曲线。图中 $\times 0.1$, $\times 10$, $\times 100$ 是指各不同曲线对应的 H 值应乘的系数。

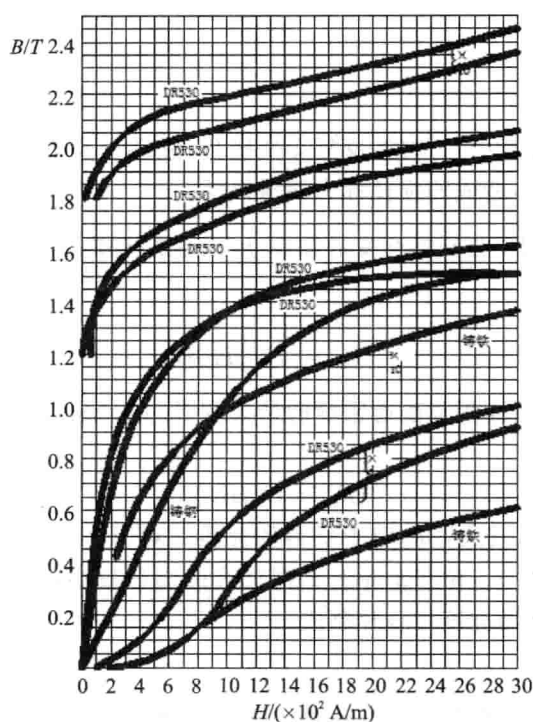


图 1-9 电机常用的铁磁材料的基本磁化曲线

按照磁滞回线的形状不同,铁磁材料可分为软磁材料和硬磁材料两大类。

(1) 软磁材料

磁滞回线较窄,剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都小的材料,称为软磁材料,如图 1-10(a)所示。常用的软磁材料磁导率较高,可用来制造电机、变压器的铁芯。磁路计算时,可以不考虑磁滞现象,用基本磁化曲线是可行的。

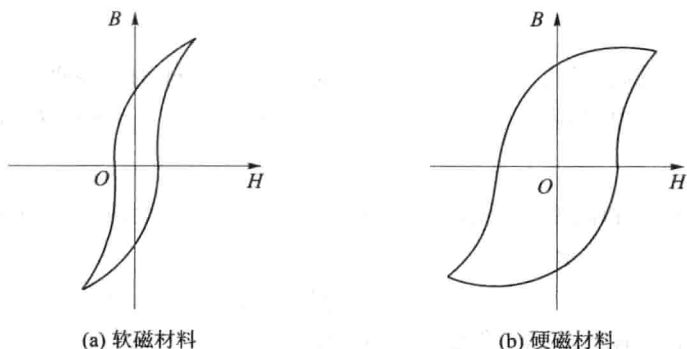


图 1-10 软磁和硬磁材料的磁滞回线

(2) 硬磁材料

磁滞回线较宽,剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都大的铁磁材料称为硬磁材料,如图 1-10(b)所示。由于剩磁 B_r 大,可用以制成永久磁铁,因而硬磁材料亦称为永磁材料,如铝钴镍、铁氧体、稀土钴及钕铁硼等。