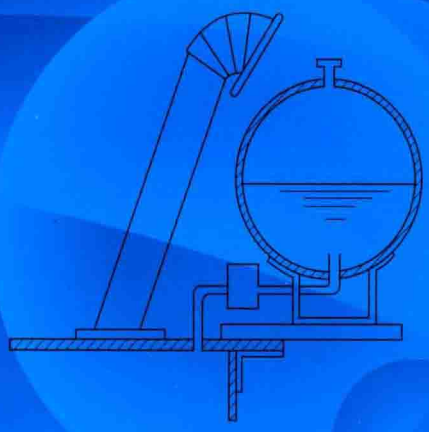
普通高等教育“十二五”规划教材

电机与控制

DIANJI YU KONGZHI

曹少泳 编



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

电机与控制

DIANJI YU KONGZHI

● 曹少泳　编

化学工业出版社
·北京·

本书共分6章，分别为磁路、变压器的类型和基本结构、三相异步电动机、直流电机、常用低压电器、电动机的基本控制线路，各章均附有思考题及习题，以便读者更好地掌握各章的基本内容和分析方法。

本书突出实用、适用、够用和创新的“三用一新”的特点，提高各种常用电机实际应用的能力。

本书可作为高等学校非电类本科生“电工和电子技术（电工学）”课程的教材，也供其他相关专业选用，也可作为有关工程技术人员的自学和参考读物。

图书在版编目（CIP）数据

电机与控制/曹少泳编. —北京：化学工业出版社，2015.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-24120-7

Ⅰ.①电… Ⅱ.①曹… Ⅲ.①电机-控制系统-高等学校-教材 Ⅳ.①TM301.2

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第112799号

责任编辑：高 钰　　文字编辑：吴开亮

责任校对：吴 静　　装帧设计：刘丽华

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印　　装：大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张9½ 字数214千字　　2015年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网　　址：http://www.cip.com.cn

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定　　价：24.00元

版权所有 违者必究

前言

本书是按照教育部（前国家教育委员会）颁布的高等院校“电工技术（电工学Ⅰ）”课程的教学基本要求编写的。

本书定位在应用型本科的培养层次，突出实用、适用、够用和创新的“三用一新”的特点，适当拓宽知识面，加强系统概念，加强理论联系实际。

本书的主要内容包括磁路、变压器的类型和基本结构、三相异步电动机、直流电机、常用低压电器、电动机的基本控制线路。各章均附有思考题及习题，便于学生对所学知识的巩固。

本书在保留电机与控制的基本内容体系的基础上，对各章主要内容进行了提炼，主要分析了三相异步电动机的基本特性、工作原理以及常见的典型控制电路，突出了基本分析方法的学习，兼顾了电工技术实验和动手能力的培养，方便学生自学。

本书的主要内容是电机原理与运行以及电器控制，编写的基本思路和特点如下。

1. 以电机（变压器、异步电机、直流电机）为研究对象，详述了它们的工作原理和运行特性，着重于性能的分析，使学生对电机电磁基本理论以及电机分析的方法有系统的认识。

2. 编写突出重点，主次分明，简化了章节和层次，压缩了篇幅。精简的主要内容有电机绕组、特种电机等电机中的一些专题性内容。重在应用，主要介绍了电动机的控制线路，主要包括启动、正反转、制动和调速等，以及各种电机的基本控制线路：直流电机和异步电机的启动、制动、正反转、调速控制线路。

3. 思考题和习题比较充足，使学生可以对各章的内容进一步巩固，能够更好地掌握物理概念，提高解题能力，取得好的学习效果。

本书可作为高等学校非电类本科生“电工和电子技术（电工学）”课程的教材，或供其他相关专业选用，也可作为有关工程技术人员的自学和参考读物。

本书是编者在总结多年的教学经验和教材建设基础之上，结合应用型本科的教学特点编写而成的。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

2015 年 7 月

目录

第 1 章　磁路 …… 1

1.1　磁场的几个基本物理量 …… 1
1.1.1　磁感应强度 …… 1
1.1.2　磁通 …… 1
1.1.3　磁导率 …… 1
1.1.4　磁场强度 …… 2
1.2　常用铁磁材料及其特性 …… 2
1.2.1　铁磁材料的磁化 …… 2
1.2.2　磁化曲线和磁滞回线 …… 3
1.2.3　铁磁材料的分类 …… 4
1.2.4　铁磁材料的铁损耗 …… 5
1.3　基本电磁定律 …… 6
1.3.1　电磁感应定律 …… 6
1.3.2　电磁力定律 …… 7
1.4　磁路基本定律 …… 7
1.4.1　磁路的概念 …… 7
1.4.2　安培环路定律 …… 7
1.4.3　磁路的欧姆定律 …… 8
1.4.4　磁路的基尔霍夫第一定律 …… 8
1.4.5　磁路的基尔霍夫第二定律 …… 9
1.5　能量守恒定律 …… 9
思考题及习题 …… 10

第 2 章　变压器的类型和基本结构 …… 11

2.1　变压器的用途、分类及结构 …… 11
2.1.1　变压器的用途 …… 11
2.1.2　变压器的分类 …… 12
2.1.3　变压器的基本结构 …… 12
2.1.4　变压器的额定值 …… 15
2.2　变压器基本运行原理 …… 16

2.2.1 变压器的空载运行 …… 16
2.2.2 变压器的负载运行 …… 21
2.2.3 绕组折算 …… 23
2.2.4 等效电路 …… 24
2.2.5 负载运行时的相量图 …… 25
2.3 三相变压器 …… 26
2.3.1 三相组式变压器的磁路系统 …… 27
2.3.2 三相芯式变压器磁路系统 …… 27
2.4 三相变压器的电路系统——绕组的连接方式和连接组 …… 28
2.4.1 绕组端点的标志与极性 …… 28
2.4.2 单相变压器的连接组 …… 28
2.4.3 三相变压器的电路系统 …… 29
2.4.4 三相变压器的连接组 …… 30
2.5 其他用途变压器 …… 32
2.5.1 自耦变压器 …… 32
2.5.2 互感器 …… 34
思考题及习题 …… 36
第3章 三相异步电动机 …… 38
3.1 三相异步电动机的结构与工作原理 …… 38
3.1.1 三相异步电动机的构造 …… 38
3.1.2 三相异步电动机的转动原理 …… 39
3.2 三相异步电动机的等效电路 …… 42
3.2.1 转子不动时的异步电动机 …… 43
3.2.2 转子旋转时的异步电动机 …… 47
3.3 三相异步电动机的转矩特性与机械特性 …… 50
3.3.1 电磁转矩（简称转矩） …… 50
3.3.2 机械特性曲线 …… 51
3.4 异步电动机的启动与调速分析 …… 52
3.4.1 启动特性分析 …… 52
3.4.2 笼型异步电动机的启动方法 …… 52
3.4.3 三相异步电动机的调速 …… 54
3.5 三相异步电动机的制动 …… 55
3.5.1 反接制动 …… 55
3.5.2 能耗制动 …… 56
3.5.3 发电反馈制动 …… 56
3.6 三相异步电动机技术数据及选择 …… 56
3.6.1 三相异步电动机技术数据 …… 56

3.6.2 三相异步电动机的选择 …… 58
思考题及习题 …… 59

第4章 直流电机 …… 61

4.1 直流电机的工作原理 …… 61
4.1.1 直流电动机的基本工作原理 …… 61
4.1.2 直流发电机的基本工作原理 …… 62
4.2 直流电机的结构和额定值 …… 63
4.2.1 直流电机的结构 …… 63
4.2.2 直流电机的额定值 …… 65
4.3 直流电机的磁场 …… 66
4.3.1 直流电机的励磁方式 …… 66
4.3.2 直流电机的空载磁场 …… 67
4.4 电枢绕组的感应电势和直流电机的电磁转矩 …… 68
4.4.1 直流电机电枢绕组的感应电势 …… 68
4.4.2 直流电机的电磁转矩 …… 68
4.5 稳态运行时直流电机的基本方程式 …… 69
4.5.1 直流发电机的基本方程式 …… 69
4.5.2 直流电动机的基本方程式 …… 70
思考题及习题 …… 71

第5章 常用低压电器 …… 73

5.1 常用低压电器的分类 …… 73
5.1.1 按用途或控制对象分类 …… 73
5.1.2 按动作方式分类 …… 74
5.1.3 按触点类型分类 …… 74
5.1.4 按工作原理分类 …… 74
5.1.5 按低压电器型号分类 …… 74
5.2 刀开关 …… 75
5.2.1 HD 型单投刀开关 …… 75
5.2.2 HS 型双投刀开关 …… 76
5.2.3 HR 型熔断器式刀开关 …… 77
5.2.4 组合开关 …… 77
5.2.5 开启式负荷开关和封闭式负荷开关 …… 78
5.3 熔断器 …… 79
5.3.1 熔断器的结构原理及分类 …… 79
5.3.2 熔断器的主要技术参数 …… 79
5.3.3 常用的熔断器 …… 79

5.4 断路器 …… 80
5.4.1 断路器的结构和工作原理 …… 81
5.4.2 低压断路器的选择原则 …… 82
5.5 控制器 …… 82
5.6 接触器 …… 83
5.6.1 交流接触器的组成部分 …… 83
5.6.2 接触器的主要技术参数和类型 …… 84
5.6.3 接触器的选择 …… 84
5.7 启动器 …… 84
5.8 控制继电器 …… 85
5.8.1 电磁式继电器 …… 85
5.8.2 中间继电器 …… 86
5.8.3 电流继电器和电压继电器 …… 87
5.8.4 时间继电器 …… 88
5.8.5 热继电器 …… 89
5.8.6 速度继电器 …… 91
5.8.7 液位继电器 …… 92
5.8.8 压力继电器 …… 92
5.9 主令电器 …… 93
5.9.1 按钮 …… 93
5.9.2 行程开关 …… 95
5.9.3 转换开关 …… 97
5.10 电阻器 …… 98
5.11 变阻器 …… 99
5.12 电压调整器 …… 99
5.13 电磁铁 …… 99
5.14 其他 …… 100
5.14.1 信号灯 …… 100
5.14.2 报警器 …… 101
5.14.3 液压控制元件 …… 101
5.15 电器的文字符号和图形符号 …… 102
5.15.1 电器的文字符号 …… 102
5.15.2 电器的图形符号 …… 103
思考题及习题 …… 107

第 6 章 电动机的基本控制线路 …… 108

6.1 直流电动机的控制 …… 108
6.1.1 直流电动机的启动控制 …… 108

6.1.2 直流电动机正反转控制 …… 110
6.1.3 直流电动机制动控制 …… 111
6.1.4 直流电动机调速控制 …… 113
6.2 三相异步电动机的启动控制 …… 114
6.2.1 定子绕组串电阻降压启动控制线路 …… 115
6.2.2 星-三角（Y-△）降压启动控制线路 …… 115
6.2.3 自耦变压器降压启动控制线路 …… 116
6.2.4 延边三角形降压启动控制线路 …… 117
6.2.5 三相绕线转子异步电动机的启动控制线路 …… 118
6.2.6 电动机软启动器 …… 120
6.3 三相异步电动机的正反转控制 …… 122
6.4 三相异步电动机的制动控制 …… 123
6.4.1 三相异步电动机能耗制动控制线路 …… 123
6.4.2 三相异步电动机反接制动控制线路 …… 124
6.4.3 三相异步电动机机械制动控制线路 …… 125
6.5 三相异步电动机的调速控制 …… 126
6.5.1 异步电动机变极调速控制线路 …… 126
6.5.2 绕线型异步电动机转子串电阻调速控制线路 …… 129
6.6 同步电动机的控制 …… 131
6.7 典型机床电气控制线路 …… 132
6.7.1 卧式车床的电气控制线路 …… 132
6.7.2 X62W 万能升降台铣床的电气控制线路 …… 135
思考题及习题 …… 140

参考文献 …… 141

第1章
磁路

1.1 磁场的几个基本物理量

1.1.1 磁感应强度

磁感应强度又叫磁通密度，它是表示磁场内某点磁场强弱的物理量，是表征磁场特性的基本场量。其大小是通过垂直于磁场方向单位面积的磁力线数目，符号为 B。

磁感应强度 B 的单位在国际单位制(SI)中是特斯拉，简称特，符号为 T；在电磁单位制(CGS)中为高斯，简称高，符号为 Gs。二者的关系为 $1\mathrm{T}=10^4\mathrm{Gs}$。

1.1.2 磁通

在磁场中，穿过任一面积的磁力线总量称为该截面的磁通量，简称磁通，符号为 Φ。

均匀磁场中，磁通等于磁感应强度 B 与垂直于磁场方向的面积 S 的乘积。

$$\Phi = BS \tag{1-1}$$

磁通是一个标量，它的单位在 SI 制中为韦伯，简称韦，符号为 Wb；在 CGS 单位制中磁通单位为麦克斯韦，简称麦，符号为 MX，1MX=1Wb。

均匀磁场中，磁感应强度可以表示为单位面积上的磁通，由式 (1-1) 可得：

$$B = \frac{\Phi}{2} \tag{1-2}$$

所以磁感应强度也称为磁通密度。

1.1.3 磁导率

磁导率是表示物质导磁性能的参数，用符号 μ 表示，单位是亨/米 (H/m)。

真空中的磁导率一般用 μ_0 表示，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}\mathrm{H/m}$。空气、铜、铝和绝缘材料等非铁磁材料的磁导率和真空磁导率大致相同。而铁、镍、钴等铁磁材料及其合金的磁导率比真空磁导率 μ_0 大很多，为 $10\sim10^5$ 倍。

把物质磁导率与真空磁导率的比值定义为相对磁导率，用符号 μ_r 表示，则铁磁材料的

磁导率可表示为：

$$\mu = \mu_r \mu_0 \tag{1-3}$$

相对磁导率是一个无量纲的参数。非铁磁物质的相对磁导率 μ_r 接近于 1，而铁磁物质的 μ_r 远远大于 1。

1.1.4 磁场强度

在各向同性的媒质中，磁场中某点的磁感应强度与该点磁导率的比值定义为该点的磁场强度，用符号 H 表示，即：

$$H = \frac{B}{\mu} \tag{1-4}$$

磁场强度只与产生磁场的电流及电流的分布有关，与磁介质的磁导率无关，单位为安/米（A/m）。磁场强度概念的引入只是为了简化计算，没有物理意义。

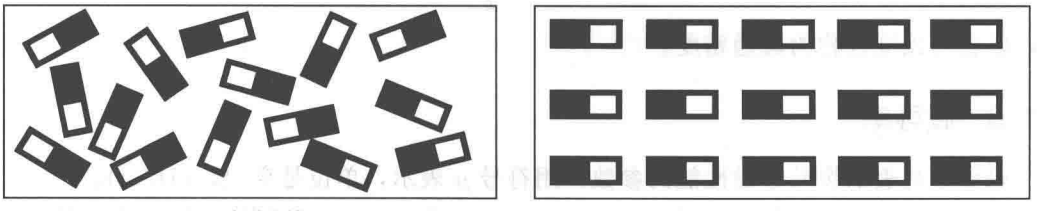
1.2 常用铁磁材料及其特性

物质按其磁化效应可分为铁磁材料和非铁磁材料两大类。非铁磁材料，如空气、铜、铝、橡胶等，它们的磁导率与真空接近，工程计算时近似认为相等。铁磁材料是由铁磁物质构成，主要有铁、镍、钴及其合金等，其磁导率较真空大很多。

在电机和变压器中，要求在一定的励磁电流下产生较强的磁场，以减小其体积和重量，所以电机和变压器铁芯都采用磁导率较高的铁磁材料制成。下面对铁磁材料的性能和特性进行简单介绍。

1.2.1 铁磁材料的磁化

铁磁材料可看作由无数小的磁畴组成，如图 1-1（a）所示，图中磁畴用一些小的磁铁表示出来。铁磁物质在不受外磁场作用时，这些磁畴杂乱无章排列，其磁效应相互抵消，对外不显示磁性。当铁磁物质受到外磁场作用时，磁畴在外磁场作用下，轴线趋于一致，如图 1-1（b）所示，由此内部形成一附加磁场，叠加在外磁场上，使合成磁场大为增强。铁磁物质这种在外磁场作用下呈现很强的磁性的现象，叫铁磁物质的磁化。



(a) 未磁化前　　(b) 磁化

图 1-1　铁磁物质的磁化

正是由于铁磁材料具有磁化特性，才使其磁导率较非铁磁物质大得多。所以，磁化是

铁磁材料的重要特性之一。

1.2.2 磁化曲线和磁滞回线

材料的磁化特性可用磁化曲线来表示。所谓磁化曲线，它是表示磁场强度 H 与磁通密度 B 之间关系的特性曲线。

对于空气等非铁磁物质，磁通密度 B 与磁场强度 H 之间呈线性关系，即磁化曲线为一直线，直线的斜率就等于 μ_0。下面讨论铁磁材料的磁化曲线。

(1) 起始磁化曲线

对尚未磁化的铁磁材料进行磁化，磁场强度 H 从 0 开始逐渐增大，磁通密度 B 也从 0 开始逐渐增加，曲线 $B=f(H)$ 就称为起始磁化曲线，如图 1-2 所示。

从图 1-2 可见，起始磁化曲线大致可分为 4 段。第 1 段：图中 Oa 段，这一段 H 从 0 开始增加，值较小，即外磁场较弱，磁通密度增加得不快，此阶段材料磁导率较小。第 2 段：图中 ab 段，这一段中随着外磁场的增强，材料内部大量磁畴开始转向，趋向于与外磁场方向一致，所以磁通密度 B 增加很快，B 与 H 近似为线性关系，磁导率很大且基本不变。第 3 段：图中 bc 段，随着外磁场继续增强，大部分磁畴已趋向外磁场方向，可转向的磁畴越来越少，磁通密度 B 增加越来越少，磁导率随 H 的增大反而减小，这种随着磁场强度 H 增加，而磁通密度 B 增加很小的现象称为磁饱和现象，通常称为饱和。第 4 段：图中 cd 段，在这一段中，虽然外磁场继续增强，但磁通密度改变很小，其磁化曲线基本上与非铁磁材料的 $B=\mu_0 H$ 特性曲线平行。

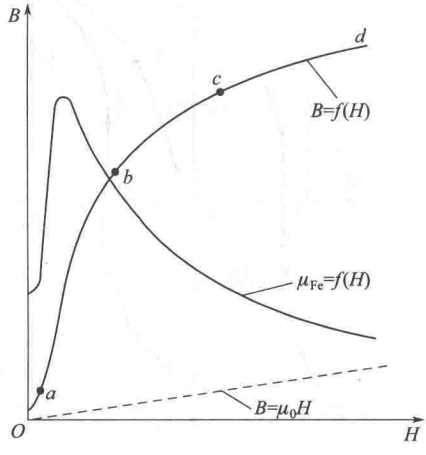


图 1-2 铁磁材料的起始磁化曲线和 $\mu_{Fe}=f(H)$ 曲线

所以，铁磁材料的起始磁化曲线与非铁磁材料的不同，它是非线性的，在不同的磁通密度下有不同的磁导率，即 $\mu_{Fe}=B/H$（随 H 大小变化而变化），如图 1-2 中的 μ_{Fe} 曲线。

在电机和变压器设计中，为了产生较强的磁场，希望铁磁材料有较高的磁导率，而励磁磁势又不能太大，所以设计时通常把磁通密度选在图中的 b 点附近，该点为磁化曲线的拐弯处，称为膝点。

(2) 磁滞回线

若铁磁材料处于交变的磁场中，将进行周期性磁化，此时 B 和 H 之间的关系变为如图 1-3 所示的磁滞回线。当磁场强度 H 从 0 增加到最大值 H_m，铁磁材料饱和，磁通密度也为最大值 B_m；之后减小 H，B 不是沿着起始磁化曲线下降，而是沿曲线 ab 下降；当 H 减小到 0 时，B 不是 0，而等于 B_r。在去掉外磁场后，铁磁材料内还保留磁通密度 B_r，把这时的磁通密度叫做剩余磁通密度，简称剩磁。而这种磁通密度 B 的变化落后于磁场强度 H 的变化的现象，叫磁滞现象。要想使剩磁为 0，必须对材料反向磁化，即加上相应的反向磁场。当反向磁场 H 为 $-H_c$ 时，磁通密度 B 降为 0，此时的磁场强度 H_c 称为矫顽

力。剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 是铁磁材料的两个重要参数。

磁滞现象是铁磁材料的又一个重要特性。由于存在磁滞现象，当对称交变的磁场强度在 $+H_m$ 和 $-H_m$ 之间变化，对铁磁材料反复磁化时，得到如图 1-3 所示的近似对称于原点的 B-H 闭合曲线 a-b-c-d-e-f-a，称为磁滞回线。

（3）基本磁化曲线

对同一铁磁材料，选择不同的磁场强度 H_m 值的对称交变磁场进行反复磁化，可得到一系列磁滞回线，如图 1-4 所示，将各磁滞回线在第一、三象限的顶点连接起来，所得到的曲线称为基本磁化曲线，基本磁化曲线一般只使用第一象限。

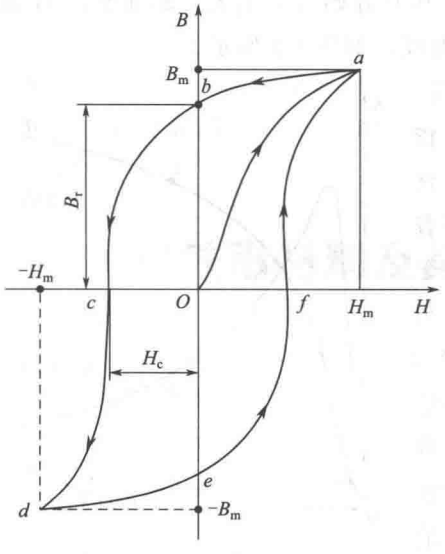


图 1-3　铁磁材料的磁滞回线

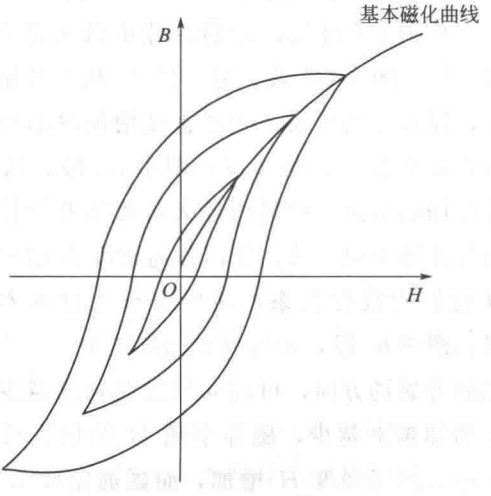


图 1-4　基本磁化

基本磁化曲线不是起始磁化曲线，但与起始磁化曲线差别不大。对一定的磁性材料，基本磁化曲线是比较固定的。直流磁路计算时，所用的磁化曲线都是基本磁化曲线。

1.2.3　铁磁材料的分类

按照磁滞回线形状的不同，铁磁材料可分为两大类：软磁材料和硬磁（永磁）材料。

磁滞回线窄，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都小的材料称为软磁材料，如图 1-5 所示。常用的软磁材料有纯铁、铸铁、铸钢、电工钢、硅钢等。这类材料的磁滞现象不明显，没有外磁场时磁性基本消失，磁导率高，常用于电机和变压器铁芯制造。

磁滞回线宽，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都大的材料称为硬磁材料，如图 1-6 所示。常用的硬磁材料有铁氧体、铝镍钴、稀土等。这类材料在被磁化后，剩磁较大且不容易消失，适合于制作永磁体，因此又称为永磁材料。有的电机采用永磁体来产生磁场，这类电机称为永磁电机，近年来众多的专家学者在永磁电机发展方向上做了许多工作。

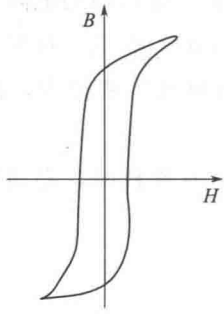


图 1-5 软磁材料的磁滞回线

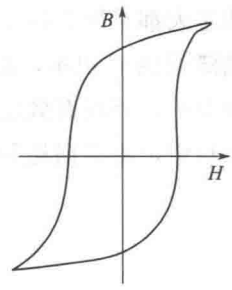


图 1-6 硬磁材料的磁滞回线

1.2.4 铁磁材料的铁损耗

带铁芯的交流线圈中，除了线圈电阻上的功率损耗（铜损耗）外，由于其铁芯处于反复磁化下，铁芯中也将产生功率损耗，以发热的方式表现出来，称为铁磁损耗，简称铁耗。

铁耗有磁滞损耗和涡流损耗两部分。

（1）磁滞损耗

铁磁材料在交变磁场作用下，正反方向反复磁化，材料内部磁畴在不断运动过程中相互摩擦，消耗能量，引起材料发热，消耗功率，这种损耗称为磁滞损耗。磁滞损耗的大小与磁滞回线的面积、磁场交变的频率 f 和铁磁材料的体积 V 有关。而磁滞回线的面积又由铁磁材料决定，磁滞回线面积越大，B_m 也越大，磁滞损耗越大。交变磁场频率越高，损耗也越大。

工程计算时，计算磁滞损耗常用如下的经验公式：

$$p_h = C_h f B_m^n V \tag{1-5}$$

式中 C_h——材料的磁滞损耗系数，与材料有关；

n——由试验确定，对一般电工钢片取 $n=1.6\sim2.3$；

V——铁磁材料的体积。

由于硅钢片磁滞回线面积较小，所以电机和变压器铁芯常用硅钢片叠成，可以减小磁滞损耗。

（2）涡流损耗

由于铁磁材料也是导电体，在交变的磁场作用下，变化的磁通在铁芯中感应电势并产生电流，这些电流在铁芯内部环绕磁通呈旋涡状流动，称为涡流。涡流在其流经路径的等效电阻上产生损耗，叫涡流损耗。涡流损耗的大小与磁通密度、磁场变化频率、垂直于磁场方向上材料的厚度及材料电阻率有关。

工程计算时，对于硅钢片叠成的铁芯，常用如下经验公式计算：

$$p_e = C_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V \tag{1-6}$$

式中 C_e——材料的涡流损耗系数，其大小决定于材料的电阻率；

Δ——硅钢片的厚度。

为了减小材料的涡流损耗，应尽量减小材料的厚度和增加涡流回路的电阻。所以，电机和变压器铁芯大都采用含硅量较高的薄硅钢片（0.35～0.5mm）叠成。这是因为硅钢导磁性能好，磁滞回线面积小，磁滞损耗小；而掺入硅后，材料电导率增大，回路电阻减小，加之厚度很小，可以有效地减小涡流损耗。

在铁磁材料中，磁滞损耗和涡流损耗总是同时存在的，计算铁耗时，必须同时考虑两种损耗。

1.3 基本电磁定律

1.3.1 电磁感应定律

（1）电磁感应定律

大量的实验证实：当穿过某一闭合导体回路的磁通发生变化（无论是何种原因变化）时，在导体回路中就会产生电流，这种现象称为电磁感应现象，产生的电流称为感应电流。如果是穿过线圈的磁通发生变化，线圈的匝数为 N 匝，则线圈中感应电势的大小与线圈匝数成正比，与单位时间内磁通量的变化率成正比，可用下式表示：

$$e=-\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}=-N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \tag{1-7}$$

式中，$\Psi=N\Phi$，为穿过整个线圈的磁链。

感应电势的方向决定于感应电势在线圈中产生的电流方向，该电流所产生的磁场总是阻碍原来产生感应电势的磁场的变化。

（2）变压器电势

若线圈与磁场处于相对静止，线圈中的感应电势是由于与线圈相交链的磁通量本身随时间变化而产生的，这种感应电势称为变压器电势。变压器电势可表示为：

$$e=-\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}=-N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \tag{1-8}$$

（3）运动电势

如果磁场是恒定的（如直流励磁），线圈与恒定磁场之间在正交方向上发生相对运动，或是线圈不动，磁场沿线圈垂直方向运动，或是磁场不动，线圈沿磁场垂直方向运动，引起和线圈相交链的磁通量发生变化，也会产生感应电势，这样的电势称为运动电势。运动电势可表示为：

$$e=Blv \tag{1-9}$$

式中 l——线圈边在磁场中的有效长度；

v——线圈导体沿磁场垂直方向的运动速度，m/s。

运动电势的方向由右手定则确定，如图 1-7 所示。

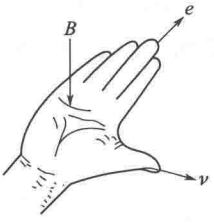


图 1-7 右手定则

1.3.2 电磁力定律

实验表明，载流导体在磁场中将要受到力的作用，由于这种力是磁场和载流导体相互作用产生的，所以称为电磁力。若磁场与导体垂直，则作用在导体上的电磁力为：

$$f = Bli \tag{1-10}$$

式中 l——导体在磁场中的长度；

i——导体中的电流。

电磁力的方向通过左手定则确定，如图 1-8 所示。

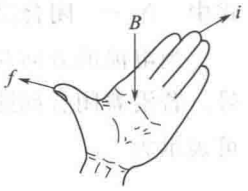


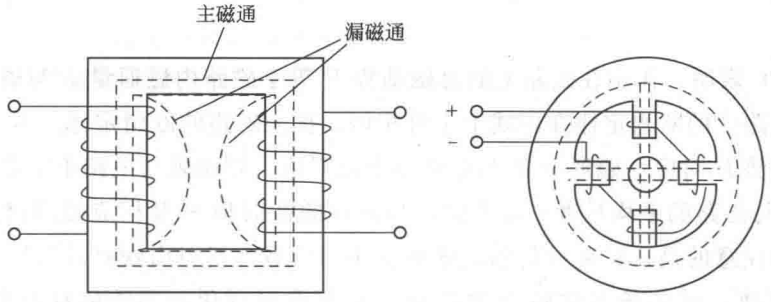
图 1-8 左手定则

1.4 磁路基本定律

电机和变压器都是利用磁场作为介质来实现能量变换的装置，在电机学和一般的工程分析中，通常将电机和变压器中复杂的电磁场问题进行简化，用磁路和等效电路的方法来分析。

1.4.1 磁路的概念

磁通所通过的路径称为磁路。如图 1-9 所示为两种常见的磁路，图 1-9（a）为变压器磁路，图 1-9（b）为两极直流电机磁路。



(a) 变压器磁路　　(b) 两极直流电机磁路

图 1-9 两种常见的磁路

电机和变压器中，常把线圈套装在铁芯上。当线圈内有电流流过时，线圈周围（包括铁芯内外）形成磁场。由于铁芯导磁性能比空气好得多，因此，大部分磁通在铁芯内部通过，称为主磁通，相应的路径为主磁路；少量的磁通经过部分铁芯和空气而闭合，这部分磁通称为漏磁通，漏磁通经过的路径为漏磁路。

用来产生磁通的电流叫励磁电流（也称激磁电流）。根据励磁电流的性质不同，磁路又可分为直流磁路和交流磁路。图 1-9（a）所示为交流磁路，图 1-9（b）所示为直流磁路。

1.4.2 安培环路定律

安培环路定律又称为全电流定律，即在磁路中，沿任一闭合路径，磁场强度矢量的线

积分$\oint_L H \cdot dl$，等于该闭合回路所包围电流的代数和，用公式表示为：

$$\oint_L H \cdot dl = \sum i = Ni \tag{1-11}$$

式中 N——闭合路径所交链的线圈匝数。

当电流的方向与闭合路径的环形方向符合右手螺旋定则时，电流 i 取正号，否则取负号。若沿着闭合回路，磁场强度 H 的方向总在切线方向，且大小处处相等，则式（1-11）可表示为：

$$Hl = Ni \tag{1-12}$$

1.4.3 磁路的欧姆定律

由于磁场强度等于磁通密度除以磁导率，即 $H = B/\mu$，且在均匀磁场中有磁通密度 $B = \Phi/S$，所以式（1-12）可表示为：

$$Hl = \frac{B}{\mu}l = \frac{\Phi}{\mu S}l = \Phi\frac{l}{\mu S} = \Phi R_m \tag{1-13}$$

或

$$F = Ni = Hl = \Phi R_m = \frac{\Phi}{\Lambda} \tag{1-14}$$

式中，$F = Ni$ 为作用在铁芯磁路上的安匝数，称为磁路的磁动势，它是造成磁路中有磁通的根源，简称磁势；$R_m = \dfrac{l}{\mu S}$ 为磁路的磁阻，单位为 A/Wb；$\Lambda = \dfrac{1}{R_m}$ 为磁路的磁导。

式（1-14）表明，作用在磁路上的总磁动势 F 等于磁路内磁通量 Φ 与磁路磁阻 R_m 的乘积，它与电路中的欧姆定律在形式上十分相似，称为磁路的欧姆定律。其中，磁动势 F 与电路中电动势 E 对应，磁通量 Φ 与电路中电流对应，则磁阻与电路中电阻对应。

磁阻 R_m 与磁路的平均长度 l 成正比，与磁路的截面积 S 及构成磁路材料的磁导率 μ 成反比。值得注意的是，铁磁材料的磁导率 μ 不是常数，所以由铁磁材料构成的磁路，其磁阻也不是常数，而是随着磁路中磁通密度的大小而变化，即铁磁材料的磁路具有非线性。

1.4.4 磁路的基尔霍夫第一定律

如果铁芯不是一个简单的闭合回路，而是带有并联分支的分支磁路，从而形成了磁路的节点。当忽略漏磁通时，在磁路中任何一个节点处，磁通的代数和恒等于 0，即：

$$\sum \Phi = 0 \tag{1-15}$$

式（1-15）与电路的基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$ 形式上相似，称为磁路的基尔霍夫第一定律，也叫磁通连续性定律。此定律表明：穿出（或进入）任一闭合面的总磁通恒等于 0（或者说，进入任一闭合面的磁通量恒等于穿出该闭合面的磁通量）。

如图 1-10 所示，当中间铁芯柱上加有磁动势 F 时，磁通的路径如图所示。如令进入闭合面 A 的磁通为负，穿出闭合面的磁通为正，则有：