

函 授 大 学 教 材

控 制 电 机

水利电力出版社

内 容 提 要

本书主要介绍一般控制电机的基本结构、工作原理及其工作特性。全书共分11章,其中包括:电磁与磁路的基本原理,控制变压器,交、直流调速发电机,交、直流伺服电动机,自整角电机,旋转变压器,步进电动机,微型同步电动机以及控制电机试验。

本书可作为高等院校和函授大学《控制电机》课程的教材,也可供电气自动控制专业技术人员参考。

前 言

本书在水利电力系统院校热力系统自动化专业试用多年，并在1987年原水利电力部成人教育处主持的教材编审会议上审定通过，为函授大学《控制电机》课程教材。

《控制电机》按60学时编写。全书共分11章，其中包括：电磁与磁路的基本概念、变压器、直流测速发电机、直流伺服电动机、交流伺服电动机、异步测速发电机、自整角电机、旋转变压器、微型同步电机（含步进电动机）及控制电机实验。此外还附有各种控制电机的技术数据和国际单位制等。

本书每介绍一种控制电机之前，重点论述有关的电机学原理和相应的普通电机的基本结构和工作特性。遵循由一般到专门的规律使学员在接受控制电机知识的同时，又获得一般电机的知识，从而扩大了知识面，达到了事半功倍的效果。

全书内容安排的顺序是按循序渐进、由浅入深、由易到难和由一般到特殊的原则。并力求避免与理论脱离，将相关的内容集中论述，既可节约课时，又能系统地掌握相关的知识，以获得全面而牢固的理论知识。

为了便于自学，每章都有内容简介、基本要求和复习思考题。书后附有控制微电机型号命名方法、产品名称代号与主要数据。还有国际单位制的基本单位、导出单位和与本书有关的单位。

本书由华北电力学院黄建西和东北电力学院李鹏编写（1～8章黄建西执笔，9～11章李鹏执笔），全书由黄建西主编。哈尔滨工业大学陆永平教授审阅全部书稿，并提出许多宝贵意见。在试用期间，武汉水利电力学院蓝世源副教授和东北电力学院党世勋副教授提出了许多宝贵意见，谨此一并表示感谢。

本书可作高等学校本科、专科，函授本科和专科自动化专业的教材；也可作中等技术学校自动化专业择用教材，并可供自动化专业技术人员以及其他专业工程技术人员学习参考。

由于作者水平所限，难免存在错误，欢迎广大师生和读者批评指正。

作 者

1988年1月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 控制电机在现代化建设中的作用	1
第二节 控制电机的功能	1
第三节 控制电机与普通电机的关系	2
第四节 一般电机的分类	3
第二章 电磁与磁路的基本概念	5
第一节 磁导率与导磁材料	5
第二节 磁化与磁化曲线	6
第三节 磁滞回线	8
第四节 铁芯损耗	9
第五节 磁路	11
第六节 磁路的计算	14
第七节 交流磁通	17
第三章 变压器	23
第一节 变压器的基本结构	23
第二节 变压器的工作原理	24
第三节 变压器空载运行	26
第四节 变压器负载运行	29
第五节 变压器等值电路	31
第六节 变压器的电压变化率	34
第七节 变压器的额定值	35
第八节 控制变压器的计算	35
第四章 直流测速发电机	39
第一节 直流电机的基本结构	39
第二节 直流发电机的工作原理	45
第三节 直流发电机的电势	47
第四节 电势纹波	49
第五节 直流电机的励磁方法	50
第六节 他励式发电机的特性	52
第七节 电枢反应	54
第八节 换向	57
第九节 直流测速发电机的工作原理及应用	61
第十节 直流测速发电机的误差	62
第十一节 国产直流测速发电机的型号及技术数据	65

第五章 直流伺服电动机	68
第一节 直流电动机的工作原理	68
第二节 直流电动机的电磁转矩	69
第三节 直流电动机的转矩平衡方程式	70
第四节 直流电动机的电势	71
第五节 直流电动机的启动、堵转和反转	72
第六节 直流电动机的转速及其特性	73
第七节 直流伺服电动机的工作特点	76
第八节 直流伺服电动机的特性	77
第九节 直流电动机的工作状态	79
第十节 直流伺服电动机的过渡过程	81
第六章 交流伺服电动机	86
第一节 交流伺服电动机的概述	86
第二节 异步电动机的基本结构	86
第三节 异步电机的工作原理	89
第四节 单相磁场与脉振磁场	90
第五节 三相磁场与圆形旋转磁场	94
第六节 两相磁场与椭圆形旋转磁场	96
第七节 转差率	102
第八节 异步电机的电势及电势方程式	103
第九节 两相异步伺服电动机的电势方程式	105
第十节 两相异步电动机的等值电路	106
第十一节 异步电机的电磁转矩	108
第十二节 单相异步电机的机械特性	113
第十三节 两相不对称电动机的机械特性	114
第十四节 异步伺服电动机的调速	116
第十五节 交流伺服电动机的技术数据	118
第七章 异步测速发电机	125
第一节 异步测速发电机的工作原理	125
第二节 异步测速发电机的电势与电势方程式	127
第三节 异步测速发电机的特性及线性误差	129
第四节 输出相位移	130
第五节 剩余电压	132
第六节 异步测速发电机的技术数据与型号	135
第八章 自整角电机	137
第一节 概述	137
第二节 力矩式自整角电机的回路电流	138
第三节 力矩式自整角电机的磁场分析	141
第四节 力矩式自整角电机的整步转矩	147
第五节 控制式自整角电机的磁场分析	149

第六节	控制式自整角电机的输出电压	153
第七节	差动式自整角电机的工作原理	155
第九章	旋转变压器	160
第一节	概述	160
第二节	正余弦旋转变压器的工作原理	161
第三节	正余弦旋转变压器的补偿	164
第四节	线性旋转变压器	166
第五节	旋转变压器在控制系统中的应用	168
第六节	旋转变压器在解算中的应用	171
第十章	微型同步电动机	177
第一节	概述	177
第二节	永磁式同步电动机	179
第三节	磁阻式和磁滞式同步电动机	180
第四节	步进电动机	181
第五节	磁阻式步进电动机的结构型式	184
第六节	其他型式的步进电动机	187
第七节	步进电动机的矩角特性	190
第八节	低速同步电动机	192
第十一章	控制电机实验	197
第一节	概述	197
第二节	单相控制变压器实验	197
第三节	直流测速发电机实验	199
第四节	直流伺服电动机实验	200
第五节	交流伺服电动机实验	201
第六节	交流测速发电机实验	202
第七节	自整角电动机实验	203
第八节	旋转变压器实验	205
习题答案		207
附录		209
附录 1	控制微电机型号命名方法	209
附录 2	控制微电机产品名称代号	209
附录 3	控制微电机机座号	210
附录 4	控制微电机使用环境条件	210
附录 5	控制微电机电源频率和电压等级	210
附录 6	旋转变压器主要技术数据表	211
附录 7	CK系列空心杯转子异步测速发电机主要技术数据表	213
附录 8	自整角电机主要技术数据表	214
附录 9	SL系列两相交流伺服电动机主要技术数据表	215
附录 10	SZ系列直流伺服电动机主要技术数据表	217
附录 11	控制用变压器的主要技术数据	219

第一章 绪 论

内 容 简 介

本章介绍控制电机在生产建设及工程技术中的作用，常见控制电机的种类及其使用范围，并介绍一般电机的分类。

第一节 控制电机在现代化建设中的作用

在现代生产建设和科学研究中，自动控制是一门非常重要的技术，在空间技术中的火箭、宇宙飞船都须采用自动控制技术。在现代国防科技上，导弹、飞机的操纵系统和雷达天线的跟踪系统也需采用自动控制技术。在现代工业和农业的建设工程、机械制造及产品生产中也广泛地采用自动控制技术。

在自动控制系统中，控制电机是不可缺少的，系统的执行元件和检测元件，很多是由各种型式、不同功能的控制电机来担任。此外，在电子计算技术中，许多函数的求解和运算线路的选择，也需由控制电机来完成。

在电力生产中，如锅炉给水、燃料馈送、风量供应等的调节，以及汽轮机进汽或水轮机进水的调节，都是采用自动控制。调节信号的产生需要作测量元件的电机来发出；信号的传递需要作整步元件的电机来发送和接收；开启或关闭阀门、挡板的指令信号需要作执行元件的电动机来驱动。控制电机在电力系统中，可充当遥测和遥控的信号测量、信号传递、信号接收和指令执行等元件。以上这些元件将远距离装置的运行状态的信号传到中央控制室，又将中央控制室的指令信号传送到远距离的装置，并执行指令的操作。

控制电机在热力系统自动化中有很重要的作用，随着电力生产的发展也要求热力系统自动化的程度相应地提高，因而控制电机在热力系统中的作用也越显重要。

控制电机的发展时间不长，随着生产技术的发展，尤其是电子技术的发展，给控制电机的发展提供了条件。如电子放大装置、移相装置以及脉冲电源等，为控制电机提供了各种特殊要求的电源。同时，由于自动化要求的提高，要求电机能作复杂的动作，从而要求研制更多型式和更高精度的各种功能的控制电机。所以控制电机的知识在任何专业的自动化系统中都是必学的。

第二节 控制电机的功能

控制电机是根据自动控制系统的特征要求，制成的具有各种特殊功能的小功率电机。

控制电机的基本原理和普通电机一样，它是利用电磁感应的原理进行机电能量转换，是一种电磁能量转换的电磁元件。控制电机的功用和普通电机不同，普通发电机或电动机是应用电机把机械能变为电能，或把电能变为机械能，作为电源或动力用，因而普通电机

也称为动力电机；控制电机的用途却不是用来一般地发电或驱动机械实现功率的转换，而是用来作信号转换的。控制电机将控制系统中的机械信号（如转速或位移）转变为电信号（如电压或频率），或把电信号转变为机械信号。

由于自动化技术在不断发展，对控制电机也不时提出新的要求，因而不断出现新型的控制电机。控制电机的种类很多，常用的有伺服电动机、测速发电机、自整角电机、旋转变压器和步进电动机等。

根据控制电机在自动控制系统中的作用，可归结为执行电机和检测电机。执行控制电机在自动控制系统中接受电信号，而输出机械功率，所以称作功率元件。检测控制电机将转速或角位移变为电压信号输出，称为信号元件。

执行电机的作用是按控制系统的电信号指令进行转动或移动。作执行用的控制电机有：直流伺服电动机、交流伺服电动机、步进电动机和力矩自整角电机等。

检测电机的作用是把自动控制系统中机械运行的速度变化或位置变化，转变为电压变化，并作为信号输出。作检测用的控制电机有：直流测速发电机，交流测速发电机，控制式自整角电机和旋转变压器等。

由于控制电机在自动控制系统中是承作检测的信号元件和执行驱动的功率元件，在系统中起很重要的作用，所以控制电机必须满足以下要求：

（1）有高可靠性。在恶劣的环境下（如高空、高温、高湿、冲击、振动）能稳定工作，具有较高的可靠性，或较低的失效率。

（2）有高精度。信号元件的精度包括静态误差、动态误差，工作环境的温度变化，电源电压和频率变化引起的输出特性漂移；功率元件的精度包括工作特性的线性度和不灵敏区等。

（3）有快速响应。对信号元件和功率元件要具有较高的灵敏度和较低的机电时间常数，控制电机因有惯性，它对信号的响应能力远远低于同系统中的电子器件，因此控制电机的快速响应自动控制系统的运行质量是很重要的，它的机电时间常数是决定控制电机快速响应的重要因素。

第三节 控制电机与普通电机的关系

控制电机学是电机学的一门分支学科，它是在电机学的基础上发展起来的。研究控制电机必须熟悉一般电机的基本原理和结构，因此学习控制电机以前必须先学习一般电机原理。

控制电机是具有特殊用途的微型电机，它们在结构形式上与普通电机有所差别，同时在运行方式和性能要求方面都有其独特之处。尽管各种控制电机与普通电机有各自的结构形式和运行特性，但它们的基本结构和工作原理是共同的。对自动化专业的学生来说，学习控制电机的目的主要是使用和维护控制电机，并在设计自动控制系统装置时能选用控制电机。

根据自动化专业的要求，本课程要求学生重点掌握直流电动机、直流发电机和单相异

步电机的工作原理；熟悉伺服电动机和测速发电机的运行方式和工作特性；了解自整角电机、旋转变压器和步进电动机等的主要结构和使用方法。对于变压器，虽然不属于控制电机，但它是电机的一种类型，它的工作原理是电机学的基本理论之一，而且变压器在自动控制系统中是不可缺少的一种电器，所以必须熟悉变压器的基本原理和小型单相变压器的主要结构。

第四节 一般电机的分类

电机的种类很多，分类方法也有多种，根据工作方式、结构形式和用途可分类如下。

一、按能量转换分

发电机——机械能转换为电能；

电动机——电能转换为机械能；

变压器——一种电压电能转换为另一种电压电能。

二、按电流种类分

直流电机——电机外部电流的方向和大小不随时间变化；

交流电机——电机电流的大小和方向随时间周期性变化。

三、按用途分

一般电机——用于电力和动力系统，如汽轮发电机或水轮发电机，动力电动机和电力变压器等；

驱动微电机——用于驱动小型器具和仪器仪表装置、医疗器械、家用电器和电声设备（如录音、录像、放映和电唱等器械）；

控制微电机——用于自动控制系统，如伺服电动机、测速发电机、旋转变压器、自整角电机和步进电动机等。

四、按工作原理和转速与磁场的关系分

同步电机——主磁场用直流励磁或永久磁铁，转速与频率成正比、与旋转磁场同步并不随负载改变；

异步电机——转子电势和电流由感应产生，转速不与旋转磁场同步、并随负载大小改变。

五、按励磁方式分

永磁式——磁极用永久磁钢制成的；

电磁式——磁极用电流通过励磁绕组产生磁通形成的，也称为励磁式。

电磁式又可分为：

（1）他励式——励磁绕组与电枢绕组不连接，由独立的电源作为供给励磁电源；

（2）自励式——励磁绕组与电枢绕组相并联或串联，励磁电流和电枢电流共由一个电源供给。对直流发电机来说，励磁电流由自身发出的电枢电流供给。根据励磁绕组与电枢绕组的连接方式，又可分为并励式、串励式和复励式。

六、按绕组的相数分

单相电机——用作驱动微电机；

两相电机——用作控制微电机；

三相电机——用作动力电机；

多相电机——用作特种用途电机。

基 本 要 求

本章要求对控制电机和一般电机有基本的认识。了解控制电机在自动控制系统中的作用和各种控制电机的用途。对电机的分类有一般的了解。

一般电机是能量转换的电力机械，其中发电机是将机械能转变为电能；电动机是将电能转变为机械能；变压器是将一种电压的交流电能转变为另一种电压的交流电能。控制电机用在自动控制系统中，它是作信号转换的控制元件，其中测速发电机将转速信号转变为电压信号；伺服电动机、步进电动机将电信号转变为机械信号（如转速或位移）；自整角电机和旋转变压器将位置信号转变为电信号。

第二章 电磁与磁路的基本概念

·内 容 简 介

本章主要介绍磁导率的定义和导磁材料的分类；磁化曲线和磁滞回线；励磁电流与磁通的波形关系；磁路计算的基本公式与方法。

第一节 磁导率与导磁材料

不同的材料对磁的传导能力有强有弱。导磁能力强的材料，如铁、钴、镍和钨及其合金，称为磁性材料或铁磁性材料；除铁磁性材料以外的材料，导磁能力都很弱，则统称为非铁磁性材料，如铜、铝、木材、纸、油及空气等。

表示材料导磁强弱的能力称为磁导率，用 μ 表示。真空的磁导率用 μ_0 表示。磁导率的单位是亨/米，用H/m表示。磁导率可用下式表示：

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2-1)$$

式中 B ——磁感应强度，T；

H ——磁场强度，A/m。

在国际单位制中，真空磁导率

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (\text{H/m})$$

磁感应强度是表示磁场强弱和方向的物理量，通常简称为磁感应，其单位为特斯拉，简称特，用T表示。磁感应强度表示在每平方米的面积内垂直通过1 Wb（韦伯）的磁通，所以也可称为磁通密度，则

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (2-2)$$

式中 Φ ——磁通，Wb；

S ——面积，m²。

各种材料的磁导率不同，为了表明材料的导磁能力，在电工技术中常用材料的磁导率 μ 与真空磁导率 μ_0 的比值 μ/μ_0 表示，称为相对磁导率 μ_r 。

非铁磁性材料的磁导率与真空的磁导率相差不多，其相对磁导率 μ_r 近似等于1，在工程计算中将非铁磁性材料的相对磁导率 μ_r 以1计算。

在分析非铁磁性材料时，把磁导率 μ 大于真空磁导率 μ_0 ，即 $\mu_r > 1$ 的材料称为顺磁性材料，如空气、铝等；而把磁导率 μ 小于真空磁导率 μ_0 ，即 $\mu_r < 1$ 的材料称为反磁性材料，如水、铜等。表2-1给出了材料的相对磁导率。

从表2-1可看出，铁磁性材料的磁导率远大于真空磁导率，所以又称为强磁性材料。

非铁磁性材料的磁导率 μ 为常数，由式(2-1)可知，非铁磁性材料的磁感应强度 B 与

表 2-1

材料的相对磁导率

铁 磁 性 材 料		顺 磁 性 材 料		反 磁 性 材 料	
名 称	μ_r	名 称	μ_r	名 称	μ_r
铂	177	氮	1.0000013	铜	0.9999912
镍	300	氧	1.0000019	锌	0.999991
铸 铁	330	硬 橡 胶	1.000014	水	0.999991
铸 钢	1430	铝	1.000023	岩 盐	0.9999874
低 硅 钢	4000	空 气	1.000038	玻 璃	0.999987
纯 钢	4500	钨	1.000175	银	0.999981
高 硅 钢	7540	铂	1.00036	金	0.999963
钴铁合金(50:50)	7900	液 态 氧	1.0034	铋	0.999824
镍锰铁合金(67:5:28)	35000				
镍铬铁合金(78.5:3.8:17.7)	62000				
镍铬铜铁合金(76:2:5:17)	100000				
镍铁合金(78.5:21.5)	120000				
镍钼铁合金(79:5:10)	800000				

磁场强度 H 成正比，即其磁化曲线（ B - H 关系曲线）为直线。而铁磁性材料的磁导率 μ 不是常数，它的磁化曲线为曲线。

第二节 磁化与磁化曲线

使不带磁性的铁磁体变为带磁性，或使带磁体的磁性增强，这种作用称为磁化。当铁块接近磁铁或铁块放在通电流的线圈内都能产生磁化作用。

利用电流通过线圈产生的磁化作用，称为电磁化或励磁。本课程所研究的各种电机和变压器，是用电流通过绕组使铁芯受磁化产生磁通，将电流转变为磁通的磁化作用。

磁化作用的大小决定于磁势 F 和磁导率 μ 的大小。电磁线圈产生的磁势 F 等于线圈匝数 N 和通过的电流 I 的乘积，即

$$F = IN \quad (2-3)$$

在闭合磁路中，单位长度磁路上的磁势称为磁场强度，即

$$H = \frac{F}{l} \quad (2-4)$$

上二式中 I —— 励磁电流，A；

N —— 线圈匝数，匝；

l —— 铁芯磁路长度，m。

图2-1所示环形铁芯上线圈产生的磁势应为

$$F = IN = Hl \quad (2-5)$$

在电磁线圈的磁路中，磁感应强度 B 随磁场强度 H 的增强而增加。当磁导率 μ 为常数时， B 与 H 成正比，其关系曲线为直线，如图2-2中的直线1。对铁磁性材料，磁导率 μ 不是常数，根据实验得，铁磁性材料的 B - H 曲线的形状如图2-2中的曲线2。

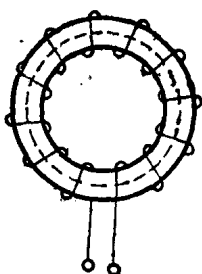


图 2-1 环形线圈磁路

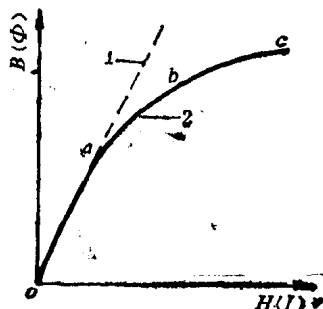


图 2-2 磁化曲线

1—线性；2—非线性

a—膝点；b—次饱和；c—饱和点

在均匀磁场中，磁路断面上的磁通密度 B 的分布均匀，沿磁路长度上的磁场强度分布均匀。根据式 (2-2) 和式 (2-5) 可知，在同一种材料的等断面的磁路中，磁通 Φ 与磁通密度 B 成正比；磁场强度 H 与励磁电流 I 成正比。因此，材料的磁化曲线也可表示它的磁通 Φ 与励磁电流 I 的关系。

一般铁磁性材料的磁化曲线如图 2-2 所示，在励磁电流 I （或磁场强度 H ）较小时，其磁通 Φ （或磁通密度 B ）与之成正比，曲线的 oa 段为直线。当励磁电流 I （或磁场强度 H ）增加到一定数量时，磁路中的磁通 Φ （或磁通密度 B ）的增长率将减慢，曲线开始向下弯曲，如曲线的 ab 段。开始弯曲的 a 点，称为膝点。当励磁电流（或磁场强度）再增加，则磁通（或磁通密度）的增长越来越慢，如曲线在 c 点以后，磁通（或磁通密度）的增长非常之少，这种现象称为磁路的饱和现象。接近饱和的 c 点称为饱和点，介于膝点 a 与饱和点 c 之间的 b 点称为次饱和点。

不同的导磁材料有不同的磁化曲线。为了便于设计电机与电器的铁芯，在电工技术手册中可查到常见电工用导磁材料的磁化曲线，如图 2-3 所示。根据磁场强度 H 可查得磁化曲线上相对应的磁通密度 B 。

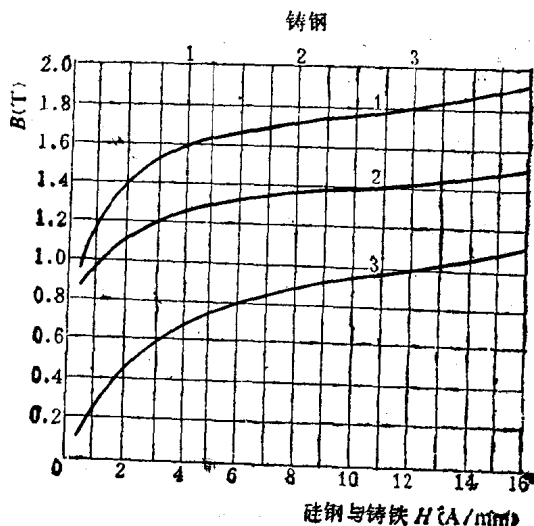


图 2-3 电工用导磁材料的磁化曲线

1—硅钢；2—铸钢；3—铸铁

第三节 磁滞回线

对铁磁性材料，当磁场强度 H 增加时，磁感应强度 B 将随着增加，这种现象称为磁化。当磁场强度减小或改变方向时，磁感应强度将相应减少，这种现象称为去磁。由于材料不同，磁化和去磁的关系也不同。本节将进一步分析铁磁性材料磁化和去磁时磁感应强度与磁场强度的关系曲线 $B=f(H)$ 。

如图2-4所示，铁磁性材料从磁场强度和磁感应强度都等于零时，开始逐渐增加磁场强度直至 H_a 时，则磁感应强度循磁化曲线 oa 上升至 B_a 。若磁场强度由 H_a 往回减少至零时，而磁感应强度也随着减小，可是不循原磁化曲线 oa 回来，而循去磁曲线 ab 下降至 B_r ，此时磁场强度降到零时，磁感应强度则不等于零，而为 B_r ， B_r 称为剩余磁感应强度，简称剩磁。如果要将剩磁 B_r 去掉，必须向相反方向增加磁场强度至 $-H_c$ 。去掉剩磁所加的反向磁场强度 $-H_c$ 称为矫顽磁场强度或矫顽力。当磁场强度继续向反方向增加至 $-H_a$ 时，磁感应强度也将循反向磁化曲线 cd 增加至 $-B_a$ 。当磁场强度从 $-H_a$ 减小至零时，磁感应强度又循反向去磁曲线 de 减小，仍余留反向剩磁 $-B_r$ 。当磁场强度再增加至 H_c 时，反向剩磁 $-B_r$ 被消除。若磁场强度继续增加至 H_a 时，磁感应强度将沿正向磁化曲线 fa 上升至 B_a 。至此，磁场强度 H 正负变化一周，磁感应强度与磁场强度的关系曲线 $B=f(H)$ 将形成一个闭合曲线，称为磁滞回线。从磁滞回线上可看出，磁感应强度的变化滞后于磁场强度的变

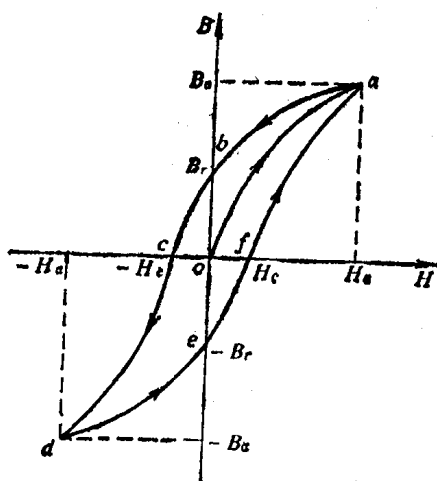


图 2-4 磁滞回线
 H_c —矫顽磁场强度； B_r —剩磁通密度

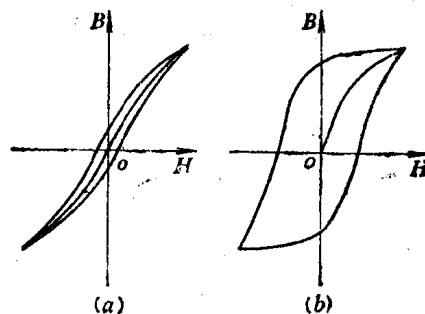


图 2-5 不同材料的磁滞回线
(a)软磁性；(b)硬磁性

化，这种现象称为磁滞。

由此可见，铁磁性材料在交变磁场中，将产生磁滞作用。磁滞作用的大小由材料的性质决定。磁滞作用大的材料，磁滞回线宽，其剩磁多、矫顽力大；磁滞作用小的材料，其磁滞回线较窄，则剩磁和矫顽力都较小，不同材料的磁滞回线如图2-5所示。

磁滞回线狭窄的材料称为软磁性材料，如电工钢（硅钢）；磁滞回线宽的材料称为硬

磁性材料，如铝镍钴合金钢。软磁性材料磁化容易，去磁也容易，磁滞损耗小，适宜作交流电机与电器的铁芯。硬磁性材料的剩磁大，能长时间保持磁性，可做永久磁铁，由于硬磁性材料的矫顽力较大，磁滞损耗大，不宜作交流电器的铁芯。

产生磁滞现象的原因，可认为铁磁性材料内部由无数磁畴（铁磁性材料内的磁分子）组成。当外磁场改变时，其内部磁畴分子的排列也随着改变。磁畴分子变换位置时相互间产生阻尼，这种阻尼便引起磁滞现象。由于各种材料内部分子的结构不同，其阻尼和磁滞的作用也不同。

第四节 铁 芯 损 耗

铁磁体在交变磁场中，铁芯将发热，并将交变的电磁能转变为热能散失到介质中，消耗功率，这称为铁芯损耗。引起铁芯损耗的原因有磁滞损耗和涡流损耗。

一、磁滞损耗

从上一节中已知产生磁滞现象的原因是假设铁磁性材料中存在无数磁畴分子，每个磁畴分子好象一块微小的磁铁，如图2-6所示。在未磁化时，铁块中磁畴的排列无规律，见图2-6(a)，各磁畴的极性相互抵消，显出无磁性状态；当铁块受磁化时，各磁畴的排列整齐，见图2-6(b)，铁块呈现带磁性状态。

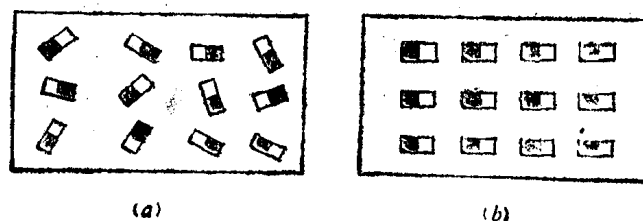


图 2-6 磁畴示意图

(a)未磁化；(b)已磁化

在交变磁场中，磁畴随着磁场的变化改变排列的方向，磁畴分子之间产生摩擦，引起铁芯发热和功率的损耗。这种损耗就是磁滞损耗。

二、涡流损耗

涡流损耗是指铁磁体在交变磁场中，铁芯横断面所产生的环流引起的铁芯发热和功率损耗。

据法拉第电磁定律和楞次定律：当交变磁通 ϕ 穿越线匝时，将在线匝内产生感应电势

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

当线匝闭合时，则在线匝内产生环流，如图2-7所示。

依这道理，整块铁芯的断面相当于由无数个线匝构成，当交变磁通 ϕ 通过铁芯时，将在铁芯断面上产生环流 i ，如图2-8所示。这环绕铁芯断面的电流称为涡流。

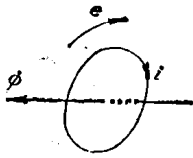


图 2-7 线匝环流
Φ—交变磁通；i—涡流

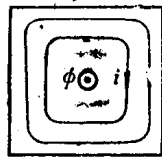


图 2-8 铁芯涡流
Φ—交变磁通；i—涡流

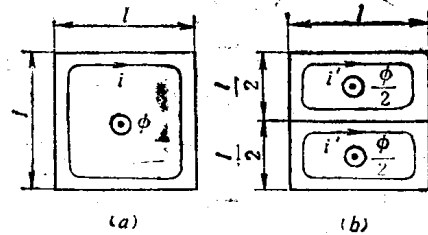


图 2-9 涡流比较
(a)整块铁芯；(b)两块叠成铁芯

由于铁芯有电阻，涡流将在铁芯中发热并消耗功率。这部分功率的来源是：交流电流流过电机或电器的绕组产生交变磁场，交变磁场在铁芯中产生涡流，涡流在铁芯中产生热能散失掉，功率是由交流电源供给的。涡流产生的热能与涡流的平方和电阻的乘积成正比。

可见，涡流越大，将损耗越多的电源电能。要降低损耗必须减少涡流，而减少涡流应设法增加铁芯断面的电阻。减少涡流的办法有：

- (1) 选用电阻率较高的导磁材料，如硅钢；
- (2) 采用叠片法用薄钢片两面涂漆，以增加断面回路的电阻。

现分析采用叠片的铁芯减少涡流的原理。图2-9(a)所示为整块的正方形断面铁芯，图2-9(b)为两个半块叠成的铁芯，两块铁芯之间涂有绝缘漆。

铁芯的电阻与铁芯断面的周长 L 成正比，与断面的面积 S 成反比。如图2-9(a)所示，整块铁芯断面的周长为 $L=4l$ ，断面积为 S ；如图2-9(b)所示，每半块铁芯断面的周长为 $L=3l$ ，断面积为 $S/2$ 。所以每半块铁芯涡流的电阻 R' 为整块铁芯涡流电阻 R 的3/2，即

$$R' = \frac{3}{2} R \quad (2-6)$$

设整块铁芯通过的交变磁通为 Φ ，而每半块铁芯的磁通为 $\Phi/2$ ，则在整块和半块铁芯断面上产生的感应电势应分别为

$$\left. \begin{aligned} e &= \frac{d\Phi}{dt} \\ e' &= \frac{1}{2} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{e}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

在各断面上产生的涡流应分别为

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{e}{R} \\ i' &= \frac{e'}{R'} = \frac{e}{2} \cdot \frac{2}{3R} = \frac{1}{3} i \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

由此可得在整铁芯和两个半块铁芯的断面上产生的涡流损耗分别为

$$\left. \begin{aligned} p_s &= i^2 R \\ p'_s &= 2i'^2 R' = 2\left(\frac{i}{3}\right)^2 \cdot \frac{3}{2} R \\ &= \frac{1}{3} i^2 R = \frac{1}{3} p_s \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

可见，将整块的铁芯分成两半后，其总涡流损耗 p'_s 仅为原损耗 p_s 的1/3左右。因此采用叠片叠装成的铁芯可以减少涡流损耗。叠片越薄，涡流损耗减少就越多。交流电机和变压器的铁芯采用0.3~0.5mm厚的硅钢片。

由于硅钢含碳少，磁滞回线较窄，具有较好的软磁特性，且磁导率高、电阻率大，同时具有高导磁能力和低导电性能，所以硅钢是作铁芯的良好材料。采用硅钢片做交流电机的铁芯可以减少磁滞损耗和涡流损耗。用优质硅钢片做的铁芯，磁通密度可取得较高，从而使电机的尺寸缩小，并可提高能量转换的效率。

三、铁芯损耗

铁芯产生的磁滞损耗 p_h 和涡流损耗 p_s ，合称为铁芯损耗 p_{fe} ，简称铁损耗，单位为瓦特，简称瓦，用符号W表示。磁滞损耗和涡流损耗都随电源频率 f 和铁芯的磁通密度 B 增加而增加，在工程设计中，通常采用下列近似公式计算。

$$p_h = \sigma_h \frac{f}{100} B^\alpha G \quad (2-10)$$

$$p_s = \sigma_s \left(\frac{f}{100} B \right)^2 G \quad (2-11)$$

上二式中 f —— 电流的频率，Hz；

B —— 最大磁通密度，T；

G —— 铁芯重量，kg；

σ_h —— 磁滞系数，由材料和几何尺寸决定；

σ_s —— 涡流系数，由材料和几何尺寸决定；

α —— 由材料性质决定，一般硅钢取1.6，当 $B=1.0\sim1.6$ T时取2。

铁芯损耗为

$$p_{fe} = p_h + p_s \quad (2-12)$$

对于变压器而言，由于其空载时的电流比额定电流小得多，空载时的铜损耗 p_{cu} 很小，可忽略不计，故可认为其空载损耗 p_0 即为铁芯损耗。而旋转电机的空载损耗，除铁损耗外，还要加上机械损耗 p_m （包括摩擦损耗和风阻损耗）。

第五节 磁 路

磁通形成的闭合路径称为磁路。磁路主要是由铁磁性材料构成。一个磁回路中可有不等断面和不同的材料（如空气隙）。磁路和电路一样既有不分支的，也有分支的，如图2-10所示。图2-10(a)所示为等断面无分支的磁路；图2-10(b)所示为不等断面有分支的磁路；图2-10(c)所示为有气隙和分支的磁路铁芯。