



普通高等教育“十二五”规划教材

# 电机与拖动基础

## (第三版)

刘启新 主 编

张丽华 祁增慧 副主编

- ★ 配套教学课件
- ★ 荣获2007-2009年度电力行业精品教材



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

# 电机与拖动基础

(第三版)

主 编 刘启新

副主编 张丽华 祁增慧

编 写 康宜平 盛国良

主 审 邵群涛



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书包括电机原理和电力拖动两大部分，主要内容有直流电机的结构及原理、直流电动机的电力拖动运行、变压器的结构及原理、三相异步电动机的基本原理、三相异步电动机的电力拖动运行、常用同步电动机和其他电机的原理。本书在内容的选择上突出了应用型本科人才培养的需求，遵循以应用为主、够用为度的原则，弱化了电机原理部分，突出了拖动部分的分析。为了便于自学，本书每章有小结，并且有大量的例题和习题，书后附有习题答案。

本书主要作为普通高等学校自动化、电气工程及其自动化等相关专业的本科教材，也可以作为高职高专及函授教材和工程技术人员的参考用书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动基础/刘启新主编. —3 版. —北京: 中国电力出版社, 2011.12

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2543 - 2

I. ①电... II. ①刘... 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 (2011) 第 278138 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2005 年 6 月第一版

2012 年 2 月第三版 2012 年 2 月北京第十次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 421 千字

定价 30.00 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前 言

本书在2007年第二版的基础上进行修订,针对目前应用型本科院校学生的基础状况,在绪论中增加了与电机拖动密切相关的基础知识,全电流定律、电磁感应定律、电磁力定律及电磁场的相关概念,帮助同学更好地理解本课程的内容。针对目前直流发电机的应用越来越少的实际状况,第一章直流电机的内容做了较大的改动,弱化了对直流发电机的讲述。由于直流无刷电动机在工业和民用生活中的广泛应用,增加了直流无刷电动机的应用实例。为了使课堂教学能跟上电机发展的步伐,在其他电机里增加了超声波电机的内容。虽然今天超声波电机的研究应用在我国还处于起步阶段,但通过产学研的共同努力,超声波电机技术一定会得到快速的发展和应用,因此需要让学生对这项新的技术有一定的认知。

本书由刘启新任主编,张丽华、祁增慧任副主编。书中第一、二章由张丽华编写,第三章由祁增慧编写,第四章由康宜平编写,绪论及第五章由刘启新编写,第六章由刘启新、盛国良编写,第七章由祁增慧、盛国良编写。全书由刘启新统稿。

由于编者水平有限,对书中存在的错误和不当之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2011年12月

## 第三版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

电机与拖动基础是自动化类专业的主干课程之一,是实践性较强的课程,在人才培养过程中起着非常重要的作用。根据培养应用型人才的宗旨和培养学生的应用能力为本的要求,本书编写人员经过讨论后确定了编写大纲,以认真严谨的态度编写了本书。本书适合四年制应用型本科学校选用,也适用于专科和函授教学,并可供有关技术人员参考。

电机与拖动基础是由电机学、控制电机和电力拖动基础等课程组成,内容丰富,涉及面广。既有传统的电机,又涉及新型电机;既包括电机的基本原理,又有电机在应用中的具体特性。本书在编写过程中,根据应用型本科人才培养的特点和要求,在内容的选择和问题的阐述方面做了如下一些探索。

(1) 精选内容。21世纪应用型本科人才培养,侧重于基础厚、知识宽、能力强、素质高,特别是随着生产技术的更新,就需要高层次的应用型人才。这就要求教学内容必须改革,而教材内容必须反映当代科学技术的发展和知识的更新。因此在本书中,我们选择了与当前应用密切相关的内容,加大了直流无刷电动机的介绍,增加了直线电机内容。

(2) 重点突出。21世纪技术发展对人才大规模的需求,带来了高校大幅度的扩招,使得教育对象发生了较大的变化。高等教育已由精英教育向大众教育转变,但由于学生的基础知识水平参差不齐,若仍沿用原来的教材,则学生的学习难度较大,因此,更新教材的知识结构变得特别迫切。本书删除了一些繁琐的理论推导,重点于电动机的拖动分析和变压器的应用,使重点内容一目了然。

(3) 通俗易懂,实用性强。本书的所有参编人员都是在一线教学的教师,有着丰富的教学经验。在教材编写过程中,借鉴于多年积累的教学经验,将不易理解的知识变为易于接受的方式叙述,既化解了知识难点,又增强了教材实用性。而且,本书所选内容和例题尽量联系生产实际,以提高实用价值。

(4) 精选习题。本书所选习题突出了重点知识内容,少而精,并附有答案,与知识内容相得益彰。

本书的编排特点有:①每章结束部分都有小结,用来概括本章内容,指出本章的重点;②本书包含了大量的例题,并有完整的解答,帮助理解所学内容;③每章末都安排了习题,并附有标准答案,帮助学生判断解题结果。

本书中标“\*”的内容,根据各院校人才培养的具体要求,可以不作要求。

本书由刘启新任主编,张丽华、祁增慧任副主编。书中第一、二章由张丽华编写,第三、七章由祁增慧编写,第四章由康宜平编写,绪论及第五、六章由刘启新编写。全书由刘

启新统稿。

全书由南京工程学院邵群涛教授主审。邵群涛教授对本书进行了认真审阅并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，对书中存在的错误和不当之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2007年1月



## 符 号 说 明

A	面积；A相	$f_1$	定子频率
a	绕组并联支路数；a相； $120^\circ$ 复数算子	$f_2$	转子频率
B	磁通密度；B相	$f_N$	额定频率
b	宽度；b相	$f_v$	$v$ 次谐波频率
d	直轴（纵轴）	$H$	磁场强度
C	C相	$h$	高度
$C_T$	转矩系数	$I$	电流
$C_e$	电动势系数	$I_a$	直流电机电枢电流
c	c相	$I_f$	直流电机励磁电流
$D_1$	定子直径	$I_\mu$	励磁电流中的磁化分量
$D_a$	转子直径	$I_N$	额定电流
$E$	电动势	$I_{sh}$	短路电流；堵转电流
$E_{ph}$	相电动势	$I_{st}$	起动电流
$E_0$	空载电动势	$I_0$	空载电流
$E_1$	变压器一次绕组（异步电动机定子绕组）感应电动势的有效值	$i_0$	空载电流瞬时值
$E_2$	变压器二次绕组（异步电动机转子绕组）感应电动势的有效值	$I_1$	变压器一次绕组（异步电动机定子）电流
$E'_2$	$E_2$ 的折算值	$I_2$	变压器二次绕组（异步电动机转子）电流
$E_V$	切割电动势	$I'_2$	$I_2$ 的折算值
$E_{\sigma 1}$	一次侧漏感电动势	$I_{Fe}$	铁损耗电流
$E_{\sigma 2}$	二次侧漏感电动势	$I^*$	电流标么值
$e$	电动势的瞬时值	$I_+$	电流的正序分量
$F$	磁通势；力	$I_-$	电流的负序分量
$F_a$	电枢磁通势	$i$	电流的瞬时值
$F_1$	一次绕组所产生的磁通势	$J$	转动惯量
$F_2$	二次绕组所产生的磁通势	$j$	电流密度
$F_0$	空载磁通势	$K$	换相片数
$F_d$	直轴磁通势	$K_m$	最大转矩与额定转矩之比
$F_q$	交轴磁通势	$K_{st}$	起动转矩与额定转矩之比
$F_m$	异步电动机的励磁磁通势	$k$	常数；变压器电压比
$F_{\phi 1}$	单相绕组的基波磁通势	$k_e$	电动势比
$F_{q1}$	$q$ 个线圈的基波合成磁通势	$k_i$	电流比
$f$	频率；力；磁通势的瞬时值	$k_{p1}$	基波短矩系数

$k_{w1}$	基波绕组系数	$R_{sh}$	变压器（异步电机）的短路电阻
$L$	电感	$S$	视在功率
$L_{a1}$	变压器一次绕组（异步电动机定子绕组）的漏磁电感	$S_N$	额定容量
$L_{a2}$	变压器二次绕组（异步电动机转子绕组）的漏磁电感	$s$	转差率
$l$	长度	$s_N$	额定转差率
$m$	相数	$s_m$	临界转差率
$m_1$	交流电机定子相数	$s_+$	转子对正序旋转磁场的转差率
$m_2$	异步电机转子相数	$s_-$	转子对负序旋转磁场的转差率
$N$	每相绕组匝数	$T$	转矩；时间常数；周期
$N_c$	每个线圈的匝数	$T_a$	电枢时间常数
$n$	转子转速	$T_N$	额定转矩
$n_0$	空载转速	$T_0$	空载转矩
$\Delta n$	转速调整率	$T_{em}$	电磁转矩
$P$	功率	$T_m$	最大转矩；机电时间常数
$P_N$	额定功率	$T_{st}$	起动转矩
$P_1$	输入功率	$T_2$	输出转矩
$P_2$	输出功率	$t$	时间；温度
$p_0$	空载损耗	$U$	电压
$P_{em}$	电磁功率	$U_N$	额定电压
$P_m$	机械功率	$U_+$	正序电压
$p_{sh}$	短路损耗	$U_-$	负序电压
$p$	极对数	$U_0$	空载电压
$p_{Cu}$	铜损耗	$U_{sh}$	短路电压；堵转电压
$p_{Fe}$	铁损耗	$u$	电压的瞬时值
$p_{ad}$	附加损耗	$\Delta u$	电压调整率
$p_m$	机械损耗	$2\Delta u_b$	每对电刷的电压降
$q$	每极每相槽数	$U_{20}$	变压器二次侧空载电压
$q$	交轴（横轴）	$u_{sh}$	短路电压百分值
$R$	电阻	$U^*$	电压标么值
$R_m$	励磁电阻	$U_2$	变压器二次侧电压
$R_1$	变压器一次绕组（异步电动机定子绕组）电阻	$U'_2$	变压器二次侧电压折算值
$R_2$	变压器二次绕组（异步电动机转子绕组）电阻	$v$	线速度
$R'_2$	$R_2$ 的折算值	$v_0$	同步线速度
$R_f$	励磁绕组电阻	$W$	功；能
$R_a$	电枢电阻	$X$	电抗
		$X_+$	正序电抗
		$X_-$	负序电抗
		$X_d$	直轴同步电抗
		$X_q$	交轴同步电抗



$X_m$	励磁电抗	$Z'_L$	负载阻抗折算值
$X_{\sigma 1}$	变压器一次绕组（异步电动机定子绕组）漏电抗	$\delta$	气隙
$X_{\sigma 2}$	变压器二次绕组（异步电动机转子绕组）漏电抗	$\eta$	效率
$X'_{\sigma 2}$	$X_{\sigma 2}$ 的折算值	$\eta_N$	额定效率
$y$	绕组合成节矩	$\eta_{\max}$	最大效率
$y_1$	第一节矩	$\phi$	主磁通瞬时值
$y_2$	第二节矩	$\Phi$	磁通量
$y_k$	换向器节矩	$\Phi_0$	空载磁通
$Z$	阻抗；电枢总导体数	$\Phi_d$	直轴磁通
$Z_m$	励磁阻抗	$\Phi_q$	交轴磁通
$Z_{sh}$	短路阻抗	$\Phi_m$	变压器或异步电动机的主磁通
$Z_1$	变压器一次绕组（异步电动机定子绕组）漏阻抗	$\varphi$	相角；功率因数角
$Z_2$	变压器二次绕组（异步电动机转子绕组）漏阻抗	$\varphi_0$	空载功率因数角
$Z^*$	阻抗标么值	$\varphi_{sh}$	短路功率因数角
$Z'_2$	变压器二次侧阻抗折算值	$\Omega$	机械角速度
$Z_L$	负载阻抗	$\Omega_0$	同步机械角速度
		$\omega$	角频率；电角速度
		$\Delta\delta_x \%$	线性误差
		$\tau$	极距

# 目 录

前言	
第二版前言	
符号说明	
绪论	1
<b>第一章 直流电机</b>	<b>8</b>
第一节 直流电机的工作原理	8
第二节 直流电机的结构	12
第三节 直流电机的磁场	20
第四节 直流电机感应电动势和电磁转矩的计算	26
第五节 直流电动机的运行原理	28
第六节 直流发电机的运行原理	36
* 第七节 直流测速发电机	42
本章小结	48
习题	49
<b>第二章 直流电动机的电力拖动运行</b>	<b>51</b>
第一节 电力拖动系统的运动方程	51
第二节 电力拖动系统的负载转矩特性	53
第三节 他励直流电动机的机械特性	55
第四节 他励直流电动机的起动	63
第五节 他励直流电动机的制动	70
第六节 他励直流电动机的调速	77
本章小结	87
习题	88
<b>第三章 变压器</b>	<b>90</b>
第一节 变压器的工作原理和结构	90
第二节 单相变压器的空载运行	93
第三节 单相变压器的负载运行	99
第四节 变压器的运行特性	107
第五节 三相变压器	111
第六节 自耦变压器和仪用互感器	118
* 第七节 旋转变压器	120
本章小结	128
习题	129

<b>第四章 三相异步电动机的基本原理</b> .....	132
第一节 三相异步电动机的基本原理.....	132
第二节 三相异步电动机的定子磁场及感应电动势.....	139
第三节 三相异步电动机的运行原理.....	148
第四节 三相异步电动机的功率和电磁转矩.....	159
第五节 三相异步电动机的工作特性.....	162
本章小结.....	164
习题.....	165
<b>第五章 三相异步电动机的电力拖动运行</b> .....	168
第一节 三相异步电动机的机械特性.....	168
第二节 三相异步电动机的起动.....	176
第三节 三相异步电动机的制动.....	186
第四节 三相异步电动机的调速.....	194
本章小结.....	207
习题.....	207
<b>* 第六章 常用同步电动机</b> .....	210
第一节 同步电动机的工作原理.....	210
第二节 三相永磁同步电动机—无刷直流电动机.....	215
第三节 磁阻电动机.....	228
第四节 步进电动机.....	230
本章小结.....	243
习题.....	243
<b>第七章 其他电机</b> .....	245
第一节 单相异步电动机.....	245
* 第二节 交流测速发电机.....	250
* 第三节 直线电机.....	254
* 第四节 超声波电动机.....	257
本章小结.....	259
习题.....	260
<b>参考答案</b> .....	261
<b>参考文献</b> .....	264

## 绪 论

电机与拖动基础包括电机学、控制电机和电力拖动(电气传动)基础三门课程的主要内容。

电机是能量转换与能量传递的装置,包括发电机、变压器和电动机等;控制电机是信号转换和信号传递的装置;电力拖动就是电动机加负载,即用电动机作为原动机来拖动生产机械的工作机构。

### 一、学习本课程的目的及意义

电机是机电一体化中机和电的结合部位,是机电一体化的一个很重要的基础,可称为电气化、自动化的心脏。电机的发展与电能的发展紧密地连在一起。电能是现今社会最主要的能源,是现代工农业生产、交通运输、科学技术和日常生活等各方面最常用的一种能源。电机是与电能的生产、传输和使用相关的最重要的能量转换设备,不仅是工业、农业和交通运输业的重要设备,而且在日常生活中包括各类家电在内的应用也愈来愈广泛。

电机、变压器是电力工业的主要设备。在发电厂,发电机将热力、水力、化学能、核能、风力、太阳能等转换为电能;在电能远距离传输前,升压变压器把大型发电机发出的低电压的交流电转换成高电压的交流电;而在供给用户使用前,来自高压输电网的电能经过降压变压器降压后再供给用户才能安全使用。变压器在经济地传输和分配电能过程中起了很大的作用。因此,在电能的生产、传输和分配过程中,发电机和变压器起着重要的作用。

而在电能的应用中,电动机起着关键的作用。在机械工业、冶金工业、化学工业、交通运输及日常生活等方面,电动机将电能转换成机械能,为各种工作机械提供动力。电力拖动系统容易控制,能够获得控制系统所需的各种静态特性和动态特性,具有良好的起动、制动性能和较宽的调速范围,特别是便于实现自动控制,所以当今多数自动控制系统都采用电动机作为原动机。随着新型电机、大功率半导体器件、大规模集成电路的发展和计算机技术的应用,电力拖动系统的品种、质量和性能都有了进一步的提高,以全数字式的三相永磁同步电动机伺服系统、三相异步电动机伺服系统和直流电动机伺服系统为代表的新型电力拖动系统的出现,带动了数控机床、工业机器人、交通运输、航空航天及家用电器等的一系列高质量、高性能、以电力来拖动的机电一体化高科技产品的迅速发展。随着科学技术的发展,工业、农业、国防等各部门都要求有性能更好的新型电机及电力拖动系统,以满足各种不同的要求。

因此,学习本课程是我们更好地使用、开发电机应用的需要,具有非常重要的意义。

### 二、本课程的性质

本课程是电子信息类学科自动化专业和非电机专业、电气工程及其自动化专业及以电为主的机电一体化专业的一门重要专业基础课,对应用型技术人才的培养起着重要的作用。加强电机在自动控制系统中的应用能力是本课程的主要任务之一。随着电力电子学、计算机和自动控制理论的发展及交流电机调速等控制技术的普及,电机在机电一体化工业中的作用更显重要,可以说无先进的电机控制及电力拖动系统,就不可能有当今机电一体化的高科技工业。

### 三、本课程的任务

本课程主要分析研究电机与电力拖动的基本规律,同时从工作机械的运行要求出发,分析研究电动机运行的基本规律、常用控制电机的应用等问题。课程基本任务是要熟悉常用的直流发电机,交、直流电动机,变压器及控制电机的基本结构、运行原理、运行特性及应用;掌握交、直流电动机的机械特性,调速原理及起动、制动方法;具备使用电力拖动系统中电动机所必需的基本知识和能力;了解电机与电力拖动今后发展的方向,为学习自动控制系统或伺服系统、工厂电气控制技术、PLC控制及工厂供电等课程准备必要的基础知识。

### 四、本课程的学习方法

由于电机及拖动基础课程包含的内容较多,而我们的课堂学习时间不可能很多,因此必须有一个良好的学习方法,才能学好这门课。这里提供几点学习方法供参考。

#### 1. 掌握分析问题的方法

在本课程中,所涉及的电机的类型较多,电力拖动也有直流拖动和交流拖动之分。如果将每一种电机,每一种拖动系统都作为一个独立的、新的内容来学,就会感觉到学习任务太重。如果我们在学习过程中能够掌握研究问题的方法,找出各类电机及各种拖动系统的共性及个性,就会使学习轻松,应用自如。例如三相异步电动机原理的分析与变压器的分析过程类似,而最后的数学模型也差不多,只要掌握了分析问题的方法,就可较容易地掌握这两部分的内容。交流电动机的拖动与直流电动机一样,都是分析其机械特性、调速原理、起动方法和制动方法,故两种电动机的分析有很多雷同之处,只要加以对比就可以掌握其规律,轻松掌握拖动的所有内容。

#### 2. 理解公式所表达的物理概念

本课程的公式较多,如果单独记忆不同公式所表达的各物理量之间的数量关系,这确实不是一件容易的事,但理解了公式所表达的物理概念,记忆起来就容易多了。如直流电机的感应电动势公式  $E_a = C_e \Phi n$ ,电磁转矩公式  $T_{em} = C_T \Phi I_a$ ,这两个公式看起来很简单,暂时记忆也较容易,但时间长了很容易混淆。如果理解了公式所表示的物理意义:感应电动势是导体在磁场中切割磁力线所产生的,必然与磁场和切割速度成正比;电磁转矩是因载流导体在磁场的作用下所产生的,其大小必定与磁场的强弱和电流的大小成正比。这样就很容易记住公式各物理量以及它们之间的相互关系了。

#### 3. 掌握重点

对自动化、电气工程及其自动化、机电一体化等专业的同学来说,学习本课程的目的是为了正确地使用电机,且为设计、研制或使用电力拖动系统服务。因此在学习过程中,要从应用电机的角度出发,着眼于电机运行的特性,要将重点放在电机的机械特性与负载的转矩特性的配合上,以及电动机起动、制动、调速的方法和原理上,为今后分析和使用电力拖动系统打下良好基础。而对电机的工作原理以够用为度,对电机内部结构只要一般了解就行了。总之要学会抓重点,不能因小失大。

学习电机及拖动基础还要注意其专业基础课的特点,既要基础理论,又要结合工程实际的综合应用,只有结合工程实际、综合应用基础理论才能真正学好本课程。

### 五、电机与拖动常用的电磁概念与定律

#### (一) 磁场的几个常用物理量

在电机与拖动中,机电能量转换的媒介是磁场,磁场的路径称为磁路,因此磁场或磁路

是电机的重要内容。而磁场通常比较抽象，不太容易掌握，在工程实际中，通常将磁场问题简化为磁路问题。

在永磁体及通电导线周围存在磁场，表征磁场的大小或强弱可以用以下的物理量表示。

(1) 磁感应强度（又称磁通密度） $B$ ：表征磁场强弱及方向的物理量，单位为  $\text{Wb}/\text{m}^2$ 。

磁感应强度描述的只是空间每一点的磁场，若要表示一个给定面积的磁场，则用磁通量。

(2) 磁通量  $\Phi$ ：垂直穿过某截面积的磁力线总和，单位为  $\text{Wb}$ 。

$$\Phi = BA$$

从上式可以看出，在均匀磁场中，单位面积内的磁通量称为磁感应强度，又称磁通密度。

(3) 磁场强度  $H$ ：计算磁场时引用的物理量，单位为  $\text{A}/\text{m}$ 。

$$H = \frac{B}{\mu}$$

式中  $\mu$  —— 磁导率。

真空中的磁导率  $\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7} \text{H}/\text{m}$ ， $\mu = \mu_r \mu_0$ 。 $\mu_r$  为导磁介质的相对磁导率。非铁磁材料的相对磁导率近似为 1。

(4) 磁通势  $F$ ：电机与拖动中特别引进的新物理量。其与磁场强度的关系为

$$F = Hl$$

## (二) 磁路的概念

磁通所通过的路径称为磁路，如图 0-1 所示。一个简单的磁路由采用高导磁材料的铁心和通电线圈组成，若忽略线圈漏磁通，由通电线圈产生的磁场将主要分布在铁心内部。

## (三) 磁路的基本定律

### 1. 安培环路定律——全电流定律

凡有电流流动的导体的周围均会产生磁场，即“电动生磁”。由载流导体产生的磁场大小可用磁场强度  $H$  来表示，磁力线的方向与电流的方向满足右手螺旋关系。如图 0-2 所示，假定在一根导体中通以电流  $i$ ，则在导体周围空间的某一平面上产生的磁场强度  $H$  为

$$\oint_L H dl = \sum i$$

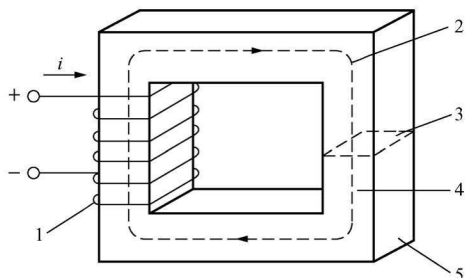


图 0-1 简单磁路示意图

1—线圈；2—磁力线；3—横截面积  $A$ ；

4—平均铁心长度  $l$ ；5—铁心磁导率

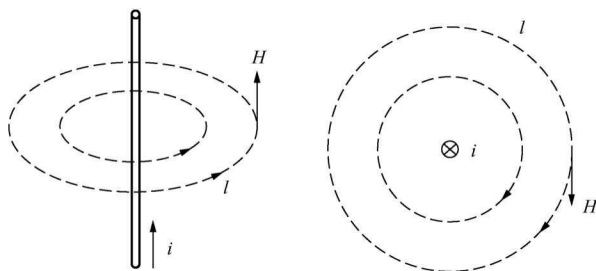


图 0-2 电流方向与磁力线方向的关系

如果载流导体是匝数为  $N$  的线圈 (见图 0-3), 在均匀磁场中, 沿着回线  $l$  处磁场强度  $H$  处处相等, 则

$$Hl = Ni = F$$

### 2. 磁路的欧姆定律

磁通密度等于磁场强度乘以磁导率, 即

$$B = \mu H = \mu \frac{NI}{l}$$

磁通量  $\Phi$  等于磁通密度乘以面积, 即

$$\Phi = \int B dA = BA = NI \frac{\mu A}{l}$$

令

$$R_m = \frac{l}{\mu A}$$

则磁通可以改写成

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu A}} = \frac{NI}{R_m} = \frac{F}{R_m}$$

上式形式与电路的欧姆定律相似, 故称为磁路的欧姆定律。

### 3. 磁路的基尔霍夫定律

由物理学的磁通连续性原理可知, 磁力线是没有起止的闭合回线。根据这个原理, 传入任何一闭合面的磁通必然等于穿出该闭合面的磁通, 对图 0-4 所示的磁通, 必然有

$$-\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 = 0, \sum \dot{\Phi} = 0$$

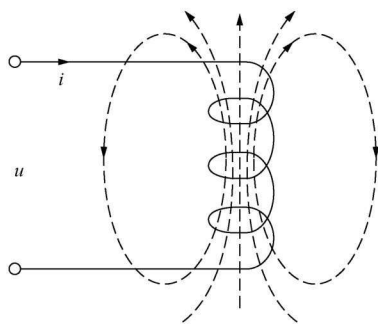


图 0-3  $N$  匝线圈电流与磁力线的关系

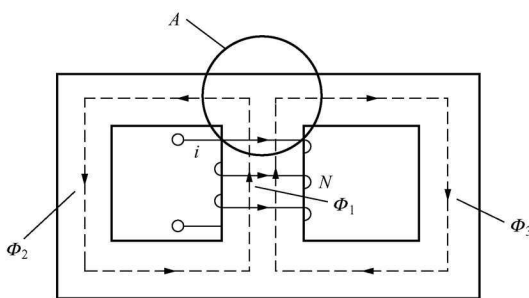


图 0-4 铁心中磁通的关系

磁路和电路有相似之处, 却要注意有以下几点差别:

(1) 电路中有电流  $I$  时, 就有功率损耗; 而在直流磁路中, 维持一定磁通量, 铁心中没有功率损耗。

(2) 电路中的电流全部在导线中流动; 而在磁路中, 总有一部分漏磁通。

(3) 电路中导体的电阻率在一定的温度下是恒定的; 而磁路中铁心的磁导率随着饱和程度而有所变化。

(4) 对于线性电路, 计算时可以用叠加原理; 而在磁路中,  $B$  和  $H$  之间的关系为非线性, 因此计算时不可以用叠加原理。



#### 4. 电磁力定律

载流导体在磁场中会受到电磁力的作用。当磁场和导体方向相互垂直时，载流导体所受的电磁力为

$$f = Bil$$

式中  $B$ ——磁场的磁感应强度， $\text{Wb}/\text{m}^2$ ；

$i$ ——导体中的电流， $\text{A}$ ；

$l$ ——导体的有效长度， $\text{m}$ 。

电磁力的方向由左手定则确定，图 0-5 表示了  $f$ 、 $B$  与  $i$  三者之间的方向关系。

#### 5. 电磁感应定律

(1) 导体在交变磁场中的变压器电动势。1831 年，法拉第通过实验发现了电磁学中最重要规律——电磁感应定律，揭示了磁通与电压之间存在如下关系：

1) 如果在闭合磁路中磁通随时间而变化，那么将在线圈中感应出电动势。

2) 感应电动势的大小与磁通的变化率成正比，即

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

感应电动势的方向与产生它的磁通正方向之间符合右手螺旋定则。法拉第电磁感应定律奠定了电机学的理论基础。

(2) 导体在静止磁场中的切割感应电动势。磁场的变化会在导体中产生感应电动势。如果磁场静止不变，而让导体在磁场中运动，相对于导体来说，磁场仍是变化的，因此根据法拉第电磁感应定律，同样会在导体中产生感应电动势，其大小为

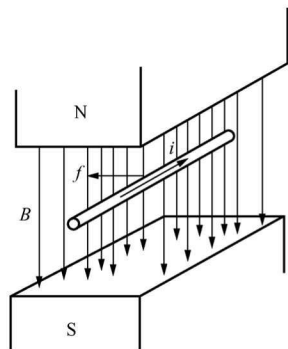
$$e = Blv$$

式中  $B$ ——磁场的磁感应强度， $\text{Wb}/\text{m}^2$ ；

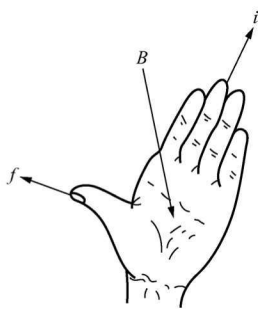
$v$ ——导体切割磁场的速度， $\text{m}/\text{s}$ ；

$l$ ——导体的有效长度， $\text{m}$ 。

而感应电动势的方向由右手定则确定，图 0-6 表示了  $e$ 、 $B$  与  $v$  三者之间的方向关系。



(a)



(b)

图 0-5 电磁力的左手定则

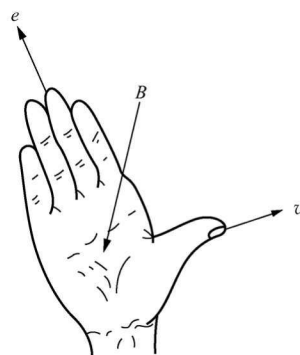


图 0-6 切割电动势的右手定则

#### (四) 常用铁磁材料及其特性

##### 1. 铁磁物质的磁化

将铁、镍、钴等铁磁材料放进磁场后，磁场将明显增强，铁磁材料呈现很强的磁性，这

种现象为铁磁材料的磁化。铁磁材料的强磁场性能,是由于在铁磁材料的内部存在许多很小的磁畴,如图 0-7 所示。铁磁材料未放进磁场前,磁畴杂乱无章,磁场效应互相抵消,对外不显磁性,如图 0-7 (a) 所示。当铁磁材料放进磁场后,在外磁场的作用下,磁畴顺着外磁场方向转向,排列整齐,显示出磁性。

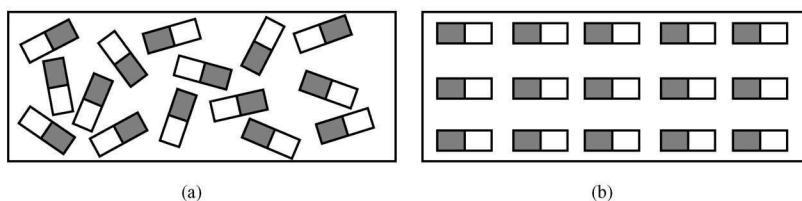


图 0-7 磁畴

(a) 未磁化; (b) 已磁化

## 2. 磁化曲线和磁滞回线

(1) 起始磁化曲线。将一块未磁化的铁磁材料进行磁化,当磁场强度  $H$  由零逐渐增加时,磁通密度  $B$  将随之增加。用  $B = f(H)$  描述的曲线就称为起始磁化曲线,其形状如图 0-8 所示。在  $0b$  段随着  $H$  的增加, $B$  增加较快。在  $bc$  段随着  $H$  的增加, $B$  增加较慢,这段称为磁化曲线的膝部。 $c$  点以后可以转向的磁畴就很少了,随着  $H$  的增加, $B$  增加非常缓慢,称为磁化曲线的饱和段。

(2) 磁滞回线。如图 0-9 所示,当铁磁材料被磁化一个循环时,就得到一个闭合回线  $abcdef$ 。当  $H$  从零增加到  $H_m$  时, $B$  相应地从零增加到  $B_m$ ;然后再逐渐减小  $H$ , $B$  值将沿曲线  $ab$  下降。当  $H=0$  时, $B$  值并不等于零,而是  $B_r$ ,这就是剩磁。

当  $H$  在  $H_m$  和  $-H_m$  之间反复变化时,呈现磁滞现象的  $B-H$  闭合曲线,称为磁滞回线。

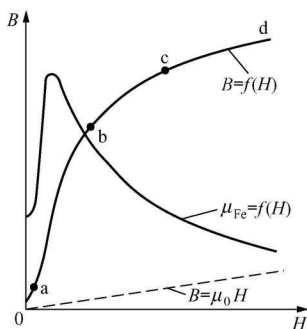


图 0-8 起始磁化曲线

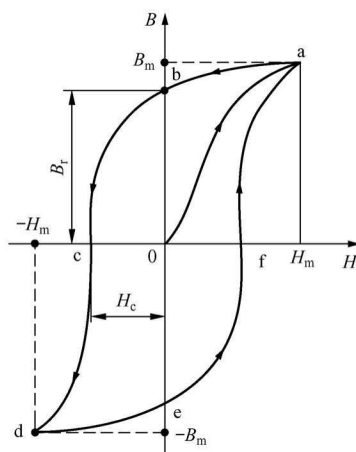


图 0-9 磁滞回线

## (五) 铁心损耗

### 1. 磁滞损耗

在交变磁场中,铁磁材料要反复磁化,这个磁化过程就是通过磁畴的转动和磁畴间相邻