



工业和信息化普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材  
21-century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

**P**ower drive and control

# 电力拖动与控制

陈勇 罗萍 向敏 编著



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化普通高等教育“十二五”



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

**P**ower drive and control

# 电力拖动与控制

陈勇 罗萍 向敏 编著

人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目(CIP)数据

电力拖动与控制 / 陈勇, 罗萍, 向敏编著. — 北京:  
人民邮电出版社, 2011.10  
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材  
ISBN 978-7-115-25492-4

I. ①电… II. ①陈… ②罗… ③向… III. ①电力传  
动—自动控制系统—高等学校—教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第180867号

## 内 容 提 要

本书主要介绍电机的机械特性、各种运转状态、启动电阻、调速等基本理论及应用。本书主要内容包括:绪论、直流电机、电力拖动系统基础、直流电动机的拖动与控制、变压器、三相交流电机、三相异步电动机的拖动与控制、微控电机原理与应用、电动机容量的选择。每章有与电机实际应用密切相关的典型设计与应用实例,章后附有思考题与习题。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、机械电子、机械制造及其自动化等相关专业的本科生教材,也可供相关专业的研究生和工程技术人员参考。

21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

### 电力拖动与控制

- 
- ◆ 编 著 陈 勇 罗 萍 向 敏  
责任编辑 刘 博
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号  
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京鑫正大印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 20  
字数: 502千字
  - 2011年10月第1版  
2011年10月北京第1次印刷

---

ISBN 978-7-115-25492-4

定价: 38.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

本书遵照目前高校“电力拖动与控制”课程的教学大纲要求，并依据本书编委会审定通过的教材编写大纲而编写。

本书绪论部分介绍了常用的物理概念和定律。其余 8 章主要内容包括：第 1 章介绍了直流电机原理；第 2 章介绍电力拖动系统基础；第 3 章阐述了直流电动机的启动、调速、电动与制动运行以及相关的控制技术；第 4 章为变压器；第 5 章阐述三相交流电机电枢绕组电动势与磁动势以及工作原理和工作特性；第 6 章阐述了三相异步电动机的机械特性、启动、电动与制动运行以及相关的控制技术；第 7 章介绍微控电机原理与应用；第 8 章介绍电动机容量的选择。本书不仅注重电力拖动的理论分析，而且注重相关的控制技术的实际应用，还有结合工程实际的例题、思考题与习题。

作为教材，编者力图做到兼顾基础性、系统性、实用性和先进性。本书具有以下主要特点。

(1) 以电力拖动系统中应用最广泛的他励直流电动机和三相异步电动机及其电力拖动与控制为重点。

(2) 侧重于基本原理和基本概念的阐述，并始终强调基本理论的实际应用。阐述电机原理时紧密围绕着电力拖动，并着重分析电动机的机械特性。

(3) 文字阐述层次清楚、概念准确、通俗易懂、深入浅出。内容阐述循序渐进，富于启发性，便于自学。

(4) 针对各章内容中的重点和难点，精心编写了例题、思考题与习题。针对原理部分（第 1 章、第 2 章、第 4 章和第 5 章）每章均有综合应用案例；针对应用部分（第 3 章、第 6 章、第 7 章和第 8 章）每章均有理论与实际控制技术结合密切的典型实例，这些实例具有典型性、规范性、启发性和趣味性，能很好地引导学生掌握本课程的主要理论，培养学生解决工程实际问题的能力。

(5) 适用面宽。本书从内容上、写法上都考虑了为不同层次、不同学时学生的使用。只要对书中内容稍加取舍，都可选作为教材。书中带星号(\*)的部分，根据需要可作为选学内容。

(6) 本书中的图形符号、文字符号及量纲和单位均采用了国家最新标准。

在本书编写的过程中，得到了国内一些专家、教授的大力支持，同时还得到了重庆邮电大学、人民邮电出版社的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。研究生冉景砚、杨佳

## 2 | 现代通信概论

义、陆遥和张虎参与了本书的编写工作，在此表示感谢。书中部分内容的编写参照了有关文献，恕不一一列举，谨对书后所有参考文献的作者表示感谢。

由于编者水平有限，书中一定有不少疏漏和不妥之处，敬请前辈、同仁们以及广大读者见谅并不吝指正。

作者

2011年6月

# 目 录

绪论	1	第 2 章 电力拖动系统基础	44
第 1 章 直流电机	8	2.1 电力拖动系统运动方程式	44
1.1 直流电机的结构及基本工作原理	8	2.2 多轴电力拖动系统的简化	46
1.1.1 直流电机的主要结构	8	2.2.1 工作机构为转动情况时转矩与 飞轮矩的折算	46
1.1.2 直流电机的基本工作原理	10	2.2.2 工作机构为平移运动时转矩与 飞轮矩的折算	49
1.1.3 直流电枢绕组和电机模型	12	2.2.3 工作机构作提升和下放重物运 动时, 转矩与飞轮矩的折算	51
1.1.4 直流电机的铭牌数据和主要 系列	16	2.3 生产机械的负载转矩特性	52
1.2 直流电机的磁场	17	2.4 电力拖动系统稳定运行的条件	53
1.2.1 直流电机的励磁方式	17	2.5 综合应用	55
1.2.2 直流电机空载时的磁场	18	本章小结	56
1.2.3 直流电机负载时的磁场	19	思考题与习题	56
1.2.4 直流电机的电枢反应	20	第 3 章 直流电动机的拖动与控制	58
1.2.5 直流电机的感应电动势和电磁 转矩	21	3.1 他励直流电动机的启动	58
1.3 直流发电机	22	3.1.1 系统启动的要求	58
1.3.1 直流发电机的基本方程式	23	3.1.2 启动方法	59
1.3.2 他励直流发电机的运行特性	24	3.2 他励直流电动机的电动与制动	62
1.3.3 并励直流发电机	25	3.2.1 他励直流电动机的电动	62
1.4 直流电动机	27	3.2.2 他励直流电动机的制动	63
1.4.1 直流电动机的基本方程式	27	3.3 他励直流电动机的调速	71
1.4.2 直流电动机的工作特性	29	3.3.1 他励直流电动机的调速方法	72
1.5 他励直流电动机的机械特性	30	3.3.2 调速的性能指标	75
1.5.1 机械特性表达式	30	3.3.3 调速方法与负载性质的匹配 问题	78
1.5.2 固有机械特性	31	3.4 控制技术应用	81
1.5.3 人为机械特性	32	3.4.1 低压电器控制直流电动机启动	81
1.5.4 根据电机的铭牌数据绘制 机械特性	33	3.4.2 单片机控制直流电动机调速与 正反转	82
1.6 直流电机的换向	38	本章小结	89
1.6.1 换向的物理过程	38	思考题与习题	90
1.6.2 改善换向的方法	39	第 4 章 变压器	92
1.7 综合应用	40	4.1 概述	92
本章小结	41		
思考题与习题	42		

4.1.1 变压器的基本结构	92	4.9.3 短路阻抗标么值不等时的并联运行	125
4.1.2 变压器铭牌数据和主要系列	95	4.10 综合应用	126
4.2 单相变压器的空载运行	96	本章小结	129
4.2.1 变压器基本工作原理	96	思考题与习题	130
4.2.2 变压器空载运行时的磁场	97	<b>第5章 三相交流电机</b>	<b>132</b>
4.2.3 变压器各电磁量正方向	97	5.1 交流电动机基本结构及工作原理	133
4.2.4 空载运行时电压、电动势与主磁通的关系	98	5.1.1 三相异步电动机基本结构及工作原理和铭牌数据	133
4.2.5 变压器的空载电流	99	5.1.2 同步电机基本结构及工作原理和铭牌数据	138
4.2.6 变压器空载运行时相量图与等效电路	101	5.2 交流电机电枢绕组	141
4.3 单相变压器的负载运行	101	5.3 旋转磁动势	145
4.3.1 负载运行时的磁动势平衡方程式	102	5.3.1 单相脉振磁场	145
4.3.2 负载运行时的基本方程式	103	5.3.2 三相绕组的合成旋转磁场	150
4.3.3 变压器的参数折算	104	5.3.3 两相绕组产生的旋转磁动势	153
4.3.4 折算后变压器的基本方程式	105	5.4 交流绕组的感应电动势	155
4.3.5 等效电路	105	5.4.1 整距线圈感应电动势	155
4.3.6 相量图和功率关系	106	5.4.2 整距分布线圈感应电动势	156
4.4 变压器参数的试验测定	109	5.4.3 短距线圈感应电动势	157
4.4.1 变压器空载试验	109	5.4.4 一相绕组感应电动势	158
4.4.2 变压器短路试验	110	5.4.5 绕组的谐波感应电动势	158
4.5 标么值	111	5.5 三相异步电动机理论分析与运行特性	160
4.6 变压器的运行特性	114	5.5.1 转子静止时的异步电动机	160
4.6.1 电压变化率和外特性	114	5.5.2 转子转动时的异步电动机	166
4.6.2 变压器效率和效率特性	115	5.5.3 三相异步电动机的功率与转矩	173
4.7 三相变压器	115	5.5.4 异步电动机工作特性及参数测定	174
4.7.1 三相变压器的磁路系统	115	5.6 同步电机理论分析与运行特性	177
4.7.2 三相变压器的绕组连接组别	116	5.6.1 同步电动机的启动	177
4.7.3 试验确定绕组的极性和三相变压器的连接组别*	120	5.6.2 同步电动机的电压方程式和相量图	179
4.8 其他用途的变压器*	121	5.6.3 同步电动机的运行特性	181
4.8.1 自耦变压器	121	5.7 综合应用	183
4.8.2 互感器	123	本章小结	187
4.9 变压器并联运行*	124	思考题与习题	187
4.9.1 变比不等时的变压器并联运行	124		
4.9.2 连接组别不同时的变压器并联运行	125		

<b>第 6 章 三相异步电动机的拖动与控制</b> ··· 190	7.2.2 单相异步电动机的启动·····247
6.1 三相异步电动机的机械特性····· 190	7.3 测速发电机·····248
6.1.1 机械特性的物理表达式····· 190	7.3.1 直流测速发电机·····249
6.1.2 机械特性的参数表达式····· 192	7.3.2 交流测速发电机·····250
6.1.3 机械特性的实用表达式····· 195	7.4 伺服电动机·····252
6.2 三相异步电动机的启动····· 197	7.4.1 直流伺服电动机·····252
6.2.1 鼠笼型异步电动机的启动··· 198	7.4.2 交流伺服电动机·····254
6.2.2 绕线式异步电动机的启动··· 202	7.5 步进电动机·····257
6.2.3 特殊型式笼型异步电动机 的启动····· 206	7.5.1 结构与基本工作原理·····257
6.2.4 异步电动机的软启动*····· 208	7.5.2 运行特性·····260
6.3 三相异步电动机的制动····· 212	7.5.3 步进电动机的驱动电路·····263
6.3.1 反接制动····· 212	7.6 其他驱动和控制微电机·····264
6.3.2 回馈制动····· 214	7.6.1 自整角机·····264
6.3.3 能耗制动····· 215	7.6.2 旋转变压器·····270
6.3.4 异步电动机的软制动和软 停车*····· 218	7.6.3 无刷直流电动机·····275
6.4 三相异步电动机的调速····· 219	7.7 控制技术应用·····277
6.4.1 三相异步电动机的变极 调速····· 219	7.7.1 单片机控制步进电动机运行···277
6.4.2 降低定子电压的调速····· 223	7.7.2 PLC 控制步进电动机运行···280
6.4.3 三相异步电动机的变频调速·· 224	7.7.3 单片机控制无刷直流电动机 运行·····284
6.4.4 绕线转子串电阻的调速····· 226	本章小结·····286
6.4.5 绕线式异步电动机的串级 调速····· 226	思考题与习题·····286
6.4.6 滑差电机调速····· 229	<b>第 8 章 电动机容量的选择</b> ·····288
6.5 控制技术应用····· 231	8.1 电动机选择的主要内容·····288
6.5.1 单片机控制三相异步电动机 Y- $\Delta$ 启动····· 231	8.2 电动机的发热、冷却与工作制·····290
6.5.2 PLC 控制三相异步电动机 Y- $\Delta$ 启动····· 237	8.2.1 电动机的发热与冷却·····290
6.5.3 变频器在牵引机上的应用··· 239	8.2.2 电动机的工作制·····292
本章小结····· 243	8.3 电动机容量的选择·····292
思考题与习题····· 244	8.3.1 连续工作制电动机容量的 选择·····293
<b>第 7 章 微控电机原理与应用</b> ····· 246	8.3.2 短时工作制电动机容量的 选择·····295
7.1 概述····· 246	8.3.3 周期性断续工作制电动机容量 的选择·····296
7.2 单相异步电动机····· 246	8.4 综合应用·····297
7.2.1 单相异步电动机的基本工作 原理····· 247	本章小结·····302
	思考题与习题·····303
	<b>附录</b> ·····304
	<b>参考文献</b> ·····312



### 1. 电力拖动与控制系统概述

电机是利用电磁感应原理工作的机械设备。

电机常用的分类方式有两种：一是按功能分，有发电机、电动机、变压器和控制电机四大类；二是按电机结构或转速分，有变压器和旋转电机。

方法归纳如图 0-1 所示。

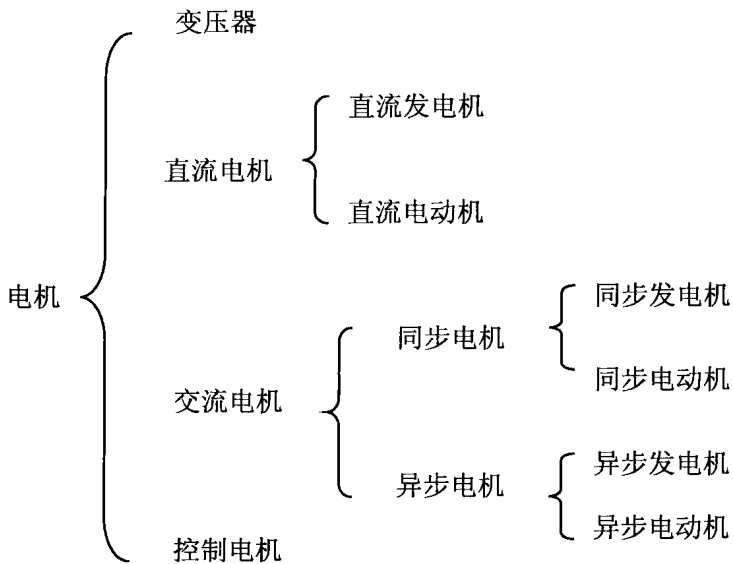


图 0-1 电机分类图

普通电机的主要任务是能量转换，主要问题是如何提高能量转换的效率。控制电机的主要任务是完成控制信号的传递和转换，而能量转换是次要的，控制电机应具有高可靠性、高精度和快速响应等性能，被广泛应用于各种自动控制系统中。

电机和电力拖动在国民经济中被广泛应用，起着重要作用，例如：

电能生产——由同步发电机生产。

高压输电——由升压变压器将发电机发出的电压升高到输电电压再输送。

降压用电——由降压变压器将输来的高压电降为所需低电压，供给用电设备。

生产机械的拖动——由各种电动机或电力拖动系统实现。

控制系统中的信号转换——由各种控制电机完成。

## 2. 本课程的性质、任务、内容

本课程是自动化、电气工程与自动化和机械电子等专业的一门专业基础课。

本课程的任务是让学生掌握电机基本结构和工作原理，以及拖动系统的运行性能、分析计算、电机选择及试验方法，培养学生在电机及电力拖动方面分析和解决问题的能力，为今后学习和工作打下坚实的基础。

本课程的内容有直流电机、电动拖动系统基础、直流电动机的电力拖动与控制、变压器、三相电机、三相异步电动机的电力拖动与控制、微控电机和电动机的选择 8 个部分。

## 3. 本课程的特点及学习方法

电力拖动与控制是一门理论性很强的技术基础课，同时又具有专业课的性质，涉及的基础理论和实际知识面广，是电磁学、动力学等学科知识的综合。用理论分析电机及拖动的实际问题时，必须结合电机的具体结构，采用工程观点和分析方法。学生在掌握基本理论的同时，还要注意培养实验操作技能和计算方法。

为了学好本门课程，必须做到以下几点。

- (1) 抓主要矛盾，有条件地略去一些次要因素。
- (2) 抓住重点，牢固掌握基本概念、基本原理和主要特性。
- (3) 要有良好的学习方法，运用对比或比较的方法，分析电机的共性和特点，加深对原理和性能的理解。
- (4) 理论联系实际，重视科学实验和工程实践。
- (5) 充分预习和复习。

## 4. 本课程常用的物理概念和定律

### (1) 电路定律

#### ① 欧姆定律

流过电阻  $R$  的电流  $I$  大小与电阻两端的电压  $U$  成正比，与电阻  $R$  的大小成反比，即有

$$I = \frac{U}{R} \quad (0-1)$$

② 基尔霍夫第一定律（电流定律）电路中流入任意节点电流的代数和等于零，即

$$\sum I = 0 \quad (0-2)$$

#### ③ 基尔霍夫第二定律（电压定律）

在电路中，对任一回路，沿回路环绕一周，回路内所有电动势的代数和等于所有电压降的代数和，即

$$\sum U = \sum E \quad (0-3)$$

### (2) 电磁感应定律

#### ① 全电流定律（安培环路定律）

在磁场中，沿任一闭和回路磁场强度的线积分等于穿过该回路所有电流的代数和，即

$$\int_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (0-4)$$

其中电流的正方向与闭合回路的正方向满足右手定则。

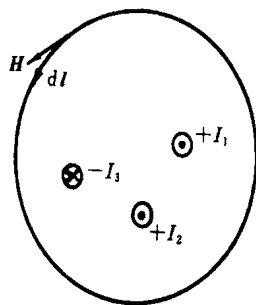


图 0-2 安培环路

### ② 电磁感应定律

无论何种原因，当与闭合线圈交链的磁链  $\psi$  随着时间  $t$  变化时，线圈中将会产生感应电动势  $e$ ，即

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

根据原因的不同，感应电动势可分为以下两类。

a. 切割（运动）电动势：指线圈不动，跨接在线圈上的导体运动，使得穿过线圈的磁通随着时间的变化而变化。此时的  $e$  叫做切割电动势  $e=Blv$ ，方向由右手定则判定。

b. 变压器电动势：指线圈不变，穿过线圈的磁通  $\Phi$  发生变化，这样在线圈内将产生感应电动势，其大小与线圈的匝数和磁通变化率成正比，方向由楞次定律决定，即

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-6)$$

### ③ 电磁力定律

载流导体在磁场中要受到力的作用，方向用左手定则判定。

$$F = BIl \quad (0-7)$$

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，称之为电磁转矩。电磁转矩是电机实现机电能量转换的重要物理量。

### (3) 磁路定律

#### ② 磁路基尔霍夫第一定律

在磁路中根据磁通的连续性可得：穿入任一闭合面的磁通必等于穿出该闭合面的磁通，即磁路中通过任何闭合面上的磁通的代数和等于零，则有

$$\sum \Phi = 0 \quad (0-8)$$

一般将穿出闭合面的磁通取正号，穿入闭合面的磁通取负号。

#### ② 磁路基尔霍夫第二定律

根据麦克斯韦方程（式（0-4））可得出：在闭合的磁路中，各段磁压降的代数和等于闭合磁路中磁动势的代数和，即有

$$\sum HL = \sum IN \quad (0-9)$$

上式中， $H$ ——磁场强度，单位为 A/m。

$L$ ——各段磁路的长度，单位为 m。

$N$ ——线积分线路所包围的导体数。

$I$ ——每根导体所流过的电流，单位为 A。

#### ③ 磁路欧姆定律

在无分支的磁路中，磁通  $\Phi$  与磁动势  $F$  大小成正比，与磁路中的总磁阻  $R_m$  的大小成反比，即有

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (0-10)$$

上式中， $R_m$ ——磁路的总磁阻，单位为 1/H。

磁路与电路有许多相似之处，如表 0-1 与表 0-2 所示。

表 0-1 磁路与电路的比较 (1)

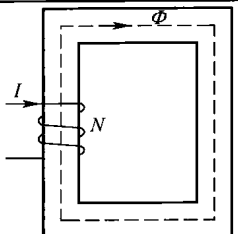
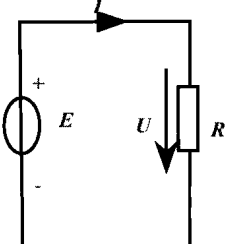
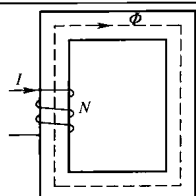
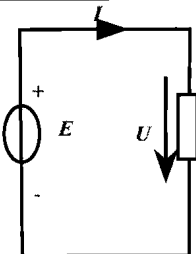
磁路		磁动势 $F = IN$	磁通 $\Phi$	磁压降 $HL$
电路		电动势 $E$	电流 $I$	电压降 $U$

表 0-2 磁路与电路的比较 (2)

磁路	基本定律	磁阻	磁感应强度	安培环路定律	
	$\Phi = \frac{F}{R_m}$	$R_m = \frac{l}{\mu S}$	$B = \frac{\Phi}{S}$	$\sum NI = \sum HL$	$\sum \Phi = 0$
电路	欧姆定律	电阻	电流强度	克氏电压定律	克氏电流定律
	$I = \frac{E}{R}$	$R = \frac{l}{\rho S}$	$J = \frac{I}{S}$	$\sum E = \sum U$	$\sum I = 0$

### 5. 电机中铁磁材料的特点

电机主要由两大系统组成：电路系统和磁路系统。铁磁材料是组成磁路的主要部分。所谓铁磁材料是指导磁性能好的材料，如：铁、镍、钴等以及它们的合金。铁磁材料的磁导率  $\mu_{Fe}$  要比非铁磁材料磁导率  $\mu$  大得多 ( $\mu_{Fe} \gg \mu$ )，非铁磁材料磁导率接近真空磁导率  $\mu_0$  ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ )，电机中常用铁磁材料的磁导率  $\mu_{Fe} = (2000 \sim 80000) \mu_0$  铁磁材料能在外磁场中呈现很强的磁性，这种现象称磁化，磁化是铁磁材料的特性之一。

#### (1) 磁导率 $\mu$

磁导率表征各种材料导磁能力的物理量。

##### ① 真空中的磁导率 ( $\mu_0$ ) 为常数

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

② 一般材料的磁导率  $\mu$  和真空中的磁导率之比，称为这种材料的相对磁导率  $\mu_r$ ：

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

式中， $\mu_r \gg 1$ ，则称为磁性材料。

$\mu_r \approx 1$ ，则称为非磁性材料。

### (2) 磁化曲线

在非铁磁材料中，磁通密度  $B$  和磁场强度  $H$  之间呈线性关系，即  $B = \mu_0 H$ 。对于铁磁材料，磁导率  $\mu_{Fe}$  除了比  $\mu_0$  大得多以外，还与磁场强度以及物质磁状态的历史有关，所以铁磁材料的磁导率  $\mu_{Fe}$  不是常数。在工程计算时，事先将各种铁磁材料用试验的方法，测得他们在不同磁场强度  $H$  下对应的磁通密度  $B$ ，绘制成  $B-H$  曲线，这条  $B-H$  曲线，就称为磁化曲线，如图 0-3 所示。将未经磁化的铁磁材料进行磁化，磁场强度  $H$  由零增大时，磁通密度  $B$  随之增大，所得的  $B=f(H)$  曲线称为起始磁化曲线，如图 0-3 (b) 曲线所示。

铁磁材料具有如下特点：磁化曲线具有饱和性，磁导率  $\mu_{Fe}$  不是常数，且随  $H$  的变化而变化。

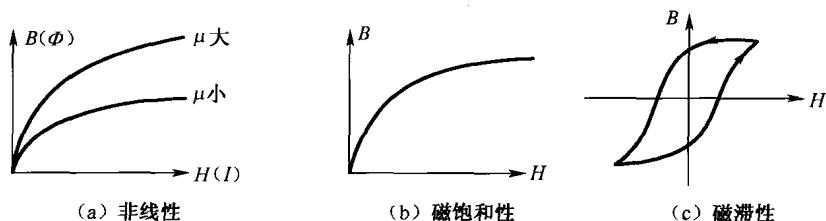


图 0-3 磁化曲线

根据磁性能，磁性材料又可分为 3 种：软磁材料（磁滞回线窄长，常用作磁头、磁心等）、永磁材料（磁滞回线宽，常用作永久磁铁）、矩磁材料（滞回线接近矩形，可用作记忆元件）。

### (3) 磁滞回线

铁磁材料被反复磁化时， $B-H$  曲线不是单值的，是一条磁滞回线，如图 0-4 所示。从图中可见，同一个  $H$  值下，有两个  $B$  值与之对应。当  $H=0$  时， $B \neq 0$ ， $B=B_r$ ， $B_r$  称为剩磁；当  $B=0$  时， $H \neq 0$ ， $H=H_c$ ， $H_c$  称为矫顽力。

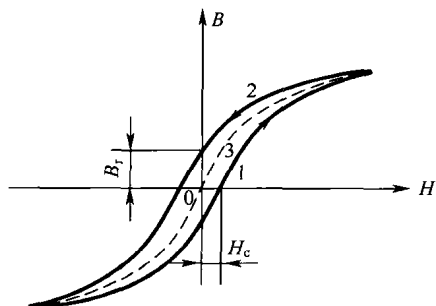
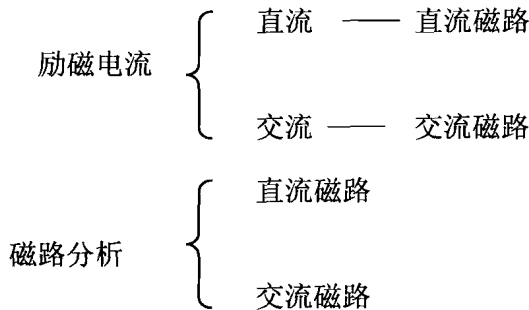


图 0-4 磁滞回线

### 6. 磁路的分析

励磁电流：在磁路中用来产生磁通的电流。



(1) 直流磁路的分析 (如图 0-5 所示)

直流磁路的特点： $I = \frac{U}{R}$  ( $R$  为线圈的电阻)

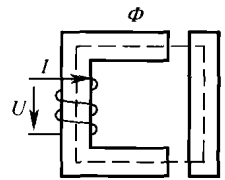
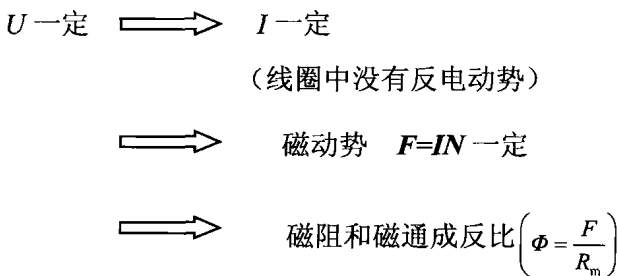


图 0-5 直流磁路

直流磁路和电路中的恒压源类似

直流磁路中：

$$\Phi = \frac{F}{R_m}$$

$F$  固定，则  $\Phi$  随  $R_m$  变化。

直流电路中：

$$I = \frac{E}{R}$$

$E$  固定， $I$  随  $R$  变化。

(2) 交流磁路的分析 (如图 0-6 所示)

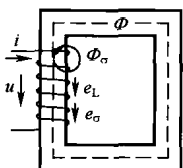


图 0-6 交流磁路

交流激励 → 线圈中产生感应电势

电路方程如下。

$$u = u_R + (-e_L) + (-e_\sigma) \approx Ri + N \frac{d\Phi}{dt}$$

$e_L$  是  $\Phi$  产生的感应电动势； $e_\sigma$  是  $\Phi_\sigma$  产生的感应电动势。

一般情况下  $u_R$  很小，则有

$$u \approx N \frac{d\Phi}{dt}$$

假设

$$\varphi = \Phi_m \sin \omega t$$

则

$$u \approx N \Phi_m \omega \cdot \cos \omega t = 2\pi f N \Phi_m \cos \omega t$$

最大值为

$$U_m \approx 2\pi f N \Phi_m$$

有效值为

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 4.44 f N \Phi_m$$

$$U \approx 4.44 f N \Phi_m$$

交流磁路的特点如下。

当外加电压  $U$ 、频率  $f$  与线圈匝数  $N$  一定时， $\Phi_m$  便确定下来。根据磁路欧姆定律  $IN = \Phi R_m$ ，当  $\Phi_m$  一定时，磁动势  $IN$  随磁阻  $R_m$  的变化而变化。

交流磁路和电路中的恒流源类似。

直流磁路中： $F = \Phi R_m \rightarrow \Phi$  固定  $\rightarrow F$  随  $R_m$  变化

直流电路中： $U = I_S R \rightarrow I_S$  固定  $U \rightarrow$  随  $R$  变化

交流磁路中磁阻  $R_m$  对电流的影响。

电磁铁吸合过程的分析如下，如图 0-7 所示。

在吸合过程中若外加电压不变，则  $\Phi$  基本不变。

$$IN = \Phi R_m$$

电磁铁吸合前（气隙大） $\rightarrow R_m$  大  $\rightarrow$  启动电流大

电磁铁吸合后（气隙小） $\rightarrow R_m$  小  $\rightarrow$  电流小

注意：

如果气隙中有异物卡住，电磁铁长时间吸不上，线圈中的电流一直很大，将会导致过热，把线圈烧坏。

磁路小结如下。

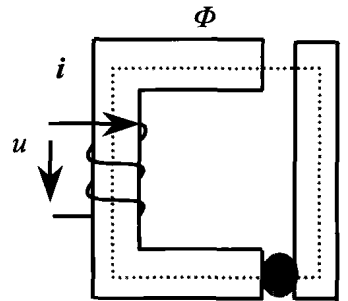


图 0-7 电磁铁吸合过程

直流磁路	$I = \frac{U}{R}$ ( $U$ 不变, $I$ 不变) $\rightarrow \Phi = \frac{IN}{R_m}$ ( $\Phi$ 随 $R_m$ 变化)
交流磁路	$\Phi_m = \frac{U}{4.44 f N}$ ( $U$ 不变时, $\Phi_m$ 基本不变) $\rightarrow IN = \Phi R_m$ ( $I$ 随 $R_m$ 变化)

## 本章教学基本要求

1. 了解直流电机主要结构，注意换向器和电刷的作用。
2. 熟悉直流发电机和直流电动机基本工作原理，理解感应电动势和电磁转矩这两个机电能量转换要素的物理意义，掌握求解它们的计算方法。
3. 掌握直流电机的运行原理，电动势、转矩平衡方程式，以及不同励磁方式的直流电机的工作特性。
4. 掌握他励直流电动机的机械特性，能绘制固有机械特性曲线和人为机械特性曲线。
5. 了解直流电机的换向。

## 重点

1. 直流电机的基本平衡方程式。
2. 他励直流电动机的机械特性。

直流电机是将机械能转换为直流电能或将直流电能转换为机械能的一种装置。把机械能转换为电能的直流电机称为直流发电机，把电能转换为机械能的直流电机称为直流电动机。**直流发电机与直流电动机在理论上是可逆的。**

由于直流电机易于实现转速调节和转矩控制，它被广泛应用于需大范围调速和精确控制的场合。近年来，随着电力电子技术、微电子技术、现代控制理论以及电机理论和技术的发展，交流调速系统在一些场合替代了直流电机，但由于直流电机具有性能多样化和拖动系统更简单的特点，它仍有广泛的应用。

## 1.1 直流电机的结构及基本工作原理

### 1.1.1 直流电机的主要结构

#### 1. 直流电机的主要结构

直流电机由两大部分组成：定子（静止部分）和转子（转动部分或称电枢），如图 1-1 和图 1-2 所示。



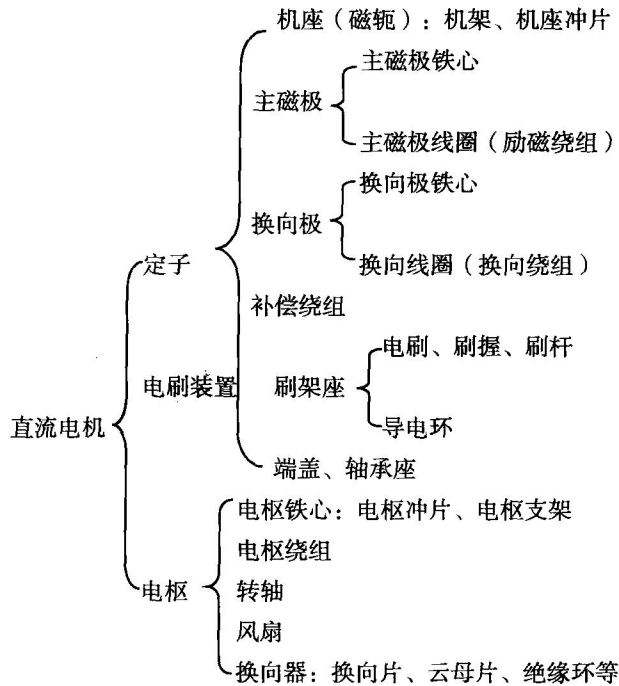


图 1-1 直流电机结构概况

### (1) 定子

定子由主磁极、换向极、电刷装置、机座等组成。主磁极由主极铁心和励磁绕组组成，铁心用 1~1.5mm 的钢板冲片叠成，外套励磁绕组。主磁极的作用是建立主磁场，它总是成对出现，N、S 极交替排列，见图 1-3。换向极也由铁心和绕组组成，铁心一般是由整块钢组成，换向极安放在相邻两主磁极之间，其作用是改善电机的换向。电刷装置由电刷、刷握、刷杆、压紧弹簧等组成，它的作用是连接转动和静止之间的电路。机座作用是固定主磁极等部件，同时也是磁路的一部分。

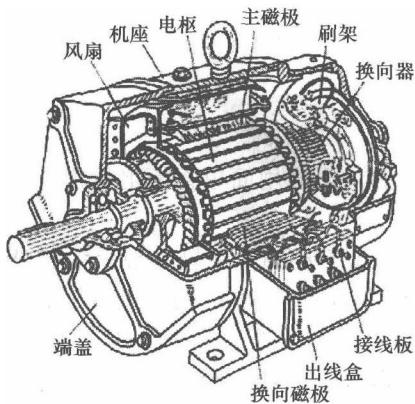


图 1-2 直流电机结构

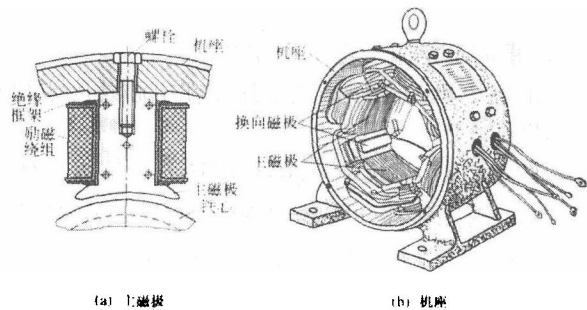


图 1-3 主磁极与机座

### (2) 转子（电枢）

转子由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴等组成，如图 1-4 所示。电枢铁心一般用 0.5mm