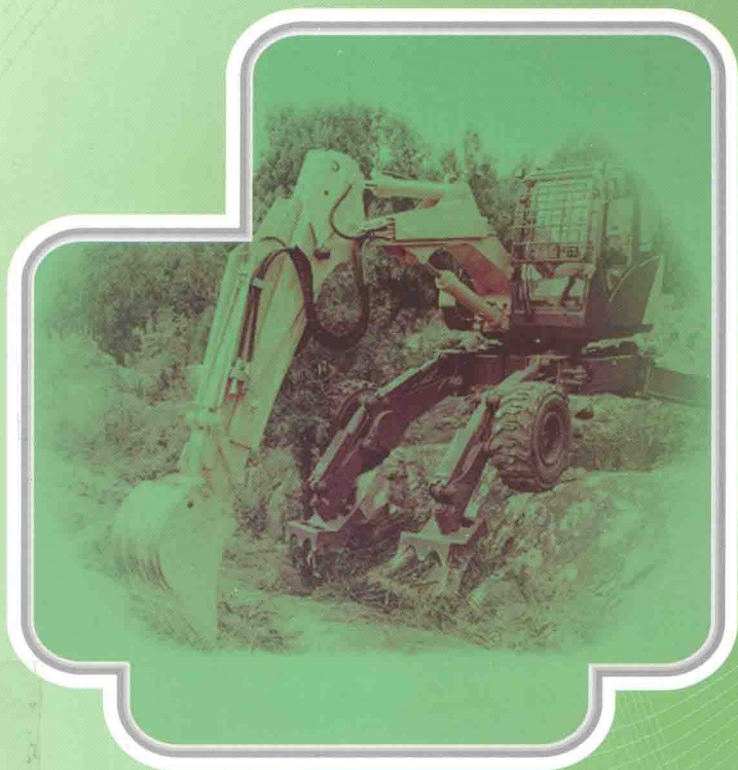




全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

# 工程机械 电气与电子控制

主编 钱宏琦



教材预览、申请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

# 工程机械电气与电子控制

主编 钱宏琦  
参编 陈伦军 周维粲  
彭秀英 张大斌  
胡 浩 钟丽琼



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书全面系统地论述了工程机械专业工程机械电气与电子控制课程的基础理论,介绍了目前流行的主要工程机械电气与电子控制的类型及控制手段。本书力求机电结合、理论联系实际,内容新颖,图文并茂,深入浅出,通俗易懂,注重引导性和实用性。

本书可作为高等院校工程机械专业学生的教材,也可供从事工程机械电气与电子控制工作的有关人员参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程机械电气与电子控制/钱宏琦主编. —北京:北京大学出版社, 2016. 3

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-26868-1

I. ①工… II. ①钱… III. ①工程机械—电气控制—高等学校—教材②工程机械—电子控制—高等学校—教材 IV. ①TU6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 025160 号

**书 名** 工程机械电气与电子控制

Gongcheng Jixie Dianqi yu Dianzi Kongzhi

**著作责任者** 钱宏琦 主编

**策划编辑** 童君鑫

**责任编辑** 黄红珍

**标准书号** ISBN 978-7-301-26868-1

**出版发行** 北京大学出版社

**地 址** 北京市海淀区成府路 205 号 100871

**网 址** <http://www.pup.cn> 新浪微博: @北京大学出版社

**电子信箱** pup\_6@163.com

**电 话** 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667

**印 刷 者** 北京溢漾印刷有限公司

**经 销 者** 新华书店

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 24.5 印张 572 千字

2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

**定 价** 54.00 元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

**版权所有,侵权必究**

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话: 010-62756370

# 前 言

本书是根据“工程机械电气与电子控制教学大纲”和高校工程机械本科专业及近似专业的课程的基本教学要求编写而成的，同时考虑了从事工程机械电气与电子控制的广大工程技术人员需要，并结合了编者多年从事相关科研实践与教学的经验。

“工程机械电气与电子控制”课程的特点是科技含量高、实践性较强。在教学过程中，必须加强课堂教学、生产实践和实习试验三方面的有机结合，以提高教学质量。

本书力求机电结合、理论联系实际，将元器件的介绍与其在工程机械控制系统中的应用紧密结合；编写体系新，内容全面、实用，由浅入深，重点突出。

全书除绪论外共 10 章，内容包括磁路和电路基础知识、工程机械电气控制基础、工程机械电器检测装置、可编程序控制器原理及应用、交流电动机变频调速技术、工程机械电子控制系统、塔式起重机电路控制、砂石料筛分楼电路、混凝土搅拌楼电路、混凝土振捣器和混凝土泵电路。

本书由钱宏琦担任主编，具体编写分工如下：绪论、第 1~4 章由钱宏琦编写，第 5 章由陈伦军编写，第 6 章由张大斌编写，第 7~8 章由周维粲编写，第 9 章由彭秀英编写，第 10 章由胡浩、钟丽琼编写。在本书的编写过程中，我们得到了邹建华、南冰等同志的大力支持，在此一并表示感谢。

本书篇幅较大，内容较多，如有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2015 年 12 月

# 目 录

绪论 .....	1	复习思考题 .....	27
<b>第 1 章 磁路和电路基础知识 .....</b>	<b>2</b>	<b>第 2 章 工程机械电气控制基础 .....</b>	<b>29</b>
1.1 磁路和磁化 .....	4	2.1 常用工程机械电器 .....	31
1.2 电磁感应定律和电磁力定律 .....	9	2.1.1 非自动控制电器 .....	31
1.3 电容和电感在直流电路中的 过渡过程 .....	10	2.1.2 自动控制电器 .....	34
1.3.1 $R-C$ 电路的充电过程 .....	11	2.1.3 主令电器 .....	40
1.3.2 $R-C$ 电路的放电过程 .....	11	2.1.4 执行电器 .....	42
1.3.3 $R-L$ 电路的励磁过程 .....	12	2.1.5 电阻器、电力制动器和 集电环 .....	46
1.3.4 $R-L$ 电路的消磁过程 .....	13	2.2 继电器-接触器控制的常用 基本线路 .....	49
1.3.5 $R-L$ 电路的断开 .....	13	2.2.1 继电器-接触器自动控制 线路的构成 .....	49
1.4 单相交流电路 .....	14	2.2.2 继电器-接触器自动控制的 基本线路 .....	50
1.4.1 正弦交流电的三要素 .....	14	2.3 工程机械中常用的自动控制 方法 .....	59
1.4.2 正弦交流电的相量 表示法 .....	15	2.3.1 按行程的自动控制 .....	59
1.4.3 相量的加减运算 .....	16	2.3.2 按时间的自动控制 .....	61
1.4.4 交流纯电阻、纯电感和 纯电容电路 .....	17	2.3.3 按速度的自动控制 .....	63
1.4.5 交流 $R-L$ 和 $R-C$ 串联 电路 .....	18	复习思考题 .....	64
1.4.6 交流 $R-L-C$ 串联 电路 .....	20	<b>第 3 章 工程机械电器检测装置 .....</b>	<b>66</b>
1.4.7 交流 $R-L$ 和 $R-C$ 并联 电路 .....	21	3.1 概述 .....	68
1.5 三相交流电路 .....	22	3.2 温度传感器 .....	68
1.5.1 相序 .....	22	3.2.1 热敏电阻式传感器 .....	68
1.5.2 三相电源绕组的星形 联结 .....	22	3.2.2 热敏铁氧体温度传感器 .....	69
1.5.3 三相电源绕组的三角形 联结 .....	23	3.2.3 热电偶式传感器 .....	70
1.5.4 三相负载的三角形联结 .....	24	3.3 转速传感器 .....	75
1.5.5 三相负载的星形联结 .....	24	3.3.1 变阻式车速传感器 .....	75
1.5.6 相序继电器 .....	26	3.3.2 测速发电机 .....	75
1.5.7 三相负载的功率 .....	27	3.3.3 接近开关 .....	77
		3.3.4 舌簧开关 .....	77
		3.4 角位移传感器 .....	78



3.4.1 电位器式 .....	78
3.4.2 磁敏电阻式 .....	79
3.4.3 差动变压器 .....	79
3.5 电阻应变式称重传感器 .....	80
3.5.1 多种应变效应 .....	80
3.5.2 电阻应变片 .....	81
3.5.3 电阻应变式称重传感器 .....	82
复习思考题 .....	85

## 第4章 可编程序控制器原理及

### 应用 .....

4.1 可编程序控制器简介 .....	88
4.1.1 可编程序控制器的定义 .....	88
4.1.2 可编程序控制器的特点 .....	88
4.1.3 可编程序控制器的工作原理 .....	88
4.1.4 可编程序控制器扫描工作方式 .....	89
4.1.5 可编程序控制器与普通计算机的比较 .....	90
4.1.6 可编程序控制器的分类 .....	90
4.2 可编程序控制器的产生与发展 .....	91
4.3 西门子 S7 系列可编程序控制器 .....	92
4.4 西门子 S7-200 系列 PLC 的基本硬件组成 .....	94
4.4.1 基本单元 .....	94
4.4.2 扩展单元 .....	95
4.4.3 编程器 .....	95
4.5 西门子 S7-200 系列 PLC 的主要技术性能 .....	95
4.6 系统内部资源 .....	98
4.7 西门子 S7-200 系列 PLC 的编程语言及程序结构 .....	103
4.7.1 梯形图 .....	103
4.7.2 语句表 .....	106
4.7.3 功能块图 .....	106
4.8 西门子 S7-200 系列 PLC 的指令系统 .....	106
4.8.1 基本逻辑指令 .....	107
4.8.2 基本功能指令 .....	118
4.9 典型的简单应用程序 .....	129

4.10 PLC 的程序设计方法及应用 .....	135
4.10.1 经验设计法及应用 .....	136
4.10.2 随机逻辑控制一般编程方法及应用 .....	140
4.10.3 顺序控制的功能图法及应用 .....	143
复习思考题 .....	152

## 第5章 交流电动机变频调速技术 .....

5.1 鼠笼式异步电动机变压变频调速系统 .....	158
5.1.1 变频器的基本构成与分类 .....	158
5.1.2 模拟式 IGBT-SPWM-VVVF 交流调速系统 .....	161
5.1.3 数字式恒压频比控制交流调速系统 .....	163
5.2 矢量变换控制交流变频调速系统 .....	165
5.2.1 异步电动机矢量变换控制原理 .....	165
5.2.2 坐标变换与矢量变换 .....	166
5.2.3 异步电动机矢量控制变频调速系统的原理结构图 .....	168
5.3 由交-交变频器供电的同步电动机调速系统 .....	170
5.3.1 交-交变频器的基本工作原理 .....	170
5.3.2 交-交变频器的控制方式 .....	171
5.3.3 三相输出的交-交变频器主电路 .....	172
5.4 变频器的选择与使用 .....	175
5.4.1 通用变频器的功能 .....	175
5.4.2 通用变频器的结构 .....	175
5.4.3 变频器类型的选择 .....	176
5.4.4 变频器容量的选择 .....	176
5.4.5 变频器外围设备的应用及注意事项 .....	179
5.4.6 变频器外部接线与应用实例 .....	179

5.4.7	变频器的调试和运行 步骤	181	7.1.3	附加电阻起动	244
5.4.8	变频器的自身保护功能及 故障分析	182	7.2	线绕式电动机的正反转和调速	247
	复习思考题	183	7.3	线绕式电动机的制动	248
<b>第6章</b>	<b>工程机械电子控制系统</b>	<b>184</b>	7.3.1	回馈制动	249
6.1	工程机械无级速度变换控制 系统	186	7.3.2	反接制动	250
6.1.1	速度变换控制方式	186	7.3.3	能耗制动	251
6.1.2	典型无级变速控制 系统	191	7.4	QT-60/80型塔式起重机 简介	252
6.1.3	无级变速行驶控制	194	7.4.1	结构简介	252
6.1.4	制动控制系统	196	7.4.2	行走机构	253
6.1.5	特殊速度控制系统	198	7.4.3	回转机构	254
6.2	液压挖掘机电子控制系统	205	7.4.4	变幅机构	254
6.2.1	电子监测控制系统	205	7.4.5	提升机构	254
6.2.2	电子功率优化控制 系统	207	7.5	QT-60/80型塔式起重机 电路	256
6.2.3	工作模式控制系统	209	7.6	QT-60/80型塔式起重机的 操作和试运转	264
6.2.4	自动怠速控制系统	209	7.6.1	操作程序	264
6.2.5	柴油发动机负荷电子 控制系统	210	7.6.2	试运转	265
6.2.6	挖掘机电子控制系统的 故障诊断	212	7.7	QT-60/80型塔式起重机电路 故障的判断	267
6.3	液压起重机电子控制系统	214		复习思考题	268
6.4	自行式平地机的电子控制 系统	233	<b>第8章</b>	<b>砂石料筛分楼电路</b>	<b>269</b>
6.4.1	电子式调平装置	233	8.1	三相异步电动机的结构和 工作原理	271
6.4.2	激光式调平装置	235	8.1.1	基本结构	271
6.5	稳定土厂拌设备电子控制系统	236	8.1.2	工作原理	273
6.5.1	稳定土厂拌设备的电气 系统	236	8.1.3	转子绕组中的电动势、 电流和频率	275
6.5.2	物料计量控制技术	237	8.2	三相异步电动机的工作特性	276
	复习思考题	239	8.2.1	转矩特性	276
<b>第7章</b>	<b>塔式起重机电路控制</b>	<b>240</b>	8.2.2	机械特性	277
7.1	线绕式电动机的起动	242	8.2.3	定子电压对电动机工作的 影响	278
7.1.1	转矩平衡方程式	242	8.2.4	三相鼠笼式电动机的 直接起动	278
7.1.2	线绕式电动机机械特性的 改造	242	8.2.5	三相鼠笼式电动机的 调速	279
			8.2.6	三相异步电动机的 断相运行	279



8.3 电动机的发热、冷却和定额 .....	281	9.6.3 搅拌层电路故障的 判断 .....	323
8.3.1 电动机的发热过程 .....	281	9.7 电子秤的工作原理 .....	324
8.3.2 电动机的冷却过程 .....	281	9.7.1 传感器 .....	325
8.3.3 电动机的定额 .....	282	9.7.2 传感器桥路 .....	326
8.4 筛分楼简介 .....	283	9.7.3 电子电位差计 .....	327
8.5 筛分楼电路 .....	285	9.7.4 称量单元的实际电路 .....	327
8.5.1 主电路 .....	285	9.7.5 给定单元的实际电路 .....	330
8.5.2 控制电路 .....	287	9.8 电子秤的稳压电源 .....	331
8.5.3 信号电路 .....	290	9.8.1 二极管和稳压管 .....	331
8.6 筛分楼的电气操作、试运转和 故障判断 .....	291	9.8.2 稳压电源实际电路 .....	332
8.6.1 电气操作 .....	291	9.9 电子秤的放大器 .....	334
8.6.2 电气试运转 .....	292	9.9.1 变流级 .....	334
8.6.3 电路故障的判断 .....	293	9.9.2 电压放大级 .....	336
复习思考题 .....	293	9.9.3 功率放大级 .....	341
<b>第9章 混凝土搅拌楼电路 .....</b>	<b>294</b>	9.10 电子秤的执行机构 .....	344
9.1 混凝土搅拌楼简介 .....	296	9.10.1 可逆电机 .....	344
9.2 进料层电路 .....	300	9.10.2 执行机构 .....	346
9.2.1 骨料进料电路 .....	300	9.10.3 电子秤的输出电路 .....	347
9.2.2 水泥进料电路 .....	304	9.11 电子秤的操作和故障检查 .....	348
9.3 配料层电路 .....	305	9.11.1 电子秤的操作 .....	348
9.3.1 滤尘、通风和信号 电路 .....	305	9.11.2 电子秤故障的检查 .....	349
9.3.2 称量电路 .....	307	复习思考题 .....	350
9.3.3 卸料电路 .....	311	<b>第10章 混凝土振捣器和 混凝土泵电路 .....</b>	<b>351</b>
9.4 搅拌层和出料层电路 .....	313	10.1 混凝土振捣器 .....	353
9.4.1 各工作机械的控制 原理 .....	313	10.2 变频机组 .....	359
9.4.2 搅拌层电路动作原理 .....	316	10.3 振捣器电路 .....	360
9.4.3 搅拌层电路的联锁 .....	319	10.4 振捣器的试运转和常见故障 .....	362
9.4.4 出料层电路 .....	319	10.4.1 试运转 .....	362
9.5 搅拌楼的电气操作和试运转 .....	320	10.4.2 使用注意事项 .....	363
9.5.1 搅拌楼的电气操作 .....	320	10.4.3 常见故障 .....	363
9.5.2 搅拌楼的电气试运转 .....	321	10.5 日本700S-1型混凝土泵 简介 .....	364
9.6 搅拌楼电路故障的判断 .....	323	10.5.1 混凝土输送系统 .....	365
9.6.1 进料层电路故障的 判断 .....	323	10.5.2 电液换向滑阀 .....	366
9.6.2 配料层电路故障的 判断 .....	323	10.5.3 液压系统 .....	368
		10.6 “星-三角”降压起动 .....	369
		10.7 700S-1型混凝土泵电路 .....	370



10.8 700S-1 型混凝土泵的操作和 电路故障判断.....	375	10.9 国产 HB-30 型混凝土泵 电路 .....	376
10.8.1 操作 .....	375	复习思考题 .....	378
10.8.2 电路故障判断 .....	376	<b>参考文献</b> .....	379

# 绪 论

“工程机械电气与电子控制”课程是一门以工程机械构造、电工学与电子学为基础，讲述工程机械所用的电气设备及检测设备的结构原理、特性及其使用与维修，以及可编程序逻辑控制器与变频器使用等内容的专业课。

该课程的特点是科技含量高、实践性较强。在教学过程中，必须加强课堂教学、生产实践和实习试验三方面的有机结合，以提高教学质量。

未来世界工程机械工业的竞争，是工程机械机电一体化、高新技术的竞争。从某种意义上来说，主要体现在工程机械电子化技术上。近几十年来，国外工程机械的机械部分变动不大，但在外形设计、内部布局和材料选用上改进较多，它的先进性主要体现在工程机械电子装置的选用上。从 20 世纪 90 年代以来，我国引进了几家世界著名工程机械生产厂的工程机械车型，并全力以赴实现配件国产化。在这二十几年的时间内，国内工程机械行业的综合技术水平得到了很大程度的提高。

工程机械工业在我国已被列入国家工业的重点产业。由于我国工程机械工业起步较晚，一个时期又踏步不前，在改革开放以后才以飞快的速度发展起来。预计在不久的将来，我国将有一批厂家的生产水平和设计能力达到世界先进水平，并且这些工程机械企业集团将会进入国际市场，参与工程机械工业的国际竞争。要实现上述宏伟目标，必须动员全国工程机械行业的专业技术人员，认真贯彻国家工程机械工业的产业政策，认清形势，找出差距，抓准时机，知难而进，勤奋学习，努力工作，为早日改变我国工程机械产品机电一体化技术落后的状况做出贡献。

当今，世界现代工程机械工业已经进入成熟期。国外各大工程机械公司为了进一步争夺世界工程机械市场，不断增加开发投资力度，试图从提高工程机械动力性、安全性、降低油耗、减少废气排放污染、改善施工舒适性和扩大自动化操纵的应用功能范围等方面继续发展，从而推动工程机械工业向高附加值方向发展。其重要的标志是工程机械技术向机电一体化迈进，工程机械电子化程度不断提高。特别是一些国际性的跨国工程机械公司都相继成立了工程机械电子研究中心。世界最著名的电器公司和计算机公司也积极地开拓工程机械电子产品市场，如德国的博世公司、西门子公司；英国的卢卡斯公司；法国的瓦雷奥公司；日本的日立公司、松下公司；美国的英特尔公司、摩托罗拉公司等。这预示着工程机械机电一体化技术的进程，将引起世界现代工程机械工业的重大改革。

# 第 1 章

## 磁路和电路基础知识



### 本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
磁路	了解磁路的基本原理； 掌握磁路的基本计算公式	铁磁材料磁化曲线
交直流电路	了解电路的基本工作原理与组成； 熟悉常用电路的工作原理； 掌握常用电路的组成	电容和电感在直流电路中的过渡过程； 单相与三相交流电路； 三相交流电路的计算



## 导入案例

### 电磁学之父——法拉第

法拉第(图 1.0)是英国物理学家,电磁场理论的创立者,于1791年出生在英国伦敦的一个铁匠家庭里,由于家境贫困,7岁上学,9岁辍学,12岁当了报童,13岁到一家印刷厂当订书学徒。他有强烈的求知欲,利用装订书和杂志的机会,如饥似渴地阅读物理、化学图书,并省吃俭用筹集钱来买些实验用品,自己试做书上的实验。他非常爱听英国化学家戴维的讲演。有一次他写了一封信并附上了自己听戴维讲演所做的笔记给戴维。戴维从中看出他的天分而赏识他,1813年收他为助手。法拉第帮助戴维做了不少工作。不久,开始独立研究化学。他最重要的贡献是1825年制取了苯。他还液化了氯气,并进行了一系列液化气体的工作,成功地运用了降低温度和增大压强相结合的方法来液化气体。

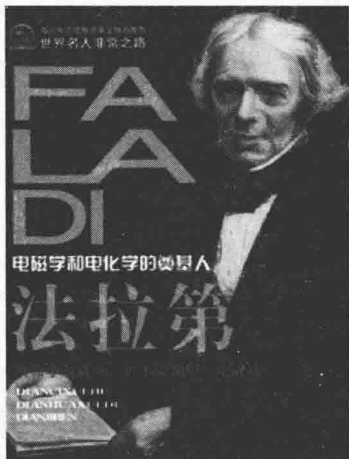


图 1.0 电磁学之父——法拉第

1820年奥斯特发现了电流的磁效应后,法拉第开始对电磁学产生浓厚的兴趣。1821年,他在日记中写到“用磁产生电”。从此,他在长达10年的研究中,运用了多种方法,企图使磁产生电,但都告失败。1831年8月29日,他用软铁做了一个外径6in(1in=0.0254m)的铁心,缠上两组互相绝缘的线圈,一组接电流计,另一组接电池。当电池电路接通时,法拉第看见电流计指针偏转;电路断开时,指针又偏转。法拉第非常高兴,他领悟到这是一种“暂态现象”,并把这个实验起名为“伏打电感应”。随后他又用圆柱形磁铁插入接有电流计的闭合线圈中,仍有电流产生。1831年11月28日,法拉第向皇家学院报告了这一工作,并确定了“电磁感应定律”。一个划时代的发现就这样诞生了,从而为人类打开了电能的宝库,为现代电工学奠定了基础。

电路与磁路是现代控制系统的基础,我们的日常生活、工作都离不开电路与磁路。本章是学习后续章节的重要基础,认真学习本章,可为后续课程学习打下良好基础。

电路是由电气元件和设备组成的总体。它提供了电流通过的途径,进行能量的转换、电能的传输和分配,以及信号的处理等。例如,发电机将机械能转换为电能;电动机将电能转换成机械能;变压器和配电线路把电能分配给各用电设备;电子放大器或磁放大器可把所施加的信号经过处理后输出。

一台大型工程机械的电路是由若干简单电路组成的。因此,掌握简单电路的规律、特点和分析方法是学懂整机电路并指导实践的必要基础。为了满足初学电工者的要求和节省查阅参考书的时间,本章将对大型工程机械电路中必要的磁路和电路的基础知识进行重点介绍。



## 1.1 磁路和磁化

电和磁是紧密相关的，电流能产生磁场，而变动的磁场或导体切割磁力线又会产生电动势。初学电工者往往只注意电而不重视磁。其实在很多情况下没有磁路知识是不可能学懂电路的，如电机、变压器、互感器、接触器和磁放大器等工作原理都与磁密切相关。

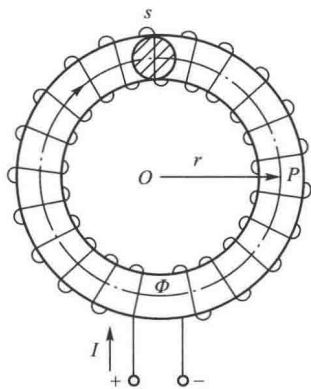


图 1.1 环形线圈

图 1.1 是一个均匀密绕的空心环形线圈，匝数为  $w$ 。当电流  $I$  通过线圈时，在环形线圈内就产生磁场。环内磁力线是一些以  $O$  为圆心的同心圆，其方向可用右手螺旋定则确定。磁力线通过的路径称为磁路，环形线圈的磁路是线圈所包围的圆环。

### 1. 磁感应强度

描述某点磁场强弱和方向的物理量称为磁感应强度。它不但有大小而且有方向，是一个矢量。它的方向与该点的磁力线方向一致。环形线圈内中心线上  $P$  点的磁感应强度大小为

$$B = \mu \frac{Iw}{2\pi r} = \mu \frac{Iw}{l} \quad (1-1)$$

式中， $\mu$  为表征磁路介质对磁场影响的物理量，叫作磁导率； $r$  为  $P$  点到圆心的距离； $l$  为磁路的平均长度。

### 2. 磁通

为了描述磁路某一截面上的磁场情况，把该截面上的磁感应强度平均值与垂直于磁感应强度方向的面积  $s$  的乘积称为通过这块面积的磁通，即

$$\Phi = Bs \quad (1-2)$$

### 3. 磁场强度

为了排除介质对磁场的影响，使计算更加方便，引入磁场强度这个物理量，其定义为

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-3)$$

环形线圈中  $P$  点的磁场强度为

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{Iw}{l} \quad (1-4)$$

### 4. 磁动势

环形线圈中的磁通是因为在  $w$  匝的线圈中通过电流  $I$  而产生的，所以仿照电路中电动势的意义把  $w$  与  $I$  的乘积称为磁动势。

$$[F] = Iw \quad (1-5)$$

## 5. 磁阻

描述磁路对磁通阻碍作用大小的物理量称为磁阻。一段磁路的磁阻  $R_m$  与磁路介质的磁导率及磁路截面成反比, 与该段磁路的平均长度成正比, 即

$$R_m = \frac{l}{\mu s} \quad (1-6)$$

## 6. 磁路欧姆定律

上述环形线圈磁路的截面和介质处处相同, 而且没有分支, 所以磁通也处处相同。对于这种简单磁路有

$$\Phi = Bs = \mu \frac{I\omega}{l} s = \frac{I\omega}{\frac{l}{\mu s}} = \frac{[F]}{R_m} \quad (1-7)$$

即简单磁路中的磁通与磁动势成正比, 与磁阻成反比。

在一个磁路中绕有几个线圈并通以不同的电流, 那么该磁路就有几个磁动势。磁动势在闭合回路中是有方向的, 取决于电流的方向和线圈的绕向, 即取决于该磁动势所产生的磁场的方向, 也用右手螺旋定则确定。在多磁动势的磁路中磁通是几个磁动势共同作用的结果, 总磁动势是几个磁动势的代数和, 即

$$[F] = [F_1] + [F_2] + \dots = I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2 + \dots \quad (1-8)$$

实际磁路的截面或介质经常不是处处相等的。例如, 接触器的磁路一段是铁心, 另一段是空气隙。此时磁阻要分段计算, 总磁阻是各段磁阻之和, 即

$$R_m = R_{m1} + R_{m2} + \dots \quad (1-9)$$

对于多磁动势多段的无分支磁路, 磁通与总磁动势成正比, 与总磁阻成反比, 即

$$\Phi = \frac{[F_1] + [F_2] + \dots}{R_{m1} + R_{m2} + \dots} = \frac{[F]}{R_m} \quad (1-10)$$

在磁通、介质和截面处处相等的一段磁路中, 磁感应强度和磁场强度也沿该段磁路处处相等, 因此该段磁路中的磁通为

$$\Phi = Bs = \mu Hs = \frac{Hl}{\frac{l}{\mu s}} = \frac{Hl}{R_m} \quad (1-11)$$

式中,  $Hl$  为该段磁路的磁压降。式(1-11)就是一段磁路的磁路欧姆定律, 它说明一段磁路的磁通与该段磁路的磁压降成正比, 与该段磁路的磁阻成反比。

## 7. 铁磁物质的磁化

图 1.2 所示为一个匝数为  $\omega$ , 磁路平均长度为  $l$ , 截面为  $s$  的铁心线圈。在线圈未通电流之前铁心不具有磁性, 通电流以后就呈现磁性, 而且磁感应强度比空气心时大得多, 这种现象称为铁

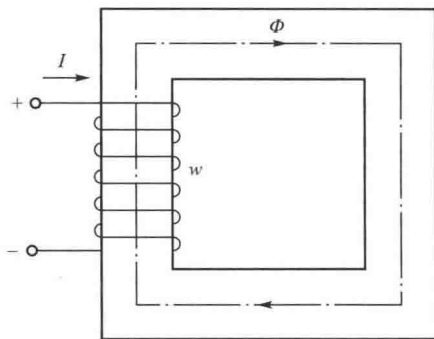


图 1.2 铁心线圈



磁物质被磁化。

### 8. 起始磁化曲线

当电流  $I$  从零逐渐增大时，铁心中的磁感应强度按式(1-12)的规律增长，即

$$B = \mu H = \mu \frac{Iw}{l} \quad (1-12)$$

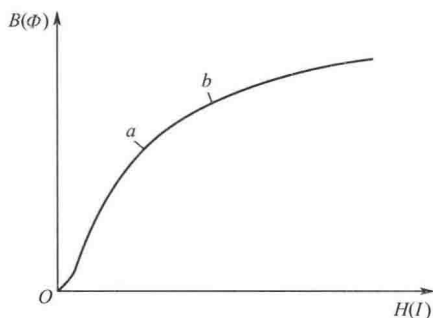


图 1.3 起始磁化曲线

图 1.3 是用实验方法测得的  $B$  随  $H$  而增长的关系曲线，叫作起始磁化曲线。对于已经制成的铁心线圈， $s$ 、 $w$ 、 $l$  都是常数， $\Phi$  与  $B$  成正比， $I$  与  $H$  成正比，故也可把磁化曲线看成  $\Phi$  与  $I$  的关系曲线。

在磁化曲线的  $Oa$  段， $B$  几乎随  $H$  直线增长，具有正比关系，电机和变压器等通常工作于这一段。在  $ab$  段  $B$  的增长速率减慢，叫作磁化曲线的膝部。在  $b$  点以后， $B$  增长得十分缓慢，称为磁化曲线的饱和段。饱和现象是铁磁物质的一个重要特性，对电气设备和电路的工作有重大影响。例如，电机和变压器若因故工作于饱和段，则励磁电流就会大大增加，引起过热，甚至烧坏；而磁放大器则利用饱和现象起放大作用。

### 9. 磁滞回线

给线圈通以如图 1.4 所示的交变电流  $i$ ，使磁场强度在正最大值  $H_m$  到负最大值  $-H_m$  之间变化，就可得如图 1.5 所示的磁化曲线。第一次  $H$  从零增加到  $H_m$  时， $B$  从零沿起始磁化曲线增到  $a$  点 ( $H_m, B_m$ )。此后  $H$  减小，但  $B$  并不沿原曲线而是沿  $ab$  曲线下降。当  $H$  减小到零时， $B$  下降到  $b$  点 ( $0, B_r$ )，这说明外加磁场强度消失后铁心中仍保留有一定的磁感应强度  $B_r$ ，称为剩磁。要消除剩磁必须加反向磁场强度，当  $H$  反向增加到  $-H_c$  时， $B$  下降到  $c$  点 ( $-H_c, 0$ )，剩磁全部消除。消去剩磁所必需的反向磁场强度  $-H_c$  叫作矫顽力。此后， $B$  沿曲线  $cdefa$  而回到  $a$  点。电流每交变一周， $B$  就沿闭合回线  $abcdefa$  循环一周。铁磁物质中的磁感应强度总是滞后于外加磁场强度的变化，故把这条闭合回线叫作磁滞回线。

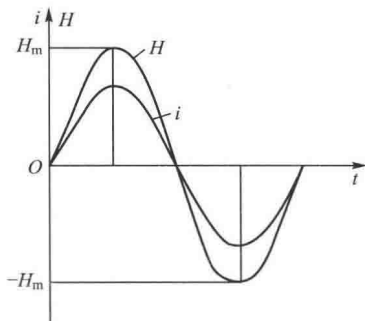


图 1.4 交变磁场强度

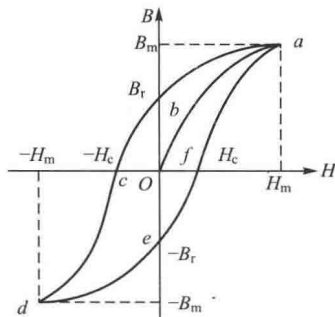


图 1.5 磁滞回线

铁磁物质反复磁化要在铁心内部损失一部分能量并转变为热能，叫作磁滞损耗。反复磁化一周所损耗的能量与磁滞回线所包围的面积成正比，因此在交变磁化的情况下总希望选用磁滞回线面积小的铁心材料。

#### 10. 平均磁化曲线

以不同的磁场强度最大值对铁心进行反复磁化，可得一系列大小不同的磁滞回线，如图 1.6 所示连接各磁滞回线的顶点即得平均磁化曲线，它与起始磁化曲线很接近。常用铁磁材料的基本磁化曲线如图 1.7 所示。

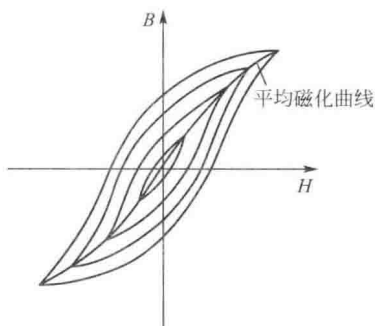


图 1.6 平均磁化曲线

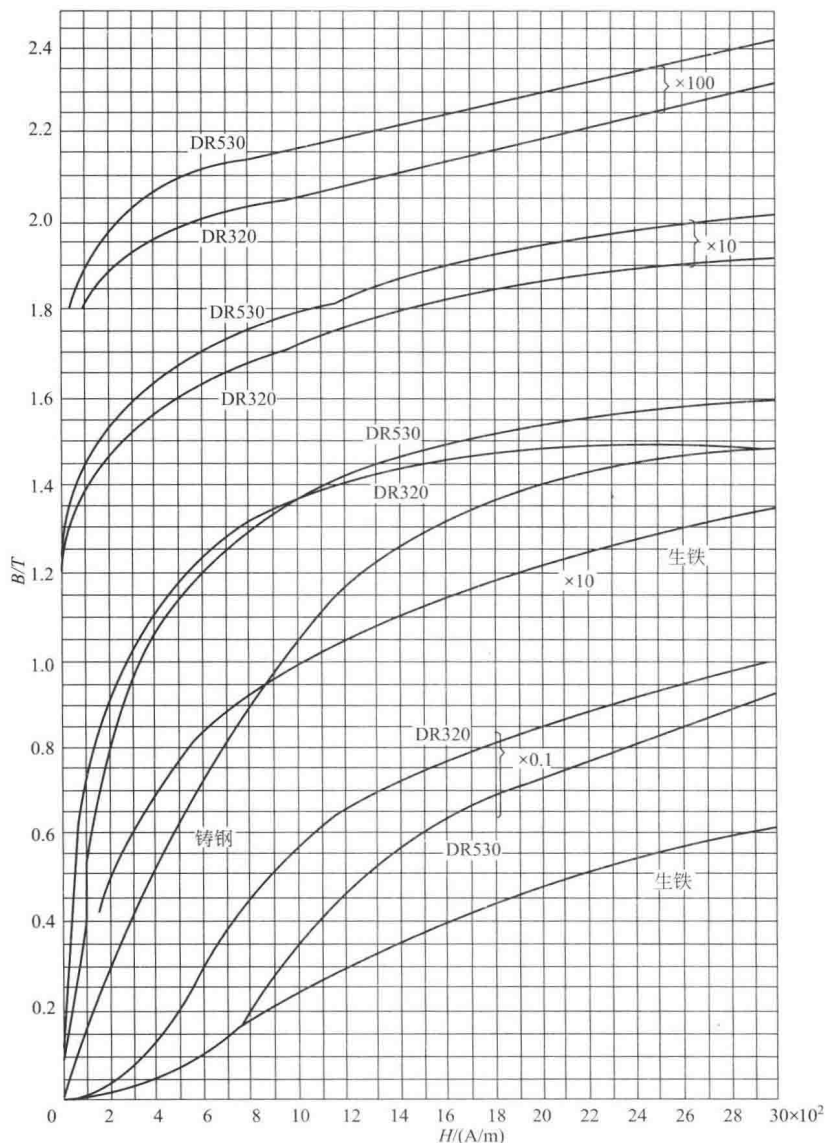


图 1.7 常用铁磁材料的基本磁化曲线





### 11. 直流磁导率

在铁心被直流磁化的情况下应使用直流磁导率  $\mu_d$ 。根据式(1-12)，如图 1.8 中  $P$  点的直流磁导率为

$$\mu_d = \frac{B_d}{H_d} \quad (1-13)$$

实际上  $\mu_d$  就是线段  $OP$  的斜率，即  $\tan\alpha_d = B_d/H_d = \mu_d$ ，在磁化曲线的  $Oa$  段  $\mu_d$  可以认为是常数，以后  $\mu_d$  随  $H$  的增加而减小，可见铁磁物质的直流磁导率不是常数。

### 12. 交流磁导率

磁放大器的铁心处于交直流混合磁化的状态下，要反映磁场强度交流成分对磁感应强度交流成分的影响，必须使用交流磁导率  $\mu_a$ 。如图 1.8 所示，在磁场强度的直流成分  $H_d$  上叠加着一个交流成分  $\Delta H = H'' - H'$ ，与此相应地在磁感应强度的直流成分  $B_d$  上叠加着一个交流成分  $\Delta B = B'' - B'$ ，铁心工作在  $P'$  点和  $P''$  点之间。 $P$  点的交流磁导率为

$$\mu_a = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (1-14)$$

其实  $\mu_a$  就是线段  $P'P''$  的斜率  $\tan\alpha_a = \Delta B/\Delta H = \mu_a$ 。当磁场强度的交流成分  $\Delta H$  越来越小时，线段  $P'P''$  也越来越靠近磁化曲线在  $P$  点的切线，因此磁化曲线某点的交流磁导率  $\mu_a$  可定义为该点切线的斜率。

铁磁物质交流磁导率  $\mu_a$  随直流磁场强度  $H_d$  的变化曲线  $\mu_a = f(H_d)$  如图 1.9 所示。

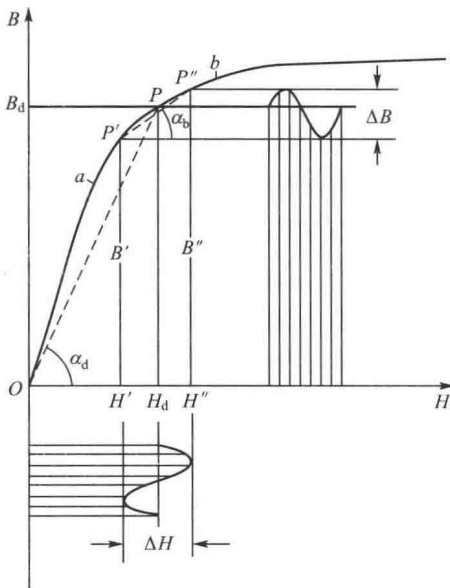


图 1.8 直流磁导率和交流磁导率

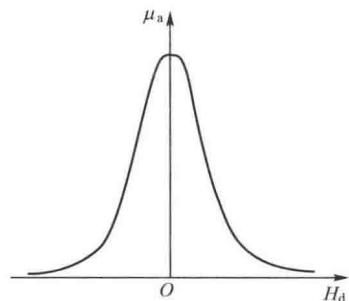


图 1.9  $\mu_a = f(H_d)$  曲线

### 13. 软磁材料

矫顽力很小的铁磁物质称为软磁材料，如铁、硅钢片、坡莫合金等。优良的软磁材料