



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电工电子应用技术

电工学Ⅲ（第三版）

史仪凯 主编



科学出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工电子应用技术

(电工学Ⅲ)(第三版)

史仪凯 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本套电工学教材是依据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导委员会2011年新修订的“电工学课程教学基本要求”,在第二版的基础上精选、改写、补充、修订而成。全套教材分为《电工技术(电工学Ⅰ)》、《电子技术(电工学Ⅱ)》和《电工电子应用技术(电工学Ⅲ)》三册。配合文字教材相继出版有电子教案、网络课程、作业集和学习指导等立体化配套教材。本套书可作为高等学校工科非电类专业本科生和专科生“电工学”课程的教材,也可供科技人员阅读。

本书第一版2005年获国家级教学成果二等奖,是2007年国家级精品课程主干教材;第二版是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,2009年被评为普通高等教育国家级精品教材,2012年被评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子应用技术·电工学·3/史仪凯主编.—3版.—北京:科学出版社,2015.12

(“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材·普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-03-044577-3

I. ①电… II. ①史… III. ①电工技术-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第124250号

责任编辑:余江 张丽花 / 责任校对:胡小洁

责任印制:霍兵 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

大厂书文印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年1月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2008年9月第 二 版 印张:18 1/2

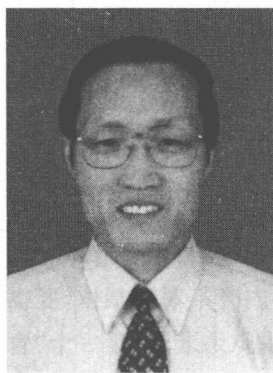
2015年12月第 三 版 字数:373 000

2015年12月第五次印刷

定价:46.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

主 编 简 介



史仪凯 西北工业大学机电学院教授、博士生导师、国家级教学名师。现任西北工业大学国家级“电工学精品课程”和国家级“电工学课程教学团队”负责人。兼任中国高等学校电工学研究会副理事长。

长期从事电工学、机械电子工程、电气工程教学和科研工作。主讲本科生和研究生课程 10 余门。先后主持国家自然科学基金、省部级基金课题 10 余项,国家和省部级教学研究课题 10 余项。已培养博士、硕士研究生 90 多人。主编(著、译)出版教材和著作 20 余部。在国内外学术刊物和国际会议发表论文 300 余篇,其中被 SCI、EI、ISTP 收录 100 余篇,申请授权和受理国家发明专利 20 余项。先后获国家级教学成果二等奖 1 项、省部级教学成果和科技奖 10 余项、宝钢优秀教师奖 1 项。

联系地址:西安市友谊西路 127 号 西北工业大学 403 信箱

邮编:710072

电话:029-88494893

传真:029-88494893

E-mail:ykshi@nwpu.edu.cn

第三版前言

本套教材是依据教育部高等学校教学指导委员会新修订的“电工学课程教学基本要求”，课程的特点、作用和任务，以及编者多年从事电工学课程教学和教改的经验体会，在第二版的基础上不断总结提高和修订完善而成。为使电工学（多学时）教材更加符合学生的认知规律和教学要求，将电工学（多学时）分《电工技术》（电工学Ⅰ）、《电子技术》（电工学Ⅱ）和《电工电子应用技术》（电工学Ⅲ）三册编写。

本套教材自2005年第一版出版以来，为适应科学技术快速发展和教学改革的需要，对结构体系和内容不断总结提高和完善修订，2006年被遴选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。2012年又被遴选为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本次修订的指导原则是：强化基础性，精选课程的基础内容，叙述上既要简明扼要，又要符合学生认识规律，使学生通过基础内容的学习掌握基本理论、知识和技能，不断提高自学能力和创新意识，为后续课程的学习和今后从事工程技术工作打好电工电子技术的理论基础；突出应用性，电工电子技术是一门实践性和应用性很强的技术基础课，教材不仅涉及知识面广，而且有着广阔的工程背景，化解难教、难学的被动教学局面，关键在于突出“应用”，使学生“学懂”和“会用”，教材内容的安排力求与工程实践紧密结合，通过教学使学生掌握所学知识的具体应用，提高学生分析和解决问题的能力；体现先进性，随着电工电子技术的快速发展，新知识、新技术和新器件不断涌现，教材内容必须不断更新，力求在结构体系上与教学要求相吻合，内容阐述上要体现一个“新”字，以新理论、新方法和新内容激励学生的学习兴趣，提高学生的科学思维 and 创新能力。

本套教材（第三版）主要作了以下修订：

（1）优化了部分章节的结构体系，如除了将涉及电工技术和电子技术的“继电器控制”、“可编程序控制器及其应用”、“电气电测技术”等内容，从《电工技术》教材中调整至《电工电子应用技术》教材中介绍外，并将整流、滤波和稳压电路安排在二极管应用中介绍；将“集成串联型稳压电路”与“开关型稳压电源”内容一并安排在“集成运算放大器的应用”中介绍；将“电压源与电流源及其等效变换”和“受控源”内容安排在“电路的基本概念与基本定律”介绍等。

（2）改写了“半导体三极管与基本放大电路”、“集成运算放大器的应用”、“门

电路与组合逻辑电路”、“触发器与时序逻辑电路”、“交流电动机”、“直流电动机”、“电气自动控制技术”和“可编程序控制器原理与应用”等部分章节内容,如“双稳态触发器”一节中在介绍基本RS触发器的逻辑功能后,其他触发器不再介绍具体翻转情况,直接给出逻辑功能、状态表、逻辑符号和时序图。

(3) 新增了反映电工技术和电子技术发展的新技术、新理论、新产品,如R铁心变压器、超声波电动机、液晶显示器及驱动电路、电动机的变频调速、非电量检测中的信号处理电路、开关型稳压电源电路等信息、通信、控制方面的相关内容。

(4) 删去了部分章节中的内容,如“集成运算放大器的应用”中的“信号测量电路”和“精密整流电路”;“电气自动控制技术”中的“继电器控制电路的逻辑函数式”等内容,以及教材中的“模拟试题”和“试题解答”。

(5) 修改、补充了部分章节的例题、“练习与思考”和“习题”。

(6) 书中带标号“*”的章节属于加深、拓宽内容,教师可根据专业特点和学时取舍。

在普通高等教育“十一五”国家级规划教材“电工学立体化教材(第二版)”项目的支持下,完成与本套教材配套的立体化教材有:

(1) 《电工学(I、II、III)(第二版)学习指导》,史仪凯主编;

(2) 《电工技术网络课程》,史仪凯、袁小庆主编;

(3) 《电子技术网络课程》,史仪凯、袁小庆主编;

(4) 《电工电子应用技术网络课程》,李志宇、赵敏玲主编;

(5) 《电工电子技术》,史仪凯主编;

(6) 《电工电子技术学习指导》,袁小庆主编;

(7) 《电工技术(第二版)》电子教案,史仪凯主编;

(8) 《电子技术(第二版)》电子教案,向平主编;

(9) 《电工电子应用技术(第二版)》电子教案,赵妮主编;

(10) 《电工电子技术》电子教案,袁小庆主编;

(11) 与电工学四部文字教材配套的作业集。

本书由西北工业大学史仪凯主编和统稿,卢健康任副主编。其中史仪凯编写第1章、第9章和改写部分章节;袁小庆编写第2章、附录和部分习题解答;王文东编写第3章;向平编写第4章;田梦君编写第5章;卢健康编写第6章;王引卫编写第7章;刘雁编写第8章;赵妮编写第10章。本书2009年被评为普通高等教育国家级精品教材。

本书由西安交通大学马西奎教授和西北工业大学张家喜教授审阅,提出了宝

目 录

第三版前言

第 1 章 交流电动机	1
1.1 三相异步电动机的结构与工作原理	1
1.1.1 三相异步电动机的结构	1
1.1.2 三相异步电动机的工作原理	4
1.2 三相异步电动机的电路分析	9
1.2.1 定子电路	9
1.2.2 转子电路.....	10
1.3 三相异步电动机的转矩与机械特性.....	13
1.3.1 电磁转矩.....	13
1.3.2 机械特性.....	13
1.4 三相异步电动机的使用.....	17
1.4.1 铭牌和技术数据	17
1.4.2 启动	19
1.4.3 调速	25
1.4.4 制动	27
1.5 三相异步电动机的选择与经济运行.....	28
1.5.1 电动机的选择	28
1.5.2 电动机的经济运行	30
1.6 单相异步电动机.....	32
1.6.1 单相异步电动机的工作原理	32
1.6.2 单相异步电动机的应用	36
* 1.7 三相同步电动机.....	38
1.7.1 同步电动机的结构	38
1.7.2 同步电动机的工作原理	39
1.7.3 同步电动机的启动	39
本章小结	40
习题	41
第 2 章 直流电动机	43
2.1 直流电机的结构.....	43

2.1.1 定子	44
2.1.2 转子	44
2.2 直流电机的工作原理	45
2.3 直流电动机的机械特性	46
2.4 直流电动机的使用	49
2.4.1 启动	49
2.4.2 反转	50
2.4.3 调速	50
2.5 直流电动机的制动	55
2.5.1 能耗制动	55
2.5.2 反接制动	55
本章小结	55
习题	56
* 第3章 控制电动机	58
3.1 伺服电动机	58
3.1.1 交流伺服电动机	58
3.1.2 直流伺服电动机	60
3.2 步进电动机	61
3.2.1 单三拍	62
3.2.2 双三拍	63
3.2.3 六拍	64
3.3 力矩电动机	65
3.3.1 交流力矩电动机	66
3.3.2 直流力矩电动机	67
3.4 超声波电动机	68
本章小结	70
习题	71
第4章 电气自动控制技术	73
4.1 几种常用低压控制电器	73
4.1.1 刀开关	73
4.1.2 组合开关	74
4.1.3 按钮	74
4.1.4 熔断器	75
4.1.5 自动空气断路器	76
4.1.6 接触器	77

4.1.7 中间继电器	78
4.1.8 热继电器	78
4.2 三相异步电动机常用控制系统	79
4.2.1 点动控制系统	79
4.2.2 连续控制系统	80
4.2.3 正反转控制系统	81
4.3 三相异步电动机行程控制系统	83
4.3.1 行程开关	83
4.3.2 行程控制系统	83
4.4 三相异步电动机时限控制系统	85
4.4.1 时间继电器	85
4.4.2 时限控制系统	86
4.5 三相异步电动机顺序联锁控制系统	88
本章小结	90
习题	91
第5章 可编程序控制器原理与应用	93
5.1 PLC组成与工作原理	93
5.1.1 PLC的组成	93
5.1.2 PLC工作方式	95
5.1.3 PLC类型和性能	96
5.1.4 PLC的主要技术性能	98
5.2 PLC编程语言与基本指令	100
5.3 PLC的编程原则与方法	103
5.3.1 编程原则	103
5.3.2 PLC指令编程举例	105
5.4 PLC的应用设计	110
5.4.1 确定系统控制任务	110
5.4.2 选择PLC机型	111
5.4.3 系统设计	112
5.4.4 设计举例	112
本章小结	117
习题	117
第6章 电力电子技术基础	122
6.1 电力电子器件	122
6.1.1 普通晶闸管	123

6.1.2	两种特殊晶闸管	129
6.1.3	电力场效应晶体管	130
6.1.4	绝缘栅双极型晶体管	132
6.1.5	MOS 控制晶闸管	133
6.2	可控整流电路	134
6.2.1	单相半波可控整流电路	134
6.2.2	单相半控桥式整流电路	137
6.2.3	单结晶体管触发电路	139
6.3	交流调压器与直流斩波器	144
6.3.1	交流调压器	144
6.3.2	直流斩波器	146
6.4	直流电动机 PWM 调速系统	147
6.4.1	脉宽调制变换器	147
6.4.2	脉宽调速系统的机械特性	150
* 6.5	变频与逆变电路	151
6.5.1	概述	151
6.5.2	变频装置	152
* 6.6	异步电动机的变频调速	155
6.6.1	变频调速的基本控制方法	155
6.6.2	正弦波脉宽调制逆变器	157
6.6.3	SPWM 波形的生成方法	161
	本章小结	162
	习题	164
第 7 章	电气电测技术	166
7.1	电测技术方法分类	166
7.1.1	电测技术主要优点	166
7.1.2	电测方法分类	167
7.2	电气测量误差分析	168
7.2.1	误差定义	168
7.2.2	误差分类和来源	170
7.3	常用电工仪表分类	171
7.3.1	磁电式仪表	172
7.3.2	电磁式仪表	173
7.3.3	电动式仪表	175
7.4	电压、电流与电功率测量	176

7.4.1	电压的测量	176
7.4.2	电流的测量	177
7.4.3	功率的测量	177
7.4.4	万用表	180
* 7.5	温度传感器与应用	181
7.5.1	热敏电阻	182
7.5.2	热电偶	183
7.5.3	集成温度传感器	186
* 7.6	压力传感器与应用	187
7.6.1	应变式电阻传感器	187
7.6.2	电感式传感器	188
7.6.3	电容式传感器	190
* 7.7	其他传感器与应用	191
7.7.1	霍尔传感器	191
7.7.2	光电传感器	193
7.7.3	CCD 图像传感器	194
* 7.8	非电量电测系统	196
7.8.1	传感器的作用和选择	197
7.8.2	信号处理电路	197
7.8.3	信号显示和记录	197
	本章小结	198
	习题	199
* 第 8 章	信号处理与数据采集系统	200
8.1	测量放大电路	200
8.1.1	电桥放大电路	200
8.1.2	电荷放大电路	201
8.2	调制与解调电路	202
8.2.1	调制器工作原理	202
8.2.2	解调器工作原理	203
8.3	多路模拟开关	204
8.3.1	CMOS 模拟开关	205
8.3.2	集成模拟多路开关	205
8.4	电压/频率转换电路	208
8.4.1	U/F 转换电路工作原理	208
8.4.2	集成 U/F 转换器	209

8.5	采样保持电路	211
8.5.1	采样定理	211
8.5.2	S/H 电路工作原理	211
8.5.3	集成 S/H 电路	212
8.6	数据采集系统	213
8.6.1	多通道共享 S/H 和 A/D 系统	214
8.6.2	多通道共享 A/D 系统	214
8.6.3	多通道 A/D 系统	215
	本章小结	215
	习题	216
第 9 章	现代通信技术	217
9.1	通信系统分类	217
9.1.1	通信系统按传输介质分类	217
9.1.2	通信系统按传输信号分类	218
9.2	通信方式	220
9.2.1	同频单工方式	220
9.2.2	双频双工方式	220
9.2.3	半双工方式	221
9.3	信道与传输介质	221
9.3.1	信道	221
9.3.2	传输介质	222
9.4	信号调制方式	224
9.4.1	模拟信号调制	224
9.4.2	数字信号调制	226
9.5	光纤通信技术	226
9.5.1	光纤传输特性	226
9.5.2	光纤通信系统	227
9.6	卫星通信技术	228
9.6.1	卫星通信特点	229
9.6.2	卫星通信分类	230
9.6.3	卫星通信系统	231
9.7	移动通信技术	232
9.7.1	移动通信特点和分类	233
9.7.2	移动通信系统	233
9.7.3	公用移动电话系统	235

9.7.4 无绳电话系统	236
9.7.5 无线寻呼系统	236
9.7.6 专用移动通信系统	237
本章小结	237
习题	238
* 第 10 章 电工电子 EDA 仿真技术	239
10.1 Multisim 10 主窗口与工具库	239
10.1.1 主窗口	239
10.1.2 元器件库	240
10.1.3 测试仪器	242
10.2 仿真电路的创建	247
10.2.1 界面设置	247
10.2.2 元器件操作和仪器调用	248
10.2.3 仪器的调用及连接	252
10.3 电路仿真分析	253
10.3.1 模拟电路仿真实例	253
10.3.2 数字电路仿真实例	258
本章小结	259
习题	260
部分习题答案	262
参考文献	265
附录 A Y 系列三相异步电动机技术数据	266
附录 B OMRON 公司 CMP1A 基本指令	267
附录 C OMRON 公司 CMP1A 基本梯形图	268
附录 D 国产晶闸管主要参数	269
附录 E GTR 主要参数	270
附录 F MOSFET 主要参数	271
附录 G IGBT 主要参数	272
附录 H GE 公司 MCT 主要参数	273
附录 I 电工测量仪表按被测电量分类	274
附录 J 典型光电耦合器主要参数	274
附录 K 常用热电偶主要参数	275
附录 L 部分 NTC 型热敏电阻主要参数	275
中英文名词对照	276

第 1 章 交流电动机

实现机械能与电能相互转换的旋转机械称为电机。将机械能转换为电能的电机称为发电机,将电能转换为机械能的电机称为电动机。

电机可分为直流电机和交流电机两大类,交流电机又分为异步电机和同步电机两种。

现代各种生产机械都广泛应用电动机来驱动。电动机按使用电源种类的不同,通常可分为交流电动机和直流电动机,交流电动机又分为异步电动机和同步电动机。电动机根据使用场合的不同可分为动力用电动机和控制用电动机。

本章主要讨论三相异步电动机的基本结构、工作原理、技术性能和使用方法,最后简单介绍单相异步电动机和同步电动机等。

1.1 三相异步电动机的结构与工作原理

在异步电动机中,通常将功率(容量)较大的做成三相异步电动机,其有利于三相电源的负载平衡,而功率较小者做成单相异步电动机。三相异步电动机与其他类型的电动机相比较,具有结构简单、运行可靠、价格低廉、维护方便和运行效率高等优点。其缺点是功率因数较低,调速性能差(尤其是大范围内调速)。在要求调速范围较宽、平滑无级的生产机械中,大多使用直流电动机或者其他类型的电动机。近年来,随着电力电子技术的迅猛发展,较好地解决了异步电动机的调速问题,使三相异步电动机在各个生产领域都得到了最广泛的应用。例如各种机床、起重机械、鼓风机、水泵以及各种动力机械等普遍使用三相异步电动机,各种家用电器、医疗器械和许多小型机械则使用单相异步电动机。三相异步电动机的容量从几十瓦到几百千瓦,约占全国电动机总容量的 85%左右。

1.1.1 三相异步电动机的结构

三相异步电动机由定子和转子两个基本部分组成,中小型异步电动机定子和转子之间一般有约 0.1~0.2mm 厚度的空气隙,如图 1.1.1 所示。

1. 定子部分

三相异步电动机的定子部分是电动机固定不动的部分。由机座(外壳)、定子铁心、定子绕组和端盖等组成。

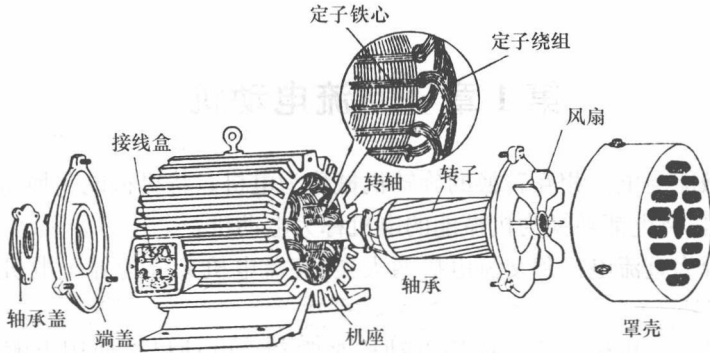


图 1.1.1 三相鼠笼式异步电动机的结构

机座通常由铸铁制成,内装有 0.35~0.5mm 圆环状硅钢片叠成的筒形(定子)铁心。机座的主要作用是固定和支撑定子铁心,要求有足够的机械强度和刚度,能够承受运输和运行过程中的各种作用力。

定子铁心是电动机磁路的一部分,为了减小涡流和磁滞损耗,由涂有绝缘漆的硅钢片叠成。定子内圆表面有若干个凹槽,以便使三相绕组放置在槽中,如图 1.1.2 所示。定子铁心是用压力机压入机座内的。

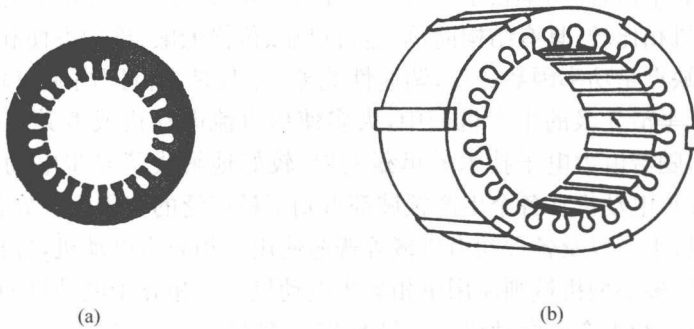


图 1.1.2 定子铁心
(a) 圆环状硅钢片;(b) 筒形定子铁心

定子绕组是定子的电路部分。异步电动机的定子绕组由带绝缘的导线——漆包铜线、铝线或纱包线等制成,安装在线槽内。定子绕组与槽壁之间还嵌有青壳线等绝缘材料。在制造定子绕组时,一般都先用模具把导线绕成线圈,再逐个地嵌入铁心槽中,然后按一定规则将所有线圈连接成三组对称分布于定子铁心中的绕组(称为定子三相对称绕组)。

定子三相绕组共有六个端子,三个首端分别标记为 U_1 、 V_1 、 W_1 ,三个对应的尾

端分别标记为 U_2 、 V_2 、 W_2 ，并将它们分别引到电动机的接线盒的接线柱上。根据需要可将三相绕组连接成星(Y)形和三角(Δ)形，如图 1.1.3 所示。两种不同的连接，可使电动机在两种不同电压下工作。

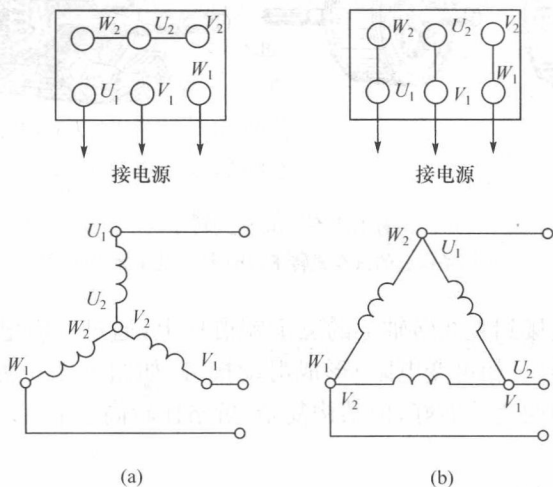


图 1.1.3 定子绕组的两种接法

(a) 星形接法；(b) 三角形接法

2. 转子部分

转子是电动机的转动部分，它由转子铁心、转子绕组、转轴和风扇等组成。

转子铁心是电动机磁路的一部分，也由 $0.35 \sim 0.5\text{mm}$ 硅钢片叠压而成。转子铁心的外圆周上有槽，槽内放置转子绕组，转子固定在转轴上，如图 1.1.4 所示。

转子绕组的作用是产生感应电动势、流过电流和产生电磁转矩。按转子绕组结构型式不同，异步电动机可分为鼠笼式和绕线式两种。图 1.1.5 所示是鼠笼式转子的结构，它在转子铁心的槽内放置铜条，其两端用端环连接，如果抽掉转子铁心，转子绕组形似鼠笼，所以称为鼠笼式转子绕组，如图 1.1.5(a)所示。

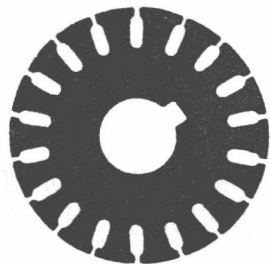


图 1.1.4 转子铁心冲片

此外，也可将铝液浇注在铁心槽内，铸成一个鼠笼，如图 1.1.5(b)所示。这种转子既经济又便于生产，中小型电动机几乎都采用铸铝转子。

绕线式转子的绕组和定子绕组相似，是将由绝缘导线做成的绕组元件放置在转子铁心槽内，然后连接成对称的三相绕组。转子三相绕组通常连接成星形，星形

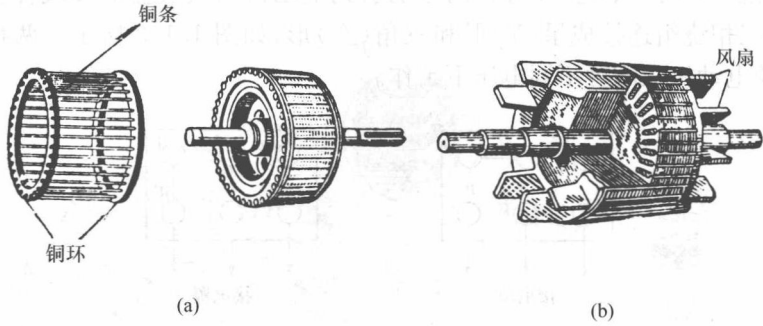


图 1.1.5 鼠笼式转子

(a) 铜条构成的鼠笼式转子；(b) 铸铝的鼠笼式转子

绕组的三根端线连接到装在转轴上的三个铜滑环上，通过一组电刷(碳刷)与外界静止的启动变阻器(三相可变电阻)形成滑动接触，如图 1.1.6 所示。绕线式三相异步电动机启动和调速性能好，但结构复杂、价格比较高。

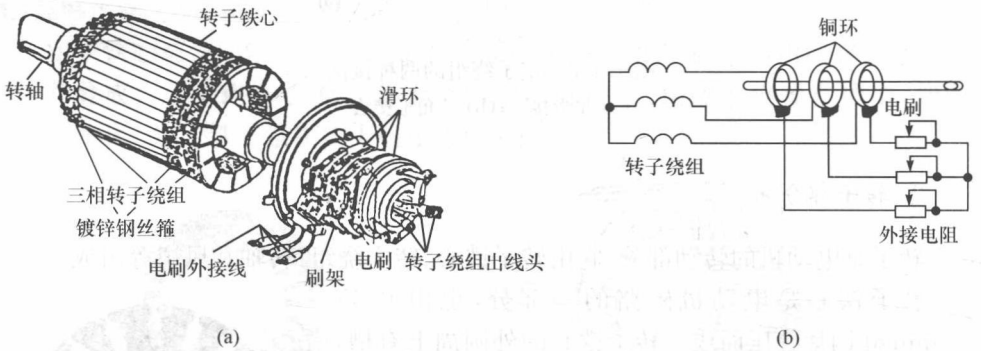


图 1.1.6 绕线式转子

(a) 转子结构图；(b) 转子示意图

鼠笼式异步电动机和绕线式异步电动机只是转子构造不同，它们的工作原理是完全一样的。

1.1.2 三相异步电动机的工作原理

1. 转动原理

图 1.1.7 是异步电动机的转动原理图。设旋转磁极是一对 N、S 磁极的永久磁铁，外壳是圆筒形，可以人工转动。中间是一鼠笼式转子。当旋转磁极以 n_1 转速旋转时，在转子的铜条中就产生感应电动势。这个感应电动势的实际方向可用