

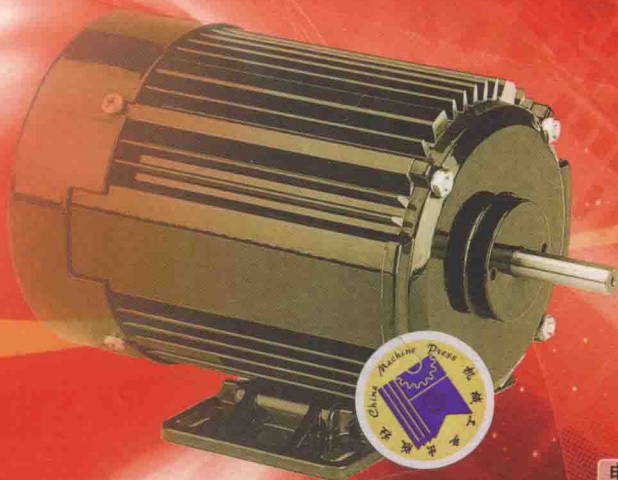


全国高等职业教育规划教材

电机与电气控制技术

吴 敏 陈菊华 汤泽容 编著

- 以能力为主，以应用为本。
- 借鉴国外职教的先进模式。
- 顺应我国职教改革的需要。
- 基于岗位技能，面向操作过程。



电子教案下载网址 www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电机与电气控制技术

吴 敏 陈菊华 汤泽容 编著



机械工业出版社

本书包括直流电机、变压器、三相异步电动机、其他电动机、常用低压电器、三相异步电动机电气控制线路、单相异步电动机电气控制线路、常用机床电气控制线路共8章内容。章后配有实训和习题,以供教学时选择使用。

本书力争满足高职院校教学的实际需要,做到理论联系实际,注重基本概念,强化实训,具有很强的实用性,内容深入浅出,简明扼要。

本书可作为高职高专院校制冷与空调技术、应用电子技术、建筑电气工程技术、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教材。除去带*号的选学内容后也可作为中等职业技术学校 and 工程技术人员的培训教材或参考书。

本书配套授课电子课件,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 1239258369, 电话: 010-88379739)。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电子控制技术/吴敏,陈菊华,汤泽容编著. —北京:机械工业出版社, 2014.4

全国高等职业教育规划教材

ISBN 978-7-111-46086-2

I. ①电… II. ①吴… ②陈… ③汤… III. ①电机学—高等职业教育—教材②电气控制—高等职业教育—教材 IV. ①TM3②TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第044219号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:王颖 版式设计:赵颖喆

责任校对:陈立辉 责任印制:刘岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2014年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13印张·314千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-46086-2

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

全国高等职业教育规划教材 电子类专业编委会成员名单

主 任 曹建林

副 主 任 张中洲 张福强 董维佳 俞 宁 杨元挺 任德齐
华永平 吴元凯 蒋蒙安 祖 炬 梁永生

委 员 (按姓氏笔画排序)

于宝明	尹立贤	王用伦	王树忠	王新新	任艳君
刘 松	刘 勇	华天京	吉雪峰	孙学耕	孙津平
孙 萍	朱咏梅	朱晓红	齐 虹	张静之	李菊芳
杨打生	杨国华	汪赵强	陈子聪	陈必群	陈晓文
季顺宁	罗厚军	胡克满	姚建永	钮文良	聂开俊
夏西泉	袁启昌	郭 勇	郭 兵	郭雄艺	高 健
曹 毅	章大钧	黄永定	曾晓宏	谭克清	戴红霞

秘 书 长 胡毓坚

副秘书长 蔡建军

出版说明

根据《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》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国近 60 所高等职业院校的骨干教师对在 2001 年出版的“面向 21 世纪高职高专系列教材”进行了全面的修订和增补,并更名为“全国高等职业教育规划教材”。

本系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会分别会同各高职高专院校的一线骨干教师,针对相关专业的课程设置,融合教学中的实践经验,同时吸收高等职业教育改革的成果而编写完成的,具有“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价,并有多品种被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订和增补过程中,除了保持原有特色外,针对课程的不同性质采取了不同的优化措施。其中,核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。同时,根据实际教学的需要对部分课程进行了整合。

归纳起来,本系列教材具有以下特点:

- 1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- 2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度,强调专业技术应用能力的训练,适当增加实训环节。
- 3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述要容易理解、清晰简洁,多用图表来表达信息;增加相关技术在生产中的应用实例,引导学生主动学习。
- 4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新,及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念,并积极支持新专业的教材建设。
- 5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合,提高教学服务水平,为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快,加之我们的水平和经验有限,因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和错误。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息,以利于我们今后不断提高教材的出版质量,为广大师生提供更多、更适用的教材。

机械工业出版社

前 言

本书结合我国高职高专教育的实际情况，体现高职高专教育的特点，在基本理论的叙述上力求通俗易懂，深入浅出，说理清楚，突出应用。编者总结了许多实际维修经验，章后配有实训和习题，供高职高专院校教学实践时选择使用。

本书详细介绍了直流电机、变压器、三相异步电动机、其他电动机、常用低压电器、三相异步电动机电气控制线路、单相异步电动机电气控制线路、常用机床电气控制线路等内容。可作为高职高专院校制冷与空调技术、应用电子技术、建筑电气工程技术、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教材。

本书教学内容共需 102 学时，课时分配方案可参见下表。

章 次	学 时 数	章 次	学 时 数
第 1 章	14	第 5 章	18
第 2 章	8	第 6 章	18
第 3 章	18	第 7 章	4
第 4 章	6	第 8 章	16

书中标有“*”号的章节，属于加宽或加深内容，供不同学校和专业选用。

本书由重庆工贸职业技术学院吴敏、陈菊华、汤泽容编著。其中，吴敏负责全书的组织策划、修改补充、统稿和定稿工作，并编写第 1 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章；陈菊华编写第 7 章、第 8 章；汤泽容编写第 2 章。

本书在编写过程中参阅了大量文献，同时也得到了与重庆工贸职业技术学院开展“校企合作”的有关单位技术人员的热情帮助，在此一并表示感谢！

各厂家对其产品的原理图及结构图在标注上并不统一。为便于查阅和方便维修，本书中的元器件符号仍随原图标注，没有再全书统一，特此说明。

由于时间仓促及编者水平有限，书中难免存在不妥或错误之处，恳请使用本书的师生及其他读者批评指正，以便进一步修改，力求日臻完善。

编 者

目 录

出版说明

前言

第1章 直流电机 1

1.1 直流电机的主要结构及基本

工作原理 1

1.1.1 直流电机的主要结构 1

1.1.2 直流电机的基本工作原理 3

1.2 直流电机的电枢绕组 5

1.2.1 单叠绕组 7

1.2.2 单波绕组 9

1.3 直流电机的铭牌数据及励磁

方式 10

1.3.1 铭牌数据 10

1.3.2 励磁方式 11

1.4 直流电机的磁场及电枢反应 11

1.4.1 直流电机的磁场 11

1.4.2 直流电机的电枢反应 13

1.5 直流电机的换向 14

1.5.1 换向的物理过程 14

1.5.2 改善换向的方法 14

1.6 直流电机的电枢电动势、电磁

转矩及功率 15

1.6.1 直流电机的电枢电动势 15

1.6.2 直流电机的电磁转矩 15

1.6.3 直流电机的功率 16

1.7 直流电机的基本方程式及直流

电动机的工作特性 17

1.7.1 直流电机的基本方程式 17

1.7.2 直流电动机的工作特性 18

1.8 直流电动机的电力拖动系统 19

1.8.1 电力拖动系统的3种工作状态 19

1.8.2 生产机械的负载特性 20

1.8.3 他励直流电动机的机械特性 21

1.8.4 他励直流电动机的起动 24

1.8.5 他励直流电动机的调速 25

1.8.6 他励直流电动机的制动 28

1.9 实训 32

1.9.1 实训1——他励直流电动机的

工作特性和机械特性 32

1.9.2 实训2——直流电动机的使用 34

1.10 习题 37

第2章 变压器 38

2.1 变压器的主要结构及工作原理 38

2.1.1 变压器的主要结构 38

2.1.2 变压器的工作原理 40

2.2 变压器的分类、型号和技术

参数 41

2.2.1 变压器的分类 41

2.2.2 变压器的型号 41

2.2.3 变压器的技术参数 42

2.3 电力变压器的联结组别 42

2.4 变压器的空载运行及等效电路 43

2.4.1 变压器空载运行的电磁关系 43

2.4.2 变压器各电磁量参考方向的规定 43

2.4.3 感应电动势 44

2.4.4 空载电流 45

2.4.5 变压器空载运行时的电动势

平衡方程 45

2.4.6 变压器空载时的等效电路 46

2.4.7 变压器的电压比 46

2.5 变压器的负载运行及等效电路 47

2.5.1 负载运行时的磁动势平衡方程 47

2.5.2 负载运行时的电动势平衡方程 48

2.5.3 变压器负载运行的等效电路 48

2.6 变压器的运行特性 49

2.6.1 变压器的外特性和电压变化率 49

2.6.2 变压器的损耗和效率	50	4.1.2 单相异步电动机的工作原理	85
2.7 实训——变压器参数的测定	51	4.1.3 罩极式单相异步电动机	86
2.8 习题	54	4.2 伺服电动机	87
第3章 三相异步电动机	55	4.2.1 直流伺服电动机	87
3.1 三相异步电动机的工作原理、 结构和铭牌参数	55	4.2.2 交流伺服电动机	89
3.1.1 三相异步电动机的工作原理	55	4.3 步进电动机	91
3.1.2 三相异步电动机的结构	57	4.3.1 步进电动机的工作原理	91
3.1.3 三相异步电动机的铭牌参数	59	4.3.2 步进电动机的控制	93
3.2 三相异步电动机的绕组	61	4.4 习题	94
3.2.1 交流绕组的几个基本概念	61	第5章 常用低压电器	95
3.2.2 交流电动机绕组的排列原则 和分类	62	5.1 低压电器概述	95
3.2.3 三相单层绕组	63	5.1.1 低压电器的范围及应用	95
3.3 三相异步电动机的空载运行	66	5.1.2 低压电器的分类	95
3.3.1 空载运行时的电磁关系	67	5.1.3 低压电器的型号命名	96
3.3.2 空载时的等效电路	67	5.2 接触器	99
3.4 三相异步电动机的负载运行	68	5.2.1 接触器的用途及分类	99
3.4.1 负载运行时的电磁关系	68	5.2.2 接触器的结构及工作原理	99
3.4.2 旋转磁场对转子绕组作用产生 的各电磁量	68	5.2.3 接触器的技术参数及型号	105
3.4.3 三相异步电动机的等效电路	69	5.2.4 接触器的选择	106
3.5 三相异步电动机的功率和转矩 平衡方程式	70	5.2.5 接触器的常见故障及排除方法	106
3.5.1 功率平衡方程式	70	5.3 继电器	107
3.5.2 转矩平衡方程式	71	5.3.1 电磁式继电器	108
3.6 三相异步电动机的特性	71	5.3.2 时间继电器	111
3.6.1 三相异步电动机的工作特性	71	5.3.3 热继电器	112
3.6.2 三相异步电动机的机械特性	72	5.3.4 其他继电器	114
3.7 实训	76	5.4 常用开关	114
3.7.1 实训1——电动机绕组的检测	76	5.4.1 刀开关	114
3.7.2 实训2——测量电动机的绝缘电阻、 空载电流、转速及运行温度	78	5.4.2 HZ 组合开关	119
3.7.3 实训3——电动机的拆装	80	5.4.3 低压断路器	120
3.8 习题	83	5.5 低压熔断器	125
第4章 其他电动机	84	5.5.1 熔断器的分类	125
4.1 单相异步电动机	84	5.5.2 熔断器的型号意义	126
4.1.1 单相异步电动机的结构	84	5.5.3 熔断器的结构和工作原理	126
		5.5.4 典型熔断器	126
		5.5.5 熔断器的选择及运行维修	129
		5.6 主令电器	130
		5.6.1 按钮	130
		5.6.2 行程开关	131

5.7 低压电器的使用和维护	133	6.4 三相异步电动机降压起动控制 线路	147
5.7.1 刀开关的使用和维护	133	6.4.1 定子电路串电阻降压起动控制 线路	147
5.7.2 熔断器的使用和维护	133	6.4.2 Y- Δ 降压起动控制线路	148
5.7.3 断路器的使用和维护	134	* 6.4.3 延边三角形降压起动控制线路 ...	150
5.7.4 交流接触器的使用和维护	134	6.4.4 自耦变压器(补偿器)降压起动 控制线路	152
5.7.5 热继电器的使用和维护	135	6.4.5 三相异步电动机起动方式选择 ...	153
5.7.6 时间继电器的使用和维护	135	6.5 三相异步电动机多速控制线路 ...	153
5.8 实训——认识低压电器	135	6.5.1 变极调速原理	154
5.9 习题	136	6.5.2 双速异步电动机控制线路	154
第6章 三相异步电动机电气控制		* 6.5.3 三速异步电动机控制线路	157
线路	138	6.6 三相异步电动机制动控制线路 ...	160
6.1 电气控制系统图概述	138	6.6.1 机械制动控制	160
6.1.1 电气控制系统图	138	6.6.2 电气制动控制	163
6.1.2 电气原理图	138	6.7 实训	165
6.1.3 绘制电气控制系统图应遵循的 原则	138	6.7.1 实训1——读取低压电器控制 线路图	165
6.1.4 电气安装图	139	6.7.2 实训2——三相异步电动机点动 控制线路	166
6.2 三相异步电动机全压起动控制 线路	139	6.7.3 实训3——三相异步电动机正、 反转控制线路	166
6.2.1 刀开关控制线路	139	6.7.4 实训4——三相异步电动机Y- Δ 降压起动控制线路	167
6.2.2 接触器点动控制线路	139	6.7.5 实训5——三相异步电动机能耗 制动控制线路	167
6.2.3 电路的保护环节	140	6.7.6 实训6——接触器控制双速 电动机控制线路	168
6.2.4 接触器连动(长动)控制线路 ...	142	6.8 习题	170
6.2.5 接触器点动和连续运转混合控制 线路	143	第7章 单相异步电动机电气控制线路 ...	171
6.2.6 电动机的多点控制线路	143	7.1 单相异步电动机起动控制线路 ...	171
6.2.7 多台电动机顺序控制线路	143	7.1.1 电阻分相式起动控制线路	171
6.3 三相异步电动机正、反转控制 线路	144	7.1.2 电容分相式起动控制线路	172
6.3.1 倒顺开关正、反转控制线路	144	7.2 单相异步电动机调速控制线路 ...	173
6.3.2 接触器互锁控制的正、反转控制 线路	145	7.2.1 电抗器降压调速控制线路	173
6.3.3 按钮互锁控制的正、反转控制 线路	146	7.2.2 抽头调速控制线路	174
6.3.4 按钮和接触器复合(双重) 互锁的正、反转控制线路	146	7.2.3 电容器调速控制线路	174
6.3.5 行程开关控制的正、反转控制 线路	146	* 7.2.4 晶闸管调压调速控制线路	175

7.3 单相异步电动机正、反转控制线路	175	8.1.4 常见故障的分析与排除	181
7.3.1 将运行绕组或起动绕组的首末端对调	175	8.2 平面磨床电气控制线路	182
7.3.2 将电容器从一个绕组改接到另一个绕组	176	8.2.1 磨床的主要结构及其运动形式 ...	182
7.4 实训	176	8.2.2 电气控制线路分析	182
7.4.1 实训1——单相异步电动机调速控制线路	176	8.2.3 常见电气故障的排除	185
7.4.2 实训2——单相异步电动机正、反转控制线路	176	8.3 摇臂钻床电气控制线路	186
7.5 习题	177	8.3.1 钻床的主要结构及其运动形式 ...	186
第8章 常用机床电气控制线路	178	8.3.2 电力拖动特点及控制要求	187
8.1 普通车床电气控制线路	178	8.3.3 电气控制线路分析	187
8.1.1 车床的主要结构及其运动形式 ...	178	8.3.4 常见故障的分析与排除	190
8.1.2 电力拖动特点及控制要求	179	8.4 万能铣床电气控制线路	191
8.1.3 电气控制线路分析	179	8.4.1 铣床的主要结构及其运动形式 ...	191
		8.4.2 电力拖动特点及控制要求	192
		8.4.3 电气控制线路分析	192
		8.4.4 常见故障的分析与排除	196
		8.5 习题	197
		参考文献	198

第1章 直流电机

1.1 直流电机的主要结构及基本工作原理

直流电机包括直流发电机和直流电动机。将机械能转换为电能的是直流发电机，将电能转换为机械能的是直流电动机。

与交流电机相比，直流电机结构复杂，成本高，运行维护较困难。但直流电动机具有良好的调速性能、较大的起动转矩和过载能力等很多优点，在起动和调速要求较高的生产机械中，仍得到广泛的应用。由于电力电子技术的迅速发展，作为直流电源的直流发电机已逐步被晶闸管整流装置所取代，但在电镀、电解行业中仍继续得以应用。

1.1.1 直流电机的主要结构

1. 定子部分

定子主要由主磁极、机座、换向磁极、电刷装置和端盖组成。小型直流电机的结构如图 1-1 所示。其剖面图如图 1-2 所示。

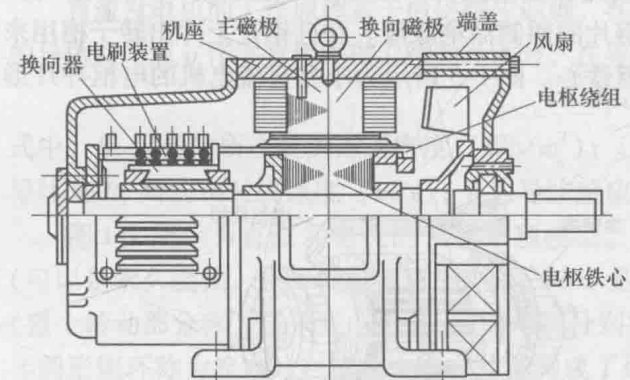


图 1-1 小型直流电机的结构图

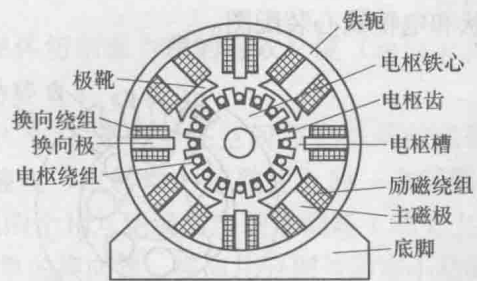


图 1-2 小型直流电机的剖面图

主磁极的作用是产生恒定、有一定空间分布形状的气隙磁通密度。主磁极由主磁极铁心和放置在铁心上的励磁绕组构成。主磁极铁心分成极身和极靴，极靴的作用是使气隙磁通密度的空间分布均匀，并减小气隙磁阻，同时极靴对励磁绕组也起支撑作用。为减小涡流损耗，主磁极铁心是用 1.0 ~ 1.5mm 厚的低碳钢板冲成一定形状，用铆钉把冲片铆紧，然后再固定在机座上。主磁极上的线圈是用来产生主磁通的，称为励磁绕组。当给励磁绕组通入直流电时，各主磁极均产生一定极性，相邻两主磁极的极性是 N、S 交替出现的。直流电机主磁极的结构如图 1-3 所示。

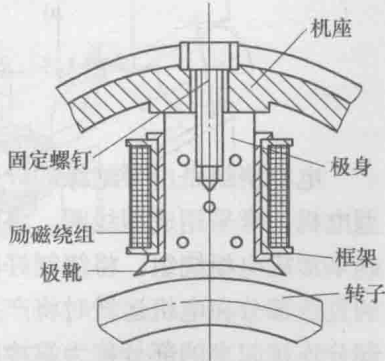


图 1-3 直流电机主磁极的结构图

一般直流电机均采用整体机座。整体机座是用导磁效果较好的铸钢材料制成的。这种机座能同时起到导磁和机械支撑作用。由于机座起导磁作用，因此机座是主磁路的一部分，称为定子铁轭。主磁极、换向极及端盖均固定在机座上，机座起机械支撑作用。

换向极用来改善直流电机的换向。一般电机容量超过 1kW 时均应安装换向极。换向极的铁心一般用整块钢板制成，在其上放置换向极绕组，换向极安装在相邻的两主磁极之间。

电刷装置是直流电机的重要组成部分。通过该装置把电机电枢中的电流与外部静止电路相连或把外部电源与电机电枢相连。电刷装置与换向片一起完成机械整流，把电枢中的交变电流变成电刷上的直流，或把外部电路中的直流变换为电枢中的交流。电刷的结构如图 1-4 所示。

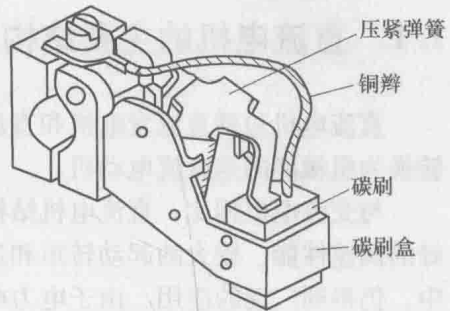


图 1-4 电刷的结构图

电机中的端盖主要起支撑作用。端盖固定于机座上，其上放置轴承支撑直流电机的转轴，使直流电机能够旋转。

2. 转子部分

直流电机的转子是电机的转动部分，又叫做电枢，由电枢铁心、电枢绕组、换向器、电机转轴和轴承等部分组成。

电枢铁心是主磁路的一部分，同时对放置在其上的电枢绕组起支撑作用。为减少电机旋转时由铁心中的磁通方向变化引起的磁滞损耗和涡流损耗，电枢铁心通常用 0.5mm 厚的低硅硅钢片或冷轧硅钢片冲压成型，并在硅钢片的两侧涂绝缘漆。在硅钢片上冲出转子槽用来放置电枢绕组。冲制好的硅钢片叠装成电枢铁心。图 1-5 所示为小型直流电机的电枢冲片形状和电枢铁心装配图。

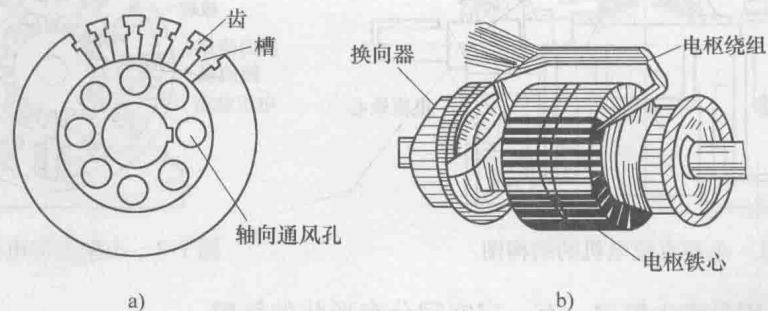


图 1-5 小型直流电机的电枢冲片形状和电枢铁心装配图
a) 电枢冲片形状 b) 电枢铁心装配图

电枢绕组是由带绝缘的导体绕制而成的。对于小型电机，常采用铜导线绕制；对于大中型电机，常采用成型线圈。将电机中的每个线圈称为一个元器件，多个元器件有规律地连接起来形成电枢绕组。将绕制好的绕组或成型绕组放置在电枢铁心上的槽内，放置在铁心槽内的直线部分在电机运转时将产生感应电动势，称为元器件的有效部分；在电枢槽两端把有效部分连接起来的部分称为端接部分，端接部分仅起连接作用，在电机运行过程中不产生感应电动势。

换向器又称为整流子。对于发电机，将换向器的作用是把电枢绕组中的交变电动势转变为直流电动势向外部输出直流电压；对于电动机，它是把外界供给的直流电流转变为绕组中的交变电流以使电机旋转。换向器由换向片组合而成，是直流电机的关键部件之一，也是最薄弱的部分。换向器采用导电性能好、硬度大、耐磨性能好的紫铜或铜合金制成，相邻的两换向片以0.6~1.2mm的云母片作为绝缘。将换向器固定在转轴的一端，换向片靠近电枢绕组一端的部分与绕组引出线相焊接。换向器的结构如图1-6所示。

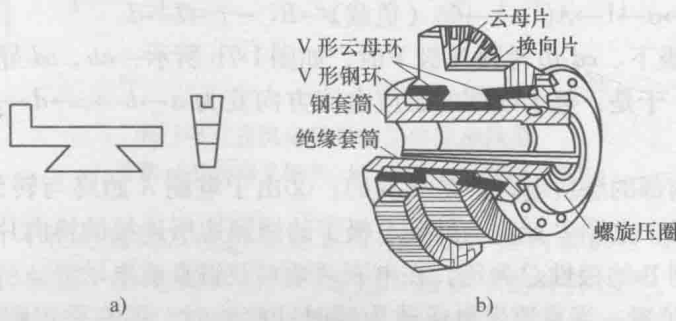


图 1-6 换向器的结构图
a) 换向片 b) 换向器

1.1.2 直流电机的工作原理

1. 直流发电机的工作原理

直流发电机的工作原理基于电磁感应原理。在磁感应强度为 B_x 的磁场中，当一根长度为 l 的导体以匀速 v 作垂直切割磁力线的运动时，在导体中会产生感应电动势，其值的大小为

$$e = B_x lv \tag{1-1}$$

式中， B_x 为导体所在处的磁通密度 (Wb/m^2)； l 为导体切割磁力线的有效长度 (m)； v 为导体与 B_x 间的相对线速度 (m/s)； e 为导体感应电动势 (V)。

图1-7所示为直流发电机的工作原理模型。图中N、S是一对在空间固定不动的磁极（可以是永久磁铁，也可以是电磁机构）， $abcd$ 是安装在可以转动的导磁柱上的一个线圈，（整个转动部分称为转子或电枢），线圈两端分别接到两个相互绝缘的半圆形铜环1和2上。半圆形铜环称为换向片，这两个换向片就构成了最简单的换向器。换向片分别与固定不动的电刷A和B保持滑动接触，这样，旋转着的线圈可以通过换向片、电刷与外电路接通。

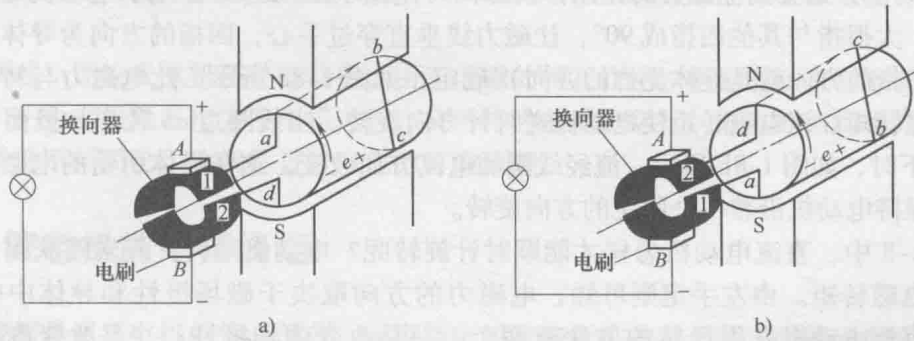


图 1-7 直流发电机的工作原理模型
a) 线圈 ab 边转到 N 极下 b) 线圈 ab 边转到 S 极下

当原动机拖动电枢以一定的速度在磁场中逆时针旋转时,根据电磁感应原理,线圈有效边 ab 和 cd 切割磁力线产生感应电动势,其方向用右手定则(又称为右手发电机定则:把右手掌伸开,大拇指与其他四指成 90° ,磁力线垂直穿过手心,大拇指指向导体运动方向,四指的方向为导体中感应电动势或感应电流的方向)确定。在图 1-7a 中所示的位置,线圈的 ab 边处于 N 极下,产生的感应电动势从 b 指向 a ;线圈的 cd 边处于 S 极下,产生的感应电动势从 d 指向 c 。在此状态下电刷 A 的极性为正,电刷 B 的极性为负。若接通电路,则电流 i 的方向为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow 1 \rightarrow A(+)\rightarrow \otimes$ (负载) $\rightarrow B(-)\rightarrow 2 \rightarrow d$ 。

当 ab 边转到 S 极下、 cd 边转到 N 极下时,如图 1-7b 所示, ab 、 cd 导体的感应电动势方向就都要随之改变,于是,整个线圈的感应电流方向变为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow 2 \rightarrow A(+)\rightarrow \otimes$ (负载) $\rightarrow B(-)\rightarrow 1 \rightarrow a$ 。

可见:①线圈内部的感应电动势是交变的;②由于电刷 A 始终与转到 N 极下的线圈边所连接的换向片接触,电刷 B 始终与转到 S 极下的线圈边所连接的换向片接触,因此电刷 A 的极性总为正,电刷 B 的极性总为负,在电刷两端可获得直流电动势。

在图 1-7a 所示位置,当直流发电机改为顺时针旋转时,用右手定则判定线圈中感应电动势的方向为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$,通过换向片与电刷的滑动接触,电刷 B 极性为正,电刷 A 极性为负。所以,直流发电机改变电枢旋转方向可以改变输出电动势的极性。

由右手定则可知,决定感应电动势方向的因素有两个:一是导体运动方向(电枢转向),二是磁场极性。所以,改变磁场的极性,也可使直流发电机电刷两端输出的电动势极性得到改变。

2. 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理基于电磁力定律。若磁场 B_x 与导体互相垂直,且导体中通以电流 i ,则作用于载流导体上电磁力 f 为

$$f = B_x li \tag{1-2}$$

式中, B_x 为导体所在处的磁通密度 (Wb/m^2); l 为导体切割磁力线的有效长度 (m); i 为导体中流过的电流 (A); f 为电磁力 (N)。

图 1-8 所示是直流电动机的工作原理模型。在电刷 A、B 两端加直流电压,在图 1-8a 所示的位置,电流从电源的正极流出,经过电刷 A、换向片 1 而流入电动机线圈,电流方向为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$,然后再经过换向片 2 与电刷 B 流回电源的负极。根据电磁力定律,线圈边 ab 与 cd 在磁场中分别受到电磁力的作用,其方向可用左手定则(又称左手电动机定则,即把左手伸开,大拇指与其他四指成 90° ,让磁力线垂直穿过手心,四指的方向为导体中电流的方向,大拇指的方向就是导体受力的方向)确定,如图 1-8a 所示。此电磁力与转子半径之积即为电磁转矩。该电磁转矩使电动机逆时针方向旋转。当线圈边 ab 转到 S 极面下、 cd 转到 N 极面下时,如图 1-8b 所示,流经线圈的电流方向改变,这样导体所受的电磁力方向不变,从而保持电动机沿着一个固定的方向旋转。

在图 1-8 中,直流电动机怎样才能顺时针旋转呢?电动机顺时针旋转需获得一个顺时针方向的电磁转矩。由左手定则可知,电磁力的方向取决于磁场极性和导体中电流的方向,所以直流电动机获得反转的方法有两个:一是改变磁场极性;二是改变电源电压的极性使流过导体的电流方向改变。应注意,二者只能改变其一,否则,直流电动机的转向不变。

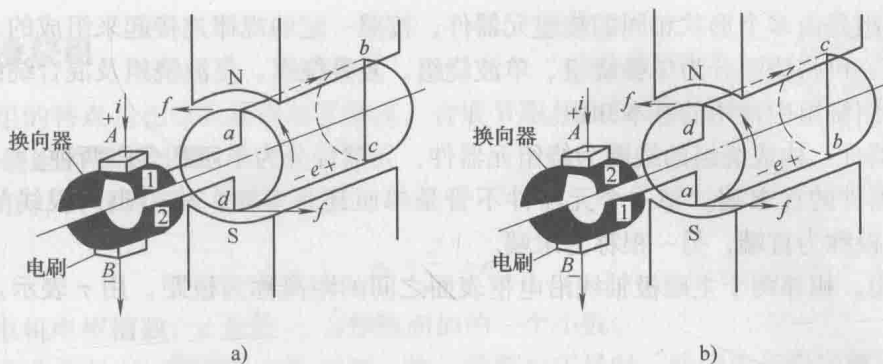


图 1-8 直流电动机的工作原理模型

a) 线圈 ab 边转到 N 极下 b) 线圈 ab 边转到 S 极下

综上所述可知，不论是直流发电机还是直流电动机，换向器都可以使正电刷 A 始终与经过 N 极面下的导体相连，负电刷 B 始终与经过 S 极面下的导体相连，故电刷之间的电压是直流电，而线圈内部的电流则是交变的，所以换向器是直流电机中换向的关键部件。通过换向器和电刷，把直流发电机线圈中的交变电动势整流成电刷间方向不变的直流电动势；把直流电动机电刷间的直流电流变成线圈内的交变电流，以确保电动机沿固定方向旋转。

3. 电机的可逆原理

观察图 1-7 和图 1-8 所示可发现，直流发电机和电动机工作原理模型的结构完全相同，但工作原理又不同。

1) 直流发电机。在发电机带负载（例如图 1-7 中电刷两端接一灯泡）后，就有电流流过负载，同时也流过线圈，其方向与感应电动势方向相同。根据电磁力定律，载流导体 ab 和 cd 在磁场中会受力的作用，形成的电磁转矩方向为顺时针方向，与转速方向相反。这意味着，电磁转矩阻碍发电机旋转，是制动转矩。为此，原动机必须用足够大的拖动转矩来克服电磁转矩的制动作用，以维持发电机的稳定运行。此时发电机从原动机吸取机械能，转换成电能向负载输出。

2) 直流电动机。从图 1-8 中可知，在电动机旋转起来后，导体 ab 和 cd 切割磁力线，产生感应电动势，用右手定则判断出其方向与电流方向相反。这意味着，此电枢电动势是一反电动势，它阻碍电流流入电动机。所以，直流电动机要正常工作，就必须施加直流电源以克服反电动势的阻碍作用，把电流送入电动机。此时电动机从直流电源吸取电能，转换成机械能输出。

综上所述，无论发电机还是电动机，由于电磁的相互作用，电枢电动势和电磁转矩是同时存在的。一台电机既可作为发电机运行，又可作为电动机运行，电机的结构相同，只是运行的外界条件不同而已，这就是直流电机的可逆原理。

1.2 直流电机的电枢绕组

电枢绕组是直流电机的核心部分。电枢绕组放置在电机的转子上，当转子在磁场中转动时，不论是电动机还是发电机，绕组均产生感应电动势；当转子中有电流时，将产生电枢磁动势，该磁动势与电机气隙磁通相互作用产生电磁转矩，从而完成机电能量的相互转换。

电枢绕组是由多个形状相同的绕组元器件，按照一定的规律连接起来组成的。根据连接规律的不同，可将绕组分为单叠绕组、单波绕组、复叠绕组、复波绕组及混合绕组等几种形式。下面介绍绕组中常用的基本知识。

- 1) 元器件。构成绕组的线圈为绕组元器件，元器件分为单匝和多匝两种。
- 2) 元器件的首末端。每一个元器件不管是单匝还是多匝，均引出两根线与换向片相连，其中一根称为首端，另一根称为末端。
- 3) 极距。相邻两个主磁极轴线沿电枢表面之间的距离称为极距，用 τ 表示。可用下式计算，即

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \tag{1-3}$$

式中， D 为电枢铁心外直径； p 为直流电机磁极对数。

- 4) 叠绕组。指串联的两个元器件总是后一个元器件的端接部分紧叠在前一个元器件的端接部分，整个绕组成折叠式前进。
 - 5) 波绕组。串联的两个元器件像波浪式的前进。
- 单匝单叠绕组、多匝单叠绕组、单匝单波绕组及多匝单波绕组如图 1-9 所示。

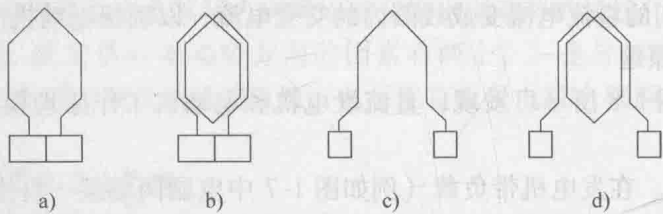


图 1-9 直流电机的绕组
a) 单匝单叠绕组 b) 多匝单叠绕组 c) 单匝单波绕组 d) 多匝单波绕组

- 6) 第一节距。一个元器件的两个有效边在电枢表面跨过的距离称为第一节距，第一节距用 y_1 表示。

- 7) 第二节距。连至同一换向片上的两个元器件中第一个元器件的下层边与第二个元器件的上层边间的距离。第二节距用 y_2 表示。

- 8) 合成节距。连至同一换向片上两个元器件对应边之间的距离，即第一个元器件的上层边与第二个元器件的上层边间的距离，或第一个元器件的下层边与第二个元器件的下层边间的距离。合成节距用 y 表示。合成节距 y 、第一节距 y_1 和第二节距 y_2 的关系如下。

单叠绕组： $y = y_1 - y_2$

单波绕组： $y = y_1 + y_2$

换向节距：同一元器件首、末端连接的换向片之间的距离。换向节距用 y_k 表示。

单叠绕组和单波绕组的节距如图 1-10 所示。

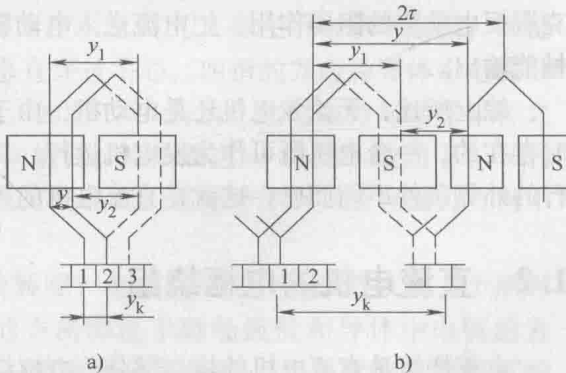


图 1-10 单叠绕组和单波绕组的节距
a) 单叠绕组 b) 单波绕组

1.2.1 单叠绕组

单叠绕组的特点是相邻元器件相互叠压，合成节距与换向节距均为1，即 $y = y_k = 1$ 。

1. 单叠绕组的节距计算

第一节距 y_1 的计算公式如下：

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon \tag{1-4}$$

式中， Z 为电机电枢槽数； ε 为使 y_1 为整数而加的一个小数。

当 ε 前面为负号时，线圈为短距线圈；当 ε 前面为正号时，线圈为长距线圈。长短距线圈的有效边是一样的，但由于长距线圈连接部分比短距线圈要长，使用铜导线较多，因此通常使用短距线圈。

单叠绕组的合成节距和换向节距相同，即 $y = y_k = \pm 1$ ，一般取 $y = y_k = +1$ 。此时的单叠绕组称为右行绕组，元器件的连接顺序为从左向右进行。

单叠绕组的第二节距 y_2 由第一节距和合成节距之差计算得到，第二节距 y_2 的计算公式如下：

$$y_2 = y_1 - y \tag{1-5}$$

2. 单叠绕组展开图

展开图是把放在铁心槽里、构成绕组的所有元器件均取出来，画在同一张图里，其作用是展示元器件相互间的电气连接关系。除元器件外，展开图中还包括主磁极、换向片及电刷，以表示元件间、电刷与主磁极间的相对位置关系。在画展开图前，应根据所给定的电机极对数 p 、槽数 Z 、元器件数 S 和换向片数 K ，算出各节距值，然后根据计算值画出单叠绕组展开图（如图1-11所示）。从展开图可以看出，电刷数等于主磁极数，在展开图中，电刷放置在换向器表面主磁极轴线的下方，将主磁极之间几何中性线（两主磁极之间的中心线）处的元器件短接。

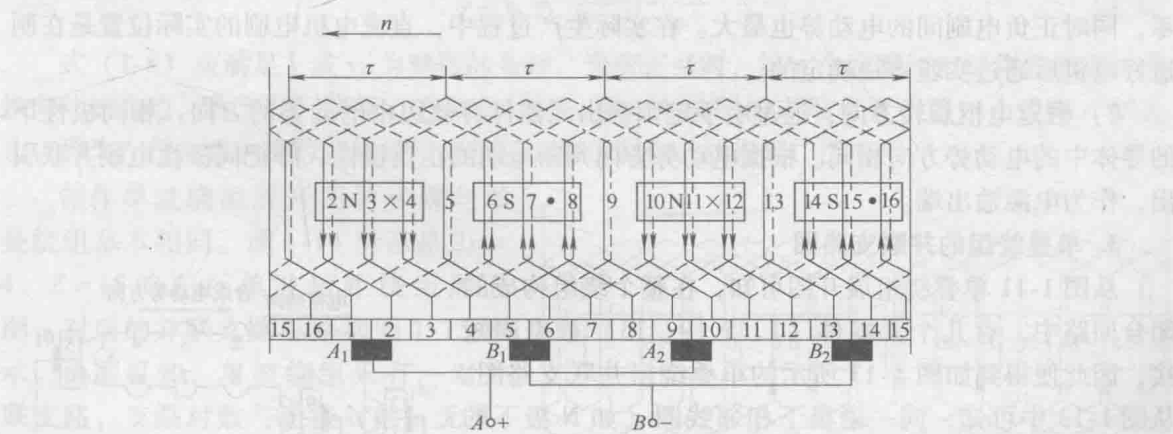


图 1-11 单叠绕组展开图

【例 1-1】 已知一台直流发电机， $2p = 4$ ， $S = K = Z = 16$ ，画出其右行单叠绕组展开图。

解：1) 计算数据。

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{16}{4} = 4$$