



电机与电气

控制技术

田淑珍 主编



免费提供电子教案

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高职高专规划教材系列

电机与电气控制技术

主编 田淑珍



机械工业出版社

本书精选了电机及拖动、工厂电气控制的典型内容,并加入了相关实训。本书主要讲解了直流电机及电力拖动、变压器、三相异步电动机、特种电动机、常用低压电器、三相异步电动机的电气控制线路、常用机床电气控制线路及常见故障的排查、桥式起重机的电气控制等内容。

本书根据维修电工中级工的达标要求,强化了技能训练,突出了职业教育的特点,将理论教学、实训、考工取证有机地结合起来。书中加入了电动机实训、线路制作、设备运行维护、故障排除等内容。

本书可作为高等职业学校工厂自动化专业、机电一体化专业的理论教学和实训教学用书,也可作为相关专业技术人员的培训和自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制技术/田淑珍主编. —北京:机械工业出版社, 2009. 12
(2015. 1 重印)

(21 世纪高职高专规划教材系列)

ISBN 978 - 7 - 111 - 29289 - 0

I. 电… II. 田… III. ①电机学-高等学校:技术学校-教材②电气控制-高等学校:技术学校-教材 IV. TM3 TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 230066 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:石隴辉 蔡家伦 版式设计:张世琴

责任校对:张玉琴 责任印制:乔 宇

三河市国英印务有限公司印刷

2015 年 1 月第 1 版第 6 次印刷

184mm×260mm·18 印张·441 千字

20001—24000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 29289 - 0

定价:29.00 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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

高职教育要以就业为导向,以培养一线科技实用型人才为目标,以培养学生的职业素质为任务。在教学中应根据专业要求将理论与实践、知识与能力有机地结合起来。实践教学中必须把学生考取专业技术等级证的技术训练贯穿于教学的全过程。因此在专业教学中应合理调整理论与实践在整个教学计划中的比重,将理论与实践紧密结合起来,并按备考专业技术等级证书的要求对学生进行强化训练,在规定的时间内按规定的标准完成规定的任务。本书正是这样一本着重技术应用训练、“讲、练、考”结合、以能力为本位、以应用为特色的教材。

本书精选了电机及其拖动和工厂电气控制的典型内容,主要包括直流电机及电力拖动、变压器、三相异步电动机、特种电动机、常用低压电器、三相异步电动机的电气控制线路、常用机床电气控制线路及常见故障的排查、桥式起重机的电气控制等。本书根据维修电工中级工的达标要求,强化了技能训练,突出了职业教育的特点。

本书由田淑珍主编,并编写第1、5、6、7章,第2章由孟晓明编写,第3章由王延忠、孟晓明编写,第4章由胡书辉编写,第8章由孙建东编写,附录由编者共同编写。全书由田淑珍整理定稿。

由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点、疏漏及不足,恳请读者批评指正。

为了配合教学,本书免费提供电子教案,读者可以从机械工业出版社教材服务网 <http://www.cmpedu.com> 下载。

编 者

目 录

前言	
绪论	
第1章 直流电机及电力拖动	3
1.1 直流电机的基本工作原理及基本结构	3
1.1.1 直流电机的基本工作原理	3
1.1.2 直流电机的基本结构	6
1.2 直流电机的电枢绕组简介	8
1.2.1 单叠绕组	9
1.2.2 单波绕组	11
1.3 直流电机的铭牌数据及励磁方式	12
1.4 直流电机的磁场及电枢反应	14
1.5 直流电机的换向及改善换向的方法	16
1.6 直流电动机的运行原理	17
1.6.1 电枢电动势、电磁转矩及电机的功率	17
1.6.2 直流电机的基本方程式	19
1.6.3 直流电动机的工作特性	20
1.7 电力拖动系统	22
1.7.1 电力拖动系统的三种工作状态	22
1.7.2 负载特性	22
1.7.3 他励直流电动机的机械特性	23
1.7.4 他励直流电动机的启动、调速与制动	26
1.8 实训	34
1.8.1 直流电动机的使用	34
1.8.2 他励直流电动机的工作特性和机械特性	37
1.9 习题	39
第2章 变压器	41
2.1 变压器的工作原理及结构	41
2.1.1 变压器的工作原理	41
2.1.2 变压器的结构	42
2.1.3 电力变压器的联结组别	44
2.1.4 变压器的铭牌数据及额定值	45
2.2 变压器的空载运行及等效电路	46
2.3 变压器的负载运行及等效电路	49
2.4 实训：变压器参数的测定	52
2.5 变压器的运行特性	54
2.5.1 变压器的外特性与电压变化率	54
2.5.2 变压器的损耗和效率	55
2.6 习题	56
第3章 三相异步电动机	57
3.1 三相异步电动机的工作原理与结构	57
3.1.1 三相异步电动机的工作原理	57
3.1.2 三相异步电动机的结构	59
3.1.3 三相异步电动机铭牌的主要技术参数	62
3.2 三相异步电动机绕组及其检测技能训练	63
3.2.1 三相异步电动机绕组的基本知识	63
3.2.2 电动机绕组的检测技能训练	69
3.3 三相异步电动机的空载运行	72
3.4 三相异步电动机的负载运行及等效电路	73
3.5 三相异步电动机的功率、转矩平衡方程式及工作特性	75
3.6 三相异步电动机的机械特性	77
3.6.1 机械特性表达式	77
3.6.2 三相异步电动机固有机械特性和人为机械特性	80
3.7 三相异步电动机的启动	81
3.7.1 三相笼型异步电动机的启动	81
3.7.2 三相绕线转子异步电动机的启动	84
3.8 三相异步电动机的调速	85
3.9 三相异步电动机的制动	88

3.10 实训	91	5.6.1 控制按钮	138
3.10.1 三相异步电动机的空载、短路 (堵转)及负载试验	91	5.6.2 万能转换开关	138
3.10.2 测量电动机的绝缘电阻、空载电流、 转速及运行温度技能训练	96	5.6.3 行程开关	139
3.10.3 电动机的拆装技能训练	98	5.6.4 接近开关	140
3.11 习题	100	5.7 常用低压电器的故障排除	141
第4章 特种电动机简介	102	5.7.1 触点的故障维修及调整	141
4.1 伺服电动机	102	5.7.2 电磁系统的故障维修	142
4.1.1 直流伺服电动机	102	5.7.3 常用低压电器的故障检修	142
4.1.2 交流伺服电动机	104	5.8 技能训练	144
4.2 步进电动机	106	5.8.1 组合开关的拆装与维修	144
4.2.1 步进电动机的工作原理	106	5.8.2 接触器的拆装与维修	145
4.2.2 步进电动机的控制	108	5.8.3 中间继电器和时间继电器	146
4.3 习题	109	5.8.4 热继电器和按钮	147
第5章 常用低压电器	110	5.9 习题	148
5.1 低压电器概述	110	第6章 三相异步电动机的电气	
5.2 接触器	111	控制线路	149
5.2.1 接触器的用途及分类	111	6.1 制作电动机控制线路的步骤	149
5.2.2 接触器的工作原理及结构	111	6.1.1 电气原理图、电器元件布置图 和接线图	149
5.2.3 接触器的主要技术参数及型号	114	6.1.2 制作电动机控制线路的步骤	151
5.2.4 接触器的选择	117	6.1.3 检查线路和试车	153
5.2.5 接触器的运行维护	118	6.2 三相异步电动机直接起动控制线 路及检查试车	154
5.3 继电器	118	6.2.1 点动控制线路及检查试车	155
5.3.1 电磁继电器	119	6.2.2 全压起动连续运转控制线路 及检查试车	157
5.3.2 时间继电器	121	6.2.3 既能点动控制又能连续运转的 控制电路	159
5.3.3 热继电器	125	6.2.4 多点控制线路及检查试车	162
5.3.4 速度继电器	128	6.2.5 顺序控制线路及检查试车	163
5.4 常用开关	128	6.2.6 正反转控制线路及检查试车	166
5.4.1 刀开关	128	6.2.7 限位控制和自动往复循环控制线路 及检查试车	169
5.4.2 组合开关	129	6.3 三相笼形异步电动机减压起动控 制线路及检查试车	173
5.4.3 开启式负荷开关	130	6.3.1 Y- Δ 减压起动控制线路 及检查试车	173
5.4.4 半封闭式负荷开关	130	6.3.2 自耦变压器减压起动	176
5.4.5 倒顺开关	131	6.3.3 软起动器及其使用	177
5.4.6 低压断路器与智能断路器	131	6.4 三相笼形异步电动机的制动控制 线路及检查试车	181
5.5 熔断器	133	6.4.1 反接制动控制线路	181
5.5.1 熔断器的结构及分类	133		
5.5.2 熔断器的安秒特性	136		
5.5.3 熔断器的技术参数	136		
5.5.4 熔断器的选择	136		
5.5.5 熔断器的运行与维修	137		
5.6 主令电器	137		

6.4.2 能耗制动控制线路	185	的检查与排除	238
6.5 三相笼形异步电动机速度控制	190	7.4.4 检修技能训练	239
6.5.1 变极调速控制线路	190	7.5 镗床的电气控制	240
6.5.2 变频调速及变频器的使用	191	7.5.1 镗床的主要结构与运动形式	240
6.6 基本控制线路的安装接线技能训练	194	7.5.2 镗床的电气线路分析	241
6.6.1 电气控制线路板的安装接线	194	7.5.3 T68 镗床的电气故障与检修	245
6.6.2 点动控制线路的安装接线	196	7.5.4 检修技能训练	246
6.6.3 单向起动控制线路的安装接线	198	7.6 习题	247
6.6.4 正反转控制线路的安装接线	200	第8章 桥式起重机的电气控制	248
6.6.5 Y- Δ 减压起动的安装接线	201	8.1 桥式起重机概述	248
6.6.6 电动机带限位保护的自动往复循环控制线路的安装接线	204	8.1.1 桥式起重机的主要结构和运动形式	248
6.6.7 双速电动机控制线路的安装接线	206	8.1.2 桥式起重机的主要技术参数	249
6.7 习题	207	8.1.3 桥式起重机对电力拖动的要求	250
第7章 常用机床电气控制线路及常见故障的排查	210	8.2 凸轮控制器及其控制电路	252
7.1 普通车床的电气控制	210	8.2.1 凸轮控制器的结构	252
7.1.1 车床的主要结构及运动形式	210	8.2.2 凸轮控制器的型号与主要技术参数	252
7.1.2 电气线路分析	211	8.2.3 凸轮控制器控制的电路	253
7.1.3 车床常见电气故障的排除	212	8.3 主令控制器的控制电路	256
7.1.4 检修技能训练	213	8.3.1 提升重物的控制	257
7.2 磨床的电气控制	216	8.3.2 下降重物的控制	257
7.2.1 磨床的主要结构及运动形式	216	8.4 运行机构的电气控制	258
7.2.2 磨床电气线路分析	216	8.5 桥式起重机电气设备的维护与修理	259
7.2.3 常见电气故障的排除	219	8.5.1 起重机的供电特点	259
7.2.4 检修技能训练	220	8.5.2 电路的构成	260
7.3 摇臂钻床的电气控制	222	8.5.3 保护电路	260
7.3.1 摇臂钻床的主要结构和运动形式	222	8.5.4 交流桥式起重机电器设备的维护和修理	260
7.3.2 Z3040 摇臂钻床电气线路分析	223	8.6 习题	264
7.3.3 Z35 摇臂钻床电气线路	226	附录	265
7.3.4 Z35 摇臂钻床常见故障的检查与排除	230	附录A 常用电气符号与限定符号	265
7.3.5 技能训练	231	附录A.1 常用电气符号国家标准 (GB/T 4728—1996~2000)	265
7.4 铣床的电气控制	233	附录A.2 电气简图图形符号 (GB/T 4728.7—2000)	267
7.4.1 万能铣床的主要结构与运动形式	233	附录B 中级维修电工考试大纲	269
7.4.2 X62W 万能铣床电气线路分析	234	附录B.1 中级维修电工等级标准	269
7.4.3 万能铣床电气线路常见故障		附录B.2 中级维修电工鉴定要求	271

附录 C 中级维修电工技能试卷、评分	试题三：工具、设备的使用与维护	276
标准及现场记录	试题四：安全文明生产	276
试题一：安装接线	参考文献	278
试题二：排除故障		

绪 论

1. 电机及电力拖动概述

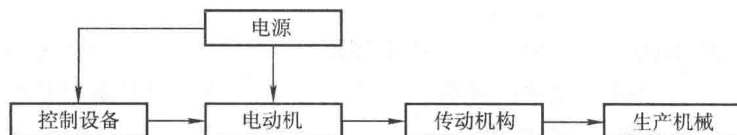
电机是利用电磁感应原理工作的机械，是生产、传输、分配及应用电能的主要设备。

电机按功能可分为发电机、电动机、变压器和控制电机四大类；发电机将机械能转换为电能；电动机将电能转换为机械能，作为拖动各种生产机械的动力，是国民经济各部门应用最多的动力机械，也是最主要的用电设备；变压器的作用是将一种电压等级的电能转换为同频率的另一种电压等级的电能；控制电机主要用于信号的变换与传递，如步进电动机、伺服电动机等，在各种自动化控制系统中作为多种控制元件使用，如国防工业、数控机床、计算机外围设备、机器人和音像设备等均大量使用控制电机。

按电源电流的不同，电机又分为直流电机和交流电机。

电力拖动系统是用电动机来拖动机械运行的系统。由于电力拖动具有控制简单，调节性能好、损耗小、经济、能实现远距离控制和自动控制等一系列优点，因此大多数生产机械均采用电力拖动。

电力拖动系统包括：电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源五个部分。各部分之间的关系如下：



电源向电动机及电气控制设备供电。电动机把电能转换成机械能，通过传动机构（如机械传动、液压传动、气动等）把电动机的运动经过中间变速或变换运动方式后，再传给生产机械（如各种机床等），驱动生产机械工作。生产机械是执行某一生产任务的机械设备，是电力拖动的对象。控制设备是由各种控制电机、电器、电子元件及控制计算机等组成，用以控制电动机的运动，从而对生产机械的运动实现自动控制。

在电力拖动的发展过程中，交、直流两种拖动方式并存于各个生产领域。在交流电出现以前，直流电力拖动是惟一的一种电力拖动方式。19 世纪末期，由于研制出了经济实用的交流电动机，致使交流电力拖动在工业中得到了广泛的应用。但随着生产技术的发展，特别是精密机械加工与冶金工业生产过程的进步，对电力拖动在起动、制动、正反转以及调速精度与范围等静态特性和动态响应方面提出了新的、更高的要求。由于交流电力拖动比直流电力拖动在技术上难以实现这些要求，所以，20 世纪以来，在可逆、可调速与高精度的拖动技术领域，在相当长的时期内，几乎都在采用直流电力拖动，而交流电力拖动则主要用于恒转速系统。

20 世纪 60 年代以后，随着电力电子技术的发展，半导体变流技术的交流调速系统得以实现。尤其是 20 世纪 70 年代以来，大规模集成电路和计算机控制技术的发展，为交流电力拖动的广泛应用创造了有利条件。诸如交流电动机的串级调速、各种类型的变频调速等，使

得交流电力拖动逐步具备了宽的调速范围、高的稳态精度、快的动态响应，在调速性能方面完全可与直流电力拖动媲美。由于交流电力拖动具有调速性能优良、维修费用低等优点，现已广泛地应用于各个工业电气自动化领域中，并逐步取代直流电力拖动而成为电力拖动的主流。

2. 电气控制技术及发展概况

不同产品的生产工艺不同，需要生产机械具有不同的动作，这就要求对拖动机械设备的电动机进行控制，如电动机的起动、停止、正反转、顺序控制等。

电气控制方式由继电器-接触器的控制向计算机控制方向发展。继电器-接触器的控制是利用刀开关、按钮、继电器-接触器等低压电器设备组成的控制系统，这种控制系统发展成熟、完善，控制方法简单、工作较可靠，至今仍在广泛应用。但是继电器控制系统的接线固定、控制功能单一，无法满足生产工艺的不断改变和控制程序不断改变的需要。20 世纪 70 年代，一种新型工业控制器——可编程序控制器（PLC）产生了。它以 CPU 为核心，通过软件编程实现各种控制功能，抗干扰能力强，适宜各种恶劣的生产环境。PLC 编程简单易学，PLC 本身结构简单、性能优越、体积小、质量小、耗电小，价格便宜。这些优势使其在电气控制领域迅速发展起来。目前 PLC 已作为一种标准化通用设备应用于机械加工、自动机床、交通运输、纺织、化工等行业。

自动控制技术发展的另一分支——数控技术也在 20 世纪 50 年代研制成功，并随着计算机技术的发展而不断走向完善。它是一种具有广泛通用性的高效率、高精度且能适应小批量复杂零件加工的自动化机床，综合应用了计算机技术、电子技术、检测技术、自动控制技术等。

可见随着科学技术的进步，生产工艺越来越复杂，对电气控制的要求也越来越高，控制功能从简单到复杂，控制技术从单机到群控，推动了生产技术的不断更新和高速发展。各种控制装置不断出现，从可编程控制器（PLC）到数控系统等，使自动控制系统的水平不断提高。

3. 本课程的特点及学习方法

本课程讲解了电机及拖动、工厂电气控制设备，在自动化专业的课程体系中起着承上启下的作用。既具有专业基础课的作用，又有专业课的性质，通过本课程的学习，培养学生在电机及电气控制方面分析和解决问题的能力，强化技能训练，增强学生理论联系实际的能力，为以后的学习和工作打下基础。

通过技能训练，使学生具有初步的电机及其控制系统的维护、设计和推广的能力。

用理论分析各种电机及拖动的实际问题时，必须结合电机的具体结构、采用工程观点和工程分析方法，培养学生的应用能力和分析解决实际问题的能力，因此本课程的实践性较强。学习“电机及电气控制技术”这门课应注意以下几点：

- 1) 要抓住重点，牢固掌握基本概念、基本原理、主要特性和电动机控制基本环节。
- 2) 运用对比或比较的学习方法，找出各种电机的共性和特点，以加深对各种电机及拖动系统性能和原理的理解。
- 3) 理论联系实际，在实训中加深对理论的理解，最好现场教学。

第1章 直流电机及电力拖动

本章要点

- 直流电机的基本工作原理、结构、电枢绕组简介及电动机的运行原理
- 负载特性及直流电动机的机械特性
- 直流电动机的起动、调速与制动
- 直流电机的实训

1.1 直流电机的基本工作原理及基本结构

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 直流电机的基本工作原理

1. 直流发电机的基本工作原理

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，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，则在导体中产生感应电动势，其值的大小为：

$$e = B_x lv \quad (1-1)$$

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 1-1 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。

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° 角，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 1-1a 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，电流

i 的方向为： $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow 1 \rightarrow A(+)\rightarrow \otimes(\text{负载}) \rightarrow B(-) \rightarrow 2 \rightarrow d$ 。

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

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 1-1a 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，则电刷 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。

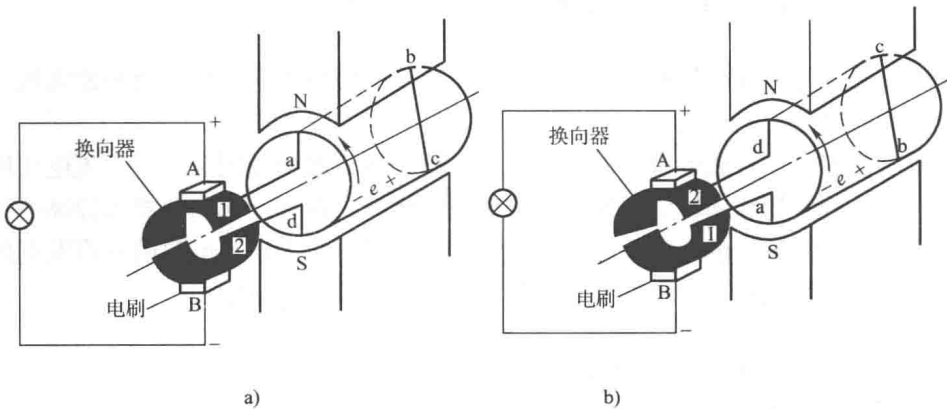


图 1-1 直流发电机工作原理

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

$$f = B_x l i \tag{1-2}$$

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 1-2 是直流电动机的工作原理模型。电刷 A 、 B 两端加直流电压，在图 1-2a 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° 角，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 1-2a 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 1-2b 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。

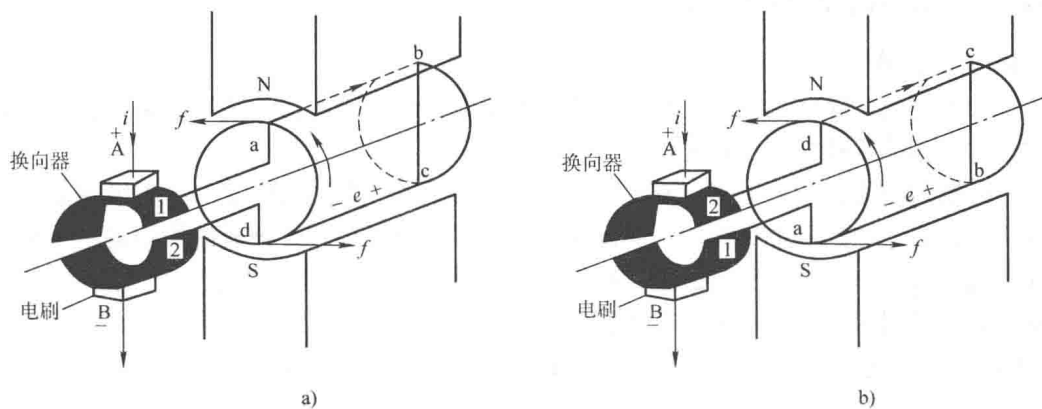


图 1-2 直流电动机的工作原理

图 1-2 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。

综上所述可知，不论是直流发电机还是直流电动机，换向器可以使正电刷 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 1-1 和图 1-2 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。当发电机带负载以后，例如图 1-1 中电刷两端接一灯泡，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 1-2 中可知，当电动机旋转起来后，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。

1.1.2 直流电机的基本结构

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 1-3 所示。其剖面图如图 1-4 所示。

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。主磁极的结构如图 1-5 所示。

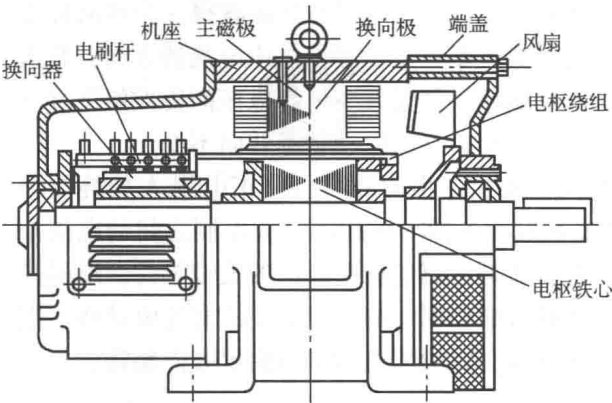


图 1-3 小型直流电机的结构

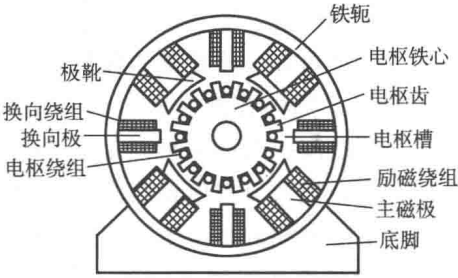


图 1-4 小型直流电机剖面图

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 1-6 所示。

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。

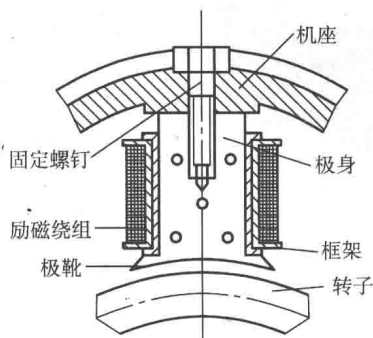


图 1-5 直流电机主磁极结构

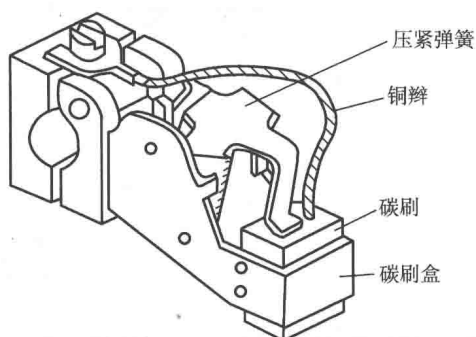


图 1-6 电刷的结构

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。为减少当电机旋转时，铁心中的磁通方向发生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。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 1-7 所示为小型直流电机的电枢冲片形状和电枢铁心装配图。

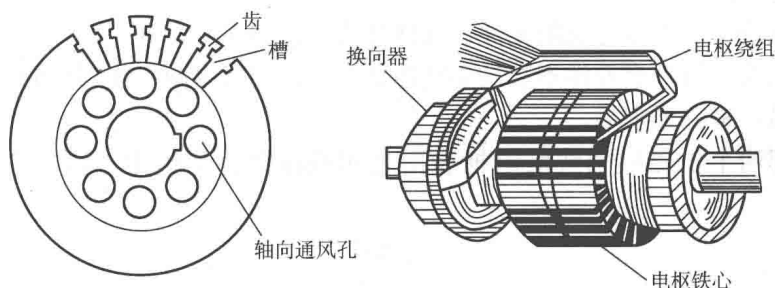


图 1-7 小型直流电机的电枢冲片形状和电枢铁心装配图

电枢绕组是由带绝缘的导体绕制而成的。小型电机常采用铜导线绕制；大中型电机常采用成型线圈。在电机中每一个线圈称为一个元件，多个元件有规律地连接起来形成电枢绕组。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，换向器的作用是使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，相邻的两换向片间以 0.6~1.2mm 的云母片作为绝缘。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。换向器结构如图 1-8 所示。

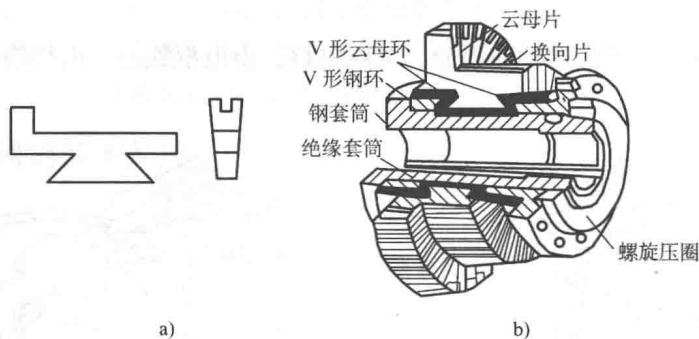


图 1-8 换向器结构

a) 换向片 b) 换向器

1.2 直流电机的电枢绕组简介

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件，按照一定的规律连接起来组成的。根据连接规律的不同，绕组可分为单叠绕组、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。

元件：构成绕组的线圈为绕组元件，元件分为单匝和多匝两种。

元件的首末端：每一个元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。

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，

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (1-3)$$

式中， D 为电枢铁心外直径； p 为直流电机磁极对数。

叠绕组：指串联的两个元件总是后一个元件端接部分紧叠在前一个元件端接部分，整个绕组成折叠式前进。

波绕组：串联的两个元件像波浪式的前进。

单匝单叠绕组、单匝单波绕组、多匝单叠绕组及多匝单波绕组如图 1-9 所示。

第一节距：一个元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。

第二节距：连至同一换向片上的两个元件中第一个元件的下层边与第二个元件的上层边间的距离。

第二节距用 y_2 表示。

合成节距：连至同一换向片上两个元件对应边之间的距离，即第一个元件的上层边与第二个元件的上层边间的距离或第一个元件的下层边与第二个元件的下层边间的距离。合成节

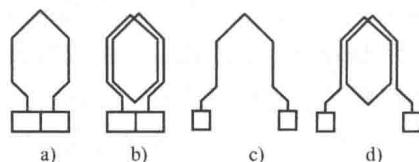


图 1-9 直流电机的绕组

a) 单匝单叠 b) 多匝单叠

c) 单匝单波 d) 多匝单波

距用 y 表示。合成节距 y 、第一节距 y_1 和第二节距 y_2 的关系为：

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。

1.2.1 单叠绕组

单叠绕组的特点是相邻元件相互叠压，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：

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon \quad (1-4)$$

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：

$$y_2 = y_1 - y \quad (1-5)$$

2. 单叠绕组展开图

展开图是把放在铁心槽里、构成绕组的所有元件均取出来，画在同一张图里，其作用是展示元件相互间的电气连接关系。除元件外，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）处的元件短接。

【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。

1) 计算数据

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

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon = \frac{16}{4} = 4$$

$$y = y_K = +1$$

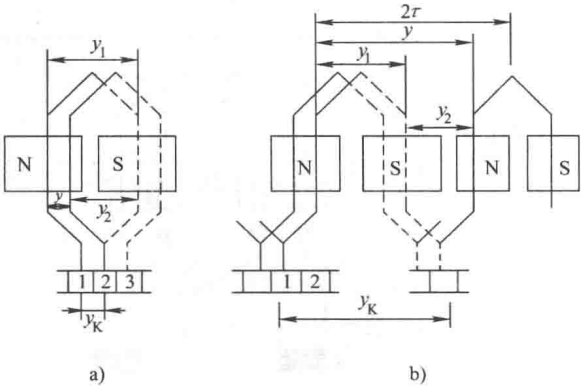


图 1-10 单叠绕组和单波绕组的节距

a) 单叠绕组 b) 单波绕组