



面向21世纪高职高专电类系列规划教材

电机与电气控制

北京希望电子出版社 总策划
刘明伟 马宏革 主 编
郝 红 马玉春 孙 斌 副主编



科学出版社
www.sciencep.com



面向21世纪高职高专电类系列规划教材

电机与电气控制

北京希望电子出版社 总策划
刘明伟 马宏革 主编
郝红 马玉春 孙斌 副主编

 科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书是面向 21 世纪高职高专电类系列规划教材之一, 根据高等职业教育“电机与电气控制”课程教学大纲编写而成, 主要内容包括直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、三相感应电动机、三相感应电动机的电力拖动、控制电机、常用低压电器、电气控制线路的基本环节、常用机床的电气控制线路、可编程控制器等。

本书结合高等职业教育应用型人才培养模式、培养目标及教学特点, 专门为培养应用型人才编写的。在编写的过程中, 我们充分吸收了传统教材的优点, 并在此基础上加入了一些实际工程中的新技术, 力求做到理论与实际结合、注重实践, 为培养满足市场需求的应用型人才服务。

本教材可作为高等职业学院工业电气自动化、电气技术、供电技术、机电一体化等专业的“电机与电气控制”课程的教材, 也可以供有关技术人员参考。

需要本书或技术支持的读者, 请与北京清河 6 号信箱 (邮编: 100085) 发行部联系, 电话: 010-82702660, 62978181 (总机), 传真: 010-82702698, E-mail: tbd@bhp.com.cn。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与电气控制 / 刘明伟, 马宏革主编. —北京: 科学出版社, 2007

(面向 21 世纪高职高专电类系列规划教材)

ISBN 978-7-03-018716-1

I. 电... II. ①刘... ②马... 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 (2007) 第 033219 号

责任编辑: 方红琴 / 责任校对: 马 君
责任印刷: 双 青 / 封面设计: 刘孝琼

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年5月第一版 开本: 787×1092 1/16
2007年5月第一次印刷 印张: 21 1/2
印数: 1—3 000 字数: 456 000

定价: 32.00 元

面向 21 世纪高职高专电类系列规划教材编委会

主任：沈复兴 北京师范大学信息科学学院院长

副主任：杜建根 河南工业职业技术学院副院长

刘小芹 湖北武汉职业技术学院副院长

刘南平 天津职业大学电子信息工程学院副院长

李晓明 江苏扬州工业职业技术学院副院长

唐汝元 湖南张家界航空职业技术学院副院长

陆卫民 中国科学出版集团北京希望电子出版社总编

委员：（按姓氏笔画为序）

及德增 尹立贤 申 勇 全卫强 刘 松 刘明伟

孙胜利 朱运利 朱国军 何 萍 余 华 宋嘉玉

张大彪 张惠明 李节阳 汪临伟 沈艳辉 肖伸平

唐春霞 黄新民 韩全立

秘 书：李节阳

总 序

一本好书，是人生前进的阶梯；一套好教材，就是教学成功的保证。为满足培养应用型人才的需要，我们成立了本编委会。在明确高职高专应用型人才¹培养模式、培养目标、教学内容和课程体系的框架下，我们组织编写了本套规划教材。

为了使本套教材能够达成目标，编委会做了大量的前期调研工作，在广泛了解各高职高专的教学现状、学生水平、培养目标的情况下，认真探讨了课程设置，研究了课程体系。为了编写出符合教学需求的好教材，我们除了聘请一批有关方面的知名专家、教授作为本套教材的主审和编委外，还组织了一批具备较高的学术水平、丰富的教学经验、较强的管理实践能力的学术带头人和骨干教师来承担具体编写工作，从而编写出特色鲜明、适用性强的教材，以真正满足目前高职高专应用型人才²培养的需要。教材编写采用整体规划、分步实施、在实践中检验提高的方式，分期分批地启动编写计划。编写大纲以及教材编写方式的确定均经过编委会多次认真讨论，以确保该套教材的高质量和实用性。

本套规划教材的主要特点是：

(1) 以服务教学为最高宗旨，认真做好教学内容的取舍、教学方法的选取、教学成果的检验工作。本套教材在教学过程中的有益反馈，都将及时体现在后续版本。

(2) 充分考虑高职高专的人才培养目标，充分吸取已有教材的优点，并注意有所创新。在阐述好基本理论的基础上，突出务实；努力做到内容新颖，科学规范，结构严谨，理论联系实际。

(3) 教材中注意结合当前的具体问题做出分析，使学生能比较熟练地应用所学知识解决实际问题；从而努力做到既注重培养学生分析问题的能力，更注重培养学生解决问题的能力。

(4) 教材在内容编排上，力求由浅入深，循序渐进；举一反三，突出重点；语言简练，通俗易懂。采用模块化结构，兼顾不同层次的需求，在具体授课时可根据具体教学计划适当取舍内容。

(5) 大部分教材配有电子教案，从而更好地服务教学。

为编写本套教材，作者们付出了艰辛的劳动，编委会的各位专家进行了悉心的指导和认真的审定。从书中参考、借鉴了国内外同类的优秀教材和专著，在此一并表示感谢。

我们衷心希望更多的优秀教师参与到教材建设中来，真诚希望广大教师、学生与读者朋友在使用本丛书过程中提出宝贵意见和建议。

若有投稿或建议，请发电子邮件到 textbook@bhp.com.cn。谢谢！

面向 21 世纪高职高专电类系列规划教材编委会

前 言

高等职业教育是针对实际职业岗位的需求,定向培养相关高级应用型人才的高等教育。近年来高等职业教育迅速发展,规模越来越大,培养满足社会需求的应用型人才是各高等职业院校的共同目标。高等职业教育的教学模式、培养方案以及相关教材应该针对高等职业教育的特点进行调整。

“电机与电气控制”课程是高等职业学院工业电气自动化、电气技术、供用电技术、机电一体化等专业的专业基础课,它是将“电机及拖动”、“低压电器”、“机床电路”、“可编程控制器”等内容有机结合而成的一门新课程。本书根据高等职业教育“电机与电气控制”教学大纲编写而成,对直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、三相感应电动机、三相感应电动机的电力拖动、控制电机、常用低压电器、电气控制线路的基本环节、常用机床的电气控制线路、可编程控制器等方面的知识进行了详细的介绍。

“电机与电气控制”是一门实践性很强的课程,我们在本书的编写过程中力争做到理论与实践相结合,使学生在掌握基本理论的同时,具有一定的电机与电气控制系统的应用能力和设计能力。在理论方面,深入浅出地对相关概念和原理进行了阐释,使学生克服对枯燥的基本理论知识的畏惧感,激发学生的求知欲。在实践方面,通过电机、拖动及控制方法的学习与技能的训练,让学生掌握电机的应用、了解电气控制的基本知识与发展,使学生在未来的工作实践中能够把握该项技术的发展和应用趋势,更好地服务其专业工作。

本书是作者在总结多年教学实践经验和广泛搜集相关资料的基础上编写而成的,编写过程中我们尽量考虑同类教材的通用性,各校在采用本书时,可根据实际情况对实验内容进行适当删减或补充。

本书由刘明伟、马宏革担任主编,郝红、马玉春、孙斌担任副主编,刘伟参加了本书的编写工作。由于编者水平有限,书中难免存在不足和疏漏,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

<p>第1章 直流电机.....1</p> <p> 1.1 直流电机的基本工作原理和结构.....1</p> <p> 1.1.1 直流电机的基本工作原理.....1</p> <p> 1.1.2 直流电机的主要结构.....3</p> <p> 1.1.3 直流电机的额定值.....5</p> <p> 1.2 直流电动机的电枢绕组.....5</p> <p> 1.2.1 概述.....5</p> <p> 1.2.2 单叠绕组.....6</p> <p> 1.2.3 单波绕组.....8</p> <p> 1.3 直流电机的磁场.....10</p> <p> 1.3.1 直流电机的励磁方式.....10</p> <p> 1.3.2 直流电机磁场.....11</p> <p> 1.3.3 直流电机的感应电动势和 电磁转矩.....15</p> <p> 1.4 直流电动机运行原理.....16</p> <p> 1.4.1 直流电动机的基本方程.....16</p> <p> 1.4.2 直流电动机的工作特性.....17</p> <p> 思考与练习题.....20</p> <p>第2章 直流电动机的电力拖动.....23</p> <p> 2.1 电力拖动系统的运动方程式.....23</p> <p> 2.1.1 单轴系统的运动方程式.....23</p> <p> 2.1.1 转矩、飞轮矩、力和质量的折算...24</p> <p> 2.1.3 生产机械的负载转矩特性.....28</p> <p> 2.2 他励直流电动机的机械特性.....29</p> <p> 2.2.1 直流电动机机械特性的一般形式...29</p> <p> 2.2.2 他励直流电动机的固有机械 特性和人为机械特性.....29</p> <p> 2.2.3 电力拖动系统的稳定运行条件...32</p> <p> 2.3 他励直流电动机的启动.....33</p> <p> 2.3.1 他励直流电动机的启动方法.....33</p> <p> 2.3.2 他励直流电动机分级启动 电阻的计算.....35</p> <p> 2.4 他励直流电动机的制动.....37</p> <p> 2.4.1 能耗制动.....37</p> <p> 2.4.2 反接制动.....39</p> <p> 2.4.3 回馈制动.....42</p> <p> 2.5 他励直流电动机的调速.....43</p> <p> 2.5.1 评价调速方法的主要指标.....43</p>	<p> 2.5.2 调速方法.....45</p> <p> 思考与练习题.....48</p> <p>第3章 变压器.....51</p> <p> 3.1 变压器的基本工作原理和结构.....51</p> <p> 3.1.1 变压器的基本工作原理和分类....51</p> <p> 3.1.2 变压器的基本结构.....52</p> <p> 3.1.3 变压器的额定值.....54</p> <p> 3.2 单相变压器的空载运行.....55</p> <p> 3.2.1 空载运行时的电磁关系.....55</p> <p> 3.2.2 空载电流.....56</p> <p> 3.2.3 空载时的电动势方程.....57</p> <p> 3.2.4 空载的等效电路和相量图.....58</p> <p> 3.3 变压器负载运行.....59</p> <p> 3.3.1 负载运行时的电磁关系.....60</p> <p> 3.3.2 负载运行时的基本方程式.....60</p> <p> 3.3.3 变压器的等效电路及相量图.....62</p> <p> 3.4 变压器的运行特性.....66</p> <p> 3.4.1 变压器的外特性和电压变化率.....66</p> <p> 3.4.2 变压器的损耗和效率特性.....66</p> <p> 3.5 三相变压器.....68</p> <p> 3.5.1 三相变压器的磁路系统.....68</p> <p> 3.5.2 三相变压器的电路系统 ——联接组.....69</p> <p> 3.6 其他用途的变压器.....73</p> <p> 3.6.1 自耦变压器.....74</p> <p> 3.6.2 仪用互感器.....75</p> <p> 3.6.3 电压互感器.....77</p> <p> 思考与练习题.....77</p> <p>第4章 三相感应电动机.....79</p> <p> 4.1 三相感应电动机的基本工作 原理与结构.....79</p> <p> 4.1.1 三相感应电动机的基本工作原理..79</p> <p> 4.1.2 三相感应电动机的结构.....81</p> <p> 4.1.3 额定数据.....82</p> <p> 4.2 交流电机的电枢绕组.....83</p> <p> 4.2.1 交流绕组的基本知识.....83</p> <p> 4.2.2 三相单层绕组.....85</p> <p> 4.3 交流绕组的磁动势.....87</p>
--	--

4.3.1 单相绕组的磁动势—— 脉振磁动势	87	6.1 单相感应电动机	144
4.3.2 整距线圈组的磁动势	89	6.1.1 单相感应电动机的工作原理	144
4.3.3 三相绕组的磁动势—— 旋转磁动势	94	6.1.2 单相感应电动机的启动和 基本类型	145
4.4 交流绕组的感应电动势	98	6.2 伺服电动机	148
4.4.1 线圈的基波电动势	98	6.2.1 概述	148
4.4.2 绕组的谐波电动势	102	6.2.2 交流伺服电动机	149
4.4.3 三相绕组的感应电动势	102	6.2.3 直流伺服电动机	150
4.5 三相感应电动机转子静止时的运行分析	103	6.3 测速发电机	150
4.5.1 三相感应电动机的主磁通和 漏磁通	103	6.3.1 直流测速发电机	151
4.5.2 三相感应电动机转子 静止时的电磁关系	104	6.3.2 交流测速发电机	151
4.6 三相感应电动机转子旋转时的电磁分析	107	6.4 直线电动机	152
4.6.1 三相感应电动机转子 旋转时的电磁关系	107	6.4.1 直线感应电动机的工作原理	153
4.6.2 等效电路和相量图	110	6.4.2 直线感应电动机的结构	153
4.7 三相感应电动机的功率平衡、 转矩平衡和工作特性	113	6.4.3 直线感应电动机的形式及应用	154
4.7.1 功率平衡和转矩平衡	113	思考与练习题	156
4.7.2 三相感应电动机的工作特性	116	第7章 常用低压电器	157
思考与练习题	117	7.1 低压电器的基本知识	157
第5章 三相感应电动机的电力拖动	121	7.1.1 低压电器的定义和分类	157
5.1 三相感应电动机的机械特性	121	7.1.2 低压电器的结构与基本特点	158
5.1.1 三相感应电动机机械 特性的三种表达式	121	7.1.3 低压电器的主要性能参数	159
5.1.2 三相感应电动机的固有机 特性和人为机械特性	124	7.2 刀开关和转换开关	159
5.2 三相感应电动机的启动	126	7.2.1 刀开关	159
5.2.1 三相笼型感应电动机的启动	126	7.2.2 转换开关	162
5.2.2 三相绕线式感应电动机的启动	129	7.3 接触器	164
5.3 三相感应电动机的制动	133	7.3.1 交流接触器	164
5.3.1 能耗制动	133	7.3.2 直流接触器	165
5.3.2 反接制动	134	7.3.3 接触器的选择	166
5.4 三相感应电动机的调速	137	7.3.4 接触器的使用和维修	167
5.4.1 变极调速	137	7.4 继电器	167
5.4.2 变转差率调速	140	7.4.1 电磁式通用继电器概述	168
思考与练习题	142	7.4.2 电磁式通用继电器的型号	169
第6章 驱动和控制微电机	144	7.4.3 电磁式电流继电器、 电压继电器、中间继电器	169
		7.4.4 时间继电器	171
		7.4.5 热继电器	174
		7.4.6 速度继电器	177
		7.4.7 继电器的使用与维护	178
		7.5 熔断器	179
		7.5.1 熔断器的结构	179

7.5.2	熔断器的主要参数	180	启动控制线路	210	
7.5.3	常用的低压熔断器	180	8.5.1	定子绕组串电阻降压启动	
7.5.4	熔断器的型号	182	... 控制线路	211	
7.5.5	熔断器的选择和维护	184	8.5.2	自耦变压器降压启动控制线路	212
7.6	自动开关	185	8.5.3	减压启动控制线路	213
7.6.1	自动开关的工作原理	185	8.6	三相线绕式感应电动机的启动控制线路	215
7.6.2	自动开关的类型	186	8.6.1	转子绕组串接电阻启动控制线路	215
7.6.3	自动开关的型号及技术数据	188	8.6.2	转子绕组串接频敏变阻器	
7.6.4	自动开关的选择和维修	189	启动控制线路	217	
7.7	主令电器	189	8.7	三相感应电动机的调速与制动控制线路	218
7.7.1	按钮	190	8.7.1	双速感应电动机的调速控制线路	218
7.7.2	行程开关	191	8.7.2	机械制动控制线路	218
7.7.3	晶体管接近开关	193	8.7.3	电气制动控制线路	220
7.8	其他常用低压电器	194	思考与练习题	222	
7.8.1	启动器	194	第9章	常用机床的电气控制线路	224
7.8.2	电磁铁	195	9.1	普通车床的电气控制线路	224
7.8.3	电阻器和变阻器	195	9.1.1	主要结构和运动情况	224
思考与练习题		197	9.1.2	电气原理图分析	225
第8章	电气控制线路的基本环节	198	9.1.3	常见故障分析	227
8.1	电气控制线路的表示符号与原理图	198	9.2	平面磨床的电气器控制线路	229
8.1.1	电气控制线路的图形符号		9.2.1	主要结构和运动情况	229
和文字符号		198	9.2.2	电气原理图分析	230
8.1.2	电气控制线路的回路标号	198	9.2.3	电气元件表	233
8.1.3	电气控制原理图	199	9.2.4	常见故障分析	233
8.2	感应电动机的单向启动控制线路	199	9.3	摇臂钻床的电气控制线路	234
8.2.1	手动控制线路	199	9.3.1	主要结构和运动情况	235
8.2.2	点动控制线路	200	9.3.2	电气原理图分析	236
8.2.3	具有自锁的控制线路	200	9.3.3	电气元件表	238
8.2.4	具有过载保护的的控制线路	201	9.3.4	常见故障分析	239
8.2.5	连续与点动运行的控制线路	202	9.4	万能铣床的电气控制电路	240
8.3	感应电动机的正反转控制线路	204	9.4.1	主要结构和运动形式	240
8.3.1	接触器联锁正反转控制线路	204	9.4.2	电力拖动形式和控制要求	241
8.3.2	按钮联锁正反转控制线路	205	9.4.3	X62W 万能铣床电器控制	
8.3.3	按钮和接触器双重联锁		电路分析	242	
正反转控制线路		206	9.4.4	电气设备表	245
8.4	其他功能控制线路	206	9.4.5	X62W 型万能铣床电气控制线路较常见的故障的诊断与检修	245
8.4.1	位置控制线路	206	9.5	T68 型卧式镗床电气控制电路	247
8.4.2	顺序控制线路	208	9.5.1	主要结构和运动形式	247
8.4.3	多地控制线路	210	9.5.2	电力拖动形式和	
8.5	三相笼型感应电动机的降压				

控制要求.....	248	11.2.3 顺序功能图编程 (SFC)	284
9.5.3 电气控制电路分析	248	11.3 可编程控制器的基本指令	284
9.5.4 电气元件表	253	11.4 常用的单元程序	291
9.5.5 常见电气故障的检修	253	11.4.1 启动、保持和停止控制程序.....	291
9.6 常用机床控制线路的分析和维修	254	11.4.2 互锁控制程序.....	292
9.6.1 机床电气线路的一般分析方法	254	11.4.3 多继电器线圈控制程序.....	293
9.6.2 电气设备的日常维护	254	11.4.4 多地控制程序.....	293
9.6.3 电气故障的诊断方法	255	11.4.5 顺序启动控制程序.....	294
思考与练习题	257	11.4.6 分频程序.....	294
第 10 章 可编程控制器的组成及工作原理.....	259	11.4.7 集中与分散控制程序.....	294
10.1 概述	259	11.4.8 自动与手动控制程序.....	295
10.1.1 可编程控制器的产生与发展.....	259	11.4.9 闪烁控制程序.....	295
10.1.2 可编程控制器的定义.....	259	11.4.10 延时接通/延时断开控制程序...296	
10.1.3 可编程控制器的应用.....	260	11.4.11 定时范围扩展程序.....	296
10.1.4 可编程控制器的发展趋势.....	261	11.4.12 常闭触点输入信号的处理...297	
10.1.5 PLC 与继电—接触器控制 系统、计算机系统的比较.....	261	11.5 顺序功能图和步进指令	298
10.2 可编程控制器组成与基本结构	262	11.5.1 顺序功能图的绘制.....	298
10.2.1 可编程控制器的基本控制系统...262		11.5.2 步进指令.....	301
10.2.2 可编程控制器的组成结构.....	263	11.6 PLC 的功能指令	304
10.2.3 中央处理器单元 CPU.....	264	11.6.1 程序流向控制指令.....	304
10.2.4 存储器.....	265	11.6.2 传送与比较指令.....	306
10.2.5 输入/输出单元	265	11.6.3 算术与逻辑运算指令.....	308
10.2.6 电源.....	267	11.6.4 移位与循环移位指令.....	309
10.2.7 编程器.....	267	11.6.5 数据处理指令.....	310
10.3 可编程控制器的工作原理	268	11.6.6 高速处理指令.....	311
10.3.1 可编程控制器的工作原理分析..268		11.6.7 功能指令应用.....	311
10.3.2 使用 PLC 的注意事项	270	思考与练习题	312
10.4 可编程控制器的主要技术指标及分类.....	270	第 12 章 可编程控制器的系统设计及应用.....	315
10.4.1 可编程控制器的主要技术指标..270		12.1 PLC 控制系统设计	315
10.4.2 可编程控制器的分类.....	271	12.1.1 PLC 控制系统设计的 步骤和内容.....	315
思考与练习题	272	12.1.2 PLC 的选型	317
第 11 章 可编程控制器编程基础.....	273	12.1.3 PLC 应用程序的设计方法 ...317	
11.1 可编程控制器的编程元件	273	12.2 PLC 应用举例	318
11.1.1 FX2 系列 PLC 的型号、 硬件指标.....	273	12.2.1 物料传送系统的控制.....	319
11.1.2 FX2 系列 PLC 的编程元件 ...274		12.2.2 液体混合装置的控制.....	320
11.2 可编程控制器的编程语言	281	12.2.3 交通信号灯的控制.....	322
11.2.1 梯形图编程语言 (LAD) ...281		12.2.4 简易机械手的控制.....	326
11.2.2 指令表编程语言 (STL)	283	12.3 PLC 改造普通机床实例	327
		思考与练习题	331

第1章 直流电机

电机是利用电磁感应原理进行能量转换的机械装置，其功能是实现机电能量转换。直流电机是将直流电能转换成机械能或将机械能转换成直流电能。将直流电能转换成机械能的电机叫直流电动机，将机械能转换成直流电能的电机叫直流发电机。由于直流电动机具有优良的启动性能和调速性能，所以在电气传动系统中，尤其是对启动及调速性能要求较高的生产机械，一般都用直流电动机进行拖动。

直流发电机将机械能转换成直流电能，对电解、电镀及直流电动机等负载供电。随着电子技术的发展，目前在很多领域直流发电机正逐步被可控整流电源取代。因此本章讲授的重点放在直流电动机原理、结构和运行特性上。

1.1 直流电机的基本工作原理和结构

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

图 1-1 是一个直流发电机的工作模型。图中 N, S 是两个在空间固定不动的磁极（它可以是永久磁铁，也可以是在铁芯上绕励磁线圈并通入直流电流来建立磁场的电磁铁）；abcd 是一个装在可以转动的铁磁圆柱体上的线圈（合称为电枢铁芯）；线圈的首、末端分别连接到与电枢同轴旋转的两个圆弧形的铜片上，该弧形铜片称为换向片。换向片之间及换向片与转轴之间是互相绝缘的；A 和 B 为两个与换向片相接触，在空间上静止不动的电刷。从电刷 A, B 引出即可对负载（图中用灯泡表示）进行供电。

假设有原动机拖动电枢以转速 n 恒速逆时针旋转，导体 ab 和 cd 切割磁力线而产生感应电动势，其方向可用右手定则确定。在图 1-1 所示的时刻，整个线圈的电势方向是 e_{dcba} ，即从 d 到 a。如果在电刷 AB 之间接上负载，则就有电流 I 从电刷 A 经过外电路负载而流向电刷 B。此时电刷 A 相当于外电路的正极，电刷 B 相当于外电路的负极。根据电流的连续性，此电流必须通过换向片及线圈 abcd 而构成回路，所以此刻在电枢线圈中电流的方向也是 i_{dcba} ，亦从 d 到 a。

当转子转过 180° 时，线圈 abcd 中感应电动势的方向为 e_{abcd} ，即从 a 到 d 端。电流流过外部负载的电流方向不变，所以电刷 A 依旧相当于外电路的正极，而电刷 B 相当于外电路的负极。根据电流连续性，此时在电枢线圈中的电流方向为 i_{abcd} ，即从 a 到 d。

根据以上两个特定位置的分析，可以得出有关直流发电机的几个结论：

①在电枢线圈内的感应电动势 e_a 及电流 i_a 都是交变电，通过换向片及电刷的整流作用才转变成外部电路的直流电动势，使外部电路得到方向不变的直流电流。

②电机电枢线圈中的感应电动势 e_a （称为电枢电动势）与其电流 i_a （称为电枢电流）的方向始终一致。

③虽然电枢线圈是旋转的且电枢线圈中的电流是交变的，但从空间上看，N 极与 S

极下的电枢电流的方向不变，因此，由电枢电流所产生的磁场在空间上是一个恒定不变的磁场。

④ 枢绕组电流与磁场相互作用产生电磁力 f 。据左手定则可以得出 f 的方向如图 1-1 所示。此电磁力 f 使转轴受到一个力距 $T=fR$ （式中 R 为导体对转轴中心的半径），称之为电磁转矩，其方向是与转子转向相反的，为制动转矩。为此原动机必须输入机械功率克服电磁转矩的制动作用才能使转子继续恒速旋转，继续不断地发出电能给负载，这样机械能通过电磁感应作用变成了电能。

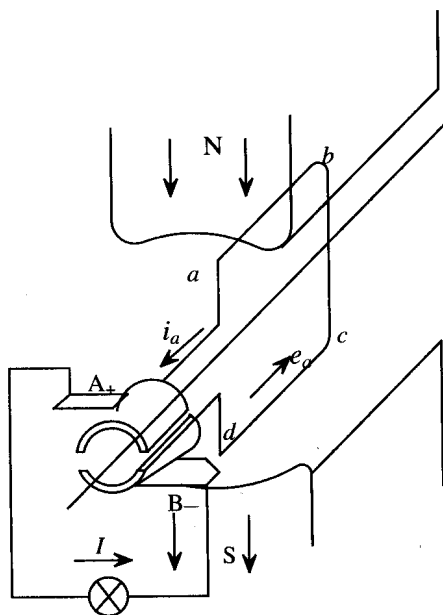


图 1-1 直流发电机工作模型

2. 直流电动机的工作原理

将图 1-1 的电刷出线端的灯泡改成外施直流电源 U ，轴上的原动机换成生产机械负载，就成了直流电动机的工作模型。

在外施电压 U 的作用下，由电流 I 经过电刷 A 及换向片进入电枢绕组 abcd，成为电枢绕组中的电流 i_a ，然后经换向片及电刷 B 而返回电源负端。电枢电流 i_a 与磁场相作用，使电枢线圈受到电磁力 f ，此电磁力所产生的电磁转矩 T 为驱动转矩，在电磁转矩 T 作用下使转子沿 T 的方向旋转起来。

参照发电机的分析方法，也可以得出以下结论：

- ① 在直流电动机中，虽然外施电压 U 及电流 I 直流，但在电枢绕组内部电流 i_a 、电动势 e 是交变的。这是靠换向片及电刷的逆变作用，将外部直流转变成内部的交流。
- ② 从空间上看，由电枢电流所生的磁场也是一个恒定磁场。
- ③ 当电枢旋转时，电枢导体切割磁力线也会感应电动势且是交变的，其方向与电枢电流 i_a 的方向始终相反，称之为反电势。

④直流电动机中电磁转矩的方向与转子转向一致，为驱动转矩。

由以上分析可以看出：同一台直流电机，原则上既可以当发电机运行，也可以当电动机运行，主要取决于外界不同的条件。将直流电源加于电刷，输入电能，电机将电能转化为机械能，拖动生产机械旋转，作电动机运行；如果用原动机拖动电枢恒速旋转，输入机械能，电机把机械能转化为直流电能，此时电机是作为发电机运行。

这种同一台电机由于外界条件的不同，既可作发电机也可以电动机运行的原理，称为电机的可逆原理。该原理不仅适用于直流电机，而且也适合于交流电机。

1.1.2 直流电机的主要结构

根据直流电机的工作原理可知，要实现机电能量转换，电路和磁场之间必须有相对运动。所以，旋转电机应由静止和旋转两大部分构成。直流电机的静止部分称为定子，旋转部分为转子。图 1-2 所示是一台小型直流电机的结构剖面图，下面对图中的主要结构部件分别作简要的介绍。

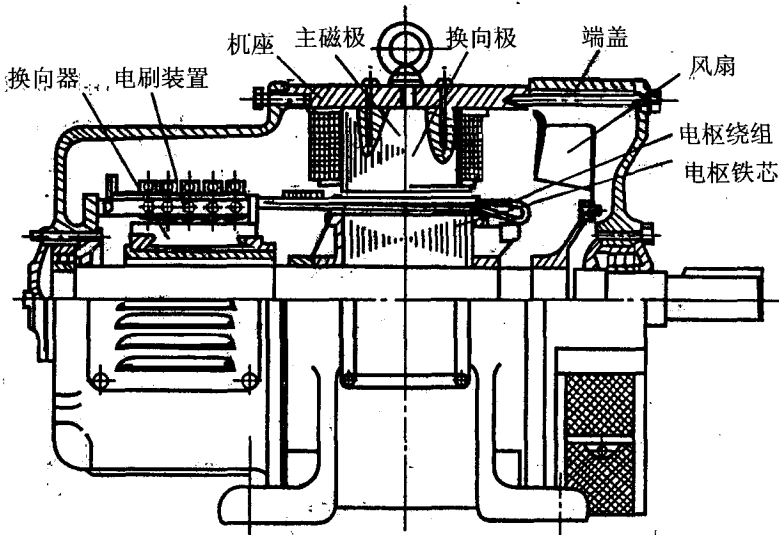


图 1-2 直流电机的结构图

1. 定子部分

定子主要由主磁极、换向极、机座、电刷装置和端盖组成。

主磁极的作用是产生气隙磁场，它包括主磁极铁芯和励磁绕组两部分。主磁极铁芯一般用 1.0~1.5mm 厚的低碳钢板冲片叠压而成，上面套励磁绕组的部分称为极身，下面扩宽的部分称为极靴。极靴既可以使气隙中磁场分布比较理想，又利于励磁绕组的固定。在小型直流电机中，主磁极也可采用永久磁铁，它不需要励磁绕组，此类电机称为永磁直流电机。

换向极又称附加极，装在相邻主磁极之间的几何中心线上，其作用是改善换向。换向极由换向极铁芯和换向极绕组两部分组成，如图 1-3 所示。换向极铁芯可用整块钢制成，

但大容量、高转速的换向极铁芯通常用 1.0~1.5mm 厚的钢片叠压而成。换向极绕组需与电枢绕组串联。在 1kW 以下的小容量直流电机中，有时换向极的数目只有主磁极的一半或不装换向极。

直流电机的机座既是磁的通路又起固定作用，机座中有磁通通过的部分称为定子磁轭。机座通常为铸钢件或由薄钢板冲片叠压而成。这样可以有较好导磁性，又能满足机械强度的要求。

电刷装置是直流电机的重要组成部分。电刷与换向器相配合，起到整流或逆变器作用。

2. 转子部分

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

电枢铁芯是电机主磁路的一部分，而且用来嵌放电枢绕组。为了减少转子旋转时电枢铁芯中涡流损耗和磁滞损耗，电枢铁芯通常用 0.5mm 厚的两面涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成。叠成的铁芯固定在转轴或转子的支架上。铁芯的外圆开有电枢槽，用以嵌放电枢绕组。

电枢绕组是直流电机的电路组成部分，能够产生感应电动势和电磁转矩，是实现机电能量转化的关键部件。在直流电机的电枢圆周上均匀地分布有许多线圈，每一个线圈的两个有效边，分别嵌放在相隔一定槽数的电枢铁芯的两个槽中，如图 1-4 所示。每个线圈的首端与末端，按一定的规律分别与换向器上的两个换向片连接。

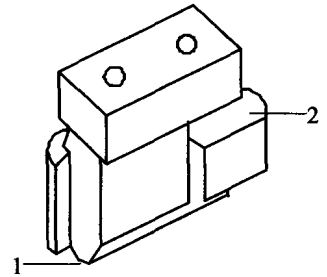


图 1-3 换向极

1—换向极铁芯 2—换向极绕组

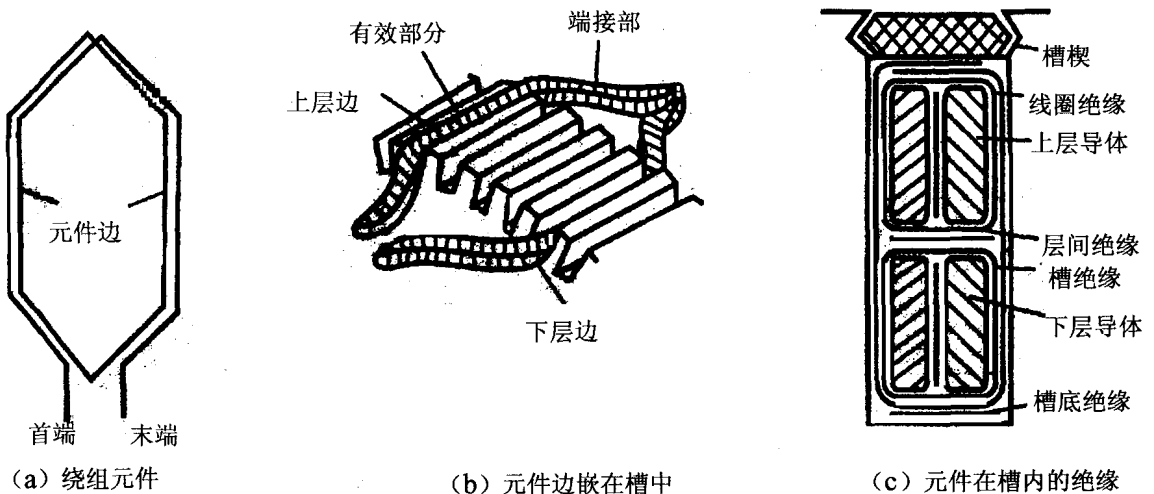


图 1-4 电枢绕组的元件及其在槽中的嵌放

换向器又叫整流子。对于发电机，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，它是把外部供给的直流电流转变为交变电流，从而产生方向恒定不变的电磁转矩，确保电机连续旋转。换向器的结构如图 1-5 所示，它是由许多彼此相互绝缘的铜换向片所组成。

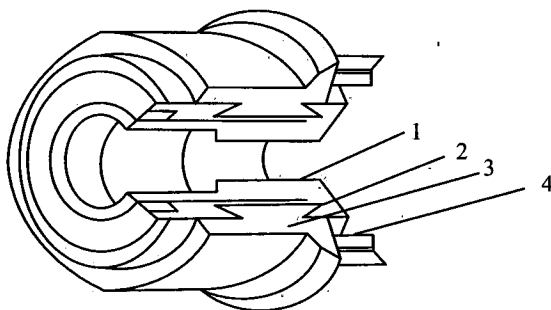


图 1-5 普通换向器

1—V形套筒 2—云母环 3—换向片 4—连接片

1.1.3 直流电机的额定值

为了使电机安全可靠地工作，并且有优良的运行性能，电机制造厂按照国家标准，根据电机的设计和试验数据而规定每台电机的主要数据称为电机的额定值。额定值一般标在电机的铭牌上，所以又称为铭牌数据。直流电机的额定值有以下几项：

- 额定容量 P_N ，对于发电机而言，是指从发电机引出端输出的电功率；对电动机而言，是指从它转轴上输出的机械功率，单位为 kW。
- 额定电压 U_N ，是指额定状态下电机出线端的电压，单位为 V。
- 额定电流 I_N ，是指额定状态下电机出线端的电流，单位为 A。
- 额定转速 n_N ，指电机在额定电压、额定电流和额定容量情况下运行时的电机转速，单位为 r/min。

还有一些物理量的额定值，如额定效率 η_N ，额定转矩 T_N ，额定温升 τ_N 及额定励磁电流等，不一定都标在铭牌上。

额定功率与额定电压和额定电流的关系：

$$\text{直流发电机} \quad P_N = U_N \cdot I_N \times 10^{-3} \text{ kW}$$

$$\text{直流电动机} \quad P_N = U_N \cdot I_N \cdot \eta_N \times 10^{-3} \text{ kW}$$

在实际运行中，如果电机的电流小于额定电流，称为欠载或轻载；如果电流大于额定电流，称为过载或超载；如果电流恰好等于额定电流，称为满载运行。长期过载会使电机过热，降低电机的使用寿命，甚至损坏电机。长期轻载不仅使电机的设备容量得不到充分利用，而且会降低电机的效率。

1.2 直流电动机的电枢绕组

1.2.1 概述

电枢绕组是直流电机产生电磁转矩和感应电动势，实现机电能量转化的枢纽。对电枢绕组的要求主要有：

①在能通过规定的电流并产生足够大的感应电动势及电磁转矩的前提下，所消耗的有效材料（包括导线和绝缘）最省。

②强度（机械、电气和热的强度）高，运行可靠，结构简单，下线方便等。

电枢绕组是由许多线圈（以下称元件）按一定规律连接而成。按连接规律不同，电枢绕组可分为叠绕组（单叠绕组和复叠绕组），波绕组（单波绕组和复波绕组）及混合绕组（又称蛙形绕组）。其基本形式是单叠和单波。

表征电枢绕组元件与元件之间的连接规律的数据称为节距。直流电机的节距主要有以下3种。

①第一节距 y_1 。第一节距是指同一元件的两个元件边在电枢表面所跨的距离，通常用槽数来表示，且为整数，如图 1-6 所示。选择第一节距 y_1 的原则是使每个元件的感应电动势尽可能的大，所以 y_1 应接近或等于一个极距。极距是指相邻两个主磁极轴线在电枢表面的距离，可以用槽数来表示，既 $\tau = \frac{z}{2p}$ ，式中 z 为电枢的槽数， p 为主磁极的极对数， τ

可以是整数，也可是分数。又因为 y_1 必须为整数，为此，第一节距可用下式表示：

$$y_1 = \frac{z}{2p} \pm \varepsilon = \text{整数}$$

式中 ε 为用以把 y_1 凑成整数的一个小于 1 的数。若 $\varepsilon=0$ ， $y_1=\tau$ 称为整距绕组；若 $y_1<\tau$ ，称为短距绕组；若 $y_1>\tau$ ，称为长距绕组，其电磁效果与短距绕组相近，但端接部分长，耗铜量大，故不经常采用。

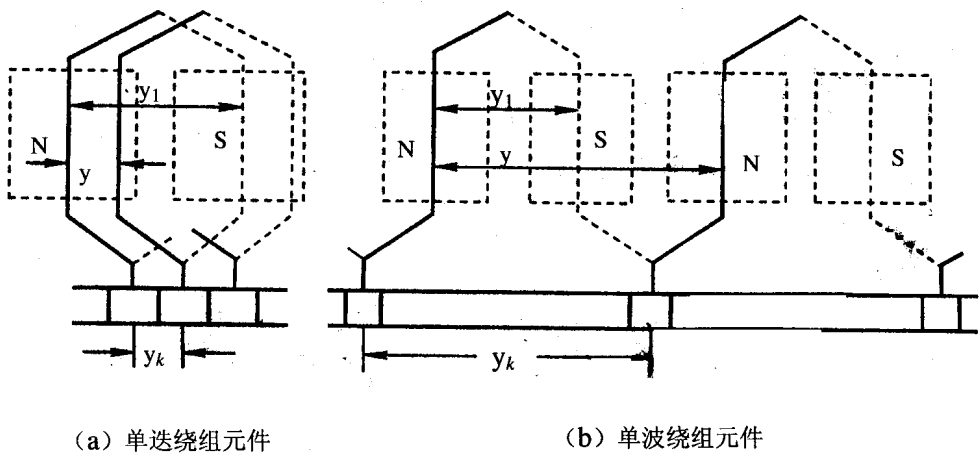


图 1-6 电枢绕组元件及其节距

②合成节距 y 。直接相连的两个元件的对应元件边在电枢表面上的距离，称为合成节距 y ，通常也用槽数来表示，亦为整数。

③换向器的节距 y_k 。每个元件的首末两端所联结的两个换向片在换向器表面上的距离，称为换向器节距 y_k ，通常用所跨的换向片数来表示。由图 1-6 可知，用槽数表示的 y 和用换向片数表示的 y_k 在数值上总是相等的。

1.2.2 单叠绕组

单叠绕组元件如图 1-6 (a) 所示。这种绕组的两个直接串联的后一个元件的端部是紧“叠”在前一个元件的端部上，所以称为“叠”绕组。因为同一个元件首末所联的两换向

片相隔“一个”换向片宽度的距离，即 $y_k=1$ ，所以称为“单”叠绕组。不难证明，单叠绕组的槽数 z 、元件数 s 和换向片数 k 三者相等，即 $z=s=k$ 。

【例 1-1】某直流电机的极对数 $p=2$ ，槽数 z 、元件数 s 及换向片数 k 为 $z=s=k=16$ ，试绕成单叠绕组。

①计算绕组数据。

因为是单叠绕组，所以 $y=y_k=1$ ；而 $y_1 = \frac{16}{2 \times 2} \pm 0 = 4$ ，为整距绕组。

②画绕组展开图。

通常把电枢绕组画成沿电枢轴向切开并展成平面，如图 1-7 所示。

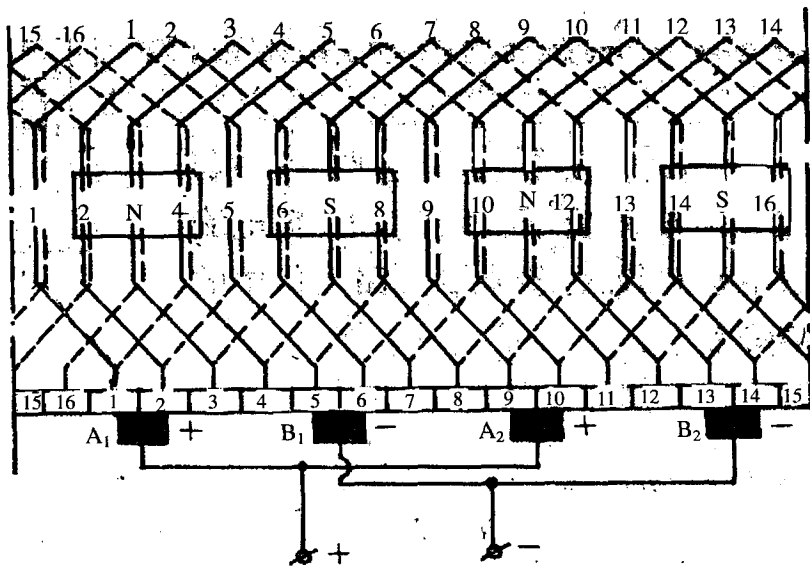


图 1-7 $z=16$ 、 $2p=4$ 单叠绕组展开图

在图 1-7 中，第一个元件的一个元件边放在放在 #1 槽的上层（实线），其另一个元件边在与之相距 $y_1=4$ 个槽即 #5 槽的下层（虚线）；#1 元件的首末端所连的两换向片应相距一片的宽度，为了使绕组元件端部对称，这两换向片的分界线应与 #1 元件的中心线重合。将 #1 元件的上层所连的换相片命名为 #1 换相片，则其下层边所连的是 #2 换向片。从 #2 片出发画 #2 元件。依次类推，画完 $S=16$ 个元件，#16 元件的末端必与 #1 片相连，形成闭合回路。

③电刷和磁极。

在绕组展开图上标出的电刷与磁极仅是某一瞬间时电枢绕组和电刷磁极之间相对位置。一般先在展开图上画 $2p=4$ 个均匀分布且 N、S 交替安排的主磁极。

为了在正负电刷间获得最大的直流电动势以及产生最大的电磁转矩，电刷应该按放在被电刷所短路的元件电动势为零的位置。在图 1-7 中，被电刷短路的元件 #1、#5、#9、#13 的两边都处在几何中心线上，电动势为零。此时，这几个元件的轴线以及它们所连的两换向片的分界线正好与主磁极轴线重合。

因此，电刷应放在其中心线与主磁极轴线对准的换向片上。每个主磁极对准的位置安放一个电刷，电刷数等于主磁极数。凡与 N 极对准的 p 个电刷（如图中的 A_1 和 A_2 ）具有