

高职高专机电类规划教材

电机与电气控制

主 编 谭维瑜

参 编 甘晓红

主 审 徐仁贵



机械工业出版社

本书的主要内容包括：交直流电机、控制电机、变压器及电磁铁的结构和工作原理；基本电气控制线路；典型机床电气控制线路；可编程序控制器（PC）；实验指导。

本书从应用角度出发，突出了基本知识和基本技能的培养。除介绍传统的控制技术和分析方法外，还介绍了较新的控制技术和分析方法，为进一步掌握微电子控制技术奠定了基础。本版仍保持原书的编写风格和特色，以读者为本，条理清晰，分析透彻，便于阅读。

本书为高职、高专计算机应用、机电一体化、电气自动化、机械制造等机电专业相关课程的教材，也可作为中职相关各专业的教材，并可供自学考试、电气技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电机与电气控制/谭维瑜主编. —北京：机械工业出版社，2003.12

高职高专机电类规划教材

ISBN 7-111-13460-5

I. 电... II. 谭... 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. ①TM3②TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2003）第 106546 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：王小东 王玉鑫 版式设计：霍永明 责任校对：张媛

封面设计：陈沛 责任印制：路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·24.25 印张·596 千字

0 001—4 000 册

定价：32.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

《电机与电气控制》一书是按原机械电子工业部的工科电子类教材 1991~1995 年编审出版规划，由原机械电子工业部中专计算机专业教学指导委员会审定推荐，作为中专规划教材，于 1995 年 5 月由机械工业出版社出版的。该书出版后受到读者的欢迎，至今仍在出版发行。

原书由机械电子工业部中专计算机专业教学指导委员会委员刘学军担任责任编委，谭维瑜主编，徐仁贵主审。谭维瑜编写绪论和第一、二、五、六、七、八、九章及其实验，甘晓红编写第三、四章及其实验，谭维瑜统编全稿。原书是作为中专计算机应用专业必修课程教材，也可作为机电一体化、电气技术、机械制造等工科专业相关课程的教材，也可供电视、函授、自学考试等有关专业及有关工程技术人员选用。

现为适应高职、高专教学的需要，由谭维瑜对原书内容进行了修订，作为高职、高专计算机应用、机电一体化、电气自动化、机械制造等机电专业相关课程的教材。

本书电路的图形符号、文字符号、电路绘制及有关术语，均采用最新的国家标准。为便于新旧标准过渡，书中对新旧标准作了对照，以利读者掌握。

本书内容分为四大部分：

第一章~第五章为电动机部分：介绍了直流电动机、异步电动机、同步电动机，常用控制电机和变压器、电磁铁（把它看作静止电机）的基本结构、工作原理、工作特性及铭牌数据。

第六章~第八章为继电器—接触器控制部分：介绍了常用低压电器的结构、工作原理及应用，电动机基本控制电路，典型机床电气控制线路。对电气原理图的阅读和分析，除介绍常用的“查线法”以外，还介绍了线路的逻辑表达式、控制过程图和流程图，为进一步学习和应用微电子控制技术奠定基础。

第九章为可编程控制器 PC 部分：介绍了可编程控制器一般的组成及工作原理；以国产小型 PC 机 MPC—001A 型为例，介绍了 PC 常用的梯形图程序设计以及指令系统、编程方法；又以日本立石公司的小型 PC 机 SYSMAC C-20 型为例，介绍了 PC 程序设计的功能图法和移位寄存器在 PC 程序设计中的应用。

第四部分为实验指导部分。实验是培养独立工作能力、操作技能和理论联系实际的重要手段，本书设置了六个实验，各校可根据实验设备选作。

由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

2003 年 8 月

于湖南工业职业技术学院

目 录

前言		
绪论	1	
第一章 直流电机	4	
第一节 直流电机概述	4	
第二节 直流电机的基本工作原理	5	
第三节 直流电机的结构	8	
第四节 直流电动机	11	
第五节 并励(他励)直流电动机的机械特性	20	
第六节 并励(他励)直流电动机的调速	23	
第七节 并励(他励)直流电动机的启动、反转与制动	31	
本章小结	38	
习题一	39	
第二章 变压器和电磁铁	41	
第一节 单相变压器的结构及工作原理	41	
第二节 变压器的主要数据	48	
第三节 变压器绕组的同极性端及其测定	49	
第四节 特殊变压器简介	50	
第五节 电磁铁	54	
本章小结	61	
习题二	62	
第三章 异步电动机	64	
第一节 异步电动机概述	64	
第二节 三相异步电动机的结构	64	
第三节 三相异步电动机的工作原理	66	
第四节 转子各量与转差率的关系	71	
第五节 异步电动机的电磁转矩	73	
第六节 异步电动机的机械特性	74	
第七节 三相异步电动机的启动	77	
第八节 异步电动机的调速	83	
第九节 异步电动机的铭牌数据	85	
第十节 单相异步电动机	88	
本章小结	92	
习题三	94	
第四章 控制电机	95	
第一节 控制电机概述	95	
第二节 伺服电动机	95	
第三节 测速发电机	99	
第四节 步进电动机	102	
第五节 自整角机	106	
第六节 旋转变压器	109	
第七节 感应同步器	114	
本章小结	117	
习题四	117	
第五章 同步电动机	118	
第一节 同步电动机的基本工作原理和结构	118	
第二节 三相同步电动机	121	
第三节 同步调相机	125	
第四节 微型同步电动机	126	
本章小结	130	
习题五	131	
第六章 低压电器	132	
第一节 低压电器概述	132	
第二节 开关	138	
第三节 主令电器	140	
第四节 保护电器	143	
第五节 交流接触器	150	
第六节 继电器	159	
第七节 电子电器简介	172	
本章小结	174	
习题六	174	
第七章 基本电气控制线路	177	
第一节 继电器接触控制系统线路图	177	
第二节 电动机全压启动控制线路	182	
第三节 电动机降压启动控制线路	185	
第四节 电动机制动控制线路	193	
第五节 多速电动机控制线路	198	
本章小结	202	
习题七	203	
第八章 典型机床电气控制线路	204	

第一节	机床电气控制线路概述	204	第六节	可编程序控制器的程序编制	331
第二节	C650 卧式车床电气控制线路	204	第七节	PC 程序设计的功能图法	339
第三节	M7120 平面磨床电气控制线路 ...	209	第八节	移位寄存器指令在 PC 程序设 计中的应用	353
第四节	Z3040 摇臂钻床电气控制线路 ...	216	本章小结	358	
第五节	X62W 万能升降台铣床电气控 制线路	223	习题九	359	
第六节	T68 型镗床电气控制线路	237	实验指导.....	361	
第七节	组合机床电气控制线路	246	实验一	直流并励电动机的起动、反 转和调速	361
第八节	A 系列龙门刨床电气控制线路 ...	257	实验二	三相异步电动机的起动	363
本章小结	289	实验三	(I) 直流测速发电机输出特 性的测定	366	
习题八	291		(II) 步进电动机的工作方式	368	
第九章	可编程序控制器	292	实验四	三相异步电动机电气控制线路 ...	373
第一节	可编程序控制器概述	292	实验五	三相异步电动机正、反转控制 ...	375
第二节	可编程序控制器的组成及基本 工作流程	295	实验六	可编程序控制器程序输入	377
第三节	可编程序控制器程序设计语言 ...	304	参考文献.....	379	
第四节	MPC—001A 型可编程序控制 器	308			
第五节	PRG—100A 编程器	325			

绪 论

本书主要讲述以电动机或其他执行电器为控制对象的生产设备的电气控制基本原理、线路及分析方法。生产设备种类繁多，功能各异，但从所采用的电气控制技术来说，其所用的控制原理、基本线路及分析方法是类似的。本课程结合典型金属切削机床电气控制线路，讲述上述几方面的内容，也适用于其他生产设备，以培养读者对电气控制系统的选择、使用和分析的基本能力。

机床是主要的加工设备，有“工作母机”之称。它的质量、数量、技术的先进程度以及自动化水平，都将直接影响整个机械工业及国民经济的发展。而机床的自动化水平，在提高生产率、改进产品质量和减轻劳动强度等方面起着极为重要的作用。

机床一般由四个基本部分组成：主机部分，驱动部分，控制部分，检测和显示部分，如图 0-1 所示。

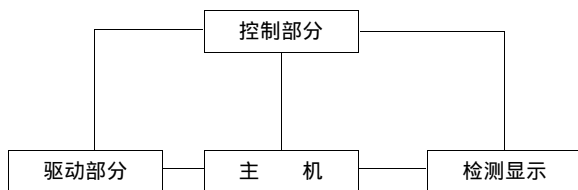


图 0-1 机床的组成

主机是指工作机械的本体。驱动部分包括原动机、传动机构等；原动机包括电动机、液压装置、气压装置等，但最主要的动力设备为电动机。控制部分的作用在于使系统中的驱动、主机、检测与显示各部分协调工作，可见控制部分是非常重要的。

一、电力拖动

以电动机为动力，通过传动机构拖动机床的工作机构进行工作的拖动方式称为电力拖动。

在电力拖动中，电动机通常被用来实现将电能转换为机械能，这时电动机在电动状态下运行；有时也反过来把机械能转换成热能或电能，这时电动机在制动状态下运行。

电力拖动可分为直流拖动和交流拖动。直流拖动是以直流电动机为动力的拖动，而以交流电动机为动力的拖动称为交流拖动。直流电动机虽不如交流电动机结构简单、制造方便、维护容易、价格便宜等，但由于直流电动机具有良好的起动、制动和调速性能，可以方便地在较宽的范围内平滑调速，所以直流电动机仍应用于对起动和调速要求较高的机械设备中。交流电动机较多的使用三相异步笼型电动机，它具有体积小、重量轻、转动惯量小、制造简单、结构牢固、工作可靠、易于维修等优点，且能用于带有腐蚀性、易爆性、含尘气体等环境中。

随着生产的发展，机床功能增多，自动化程度日益提高，为了简化机械传动机构，改变了过去一台电动机拖动几台机床，或一台电动机拖动一台机床的单独拖动方式，而出现了机床主运动、进给运动、辅助运动等分别由几台电动机拖动的分立拖动方式。

此外，在自动控制系统和计算装置中还用到各种交流或直流控制电机，例如伺服电动机、测速发电机、步进电动机等。各种控制电机的主要任务是转换和传递控制信号，能量的转换是次要的。

对于各种电动机我们应该了解下列几个方面的问题：基本构造，工作原理，表示转速与转矩之间关系的机械特性，起动、反转、调速及制动的基本原理和基本方法，应用场合及如何正确使用。

二、机床电气控制系统

机床控制系统应用的控制方法很多，有电气的、液压的、气动的、机械的或综合配用的等，其中以电气控制应用最为普遍。

机床电气控制是采用电气元件对控制对象进行控制。如继电器、接触器、交磁放大器、半导体器件等都可以作为控制装置的元件，它们根据生产工艺的要求，按一定的线路组成电气控制系统，自动控制电动机的起动、制动、正反转，按给定程序（流程）改变速度、运动方向和机床工作部件的位置，以及工作循环自动化等。

对机床电气控制系统一般要求：最大限度满足生产工艺的要求，力求简单经济，保证安全、可靠，操作、维修方便。

电气控制技术随着科学技术的不断发展、生产工艺不断提出新的要求而迅速发展。在控制方法上，从手动控制到自动控制；在控制原理上，由硬接线继电器接触式控制到以微处理器为核心的软件控制；在控制方式上，从断续的有级控制到连续的无级控制，由开环控制到闭环控制；在控制元件上，由有触头元件到无触头元件等。随着新的控制理论和新型元器件的出现，将不断推动控制技术发展。

对于机床电气控制系统，我们应了解以下几个方面的问题：机床本身的主要结构，生产工艺要求机床具有的运动形式，电力拖动的方式，所用电器元件的型号、规格及安装等。

三、继电器—接触器控制系统

使用按钮、开关、继电器、接触器、行程开关等组成的电气控制系统，称为“继电器—接触器控制系统”或“继电器接触式控制系统”。通过电气接触点（触头）的闭合与分断来控制电路转换（接通或断开），实现对电动机运转和机床工作机构运动的自动控制，故又称为“有触点控制系统”。

这种控制是由操作者通过主令电器（例如按钮）接通或断开继电器、接触器电路，使它们的触点闭合或分断，来接通或断开电动机电路的。控制系统的工作框图如图 0-2 所示。

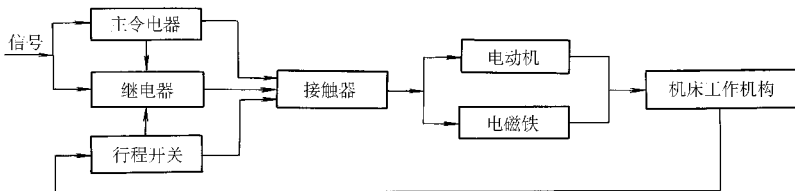


图 0-2 继电器接触式控制系统的工作框图

继电器接触式控制系统是在 20 世纪 20~30 年代出现的自动控制系统。这种系统的优点是结构简单、价格低廉、维护方便、抗干扰强、工作稳定、能控制较大功率。采用它可以实现控制的自动化，还可以实现集中控制和远距离控制，现在仍是机床和机械设备应用广泛的基

本的电气控制形式之一。它是本课程重点内容。

这种控制系统的缺点是：由于是固定接线形式，只能按固定的程序进行控制，改变程序不方便，灵活性差；采用有触头的开关动作，工作频率低、触头易损坏、使用寿命短、噪声大。

对于继电器接触式控制系统，我们应了解以下几个方面的问题：各种低压电器的基本结构和工作原理；对电动机起动、制动、反转、速度调节的基本控制电路的工作原理；典型机床电气控制线路是电动机基本控制电路的组合，控制线路中还具有对各个电动机动作的配合、自保、联锁、顺序、切换等功能，同时有各种行程、时间、速度、电流、温度、压力等基本控制方式；机床的运动形式及对电力拖动的要求；电气、液压、机械相互间的配合。

四、可编程序控制器

在生产中，大量存在以开关量控制的简单的程序控制过程，而且生产工艺和流程经常变化，要求更改控制程序。继电器接触式硬接线控制系统是不能满足这种需要的。

在 20 世纪 70 年代出现了以微处理器为核心的、引入了计算机存储程序技术、以软件来实现各种控制功能的自动化装置——可编程序控制器（PC）。它兼备了计算机的编程灵活、功能齐全、应用面广和继电器接触式控制简单、使用方便、抗干扰强的优点。PC 具有体积小、耗电省、容易更改控制程序的特点，目前已作为一种标准化通用设备用于工业生产控制。

由于 PC 是专为工业生产控制需要而设计的，采用与继电器接触式控制线路相类似的线路，它的指令简单，编程容易掌握，即使对微型计算机不太了解的使用者，也能得心应手的使用，从而受到广大用户的欢迎。

对于可编程序控制器 PC，我们应了解以下几个方面的问题：PC 的硬件组成，各组成部分的功用及相互联接关系；PC 的指令系统，各条指令的格式及作用；PC 程序基本编制方法和步骤，流程图、梯形图及功能图的作用；编程器上各个按键的功用等。

第一章 直流电机

第一节 直流电机概述

一、电机的分类

应用电磁原理实现电能与机械能互换的旋转机械，统称为电机。把机械能转换为电能的电机，称为发电机；把电能转换为机械能的电机，称为电动机。

按照产生或取用电能种类的不同，电机分为直流电机与交流电机。产生电能的称为发电机，取用电能的称为电动机。

电动机分为交流电动机和直流电动机两大类。交流电动机又分为单相的和三相的，异步的和同步的。直流电动机按照励磁方式的不同分为他励、并励、串励和复励四种。

交流电动机应用较为普遍，特别是异步电动机应用广泛，因为它的结构简单、坚固耐用、维护方便、价格便宜和工作可靠等。

直流电动机是人类最早发明和应用的一种电机，虽然目前不如交流电动机应用普遍，但是，直流电动机具有比交流电动机较为优良的调速和起动性能。它的调速范围广，平滑性、经济性较好，采用晶闸管调速系统更为方便；它的起动转矩较大。这种性能对有些机械的拖动是十分重要的，例如大型机床、电力机车、大型轧钢机、大型起重设备等。

直流电动机也有它显著的缺点：一是制造工艺复杂，生产成本高；二是运行时由于电刷与换向器之间容易产生火花，可靠性较差，维护较麻烦。人们虽做过很多研究工作来改善交流电动机的性能，但还不能全部用交流拖动来代替直流拖动。因而，在某些机械的拖动中，仍需用直流电动机。

直流发电机过去是直流电的主要电源之一，广泛地用在电解、电镀、充电等设备中，也用作同步电动机的励磁和直流电动机的电源。由于晶闸管整流技术日益发展，在某些场合已经取代直流发电机。

电动机除了较多的用作动力外，随着生产自动化的需要，在自动控制系统和计算装置中还用到一些控制电机和特殊用途的电机。例如测速发电机、步进电动机等。

对于各种电动机，我们应该了解以下几个方面的问题：基本工作原理，基本构造，表示转速与转矩之间关系的机械特性，起动、反转、调速及制动的基本原理和基本方法，适用场所和正确使用。

本章只讨论直流电机的有关问题，其他电机在以后章节中讨论。

二、直流电机的系列

为了满足各行各业对产品的不同要求，生产厂将产品制成不同型号系列。所谓系列就是指产品的结构和形状基本相似，而某种性能参数例如容量则按一定等级递增的一系列产品。对于电动机来说，系列产品的电压、速度、机座号和铁心长度都有一定的等级。

现将国产直流电动机系列简介如下：

(一) Z 型系列

Z 为直流电机的汉语拼音第一个字母。这种系列是通风防护式的。适用于调速范围不大的机械拖动、少灰尘、少腐蚀及温度低的场所。

(二) Z_2 型系列

此系列是 Z 型系列的改进型，也是防护式。调速范围可达 2:1，即可超过额定转速的一倍。

(三) ZO 型系列

此系列电机是封闭式的，用于多灰尘但无腐蚀性气体的场所。

(四) ZD 型系列

此系列主要用于需要广泛调速、具有较大的过载能力的场所，如大型机床、卷扬机、起重设备。

(五) ZQD 型系列

此系列是直流牵引电动机，用于牵引车辆。

第二节 直流电机的工作原理

任何电机的工作原理都是建立在电磁感应和电磁力这个基础上的。为了讨论直流电机的工作原理，我们把复杂的直流电机结构简化为工作原理图。

一、直流发电机的工作原理

在电工课程中，我们已经知道在磁场中运动的导体内，将产生感应电动势——电磁感应定律。发电机就是应用这个定律工作的。

图 1-1 所示的是一台两磁极直流发电机的工作原理图。图中 N 和 S 是一对静止的磁极，用以产生磁场，其磁感应强度沿圆周为正弦分布。容量较小的发电机是用永久磁铁做磁极的。容量较大的发电机的磁场是由直流电流通过绕在磁极铁心上的绕组产生的。用来形成 N 极和 S 极的绕组称为励磁绕组，励磁绕组中的电流称为励磁电流 I_f 。

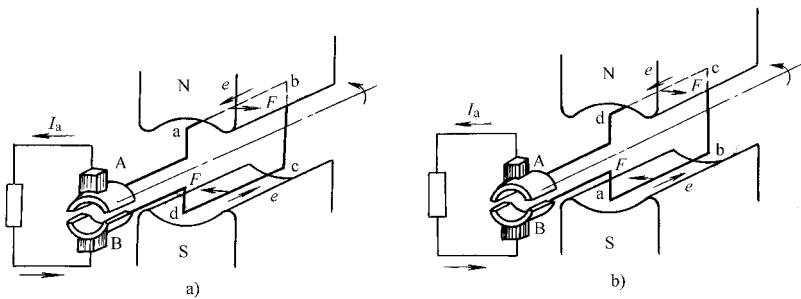


图 1-1 直流发电机原理图

在 N 极和 S 极之间，有一个能绕轴旋转的圆柱形铁心，其上紧绕着一个线圈称为电枢绕组（图中只画出一匝线圈），电枢绕组中的电流称为电枢电流 I_a 。

电枢绕组两端分别接在两个相互绝缘而和绕组同轴旋转的半圆形铜片——换向片上，组成一个换向器。换向器上压着固定不动的炭质电刷。铁心、电枢绕组和换向器所组成的旋转部分称为电枢。

当电枢被原动机以恒速驱动，按逆时针方向转动时，用右手定则可以判定，线圈 ab 和 cd 边切割磁力线产生的感应电动势 e 的方向，如图 1-1a 所示，在负载与线圈构成的回路中产生电流 I_a ，其方向与电动势方向相同。电流由电刷 A 流出，由电刷 B 流回。

当电枢转到图 1-1b 所示位置时， ab 边转到了 S 极下， cd 边转到了 N 极下。这时线圈中感应电动势的方向发生了改变，但由于换向器随同一起旋转，使得电刷 A 总是接触 N 极下的导线，而电刷 B 总是接触 S 极下的导线，故电流 I_a 仍由 A 流出 B 流回，方向不变。

虽然有换向器的作用，将线圈内的交变电动势在两电刷间变换为方向不变的电动势，但它的大小仍然是脉动的，如图 1-2 所示。欲获得在方向和量值上均为恒定的电动势，则应把电枢铁心上的槽数和线圈匝数增多，同时换向器上的换向片数也要相应地增加。

直流发电机的电动势，因割切磁力线而产生，故两电刷间电动势 E 的大小，与发电机电枢的转速 n 和磁极磁通 Φ 的乘积成正比，即

$$E = C_E \Phi n \quad (1-1)$$

式中， C_E 为电机常数，与电机的构造有关； Φ 的单位是 Wb； n 的单位是 r/min ； E 的单位是 V。

在这种情况下，直流电机便是一个直流电源，向负载输出直流电功率。

与此同时，电枢电流 I_a 与磁场相互作用而产生的电磁力形成了电磁转矩 T ，且

$$T = C_T \Phi I_a \quad (1-2)$$

式中， C_T 是与电动机结构有关的常数； Φ 的单位是 Wb； I_a 的单位是 A； T 的单位是 $N \cdot m$ 。

用左手定则可以判定，电磁转矩 T 的方向与电枢旋转方向相反。因此，在电枢等速旋转时，原动机的驱动转矩 T_1 必须与发电机的电磁转矩 T 和空载损耗转矩 T_0 相平衡（ T_0 是发电机轴上的转矩），即 $T_1 = T + T_0$ 。

当发电机的负载（即电枢电流）增加时，电磁转矩和输出功率也随之增加，这时原动机的驱动转矩所供给的机械功率亦必须相应增加，以保持转矩之间和功率之间的平衡，使转速基本上不变。

可见，发电机向负载输出电功率的同时，原动机却向发电机输出机械功率，发电机起着将机械能转换为电能的使用。

二、直流电动机的工作原理

在电工课程中，我们已经知道通电导体在磁场中会受到电磁力的作用——电磁力定律。电动机就是应用这个定律工作的。

图 1-3 是直流电动机的原理图。其组成与直流发电机基本相同。

电枢绕组通过电刷接到直流电源上，绕组的旋转轴与机械负载相联。电流从电刷 A 流入电枢绕组，从电刷 B 流出。电枢电流 I_a 与磁场相互作用产生电磁力 F ，其方向可用左手定则判定。这一对电磁力所形成的电磁转矩 T ，使电动机电枢逆时针方向旋转，如图 1-3a 所示。

当电枢转到图 1-3b 所示位置时，由于换向器的作用，电源电流 I_a 仍由电刷 A 流入绕

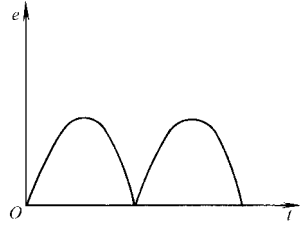


图 1-2 一个线圈的脉动电动势

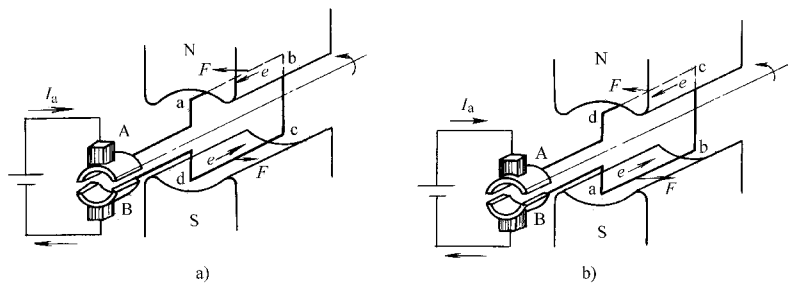


图 1-3 直流电动机原理图

组，由电刷 B 流出。电磁力和电磁转矩的方向仍然使电动机电枢逆时针方向旋转。

电枢转动时，割切磁力线而产生感应电动势，这个电动势（用右手定则判定）的方向与电枢电流 I_a 和外加电压 U 的方向总是相反的，称为反电动势 E_a 。它与发电机的电动势 E 的作用不同。发电机的电动势是电源电动势，在外电路产生电流。而 E_a 是反电动势，电源只有克服这个反电动势才能向电动机输入电流。

可见，电动机向负载输出机械功率的同时，电源却向电动机输入电功率，电动机起着将电能转换为机械能的作用。

发电机和电动机两者的电磁转矩 T 的作用是不同的。

发电机的电磁转矩是阻转矩，它与原动机的驱动转矩 T_1 的方向是相反的。

电动机的电磁转矩是驱动转矩，它使电枢转动。电动机的电磁转矩 T 必须与机械负载转矩 T_2 及空载损耗转矩 T_0 相平衡，即 $T = T_2 + T_0$ 。当电动机轴上的机械负载发生变化时，则电动机的转速、反电动势、电流及电磁转矩将自动进行调整，以适应负载的变化，保持新的平衡。例如，当负载转矩 T_2 增大，电磁转矩 T 暂时小于 T_2 ，转速 n 下降，当磁通 Φ 不变时，反电动势 E_a 必将减小，而电枢电流 $I_a = (U - E_a) / R_a$ 将增加，于是电磁转矩 T 随着增加，直到与负载转矩达到新的平衡后，转速不再下降，电动机以较原来为低的转速稳定运行。这时的电枢电流已增大，电源输入功率增加（电源电压保持不变）。

可见，直流电机作发电机运行和作电动机运行时，虽然都产生电动势和电磁转矩，但两者作用截然相反。

发电机运行	电动机运行
E 和 I_a 方向相同	E_a 和 I_a 方向相反
E ——电源电动势	E_a ——反电动势
T ——阻转矩	T ——驱动转矩
$T_1 = T + T_0$	$T = T_2 + T_0$

例 1-1 一台直流电动机，已知常数 $C_E = 3$ ，磁通 $\Phi = 0.05 \text{ Wb}$ 。(1) 试求当电枢转速 $n = 1400 \text{ r/min}$ 时的电枢反电动势 E_a ；(2) 若电源电压 $U = 220 \text{ V}$ ，测得电枢电流 $I_a = 50 \text{ A}$ ，试求电枢电路的电阻 R_a 。

解 (1) 由 $E_a = C_E \Phi n$ 得

$$E_a = (3 \times 0.05 \times 1400) \text{ V} = 210 \text{ V}$$

(2) 由 $U = E_a + I_a R_a$ 得

$$R_a = \frac{U - E_a}{I_a} = \frac{220 - 210}{50} \Omega = 0.2 \Omega$$

三、电机的可逆性

由以上分析可知，电机既可以作发电机运行，把机械能转换成电能，又可以作电动机运行，把电能转换成机械能。只是由于外部条件不同——电枢由原动机带动或是向电枢输入电功率，得到相反的能量转换。所以电机是一种双向的机电能量转换装置，这一特性称为电机的可逆性。但在实用上，一般只作一个方面来使用，或作发电机或作电动机使用。

第三节 直流电机的结构

我们讨论电机及其他电器的结构，目的在于了解它们各主要部件的名称、作用、相互组装及动作关系，以利正确选用和使用。

电机的结构是由以下几方面的要求来确定的。首先是电磁方面的要求：使电机产生足够的磁场，感应出一定的电动势，通过一定的电流，产生一定的电磁转矩，要有一定的绝缘强度。其次是机械方面的要求：电机能传递一定的转矩，保持机械上的坚固稳定。此外，还要满足冷却的要求，温升不能过高；还要考虑便于检修，运行可靠等。

从电机的基本工作原理知道，电机的磁极和电枢之间必须有相对运动，因此，任何电机都由固定不动的定子和旋转的转子两部分组成，在这两部分之间的间隙叫空气隙。

下面介绍直流电机的结构。图 1-4 是直流电机结构图，图 1-5 是直流电机径向剖面图。

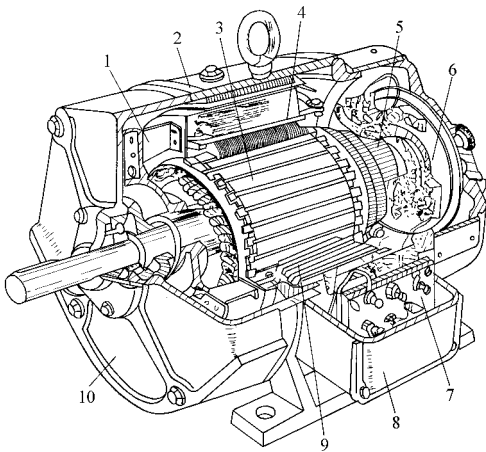


图 1-4 直流电机结构图

- 1—风扇 2—机座 3—电枢 4—主磁极 5—刷架
6—换向器 7—接线板 8—出线盒
9—换向磁极 10—端盖

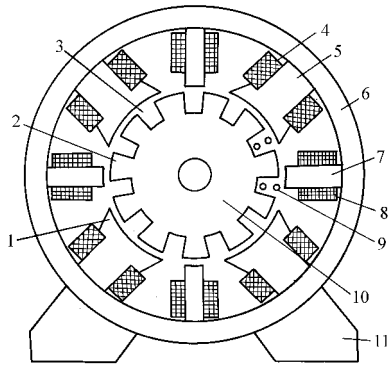


图 1-5 直流电机径向剖面图

- 1—极靴 2—电枢齿 3—电枢槽 4—励磁绕组 5—主磁极
6—磁轭 7—换向极 8—换向极绕组 9—电枢绕组
10—电枢铁心 11—底座

一、定子

定子的作用是产生磁场和作为电机机械支撑。它由主磁极、换向磁极、电刷、机座、端盖和轴承等组成。图 1-6 是直流电机的定子。

(一) 主磁极

主磁极的作用是产生主磁通 Φ 。主磁极铁心包括极心和极掌两部分。极心上套有励磁绕组，各主磁极上的绕组一般都是串联的。直流电机的磁极如图 1-6 所示。极掌的作用是使空气隙中磁感应强度分布最为合适。

改变励磁电流 I_f 的方向，就可改变主磁极极性，也就改变了磁场方向。

(二) 换向磁极

在两个相邻的主磁极之间中性面内有一个小磁极，这就是换向磁极。它的构造与主磁极相似，它的励磁绕组与主磁极的励磁绕组相串联。

换向磁极的作用是产生附加磁场，改善电机的换向，减小电刷与换向器之间的火花，不致使换向器烧坏。

主磁极中性面内的磁感应强度本应为零值，但是，由于电枢电流通过电枢绕组时所产生的电枢磁场，使主磁极中性面的磁感应强度不能为零值，于是使转到中性面内进行电流换向的绕组产生感应电动势，使得电刷与换向器之间产生较大的火花。

用换向磁极的附加磁场来抵消电枢磁场，使主磁极中性面内的磁感应强度接近于零，这样就改善了电枢绕组的电流换向条件，减小了电刷与换向器之间的火花。

(三) 电刷装置

电刷装置主要由用碳—石墨制成导电块的电刷、加压弹簧和刷盒等组成，如图 1-7 所示。

固定在机座上（小容量电机装在端盖上）不动的电刷，借助于加压弹簧的压力和旋转的换向器保持滑动接触，使电枢绕组与外电路接通。

电刷数一般等于主磁极数，各同极性的电刷经软线汇在一起，再引到接线盒内的接线板上，作为电枢绕组的引出端。

(四) 机座

机座用铸钢或铸铁制成，用来固定主磁极、换向磁极和端盖等，它是电机磁路的一部分。机座上的接线盒有励磁绕组和电枢绕组的接线端，用来对外接线。

(五) 端盖

端盖由铸铁制成，用螺钉固定在底座的两端，盖内有轴承用以支撑旋转的电枢。

二、转子

转子又称电枢，是电机的旋转部分。它由电枢铁心、绕组、换向器等组成，如图 1-8 所

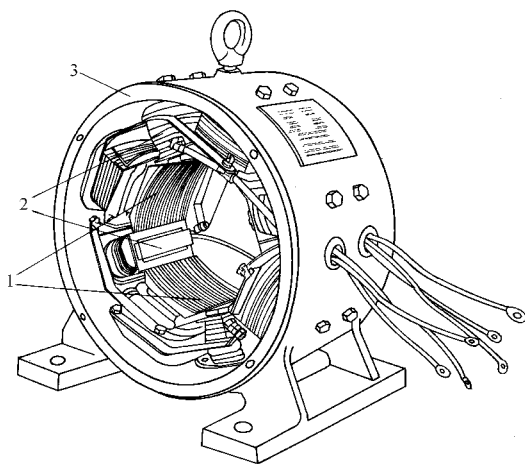


图 1-6 直流电机的定子
1—主磁极 2—换向磁极 3—机座

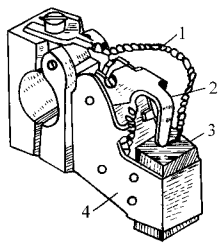


图 1-7 电刷装置
1—导电软线 2—加压弹簧 3—电刷 4—刷盒

示。

(一) 电枢铁心

电枢铁心由硅钢片冲制迭压而成，在外圆上有分布均匀的槽用来嵌放绕组。铁心也作为电机磁路的一部分。

(二) 绕组

绕组是产生感应电动势或电磁转矩，实现能量转换的主要部件。它是由许多绕组元件构成，按一定规则嵌放在铁心槽内和换向片相连，使各组线圈的电动势相加。绕组端部用镀锌钢丝箍住，防止绕组因离心力而发生径向位移。

(三) 换向器

换向器由许多铜制换向片组成，外形呈圆柱形，片与片之间用云母绝缘。

三、铭牌和额定值

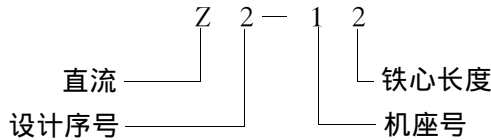
为了使电机安全而有效地运行，制造厂对电机的工作条件都加以技术规定。按照规定的工作条件进行运行的状态叫做额定工作状态。电机在额定工作时的各种技术数据叫做额定值，一般加下标 N 表示。这些额定值都列在电机的铭牌上，使用电机前，应熟悉铭牌，直流电机的铭牌见表 1-1。使用中的实际值，一般不应超过铭牌所规定的额定值。

表 1-1 直流电机的铭牌

直 流 电 动 机			
型号	Z2-12	励磁方式	他励
功率	4kW	励磁电压	220V
电压	220V	励磁电流	0.63A
电流	22.7A	定额	连续
转速	1500r/min	温升	80°C
出厂号	××××	出厂日期	年 月

(一) 型号

它表示电机的类别。例如：



(二) 额定电流 I_N

这是指发电机长期运行时电枢输出给负载的允许电流。对于电动机则是指电源输入到电动机的允许电流。

(三) 额定电压 U_N

这是指发电机输出的允许端电压。对于电动机则指输入到电动机端钮上的允许电压。

(四) 额定转速 n_N

这是指电机在额定工作状态时，应达到的转速。

(五) 额定功率（额定容量） P_N

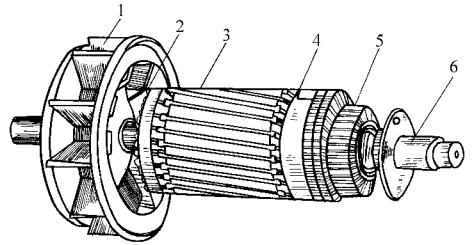


图 1-8 直流电机的电枢

- 1—风扇 2—绕组 3—电枢铁心
- 4—绑带 5—换向器 6—轴

对于发电机来说,这是指在额定电压 U_N 下,输出额定电流 I_N 时,向负载提供的电功率 $P_N = U_N I_N$ (V·A)。

对于电动机来说,则是指在额定电压 U_N , 额定电流 I_N 和额定转速 n_N 下,电动机轴上输出的机械功率 $P_N = U_N I_N \eta_N$ (W)。

(六) 额定效率 η_N

额定功率与输入功率之比,称为电机的额定效率,即

$$\eta_N = \frac{\text{额定功率}}{\text{输入功率}} \times 100\% \quad (1-3)$$

第四节 直流电动机

前几节我们对直流电机的基本工作原理和结构作了共性的讨论,从本节起将对直流电动机作进一步的讨论,以求对直流电动机的能量关系、特性、运行等知识能基本掌握,并能正确使用。

一、直流电动机的励磁方式

直流电动机按它的励磁绕组在电路中联接方式即励磁方式的不同,可分为以下四种:

(一) 他励电动机

这种电动机的励磁绕组与电枢绕组分别由两个直流电源供电。这种励磁绕组称他励绕组,如图 1-9 所示。

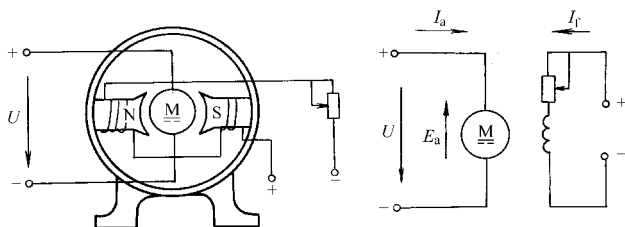


图 1-9 他励电动机

图中变阻器用来调节励磁电流的大小,励磁电流 I_a 仅取决于他励电源的电动势和励磁电路的总电阻,而不受电枢端电压的影响。

(二) 并励电动机

它的励磁绕组与电枢绕组并联,由同一直流电源供电。这种励磁绕组称并励绕组,如图 1-10 所示。

由图可见,励磁电流不仅与励磁回路的电阻有关,而且还受电枢两端电压的影响,承受电枢两端的较高电压。为了减小励磁电流及损耗,接有变阻器调节 I_f 。励磁绕组必须具有较大的电阻,因此,励磁绕组的匝数较多,且用较细的导线绕制。励磁电流虽小,但绕组匝数较多,仍能使磁极产生一定的磁通。

并励电动机的电流有 $I = I_a + I_f$ 关系。

(三) 串励电动机

串励电动机的励磁绕组与电枢绕组串联。这种励磁绕组称串励绕组,如图 1-11 所示。

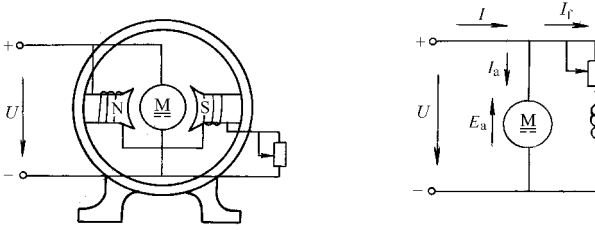


图 1-10 并励电动机

由于串励绕组电流较大，因此要求串励绕组应具有较小的电阻。为此，所用导线要粗且匝数较少，但由于流过的电流较大，故磁极仍能产生一定的磁通。

(四) 复励电动机

电动机的主磁极上有两个励磁绕组，一个同电枢绕组并联，另一个同电枢绕组串联，故名复励电动机，如图 1-12 所示。

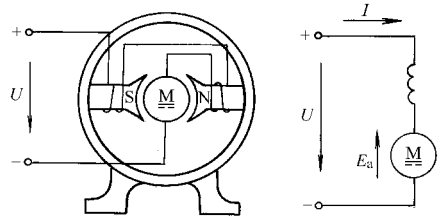


图 1-11 串励电动机

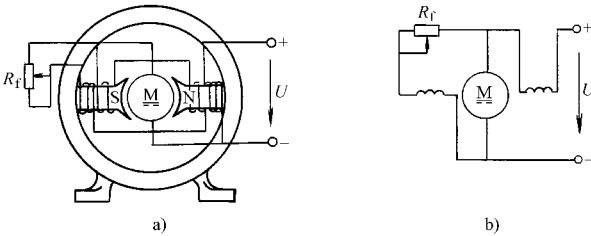


图 1-12 复励电动机

电动机的主磁通是两个励磁绕组分别产生的磁通的叠加。

直流电动机各绕组出线端的标志见表 1-2。

表 1-2 直流电动机出线端标志

绕组名称	首端	末端	绕组名称	首端	末端
电枢绕组	S ₁	S ₂	并励绕组	B ₁	B ₂
换向绕组	H ₁	H ₂	串励绕组	C ₁	C ₂
他励绕组	T ₁	T ₂			

二、直流电动机的磁场

(一) 直流电动机空载时的磁场

空载是指电机无负载，即无功率输出。在电动机中则是指无机械功率输出，电枢电流很小，由它产生的磁场可忽略。直流电动机空载磁场，可以看作是励磁磁通势单独作用产生的磁场。

1. 主磁通和漏磁通

图 1-13 是 4 极直流电动机空载时，由励磁电流单独作用时建立的磁场分布图。

磁通由一个主磁极 (N 极) 出发，经气隙和电枢齿，进入电枢铁心，再分别经电枢齿和