

高等学校教材

电机及拖动基础

上册

第2版

合肥工业大学 顾绳谷 主编

机械工业出版社

高等学校教材

电机及拖动基础

上册

第2版

合肥工业大学 顾绳谷 主编



机械工业出版社

本书包括《电机学》及《电力拖动基础》两门课程的主要内容，合并为《电机及拖动基础》。全书分上下两册，上册分六章阐述直流电机、变压器、异步电机、同步电机及控制电机的原理、结构、运行特性等。第2版进行了修订，内容有所增删，部分安排作了调整，充实了电机的一些有关统一性的内容。

本书可作为高等院校工业自动化专业的教材，也可供有关专业师生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动基础. 上册. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2000. 10
高等学校教材

ISBN 7-111-03775-8

I. 电… II. Ⅲ. ①电机-高等学校-教材②电力传动-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 65606 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: 赖尚元 卢若薇 版式设计: 冉晓华 责任校对: 孙志筠

封面设计: 郭景云

责任印制: 何全君

北京第二外国语学院印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行

2001 年 2 月第 2 版第 27 次印刷

787mm × 1092mm $\frac{1}{16}$ · 15 印张 · 365 千字

465151—470150 册

定价: 20.00 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、68326677-2527

前 言

本书是根据 1983 年 4 月高等工业学校自动化类专业教材编审委员会在福州召开的第二次全委扩大会议拟订的《电机及拖动基础》教学大纲（试行草案）并在原教材试用本基础上修订编写的。

本书包括《电机学》及《电力拖动基础》两门课程的主要内容，合并为《电机及拖动基础》。为了便于组织教学，在修订时将“电机”及“电力拖动”两部分内容相对集中，分别安排在《电机及拖动基础》的上下两册中。为使不同类型的电机及其拖动联系更紧密，也可考虑按第一、七、八、二、三、四、九、十、十一、五、六、十二、十三章的次序安排教学，还可将变压器放在直流电机之前讲授。

电机部分的修改本着结合专业特点和兼顾电机学科体系的原则进行，以所谓传统的大电机加控制电机作总体安排，仍以拖动系统中主要元件——交、直流电机为主要分析对象，以可逆原理去联系发电机，略加阐述，整体内容有所增删，部分安排作了调整，删去一些非主要内容，略增加一些有关统一性的内容，使电机的内在联系有所揭示，以加深对电机机理的认识。这些有关统一性内容的章节标题，或内容阐述之始加上※号；可以自由选读。

由于“电力拖动系统的动力学基础”是本书“拖动部分”的重点，在修订时将这部分内容独立成章并适当充实。在“直流电机的电力拖动”一章中，发电机—电动机组是可控整流装置供电的直流调速系统的基础，在修订时适当充实其机械特性、调速性能及过渡过程等有关内容。

本书可作为高等院校工业电气自动化专业的教材，也可供有关专业师生、工程技术人员及其他人员参考。

本书由合肥工业大学顾绳谷教授主编并编写了“电力拖动部分”，“电机部分”由合肥工业大学姚守猷教授编写，合肥工业大学吴奕副教授对“电机部分”内容作了校阅。

全书由哈尔滨工业大学赵昌颖教授主审。哈尔滨工业大学孔昌平、陆永平两教授参加了“电机部分”内容的审稿工作。他们对书稿提出了许多宝贵意见，对他们谨致以衷心的感谢。

在修订之际，对使用过本书试用本并提出了许多宝贵意见的同志表示谢意。

编 者

1992 年 12 月

目 录

前言

绪言	1
第一章 直流电机	6
第一节 直流电机的工作原理及结构	6
第二节 直流电机的铭牌数据	11
第三节 直流电机的绕组	11
第四节 直流电机的励磁方式及磁场	18
*第五节 机电能量转换过程的简述	24
第六节 感应电动势和电磁转矩的计算	26
第七节 直流电机的运行原理	31
第八节 直流电机的换向	46
小结	49
第二章 变压器	52
第一节 变压器的工作原理、分类及结构	52
第二节 单相变压器的空载运行	56
第三节 单相变压器的基本方程式	60
第四节 变压器的等效电路及相量图	62
第五节 等效电路参数的测定	67
第六节 三相变压器	69
第七节 变压器的稳态运行	75
第八节 自耦变压器与互感器	84
小结	88
第三章 异步电机（一）——三相异步电动机的基本原理	90
第一节 三相异步电动机的工作原理及结构	90
第二节 三相异步电动机的铭牌数据	97
第三节 三相异步电动机的定子绕组	97
第四节 三相异步电动机的定子磁通势及磁场	105
第五节 三相异步电动机定子绕组的电动势	119
小结	125
第四章 异步电机（二）——三相异步电动机的运行原理及单相异步电动机	127
第一节 三相异步电动机运行时的电磁过程	127
第二节 三相异步电动机的等效电路及相量图	138
第三节 三相异步电动机的功率和转矩	147
第四节 三相异步电动机的工作特性及其测取方法	151
第五节 三相异步电动机参数的测定	153
第六节 三相异步电动机的转矩与转差率之关系	156
第七节 单相异步电动机	157

小结	163
第五章 同步电机	165
第一节 三相同步电机	165
第二节 无换向器电动机——自控式同步电动机	188
第三节 其他同步电机	194
小结	199
第六章 控制电机	201
第一节 伺服电动机	201
第二节 测速发电机	208
第三节 自整角机	213
第四节 旋转变压器	218
小结	223
附录	225
附录 A 小型单相变压器的计算	225
附录 B 变压器的瞬变过程	231
参考文献	234

绪 言

一、电机及电力拖动技术的发展概况

电能是现代大量应用的一种能量形式。这种能量形式有许多优点，如生产和变换比较经济，传输和分配比较容易，使用和控制比较方便等等。人类自从使用了电能以后，从繁重的体力劳动中得到了解放，大大提高了劳动生产率，并能完成手工劳动所不易或不能完成的生产任务，因此电能已成为国民经济各部门中动力的主要来源。

电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制等，都必须利用电机这种进行能量转换或信号变换的机电装置。在电力工业中，发电机和变压器是电站和变电所中的主要设备。在工业企业中，大量应用电动机作为原动机去拖动各种生产机械。如机械工业、冶金工业、化学工业中，机床、电铲、轧钢机、吊车、抽水机、鼓风机等等都要用大大小小的电动机来拖动；在自动控制技术中，各式各样的小巧灵敏的控制电机广泛地作为检测、放大、执行和解算元件。

不论是旋转电机的能量转换，还是控制电机的信号变换，都是通过电磁感应作用而实现的，因此分析电机内部电磁过程及其所表现的特性时，要应用有关的电和磁的规律，如电路第一、第二定律，全电流定律，电磁感应定律和电磁力定律等，但是电机毕竟是一种机械，除电磁规律以外，还涉及到结构、工艺、材料等方面的问题，所以电机在拖动系统中是一种综合性的装置或元件。

电机是随着生产的发展而产生和发展的，而电机的发展反过来又促进社会生产力的不断提高。20世纪以前，电机的发展过程是由诞生到在工业上初步应用、各种电机的初步定型以及电机理论和电机设计计算的建立和发展。20世纪的特征是由电气化时代进入原子能、计算机及自动化时代，不仅对电机提出了诸如性能良好、运行可靠、单位容量的重量轻、体积小等方面愈来愈多的要求，而且随着自动控制系统和计算装置的发展，在旋转电机的理论基础上，发展出多种高精度、快响应的控制电机，成为电机学科的一个独立分支。与此同时由于电力电子学等学科的渗透，使电机这一较为成熟的学科得到新的发展。

新中国成立以来，我国的电机制造工业发生了巨大的变化。40年来不仅建成了独立自主和完整的体系，而且有一些产品已经达到或接近世界先进水平，就各种拖动系统中的主要设备——电动机而言，近年来已生产了不少大型的直流电动机、异步电动机和同步电动机；在中小型电机和控制电机方面，亦自行设计和生产了不少新系列电机。由于生产上的需要，这几年来，对电机的新原理、新结构、新工艺、新材料、新的运行方式和调试方法，亦进行许多摸索、研究和试验工作，取得了不少成就。

当前科学技术突飞猛进，因此电机在制造上也向着大型、巨型发展。在应用上由于计算技术迅速发展，将会出现由机器人工作的无人工厂，以计算机作为这些工厂的“中枢神经”，实现无人化的可能。在这种时代里的某些特种电机必须具有快速响应、模仿性运动、快速启动和停止等比人的手脚更复杂而精巧的运动。在理论上，由于在电机中应用了控制技术，使电机具有更良好的特性，使各类电机成为各种机电系统中一种极重要的元件。因之将使电力

电子学、计算机、电机学和控制论结合起来，发展成一门新的学科。

上面简述了电机的发展概况。同样应用各种电动机拖动各种生产机械的电力拖动技术，其发展也是有过程的。

最初，电力拖动代替了蒸汽或水力的拖动。当时电动机拖动生产机械的方式是通过天轴实现的，称为“成组拖动”。它是由一台电动机拖动一组生产机械，从电动机到各生产机械的能量传递以及在各生产机械之间的能量分配完全用机械方法，靠天轴及机械传动系统来实现。电动机远离生产机械，车间里有大量的天轴、长带和带轮等。能量传递过程中的损耗大，效率低，生产率低，灰尘大，劳动条件与卫生条件很差，而且易出事故。另外，如果电动机发生故障，则成组的生产机械将停车，甚至整个生产可能停顿。这是一种陈旧落后的电力拖动方式。

为了克服上述缺点，自 20 世纪 20 年代以来，生产机械上广泛采用一种“单电动机拖动系统”，在这一系统中，一台生产机械用一台单独的电动机拖动。这样，电动机与生产机械在结构上配合密切，可以用电气方法调节每台生产机械的转速，从而进一步简化机械结构，而且易于实现生产机械运转的全部自动化。

但是，如果用一台电动机拖动具有多个工作机构的生产机械时，则机械内部仍将保留着复杂的机械传动机构，因此，自 30 年代起，广泛采用了“多电动机拖动系统”，即每一个工作机构用单独的电动机拖动，因而生产机械的机械结构可大为简化。例如，具有三个主轴的龙门铣床用三台电动机拖动，每台电动机拖动一根主轴运动。某些生产机械的生产过程长而连续，如造纸、印刷、纺织、轧制等机械，也都采用多电动机拖动系统，这些机械一般由多个分部组成，每一分部可用单独电动机拖动。

必须指出，在只有一个工作机构的生产机械上有时也采用多电动机拖动系统。例如，链式输送机的工作机构是一条长的链式运输带，它往往采用多台电动机拖动。

在多电动机拖动系统中，各台电动机可在机械上采用刚性联结或摩擦联结等。很多情况下也采用电气方法联系，用电气控制线路及装置实现各电动机间的转速关系保持恒定（如电轴系统），维持某一参数（如张力）在容许范围内，如造纸、纺织、印刷、轧制等生产机械及各电动机间互相连锁（保证一定的起动运转、停车程序）等。

随着生产的发展，对上述单电动机拖动系统及多电动机拖动系统提出了更高的要求：如要求提高加工精度与工作速度，要求快速起动、制动及逆转，实现在很宽范围内调速及整个生产过程自动化等。要完成这些任务，除电动机外，必须有自动控制设备，组成自动化的电力拖动系统。

现代工业的电力拖动，一般都要求局部的或全部的自动化，因此必然要与各种控制元件组成的自动控制系统联系起来，而电力拖动则可视作自动化电力拖动系统的简称。在这一系统中可对生产机械进行自动控制，如实现自动控制起动、制动、调速、同步，自动维持转速、转矩或功率为恒定值，按给定程序或事先不知道的规律改变速度、改变转向和工作机构的位置，及使工作循环自动化等。

随着电机及电器制造业以及各种自动化元件的发展，自动化电力拖动系统得到不断的更新与发展。

最初采用的控制系统是继电器—接触器型的，属于有触点断续控制系统，称为继电器—接触器自动控制系统。

30年代初,出现了发电机—电动机组,使调速性能优异的直流电动机得到了广泛的应用。在直流电动机的拖动系统中,由于电机、电器、自动化元件及电力电子器件的不断更新与发展,在上述发电机—电动机组的基础上,发展成为采用交磁电机扩大机、磁放大器、可控离子变流器及晶闸管整流器等组成的自动化直流电力拖动系统。目前晶闸管等直流自动电力拖动系统已得到了广泛的应用,并正在向大容量的方向发展。国外自动化的直流电力拖动的成套设备功率已高达2万多kW,供1200V的直流电动机配套使用,做到集中控制、集中监视。在自动化元件方面已有整套标准控制单元,控制装置集成化、小型化、微型化,做到结构上组合安装积木化,微型化的自动化装置可直接装于电动机机座上,做到与电动机一体化,节省专用的控制柜。设备可靠性高,维护简便,许多设备都可做到锁门运行,不需监视与维护。

与直流电动机相比,交流电动机具有结构简单、价格便宜、维护方便、惯性小等一系列优点,单机功率比直流电机高得多,电压容易做成6000~10000V,还能实现高速拖动。

国外在40年代末到50年代,对串级及离子变频的交流调速系统进行了一些研究,并提出了无换向器电动机的原理。其后,晶闸管及电力电子自关断器件的出现,为交流调速系统开辟了广阔的前途。目前已进入扩大应用及系列化、进一步提高性能指标、向大容量发展的阶段。串级调速系统、变频调速系统及无换向器电动机的功率都已达到几万千瓦,控制系统已实现集成化,并已在工业中广泛应用。

我国建国以来,电力拖动自动化技术的发展有很大成绩,建立了一些有一定电力拖动自动化水平的工厂,成立了一批科研与设计机构。但与国外比较,差距还是较大。目前正急起直追,主攻成套,狠抓基础,开展一些关键技术的研究,如电力拖动自动化成套技术,它应用系统工程理论与计算机对工业自动化系统及成套设备的技术经济指标进行全面分析研究,使系统各组成部分按全系统要求的最佳方式工作,达到全系统和整个成套设备综合技术经济指标最佳。

随着近代电力电子技术和计算机技术的发展以及现代控制理论的应用,自动化电力拖动正向着计算机控制的生产过程自动化的方向迈进。在一些现代化的工厂里,力求做到从原料进厂到产品出厂都是自动化或半自动化的,而且达到高速、优质、高效率地生产。但必须指出,在大多数综合自动化系统中,例如在计算机集成制造系统(CIMS)中,自动化的电力拖动系统仍然是不可缺少的主要组成部分。

我国与国外的发展情况相同,一些工厂企业的生产过程正从单机、局部自动化发展到全盘、综合自动化。

已出现大批自动生产线;一些自动化车间和自动化工厂也将会在我国出现。

另外,低成本自动化的技术与设备的开发,愈来愈引起国内外的注意,特别对于中小型企业,应用适用技术的设备,不仅有利于获得经济效益,而且能提高生产率、可靠性与柔性,还有易于应用的优点。自动化的电力拖动系统更是低成本自动化系统的重要组成部分。

二、本课程的性质、任务与内容

本课程是工业电气自动化专业的一门专业基础课。

本课程的任务是使学生掌握常用交、直流电机、控制电机及变压器等的基本结构与工作原理以及电力拖动系统的运行性能,分析计算,电机选择与实验方法,为学习《拖动自动控制系统》、《反馈控制理论》及《计算机控制技术》等课程准备必要的基础知识。

本课程主要研究电机与电力拖动系统的基本理论问题，同时也联系到科学实验与生产实际的内容。具有原《电机学》及《电力拖动基础》的基本内容。在学完本课程之后，应达到下列要求：

- (1) 掌握常用交直流电机及变压器的基本理论（电磁关系、能量关系等）。
- (2) 掌握控制电机的工作原理，特性及用途。
- (3) 掌握分析电动机机械特性及各种运转状态（起动、反接制动、能耗制动、回馈制动）的基本理论。
- (4) 掌握电力拖动的机械过渡过程的基本特性及其主要的分析方法；了解机械惯性和电磁惯性同时作用时对直流电力拖动过渡过程的影响。
- (5) 掌握电力拖动系统中电动机参数调速方法的基本原理和技术经济指标。
- (6) 掌握选择电机的原理与方法。
- (7) 掌握电机与电力拖动系统的基本的实验方法与技能，并具有熟练的运算能力。
- (8) 了解电机与电力拖动今后发展的方向。

为了解决本课程计算方法的基本问题，给以启发性的示范以提高学生的运算能力，同时也起到巩固理论知识的作用，建议在教学过程中安排 1~2 次习题课，内容以交直流电动机机械特性计算为主。

为了深入掌握本课程的有关内容。应在教学过程中选择适当份量的课外作业，进行演习。习题内容可尽量与实验内容结合起来。

课外作业主要内容为：

- (1) 他励直流电动机工作特性的计算。
- (2) 变压器运行特性的计算。
- (3) 异步电动机工作特性的计算。
- (4) 运动方程式中各参数折算的计算。
- (5) 他励直流电动机机械特性的计算。
- (6) 他励直流电动机过渡过程的计算。
- (7) 他励直流发电机—电动机机组机械特性与过渡过程的计算。
- (8) 异步电动机机械特性的计算。
- (9) 异步电动机起动设备的计算。
- (10) 异步电动机过渡过程的计算。
- (11) 硬轴联结双电动机拖动系统机械特性的计算。
- (12) 长期变化负载下电动机功率的计算。
- (13) 短期工作方式电动机功率的计算。
- (14) 断续工作方式电动机功率的计算。

本课程在教学过程中，必须进行必要的实验，其主要目的和要求为：

- (1) 通过实验，对交直流电动机的工作特性及机械特性的性质、基本原理和理论计算加以验证。
- (2) 进行独立的实验操作，学会测定各种电机（包括变压器）的工作特性、电力拖动的机械特性及电机参数的方法，提高实验技能和熟练程度。

建议本课程在下列实验内容中选做 9 个左右，实验学时数约为 21 学时（除实验（5）、

(10)、(13) 外, 每个实验为 2 学时):

- (1) 他励直流电动机工作特性的测定。
- (2) 直流发电机实验。
- (3) 单相变压器实验。
- (4) 三相变压器极性和联结组的测定。
- (5) 三相异步电动机实验 (3 学时)。
- (6) 三相同步电动机的起动和 V 形曲线的测定。
- (7) 交流伺服电动机的特性测定。
- (8) 交直流测速发电机实验。
- (9) 自整角机实验。
- (10) 他励直流电动机在各种运转状态下机械特性的测定 (3 学时)。
- (11) 他励直流电动机飞轮矩和参数的测定。
- (12) 他励直流发电机—电动机机械特性及过渡过程的测定。
- (13) 电轴系统示范实验。

本课程是在学完《电工原理》课程的基础上进行讲授的。《电工原理》课程必须包括磁路等主要内容。

本课程与《拖动控制系统》、《半导体变流技术》、《工厂电气控制技术》等课程的分工必须明确, 以免有些内容遗漏或重复, 在交直流电机的起制动及调速部分, 本书只介绍其基本原理、方法、特性, 以及调速方法的技术经济指标, 而如何实现自动起制动及调速的线路以及分析系统的动态特性等问题, 不属本书的范围。这些内容应在一些后续课程中讲授。

第一章 直流电机

内 容 提 要

本章以直流电动机为讨论的主要对象，分析直流电机的工作原理、结构、电路、磁路、运行原理及换向等问题，为电力拖动系统提供元件的性能知识。

讨论问题时，既运用在电工基础课程中所学习过的基本电磁规律，又注意到直流电动机是拖动系统中的元件，以及在其中进行着机电能量转换的物理现象。

旋转电机是一种机电能量转换的机电装置，把电能转换为机械能的称为电动机；把机械能转换为电能的称为发电机。电流有交、直流之分，所以旋转电机也有直流电机与交流电机两大类。

直流电动机的调速性能很好、起动转矩较大，特别是调速性能为交流电动机所不及。因此，在对电动机的调速性能和起动性能要求高的生产机械上，大都使用直流电动机进行拖动；但是，直流电动机的制造工艺复杂，生产成本较高，维护较困难，可靠性较差，所以，在现代工业的拖动系统中，直流电动机与交流电动机“各得其所”。直流发电机也有和直流电动机一样的所述缺点，随着电力电子技术的发展，特别是在大功率电力电子器件问世以后，有逐步被整流电源所取代的趋势。不过，目前有些直流电源，如大型同步发电机的励磁电源以及化学工业中的电镀、电解等设备的电源还是采用直流发电机的供电方式。

第一节 直流电机的工作原理及结构

一、直流电机的工作原理

(一) 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是建立在皮 - 萨电磁力定律的基础上。我们来回顾一下皮 - 萨电磁力定律。

根据实验可知，若磁场与载流导体互相垂直（图 1-1a），作用在导体上的电磁力为

$$f = B i l \quad (1-1)$$

式中 B ——磁场的磁感应强度 (Wb/m^2)；

i ——导体中的电流 (A)；

l ——导体的有效长度 (m)。

算出来的电磁力单位是 N。力的方向用左手定则（图 1-1b）确定。

由于绝大多数的电动机都须作连续的旋转运动，因此，必须使载流导体在磁场中所受到的电磁力形成一种方向不变的转矩，才能构成电动机。我们先观察一下如图 1-2 所表示的

一种简单的电磁装置，它能否使导体所受的电磁力形成一种转矩？

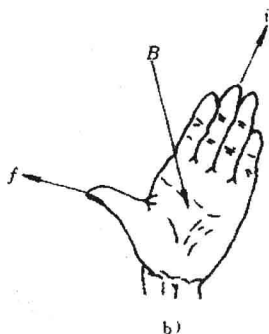
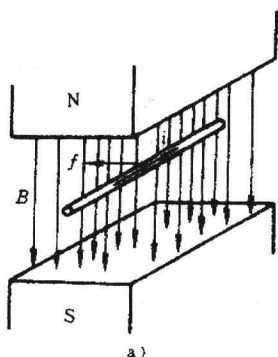


图 1-1 载流导体在磁场内受到的电磁力及左手定则

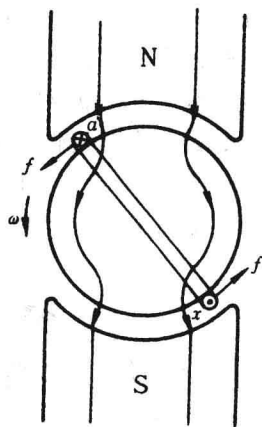


图 1-2 载流线圈在气隙磁场中产生电磁转矩

在图 1-2 中，N、S 为一对固定的磁极（一般是电磁铁，也可以是永久磁铁），两磁极间装着一个可以转动的铁质圆柱体，圆柱体的表面上固定着一个线圈，上线圈边为 a ，下线圈边为 x （以后把这个装有线圈的铁质圆柱体称为电枢）。N 极与 S 极的磁力线所通过圆柱体的途径如图 1-2 中所表示。当线圈 ax 中通入直流电流（由 a 边流入，从 x 边流出）时，线圈边 a 和 x 上均受到电磁力，根据左手定则确定力的方向，这一对电磁力形成了作用于电枢的一个电磁转矩，转矩的方向是逆时针方向。若电枢转动，线圈边 a 和 x 的位置互换，而线圈中通过的还是直流电流，则所产生的电磁转矩的方向却变为顺时针方向了，因此电枢受到一种方向交变的电磁转矩。这种交变的电磁转矩只能使电枢来回摇摆，而不能使电枢连续转动。显然，要使电枢受到一个方向不变的电磁转矩，关键在于，当线圈边在不同极性的磁极下，如何将流过线圈中的电流方向及时地加以变换，即进行所谓“换向”。为此必须增添一个叫做换向器的装置，如图 1-3 中所表示。换向器由互相绝缘的铜质换向片构成，装在轴上，也和电枢绝缘，且和电枢一起旋转。换向器又与两个固定不动的由石墨制成的电刷 A、B 相接触。装了这种换向器以后，若将直流电压加于电刷端，直流电流经电刷流过电枢上的线圈，则产生电磁转矩，电枢在电磁转矩的作用下就旋转起来。电枢一经转动，由于换向器配合电刷对电流的换向作用，直流电流交替地由线圈边 ab 和 cd 流入，使线圈边只要处于 N 极下，其中通过电流的方向总是由电刷 A 流入的方向，而在 S 极下时，总是从电刷 B 流出的方向。这就保证了每个极下线圈边中的电流始终是一个方向。这样的结构，就可使电动机能连续地旋转。这就是直流电动机的工作原理。

（二）直流发电机的工作原理

直流发电机的工作原理就是把电枢线圈中感应产生的交变电动势，靠换向器配合电刷的换向作用，使之从电刷端引出时变为直流电动势的原理。

如在图 1-3 所示的简易装置中，电刷上不加直流电压，用原动机拖动电枢使之逆时针方向恒速转动，线圈边 ab 和 cd 就分别切割不同极性磁极下的磁力线，而在其中感应产生电动势，电动势方向按右手定则确定。这种电磁情况表示在图 1-4 上。由于电枢连续地旋转，线圈边 ab 和 cd 交替地切割 N 极和 S 极下的磁力线，虽然每个线圈边和整个线圈中的感应电

电动势的方向是交变的，线圈内的感应电动势是一种交变电动势，而在电刷 A、B 端的电动势却为直流电动势（说得确切一些，是一种方向不变的脉振电动势）。因为，电枢在转动过程中，无论电枢转到什么位置，由于换向器配合电刷的换向作用，电刷 A 通过换向片所引出的电动势始终是切割 N 极磁力线的线圈边中的电动势，因此，电刷 A 始终有正极性。同样道理，电刷 B 始终有负极性，所以电刷端能引出方向不变的但大小变化的脉振电动势。如每极下的线圈数增多，可使脉振程度减小，就可获得直流电动势。这就是直流发电机的工作原理。同时也说明了直流发电机实质上是带有换向器的交流发电机。

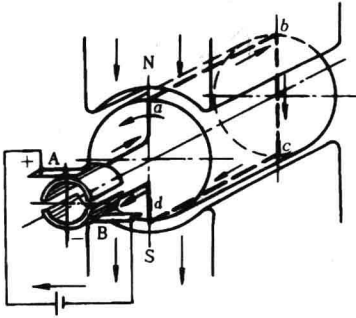


图 1-3 直流电动机的工作原理示意图

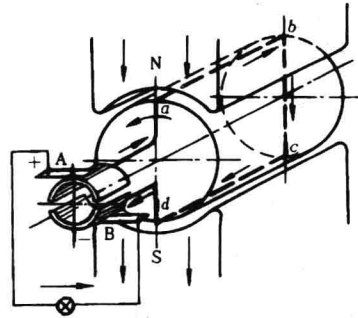


图 1-4 直流发电机工作原理示意图

从上述基本电磁情况来看，一台直流电机原则上既可以作为电动机运行，也可以作为发电机运行，只是约束的条件不同而已。在直流电机的两电刷端上，加上直流电压，将电能输入电枢，机械能从电机轴上输出，拖动生产机械，将电能转换成机械能而成为电动机；如用原动机拖动直流电机的电枢，而电刷上不加直流电压，则电刷端可以引出直流电动势作为直流电源，可输出电能，电机将机械能转换成电能而成为发电机。同一台电机，能作电动机或作发电机运行的这种原理，在电机理论中称为可逆原理。

二、直流电机的结构

直流电机的工作原理仅仅揭示了如何利用基本电磁规律以实现机电能量转换的道理，但是要按人们的意志去攫取这些能量为工农业生产服务，还得制造既经济又良好的电机。为此，任何旋转电机都必须具有能满足电磁和机械两方面要求的合理的结构形式。

要实现机电能量转换，电路和磁场之间必须有相对运动，所以旋转电机必须具备静止的和转动的两大部分，静止和转动部分之间要有一定大小的间隙（以后称为气隙）。直流电机的静止部分称为定子，它的主要作用是产生磁场，由主磁极、换向极、机座和电刷装置等组成。转动部分就是转子，通常称为电枢，它的作用是产生电磁转矩和感应电动势，由电枢铁心和电枢绕组、换向器、轴和风扇等组成。直流电机的剖面图如图 1-5 所示。现对各主要结构部件的基本结构及其作用作简要介绍如下：

（一）直流电机的静止部分

1. 主磁极 在一般大中型直流电机中，主磁极是一种电磁铁。主磁极的铁心用 1~1.5mm 厚的钢板冲片叠压紧固而成。绕制好的励磁绕组套在铁心外面，整个磁极用螺钉固定在机座上。各主磁极上的励磁绕组的联接必须使其通过励磁电流时，相邻磁极的极性呈 N 极和 S 极交替的排列。为了使主磁通在气隙中分布得更合理一些，铁心下部（称为极靴）比套绕组的部分（称为极身）宽（图 1-6）。这样也可使励磁绕组牢固地套在铁心上。

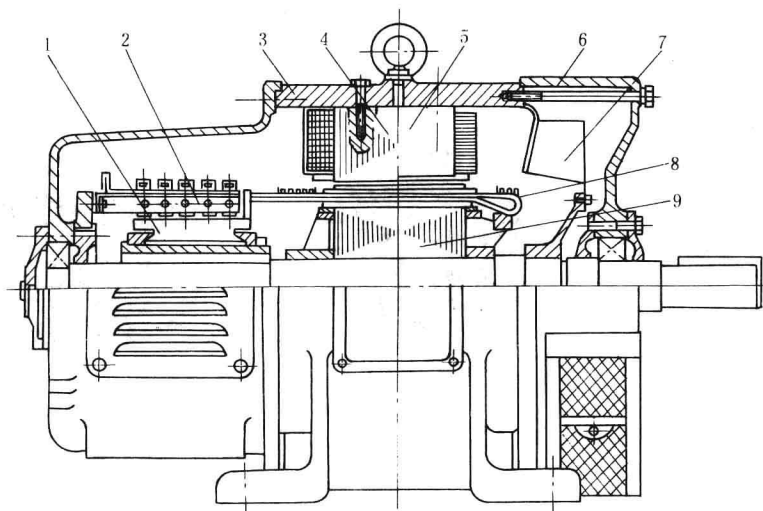


图 1-5 直流电机的剖面图

1—换向器 2—电刷装置 3—机座 4—主磁极 5—换向极 6—端盖
7—风扇 8—电枢绕组 9—电枢铁心

2. 换向极 又称附加极或间极，其作用是用以改善换向。换向极装在两主磁极之间，它也是由铁心和绕组构成（图 1-7）。铁心一般用整块钢或钢板加工而成。换向极绕组与电枢绕组串联。

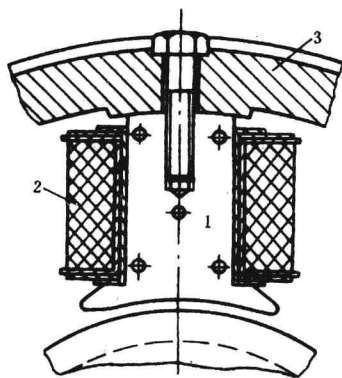


图 1-6 主磁极

1—主极铁心 2—励磁绕组 3—机座

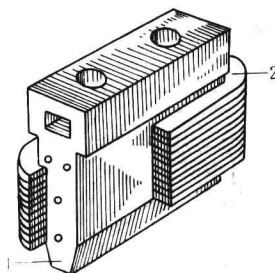


图 1-7 换向极

1—换向极铁心 2—换向极绕组

3. 机座 机座通常由铸钢或厚钢板焊成。它有两个用处，一个是用来固定主磁极、换向极和端盖；另一个用处是作为磁路的一部分。机座中有磁通经过的部分称为磁轭。

4. 电刷装置 电刷装置是把直流电压、直流电流引入或引出的装置。电刷装置由电刷、刷握、刷杆座和铜丝辫组成（图 1-8）。电刷由石墨制成，放在刷握内，用弹簧压紧在换向器上，刷握固定在刷杆上，刷杆装在刷架上，彼此之间都绝缘。刷架装在端盖或轴承内盖上，调整位置以后，将它固定。

（二）直流电机的转动部分

1. 电枢铁心 电枢铁心也有两个用处，一个是作为主磁路的主要部分；另一个是嵌放电枢绕组。由于电枢铁心和主磁场之间的相对运动将导致铁耗，为了减少铁耗，通常用

0.5mm厚的硅钢片的冲片叠压而成，固定在转子支架或转轴上（图 1-9）。

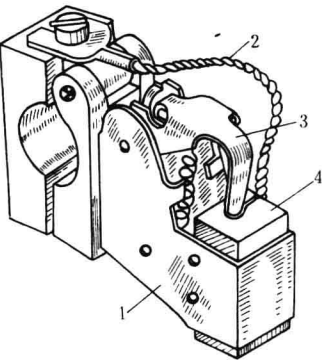
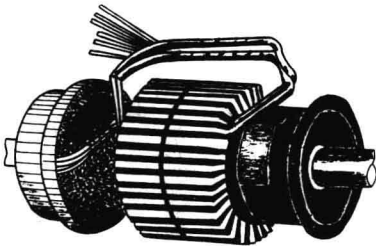


图 1-8 电刷装置
1—刷握 2—铜丝辫
3—压紧弹簧 4—电刷



a)



b)

图 1-9 电枢铁心冲片和铁心
a) 电枢铁心冲片 b) 电枢铁心

2. 电枢绕组 电枢绕组是由许多按一定规律联接的线圈组成，它是直流电机的主要电路部分，是通过电流和感应产生电动势以实现机电能量转换的关键性部件。线圈用带绝缘的圆形和矩形截面导线绕成，嵌放在电枢槽内，上下层之间以及线圈与铁心之间都要妥善地绝缘（图 1-10）。然后用槽楔压紧，再用钢丝或玻璃丝带扎紧，以防止离心力将绕组甩出槽外。在大型电机中，绕组伸出槽外的端接部分应扎紧在支架上。

3. 换向器 换向器也是直流电机的重要部件。在直流电动机中，它的作用是将电刷上所通过的直流电流转换为绕组内的交变电流，在直流发电机中，它将绕组内的交变电动势转换为电刷端上的直流电动势。换向器由许多换向片组成。换向片之间用云母绝缘。电枢绕组的每一个线圈两端分别焊接在两个换向片上。换向器的结构形式如图 1-11 所示。

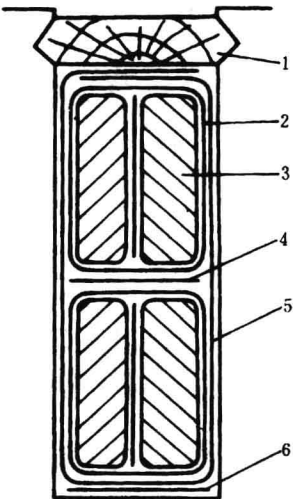


图 1-10 电枢槽内绝缘
1—槽楔 2—线圈绝缘 3—导体 4—层间绝缘
5—槽绝缘 6—槽底绝缘

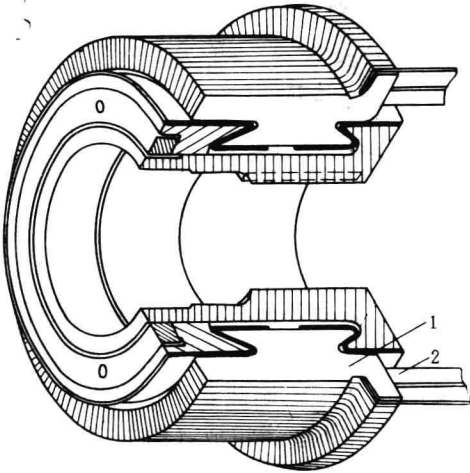


图 1-11 换向器
1—换向片 2—连接片

第二节 直流电机的铭牌数据

每台直流电机的机座上都钉有一块所谓铭牌。上面标注着一些叫做额定值的铭牌数据。额定值是由电机制造厂按国家标准的要求，对电机的一些电量或机械量所规定的数值。若电机运行时，这些电量和机械量都符合额定值，这样的电机运行情况称为额定工况。在额定工况下运行，可以保证电机可靠地工作，并且具有优良的性能。直流电机的额定值有：额定功率 P_N (kW)，额定电压 U_N (V)，额定电流 I_N (A)，额定转速 n_N (r/min)，额定励磁电压 U_{fN} (V)，额定励磁电流 I_{fN} (A) 和励磁方式等等。直流电动机的额定功率是指输出的机械功率，它等于额定电压和额定电流的乘积，再乘以电动机的效率。直流发电机的额定功率是指电机出线端输出的电功率，它等于额定电压和额定电流的乘积。

第三节 直流电机的绕组

从直流电机的工作原理可知，直流电机必须具有能在磁场里转动的线圈。在电动机里，线圈中通过电流，产生电磁转矩，使线圈在磁场里转动，则在线圈中感应产生反电动势，吸收电功率，实现了将电能转换为机械能的机电能量的转换。而发电机里，线圈在磁场里转动时，线圈中感应产生电动势，通过换向器及电刷向外引出，接上负载后，电流流过线圈，产生制动的电磁转矩，吸收机械功率，实现了机械能转换为电能的机电能量的转换。由此可见，在直流电机中，这种能在磁场中转动的线圈是实现机电能量转换的枢纽。所以直流电机的转子称为电枢。在实际电机中，在电枢表面上均匀分布的槽内嵌放着许多线圈，这些线圈按一定规律联接起来，构成直流电机的电枢绕组，以便通过一定大小的电流和感应产生足够数值的电动势。实质上，电枢绕组就是直流电机的主要电路，所以，它是直流电机的一个重要部件。本节将说明绕组的构成。

电枢绕组在实现机电能量转换过程中起着重要作用，对它的要求是：在能通过规定的电流和产生足够的电动势的前提下，尽可能节省有色金属和绝缘材料，并且要结构简单、运行可靠等等。从这些要求出发，我们先分析一个简单的绕组，以阐明绕组构成的原则。

一、简单的绕组

在叙述直流电机的工作原理时，我们认为电枢上仅有一个线圈，线圈的端子分别与互相绝缘的换向片相联接，见图 1-3。如果电枢上有 4 个线圈，换向器需由 8 个换向片组成，如图 1-12 所示，线圈增多了但互相不联接。这样的绕组是不能符合上面所提出的要求，因为线圈互相不联接，如作电动机运行，电流不能通过所有线圈，如作发电机运行，所有线圈中的感应电动势不能同时向外引出，以致产生的电磁转矩与感应电动势大小不足。为此，必须将所有线圈互相联接起来。

如果将由线圈边 1、2；3、4；5、6；7、8 分别构成 4 个线圈，作如图 1-13a 的安排，且嵌放在均匀分布的电枢槽内，并将相邻线圈的首端和末端一起焊接到一个换向片上，使所有

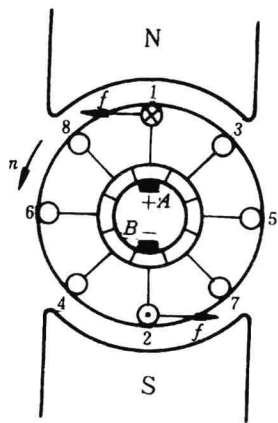


图 1-12 线圈不联接的多线圈装置