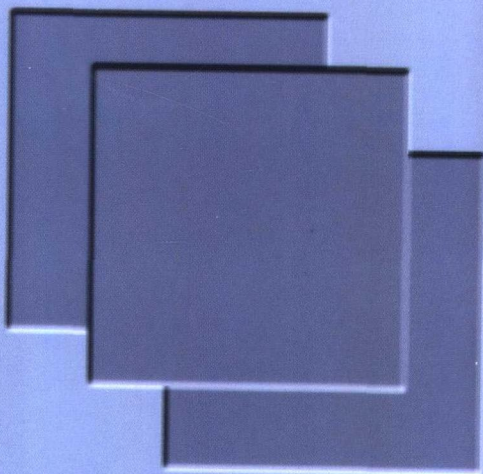




全国高职高专电气类精品规划教材

电机与拖动

主编 肖 兰 马爱芳



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

全国高职高专电气类精品规划教材

电机与拖动

主 编 肖 兰 马爱芳
副主编 茹反反 马香普 万 军
唐金贵 方益秋



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材是结合我国高等职业教育的现状,针对当前的教学需要编写而成,教材共分9章,主要内容有直流电机,直流电动机的电力拖动,变压器,交流电机的绕组、电动势和磁动势,异步电动机,三相异步电动机的电力拖动,同步电机,控制电机,电力拖动系统中电动机的选择。

为了便于教学使用,在本书各章前面提出了教学要求,单元后附有小结和习题。

本教材可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高等教育学院的供用电技术、工业企业自动化、电气技术等专业的教材,还可供电气类专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动/肖兰,马爱芳主编. —北京:中国水利水电出版社,2004
全国高职高专电气类精品规划教材
ISBN 7-5084-2260-0

I. 电... II. ①肖...②马... III. ①电机—高等学校:技术学校—教材②电力传动—高等学校:技术学校—教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 071613 号

书 名	全国高职高专电气类精品规划教材 电机与拖动
作 者	主编 肖 兰 马爱芳
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京安锐思技贸有限公司
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×960mm 16开本 20印张 391千字
版 次	2004年8月第1版 2004年8月第1次印刷
印 数	0001—5100册
定 价	29.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

序

教育部在《2003-2007 年教育振兴行动计划》中提出要实施“职业教育与创新工程”，大力发展职业教育，大量培养高素质的技能型特别是高技能人才，并强调要以就业为导向，转变办学模式，大力推动职业教育。因此，高职高专教育的人才培养模式应体现以培养技术应用能力为主线 and 全面推进素质教育的要求。教材是体现教学内容和教学方法的知识载体，进行教学活动的基本工具；是深化教育教学改革，保障和提高教学质量的重要支柱和基础。因此，教材建设是高职高专教育的一项基础性工程，必须适应高职高专教育改革与发展的需要。

为贯彻这一思想，2003 年 12 月，在福建厦门，中国水利水电出版社组织全国 14 家高职高专学校共同研讨高职高专教学的目前状况、特色及发展趋势，并决定编写一批符合当前高职高专教学特色的教材，于是就有了《全国高职高专电气类精品规划教材》。

《全国高职高专电气类精品规划教材》是为适应高职高专教育改革与发展的需要，以培养技术应用为主线的技能型特别是高技能人才的系列教材。为了确保教材的编写质量，参与编写人员都是经过院校推荐、编委会答辩并聘任的，有着丰富的教学和实践经验，其中主编都有编写教材的经历。教材较好地反映了当前电气技术的先进水平和最新岗位要求，体现了培养学生的技术应用能力和推进素质教育的要求，具有创新特色。同时，结合教育部两年制高职教育的试点推行，编委会也对各门教材提出了

满足这一发展需要的内容编写要求，可以说，这套教材既能适应三年制高职高专教育的要求，也适应两年制高职高专教育的要求。

《全国高职高专电气类精品规划教材》的出版，是对高职高专教材建设的一次有益探讨，因为时间仓促，教材可能存在一些不妥之处，敬请读者批评指正。

《全国高职高专电气类精品规划教材》编委会

2004年8月

前

言

《电机与拖动》是高等职业技术学院供用电技术、工业电气自动化、电气技术和机电一体化等专业学生必修的一门主干课程，它将电机学、电机拖动及控制电机等内容有机地结合起来。其任务是：使学生具备现代高等职业技术应用型人才所必需的电机与拖动方面的基本知识与基本技能，为学生学习专业知识和职业技能，全面提高学生素质，增强学生适应职业变化和继续学习的能力打下一定的基础。

本教材主要讲述电机的基本理论及其在电力拖动系统中的应用，包括直流电机及拖动、变压器、交流电机及拖动、控制电机及电力拖动系统中电动机的选择等几部分内容。

本教材共分9章，第3章、第7章由湖北水利水电职业技术学院马爱芳编写，第1章由福建水利电力职业技术学院茹反反编写，第2章由河北工程技术高等专科学校马香普编写，第4章由浙江水利水电专科学校万军编写，第5章、第6章由四川电力职业技术学院肖兰编写，第8章由武汉电力职业技术学院唐金贵编写，第9章由江西电力职业技术学院方益秋编写，绪论由万军和方益秋共同编写。全书由肖兰和马爱芳主编，由肖兰副教授统稿。

由于编写时间紧迫，编者水平有限，书中的缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

2004年8月

目 录

序

前言

绪论 1

第 1 章 直流电机 4

- 1.1 直流电机的工作原理与结构 4
- 1.2 直流电机的电枢绕组 10
- 1.3 直流电机的电枢反应 19
- 1.4 直流电机的换向 24
- 1.5 直流电机的电枢电动势与电磁转矩 29
- 1.6 直流发电机 32
- 1.7 直流电动机 38
- 小结 40
- 习题 41

第 2 章 直流电动机的电力拖动 43

- 2.1 电力拖动系统的动力学基础 43
- 2.2 他励直流电动机的机械特性 51
- 2.3 直流电动机的起动 60
- 2.4 他励直流电动机的调速 64
- 2.5 直流电动机反转和制动 74
- 小结 84
- 习题 85

第 3 章 变压器 90

- 3.1 变压器的基本工作原理和结构 91
- 3.2 单相变压器的空载运行 98
- 3.3 单相变压器的负载运行 104

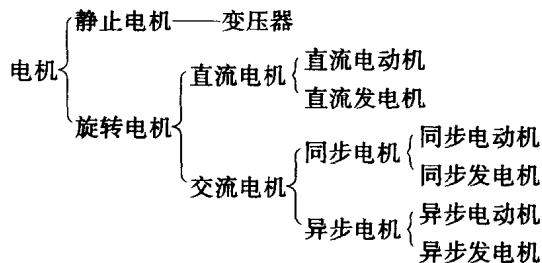
3.4	变压器参数的测定	112
3.5	变压器的运行特性	119
3.6	三相变压器	124
3.7	变压器的并联运行	132
3.8	其他用途的变压器	135
	小结	141
	习题	142
第 4 章	交流电机的绕组、电动势和磁动势	147
4.1	交流电机的绕组	147
4.2	交流电机绕组的感应电动势	154
4.3	交流电机绕组的磁动势	159
	小结	165
	习题	166
第 5 章	异步电动机	168
5.1	三相异步电动机的工作原理和基本结构	169
5.2	异步电动机的空载运行	178
5.3	异步电动机的负载运行	181
5.4	异步电动机的电磁转矩	187
5.5	异步电动机的工作特性	190
5.6	异步电动机的参数测定	192
	小结	195
	习题	196
第 6 章	异步电动机的电力拖动	198
6.1	三相异步电动机的机械特性	198
6.2	三相异步电动机的起动概述	203
6.3	鼠笼式异步电动机的起动	204
6.4	绕线式异步电动机的起动	211
6.5	深槽式和双鼠笼式异步电动机	214
6.6	异步电动机的调速	216
6.7	异步电动机的反转与制动	226
6.8	单相异步电动机	230

小结	236
习题	238
第 7 章 同步电机	241
7.1 同步电机的基本工作原理和结构	241
7.2 同步发电机	245
7.3 同步电动机	255
7.4 同步电动机调相运行及同步调相机	261
小结	263
习题	264
第 8 章 控制电机	266
8.1 测速发电机	266
8.2 伺服电动机	271
8.3 旋转变压器	275
8.4 自整角机	278
8.5 步进电动机	283
小结	289
习题	290
第 9 章 电力拖动系统中电动机的选择	292
9.1 电动机选择的一般概念	292
9.2 电动机发热及冷却	294
9.3 电动机的工作制	296
9.4 连续工作制电动机额定功率的选择	298
9.5 短时工作制电动机额定功率的选择	303
9.6 断续周期工作制电动机额定功率的选择	304
9.7 电动机类型、额定电压、额定转速的选择	306
小结	308
习题	309
参考文献	310

绪 论

1. 电机及电力拖动的分类及发展概况

(1) 分类。当代最主要的能源是电能。电机是指利用电磁感应原理，实现机电能量转换的机械装置。在实际生产应用中，有许许多多的各种类型的电机。这些电机可以按不同的方法进行分类。如：按电流的种类来分，有交流电机和直流电机；按电机职能分，有变压器、发电机、电动机、控制电机（主要应用在自动控制和测量领域中）。现将主要用作机电能量转化的各种电机，归纳如下：



发电机的作用是把机械能转变成电能，即发电；电动机的作用是把电能转变成机械能，拖动各种生产机械设备运转，实现生产过程的机械化和自动化；变压器的作用是升高或降低电压，升高电压是为了减小输电线路的损耗，实现远距离、大容量经济地传输电能，降低电压是为了安全使用电能。可见，本课程研究的对象——发电机、变压器、电动机三大部分，涉及电能生产、输送、分配和使用的各个环节。

在现代工业、农业生产和交通运输中，需要使用各种各样的生产机械。而拖动这些生产机械运转的方法有三种：气动、液压拖动和电力拖动。由于电力拖动控制简单、方便、经济，能实现远距离控制，并能实现自动调节的功能，因此在大多数生产机械中都采用电力拖动。所谓电力拖动就是用电动机拖动各种生产机械运转，实现工农业生产过程的机械化和自动化。



这其中,变压器和发电机是电力工业的主要设备。而各类电动机则是工业企业中,用以拖动各类机械设备的动力之源。另外各种微特电机广泛地应用在自动控制领域,作为检测、转换、执行等元件。

(2) 发展概况。蒸汽机带动了 18 世纪第一次产业革命以后,19 世纪末到 20 世纪上半叶电机又引发了第二次产业革命,使人类进入了电气化时代。1831 年法拉第发现了电磁感应现象,为电机的产生奠定了基础,1933 年楞次证明了可逆原理,1889 年多里·多勃罗沃尔斯基提出三相制,设计和制造了第一台三相变压器和三相异步电动机。从此以后,电机技术不断发展和完善,如冷却技术、材料性能不断改进,电机的容量不断增大,性能不断提高,应用日益广泛。20 世纪下半叶的信息技术引发了第三次产业革命,使生产和消费从工业化向自动化、智能化时代转变;推动了新一代高性能电机驱动系统与伺服系统的研究与发展。

电机的发展也伴随着电力拖动技术的发展。电力拖动是电动机在拖动系统中作为动力机械装置和元件拖动机械做功的运行方式。电力拖动又称电气拖动或电力转动。

电力拖动系统主要是由电动机、传递机构和工作机械等装置组成的机电系统。电力拖动的任务就是使电动机实现由电能向机械能的转换,完成拖动机械装置进行启动、运行、调速、制动等工作,因此电动机是电力拖动的关键。

电动机出现后,电力拖动大量替代了蒸汽和水力拖动。最初为“组拖动系统”,一台电机拖动一组生产机械,通过大量的轴传动、皮带传动实现能量从电动机到机械装置的传递。二十世纪上半叶以来,大量采用“单电动机拖动系统”,一台电机拖动一台生产机械,便于通过对电动机的控制,实现对机械装置的电气控制,从而实现生产自动化。但随着机械装置的要求日益提高,很多机械装置为完成复杂的工作,使用了大量的机械传动机构,由于机械零件加工技术和机械自身特性所限,使得系统难以达到所要求的传动控制和传动精度;因此,往往使用“多电动机拖动系统”,即在一个机械装置中,每个部件的每个传动工作或运动方式均由一台电机驱动,使得传动机构大大减少,从而简化机械系统,提高传动精度。

同时随着自动化元件和控制技术发展,通过对每台电机的控制,就可对机械装置的每个工作动作进行电气控制,实现自动化电机拖动系统。

近年来,计算机技术、微电子技术、电力电子技术、现代控制技术以及网络通信等新技术得到发展和广泛应用,微电子、计算机技术与控制技术相结合改造传统产业,能够实现高性能、电子化、小型化、智能化的电机拖动系统。

无论是哪一类电机,无论技术如何向前发展,电机都是通过电磁感应原理,实现能量的转换和控制的,本课程所研究的内容主要是其基本原理和特性,是电机及拖动技术的理论基础。



2. 本课程的性质、任务和内容

《电机与拖动》这门课程是电气工程、供用电技术等专业的一门主干课程。由于电机大量在拖动系统中作为动力机械装置和元件使用。我们有必要研究其基本原理、电气特性、机械特性以及在系统中的匹配问题。

本课程主要讲述电机的基本理论及其在电力拖动系统中的应用,包括直流电机及拖动、变压器、交流电机及拖动、控制电机及电力拖动系统中电动机的选择等几部分内容。

在学习了本课程后,应掌握直流电机、变压器、异步电机、同步电机的工作原理、电磁过程、基本方程式、等效电路等内容。电力拖动部分主要掌握:直流电动机、异步电动机的各种机械特性、电动机的起动、调速、制动运行的特性分析及其相关计算等内容。掌握选择电机的原理与方法。了解电动机与电力拖动系统的实验方法与发展方向。

3. 分析电机常用的基本电磁定律

各种类型的电机都是利用电磁感应原理来实现机电能量转换的,都存在电路和磁路两大部分。因此,在分析电机原理时,经常需要用到电路和磁路的一些基本定律。最常用的是:

- (1) 法拉第电磁感应定律。
- (2) 安培全电流定律。
- (3) 电磁力定律。
- (4) 基尔霍夫定律。
- (5) 能量守恒定律。

4. 本课程的特点及学习方法

《电机与拖动》这门课既是一门理论性很强的专业基础课,又具有专业课的性质。在本课程的学习过程中,应在对本书进行充分阅读的基础上,注意对基本原理的掌握和基本概念的理解。本书在每一章节的小结中均列出了重点和要点,须注意对这些知识点的学习,在初始学习时,有些知识点的联系可能较为松散,只有对这些知识点进行及时消化和记忆,才能建立较系统的知识体系。在学习过程中,还要注意进行比较,比如对变压器、异步电机和同步电机的相关比较,可以使我们准确把握相关基本概念,明确各类电机特点,有利于电机理论系统化。同时还须注意与实践的结合,运用相关的知识要点解释和解决具体的生活生产中电机和拖动问题。



第 1 章

直 流 电 机

【教学要求】 掌握直流发电机和直流电动机的工作原理，了解直流电机的基本结构及各部件的作用，了解单叠绕组和单波绕组的特点及连接规律，了解影响电枢反应性质的因素及电枢反应对机电能量转换的作用，了解换向的物理过程，掌握改善换向的主要方法，了解直流发电机的运行特性和直流电动机的工作特性。

1.1 直流电机的工作原理与结构

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

直流发电机是根据导体在磁场中做切割磁力线运动，从而在导体中产生感应电势的电磁感应原理制成的。为获得直流电势输出，就要把电枢绕组先连接到换向器上，再通过电刷输给负载，其工作原理见图 1-1 所示。

定子上的主磁极 N 和 S 可以是永久磁铁，也可以是电磁铁。嵌在转子铁芯槽中的某一个元件 abcd 位于一对主磁极之间，元件的两个端点 a 和 d 分别接到换向片 1 和 2 上，换向片表面分别放置固定不动的电刷 A 和 B，而换向片随同元件同步旋转，由电刷、换向片把元件 abcd 与外负载连接成电路。

当转子在原动机的拖动下按逆时针方向恒速旋转时，元件 abcd 中将有感应电势产生。在图 1-1(a)所示时刻，导体 ab 处在 N 极下面，根据右手定则判断其感应电势方向由 b 到 a；导体 cd 处在 S 极下面，其感应电势方向由 d 到 c；元件中的电势方向为 d-c-b-a，此刻 a 点通过换向片 1 与电刷 A 接触，d 点通过换向片 2 与电刷 B 接触，则电刷 A 呈正电位，电刷 B 呈负电位，流向负载的电流是由电刷 A 指向电刷 B。



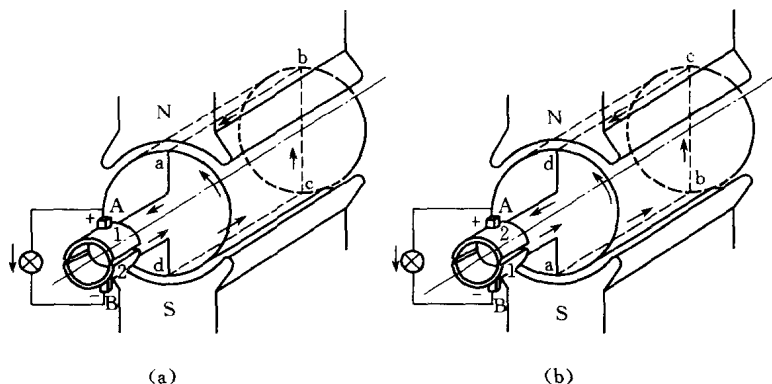


图 1-1 直流发电机工作原理

(a) 导体 ab 和 cd 分别处在 N 极和 S 极下时；(b) 导体 cd 和 ab 分别处在 N 极和 S 极下时

当转子旋转 180° 后到图 1-1(b) 所示时刻时，导体 cd 处在 N 极下面，根据右手定则判断其感应电势方向由 c 到 d；导体 ab 处在 S 极下面，其感应电势方向由 a 到 b；元件中的电势方向为 a-b-c-d，与图 1-1(a) 所示的时刻恰好相反，但此刻 d 点通过换向片 2 与电刷 A 相接触，a 点通过换向片 1 与电刷 B 相接触，从两电刷间看电刷 A 仍呈正电位，电刷 B 仍呈负电位，流向负载的电流仍是由电刷 A 指向电刷 B。可以看出，当转子旋转 360° 经过一对磁极后，元件中电势将变化一个周期，转子连续旋转时，元件中产生的是交变电势，而电刷 A 和电刷 B 之间的电势方向却保持不变。

由以上分析看出，由于换向器的作用，使处在 N 极下面的导体永远与电刷 A 相接触，处在 S 极下面的导体永远与电刷 B 相接触，使电刷 A 总是呈正电位，电刷 B 总是呈负电位，从而获得直流输出电势。

一个线圈产生的电势波形如图 1-2(a) 所示，这是一个脉动的直流，不适于做直流电源使用。实际应用的直流发电机是由很多个元件和相同个数的换向片组成电枢绕组，这样可以在很大程度上减少其脉动幅值，可以看做是稳恒电流电源，如图 1-2(b) 所示。

2. 直流电动机的工作原理

直流电动机是根据通电导体在磁场中会受到磁场力作用这一基本原理制成的，其工作原理如图 1-3 所示。

在电刷 A 和 B 之间加上一个直流电压时，便在元件中流过一个电流，若起始时元件处在图 1-3(a) 所示位置，电流由电刷 A 经元件按 a-b-c-d 的方向从电刷 B 流出。根据左手定则可判定，处在 N 极下的导体 ab 受到一个向左的电磁力；处在 S 极下的



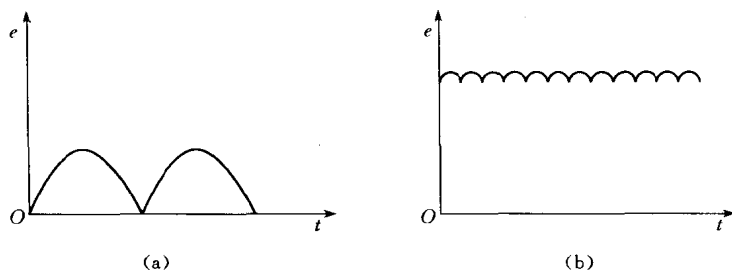


图 1-2 直流发电机输出的电势波形

(a) 单匝线圈电势；(b) 电刷间输出电势

导体 cd 受到一个向右的电磁力。两个电磁力形成一个使转子按逆时针方向旋转的电磁转矩。当这一电磁转矩足够大时，电机就按逆时针方向开始旋转。当转子转过 180° 如图 1-3 (b) 所示位置时，电流由电刷 A 经元件按 $d-c-b-a$ 的方向从电刷 B 流出，此时元件中电流的方向改变了，但是导体 ab 处在 S 极下受到一个向右的电磁力，导体 cd 处在 N 极下受到一个向左的电磁力，两个电磁力矩仍形成一个使转子按逆时针方向旋转的电磁转矩。可以看出，转子在旋转过程中，元件中电流方向是交变的，但处在同一磁极下面导体中电流的方向却是恒定的，这是由于换向器的作用，从而使得直流电动机的电磁转矩方向不变。

为使电动机产生一个恒定的电磁转矩，同发电机一样，电枢上不只安放一个元件，而是安放若干个元件和若干个换向片。

由直流电机的工作原理可以看出，直流发电机是将机械能转变成电能，电动机是将电能转变成机械能，因此说直流电机具有可逆性。

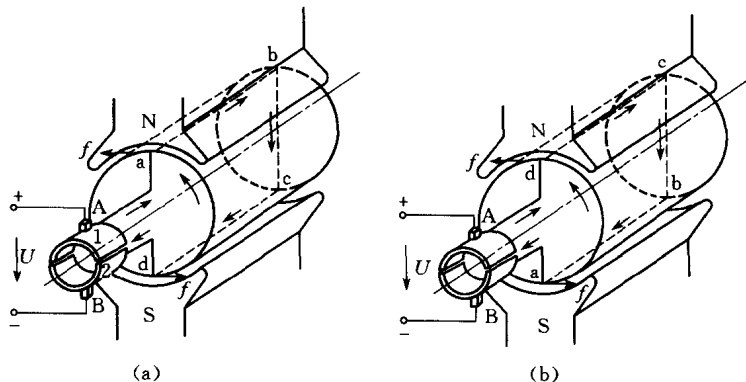


图 1-3 直流电动机的工作原理

(a) 起始位置；(b) 转过 180° 位置



1.1.2 直流电机的基本结构

直流电机由定子与转子两大部分构成，通常，把产生磁场的部分做成静止的，称为定子；把产生感应电势或电磁转矩的部分做成旋转的，称为转子（又叫电枢）。

1. 定子

定子由主磁极、换向磁极、机座、端盖和电刷装置等组成。

(1) 主磁极。主磁极的作用是产生主磁通。主磁极由铁芯和励磁绕组组成如图 1-4 所示。铁芯包括极身和极靴两部分，极靴的作用是支撑励磁绕组和改善气隙磁通密度的波形。铁芯通常由 0.5~1.5mm 厚的硅钢片或低碳钢板叠装而成，以减少电机旋转时因极靴表面磁通密度变化产生的涡流损耗。励磁绕组选用绝缘的圆铜或扁铜线绕制而成，并励绕组多用圆铜线绕制，串励绕组多用扁铜线绕制。各主磁极的励磁绕组串联相接，但要使其产生的磁场沿圆周交替呈现 N 极和 S 极。绕组和铁芯之间用绝缘材料制成的框架相隔，铁芯通过螺栓固定在磁轭上。

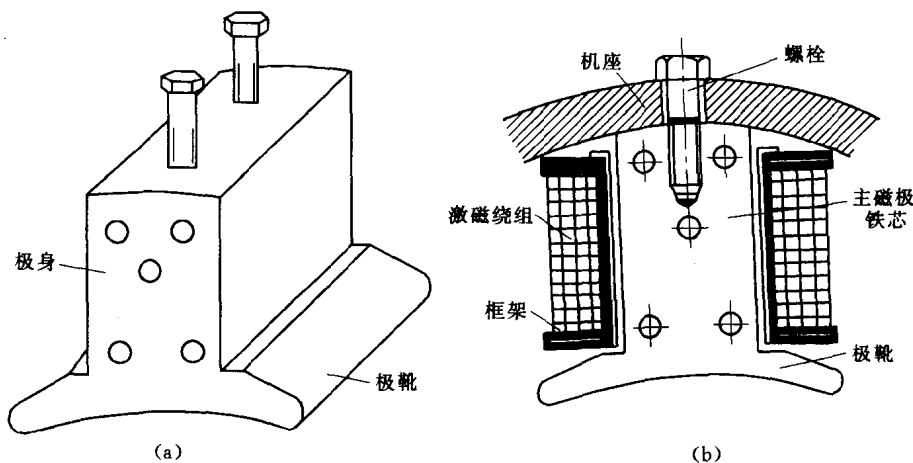


图 1-4 直流电机主磁极

(a) 主磁极铁芯；(b) 主磁极装配图

对某些大容量电机，为改善换向条件，常在极靴处装设补偿绕组。

(2) 换向磁极。换向磁极又叫附加磁极，用于改善直流电机的换向，位于相邻主磁极间的几何中心线上，其几何尺寸明显比主磁极小。换向磁极由铁芯和套在铁芯上的换向极绕组组成，如图 1-5 所示。铁芯常用整块钢或厚钢板制成，其绕组一般用扁铜线绕成，为防止磁路饱和，换向磁极与转子间的气隙都较大。换向极绕组匝数不多，与电枢绕组串联。换向极的极数一般与主磁极的极数相同。换向极与电枢之间的气隙可以



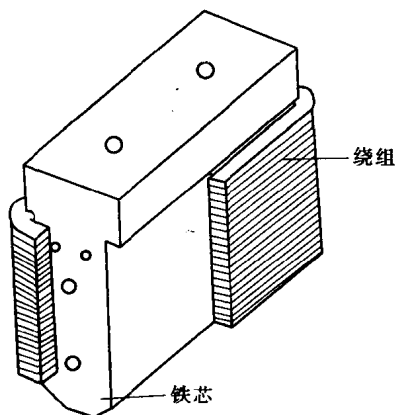


图 1-5 直流电机换向磁极

调整。

(3) 机座和端盖。机座的作用是支撑电机、构成相邻磁极间磁的通路，故机座又称为磁轭。机座一般用铸钢或厚钢板焊成。

机座的两端各有一个端盖，用于保护电机和防止触电。在中小型电机中，端盖还通过轴承担负支持电枢的作用。对于大型电机，考虑到端盖的强度，则采用单独的轴承座。

(4) 电刷装置。电刷装置的作用是使转动部分的电枢绕组与外电路连通，将直流电压、电流引出或引入电枢绕组。电刷装置由电刷、刷握、刷杆、刷杆座和汇流条等零件组成，如图 1-6 所示。电刷一般采用石墨和铜粉压制烧焙而成，它

放置在刷握中，由弹簧将其压在换向器的表面上，刷握固定在与刷杆座相连的刷杆上，每个刷杆装有若干个刷握和相同数目的电刷，并把这些电刷并联形成电刷组，电刷组个数一般与主磁极的个数相同。

2. 转子

转子由铁芯、绕组、换向器、转轴和风扇等组成。

(1) 电枢铁芯。电枢铁芯的作用是构成电机磁路和安放电枢绕组。通过电枢铁芯

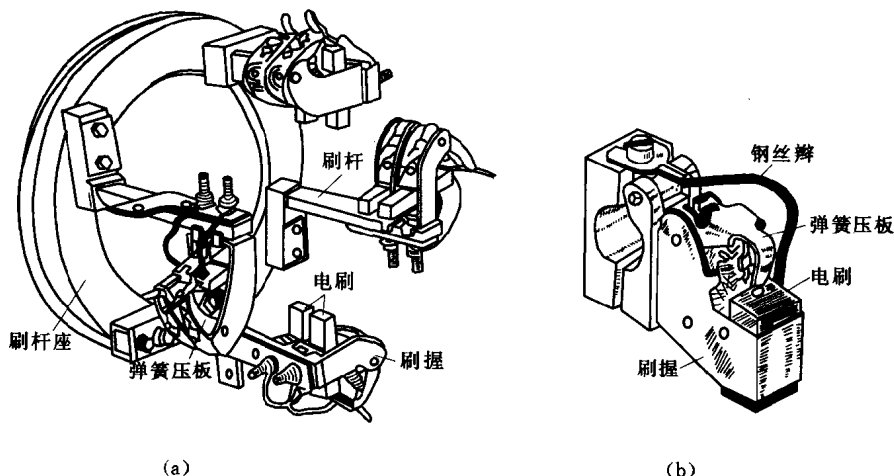


图 1-6 电刷装置

(a) 电刷装置；(b) 电刷与刷握的装配