



高职高专电气工程及自动化类专业精品课程教材

GAOZHI GAOZHUAN DIANQI GONGCHENG JI ZIDONGHUALEI ZHUANYE JINGPIN KECHENG JIAOCAI

马爱芳 主编

# 电机及拖动

*DIANJI JI TUODONG*



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

高职高专电力工程及自动化类专业精品课程教材

# 电机及拖动

马爱芳 主 编

华中科技大学出版社

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动/马爱芳 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2009年2月  
ISBN 978-7-5609-4768-6

I. 电… II. 马… III. ①电机 ②电力传动 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 017044 号

电机及拖动

马爱芳 主编

责任编辑:刘勤

封面设计:潘群

责任校对:周娟

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

印刷:华中科技大学印刷厂

开本:710 mm×1000 mm 1/16

印张:18.25

字数:356 000

版次:2009年2月第1版

印次:2009年2月第1次印刷

定价:28.80元

ISBN 978-7-5609-4768-6/TM·108

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

# 前 言

“电机及拖动”是高等职业技术学院供用电技术、电气自动化技术和机电一体化技术等专业学生必修的一门主干课程。在编写本书过程中,根据高职教育的特点和要求并结合当前学生的文化基础,正确地处理了知识传授和能力培养之间的关系;在保留课程体系的同时,吸收了新的科技成果,注重基本概念、基本分析方法和基本技能的培养和训练;在内容叙述上,力求通俗易懂、由浅入深地阐明问题;对于一些理论性较强的内容,以定性分析为主,使教材易教易学。

本书将电机学、电力拖动、控制电机等课程内容有机地结合在一起,编写的重点放在使用较多的电机上。全书共分九章,主要包括直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、三相异步电动机、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等内容。

本书特点如下。

1. 在内容的叙述上,强调电机的结构、工作原理、主要性能和实际应用意义。
2. 对理论的分析采用图解、图示方法,并强调基本理论的实际应用。
3. 内容上进行了较大的改动,删除了陈旧过时、偏多、偏深的内容,努力反映新技术、新元件。
4. 加强定性分析和物理意义的阐述,在阐述物理意义的基础上给出公式,减少繁杂的公式推导。
5. 书中有典型例题,各章后面附有小结、思考题及习题。题目具有典型性、规范性、启发性,能引导学生掌握本课程的主要内容,并培养学生解决工程实际问题的能力。

本书由湖北水利水电职业技术学院马爱芳副教授主编,其中第1、2、3、7章由马爱芳编写,第4、5、6章由陈小梅编写,第8、9章由毛晓英编写。全书由马爱芳统稿、审定。

在编写本书时,参阅了许多同行专家编著的教材和资料,得到了不少启发和教益,在此致以诚挚的谢意!

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,敬请读者指正。

编 者  
2008年10月

# 目 录

绪论	(1)
第 1 章 直流电机	(4)
1.1 直流电机的工作原理和结构	(4)
1.2 直流电机的电枢绕组	(14)
1.3 直流电机的电枢反应和换向	(22)
1.4 直流电机的电枢电动势与电磁转矩	(26)
1.5 直流发电机	(29)
1.6 直流电动机	(32)
小结	(35)
思考题与习题	(35)
第 2 章 直流电动机的电力拖动	(38)
2.1 电力拖动系统的运动方程式	(38)
2.2 生产机械的负载特性	(41)
2.3 他励直流电动机的机械特性	(43)
2.4 直流电动机的启动和反转	(48)
2.5 他励直流电动机的调速	(52)
2.6 直流电动机制动	(60)
小结	(68)
思考题与习题	(70)
第 3 章 变压器	(72)
3.1 变压器的基本工作原理和结构	(72)
3.2 单相变压器的空载运行	(80)
3.3 单相变压器的负载运行	(86)
3.4 变压器参数的测定	(94)
3.5 变压器的运行特性	(101)
3.6 三相变压器	(105)
3.7 变压器的并联运行	(111)
3.8 其他用途的变压器	(114)
小结	(121)
思考题与习题	(122)

<b>第 4 章 交流旋转电机的绕组、电动势和磁动势</b> .....	(125)
4.1 交流旋转电机绕组 .....	(125)
4.2 交流旋转电机绕组的感应电动势 .....	(133)
4.3 交流旋转电机绕组的磁动势 .....	(139)
小结 .....	(145)
思考题与习题 .....	(145)
<b>第 5 章 异步电动机</b> .....	(146)
5.1 三相异步电动机基本结构和工作原理 .....	(146)
5.2 三相异步电动机的空载运行 .....	(157)
5.3 三相异步电动机的负载运行 .....	(160)
5.4 三相异步电动机的等效电路 .....	(165)
5.5 三相异步电动机的功率和转矩平衡方程式 .....	(169)
5.6 三相异步电动机的工作特性 .....	(174)
小结 .....	(176)
思考题与习题 .....	(177)
<b>第 6 章 异步电动机的电力拖动</b> .....	(179)
6.1 三相异步电动机的机械特性 .....	(179)
6.2 三相异步电动机的启动 .....	(185)
6.3 深槽式和双鼠笼式异步电动机 .....	(195)
6.4 三相异步电动机的调速 .....	(198)
6.5 三相异步电动机的制动 .....	(208)
6.6 单相异步电动机 .....	(213)
小结 .....	(218)
思考题与习题 .....	(219)
<b>第 7 章 同步电机</b> .....	(222)
7.1 同步电机的基本工作原理和结构 .....	(222)
7.2 同步发电机 .....	(226)
7.3 同步电动机 .....	(235)
7.4 同步电动机调相运行及同步调相机 .....	(242)
小结 .....	(243)
思考题与习题 .....	(244)
<b>第 8 章 控制电机</b> .....	(246)
8.1 伺服电动机 .....	(246)
8.2 测速发电机 .....	(249)
8.3 步进电动机 .....	(254)

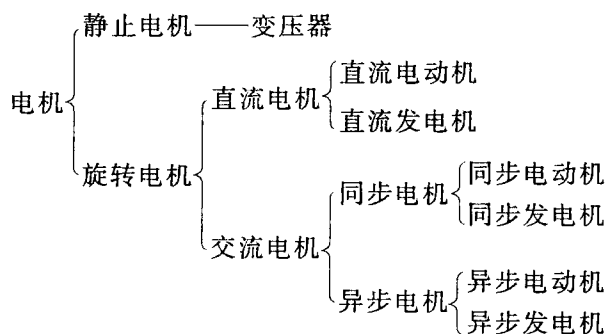
8.4 旋转变压器 .....	(257)
8.5 自整角机 .....	(259)
小结 .....	(262)
思考题与习题 .....	(264)
<b>第9章 电力拖动系统中电动机的选择</b> .....	<b>(265)</b>
9.1 概述 .....	(265)
9.2 电动机容量选择的基本知识 .....	(267)
9.3 电动机的工作制 .....	(271)
9.4 连续工作制电动机容量的选择 .....	(272)
9.5 短时工作制电动机容量的选择 .....	(277)
9.6 断续周期工作制电动机容量的选择 .....	(279)
小结 .....	(281)
思考题与习题 .....	(281)
<b>参考文献</b> .....	<b>(283)</b>

# 绪 论

## 1. 电机及电力拖动的分类及发展概况

### 1) 分类

在实际生产应用中,有各种类型的电机。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。现将主要应用的各种电机归纳如下。



### 2) 作用

电机是进行电能传递或机电能量转换的设备。发电机的作用是把机械能转换成电能,即发电;电动机的作用是把电能转换成机械能,拖动各种生产机械设备运转;变压器的作用是升高或降低电压,实现电能的传递。可见,变压器和发电机是电力工业中的主要设备。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。

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。在现代工农业生产和交通运输中,需要使用各种各样的生产机械。由于电力拖动的控制简单、方便、经济,能实现远距离控制,并能实现自动调节,因此大多数生产机械都采用电力拖动。

### 3) 发展概况

蒸汽机启动了 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而发展。电力拖动的任务就是电动机拖动生产机械装置进行启动、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”,一台电动机拖动一组生产机械,通过大量的轴传动、带传动实现能量从电动机到机械装置的传递。20世纪20年代以来,大量采用“单电动机拖动系统”,一台电动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。20世纪30年代,随着生产机械装置的日益复杂,一台生产机械装置为完成复杂的工作往往有许多运动部件,因此,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均由一台电动机驱动,使得传动机构大大减少,从而简化机械系统,提高传动效率。

近年来,随着计算机技术、微电子技术、电力电子技术、现代控制技术及网络通信等新技术的发展和广泛应用,自动化元件和控制技术不断发展,对每台电动机进行控制就可对机械装置的每个工作动作进行电气控制,实现生产过程自动化。

## 2. 本课程的性质、任务和内容

“电机及拖动”这门课程是电气自动化技术、电气技术、供用电技术、机电一体化技术等专业的一门主干课程。

本课程主要介绍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。

在学习了电机部分后,应掌握直流电机、变压器、异步电机、同步电机的基本结构和工作原理、电磁转换过程、基本方程式、等效电路等内容。学习电力拖动部分后,应主要掌握直流电动机、异步电动机的各种机械特性、电动机的启动、调速、制动运行的特性分析及其相关计算等内容。通过本课程的学习应掌握选择电机的原理与计算方法,了解电机与电力拖动系统的实验方法与发展方向。

本课程为学生学习后续课程,如“自动控制理论”、“电气控制技术”、“变频技术”作好准备,为掌握本专业知识和日后工作打下必要的理论基础。

## 3. 本课程的特点及学习方法

“电机及拖动”既是一门理论性很强的基础课,又具有专业课的性质。不仅要进行理论的分析与推导、电磁的抽象描述,还要用理论知识去分析工程实际问题。本课程的学习方法如下。

(1)注意对基本原理的掌握和基本概念的理解。

(2) 本书每一章的小结中均列出了重点和要点, 注意对这些知识点的学习, 建立较系统的知识体系。

(3) 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, 以准确把握相关的基本概念; 明确各类电机的特点, 有利于电机理论的系统化。

(4) 注重理论联系实际, 运用相关的知识解释和解决生活、生产中具体的电机和拖动问题。

# 第1章 直流电机

直流电机是实现直流电能和机械能相互转换的电气设备,其中将机械能转换为直流电能的是直流发电机,将直流电能转换为机械能的是直流电动机。

直流电机的主要优点是启动和调速性能好,过载能力强,因此多应用于对启动和调速要求较高的生产机械,如轧钢机、电力机车、造纸机及纺织机械等。

直流发电机作为直流电源,电势波形好,抗干扰能力强,主要应用在电镀、电解行业中。

直流电机的缺点主要表现在电流换向方面。这个问题的存在使其结构、生产工艺复杂,且使用有色金属较多,价格昂贵,运行维护较困难。

在很多领域内,直流电动机将逐步为交流调速电动机所取代,直流发电机正在被电力电子整流装置所取代。目前,直流电机仍在许多场合发挥作用。

本章主要分析直流电机的工作原理、结构和运行特性。

## 1.1 直流电机的工作原理和结构

### 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

直流发电机是根据导体在磁场中作切割磁力线运动,从而在导体中产生感应电势的电磁感应原理制成的。

在图 1-1 所示的直流发电机模型中,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旋转时,元件  $abcd$  中将有感应电势产生。在图 1-1(a)所示的时刻,导体  $ab$  处在 N 极下面,根据右手定则判断其感应电势方向为由  $b$  到  $a$ ;导体  $cd$  处在 S 极下面,其感应电势方向为由  $d$  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。

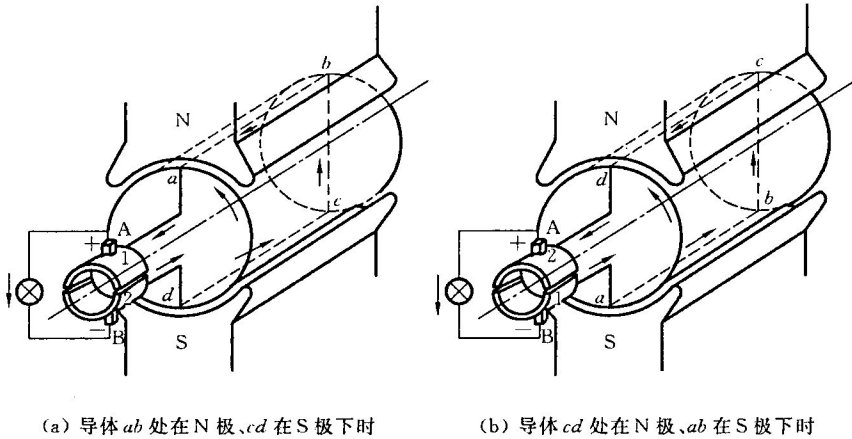


图 1-1 直流发电机工作原理

当转子旋转  $180^\circ$  后到图 1-1(b) 所示的时刻时, 导体  $cd$  处在 N 极下面, 根据右手定则判断其感应电势方向为由  $c$  到  $d$ ; 导体  $ab$  处在 S 极下面, 其感应电势方向为由  $a$  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  $360^\circ$  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。

由以上分析可知, 由于换向器的作用, 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, 因而电刷 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电势, 不适合于做直流电源使用。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的电枢绕组, 这样可以在很大程度上减少其脉动幅值, 从而得到稳恒直流电势, 其

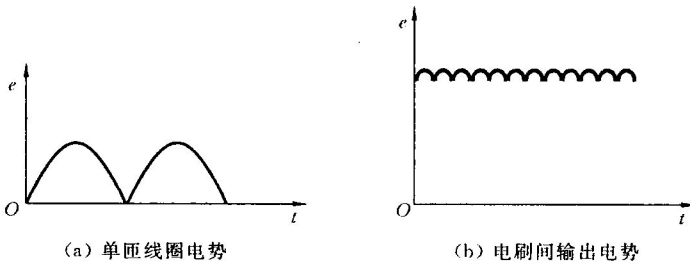


图 1-2 直流发电机输出的电势波形

电势波形如图 1-2(b) 所示。

总结: 直流发电机的工作原理如下。

(1) 原动机拖动转子(即电枢)以每分转  $n$  转转动。

(2) 电机的固定主磁极建立磁场。

(3) 转子导体在磁场中运动, 切割磁力线而感应交流电动势, 经电刷和换向器整流作用输出直流电势。

注意: 某一根转子导体的电势性质是交流电; 而经电刷输出的电动势却是直流电。

**例 1-1** 在图 1-1 所示中, 若直流发电机顺时针旋转, 则电刷输出电动势极性有何变化? 还有什么因素会引起同样变化?

**解** 直流发电机顺时针旋转时, 用右手定则可判定出: 电刷 A 为负极性、电刷 B 为正极性, 电刷两端输出电动势极性改变。通过改变主磁场极性同样会引起电刷两端输出电动势极性改变。

## 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。

在图 1-3 所示直流电动机模型中, 在电刷 A 和 B 之间加上一个直流电压时, 在元件中便会有电流流过, 若起始时元件处在图 1-3(a) 所示位置, 则电流由电刷 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  $180^\circ$  到达如图 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

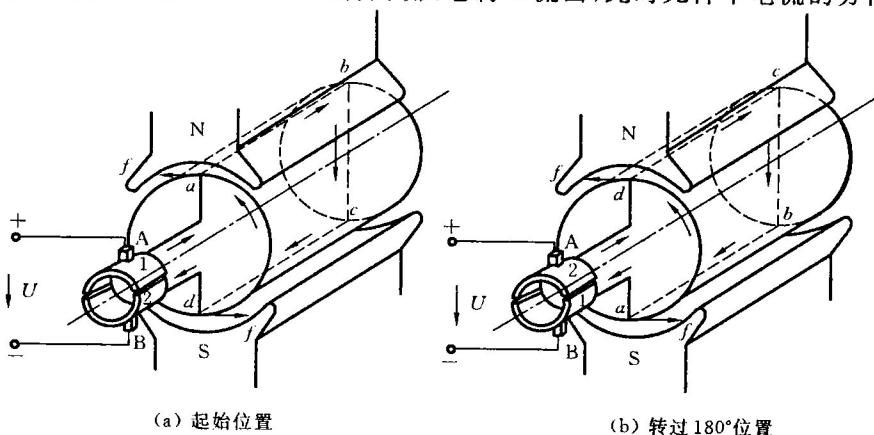


图 1-3 直流电动机的工作原理

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,但由于受换向器的作用,处在同一磁极下面的导体中的电流方向是恒定的,从而使得直流电动机的电磁转矩方向不变。

为使直流电动机产生一个恒定的电磁转矩,同直流发电机一样,电枢上不止安放一个元件,而是安放若干个元件和换向片。

总结:直流电动机工作原理如下。

(1) 将直流电源通过电刷接通电枢绕组,使电枢导体有电流流过。

(2) 电机主磁极建立磁场。

(3) 载流的转子(即电枢)导体在磁场中将受到电磁力  $f$  的作用。

(4) 所有导体产生的电磁力作用于转子,形成电磁转矩,驱使转子旋转,以拖动机械负载。

注意:在直流电动机中,外加直流电压并非直接加于线圈,而是通过电刷和换向器加到线圈上。通过电刷和换向器的作用,导体中的电流成为交变电流,从而使电磁转矩的方向始终保持不变,以确保直流电动机旋转方向一定。

### 3. 直流电机的可逆原理

直流发电机和直流电动机的工作原理结构模型完全相同,但工作过程不相同。

#### 1) 直流发电机

如图 1-1 所示,当带上负载,比如接上一灯泡后,就有电流流过电枢线圈和负载,其方向与电枢电动势方向相同。根据电磁力定律,载流导体在磁场中会受到电磁力作用,形成电磁转矩,其方向与旋转方向相反。可见电磁转矩为制动转矩,阻碍发电机旋转。因此,原动机必须用足够大的驱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。直流发电机从原动机吸收机械能,转换成电能输出给负载。

#### 2) 直流电动机

如图 1-2 所示,当电动机旋转起来后,电枢导体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。可见电枢电动势是一反电动势,它阻碍电流流入电动机。因此,直流电动机必须施加直流电源以克服反电动势的作用,将直流电流输入电动机。电动机从直流电源吸收电能,将电能转换成机械能输出。

综上所述,无论是直流发电机还是直流电动机,电枢电动势和电磁转矩是同时存在的。从原理上来说,发电机和电动机只是外界条件不同而已。一台电机,既可作为发电机运行,也可作为电动机运行,直流电机具有可逆性。但在设计电机时,会考虑两者的运行特点。如果是发电机,则同一电压等级下发电机比电动机额定电压略高,以补偿线路电压降。

## 1.1.2 直流电机的基本结构

直流电机的结构是多种多样的,图 1-4 所示为国产 Z2 系列直流电机的剖视图。由图可见,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)。定子与转子间因有相对运动,故有一定的空气隙,一般小型电机的空气隙为 0.7~5 mm,大型电机为 5~10 mm。

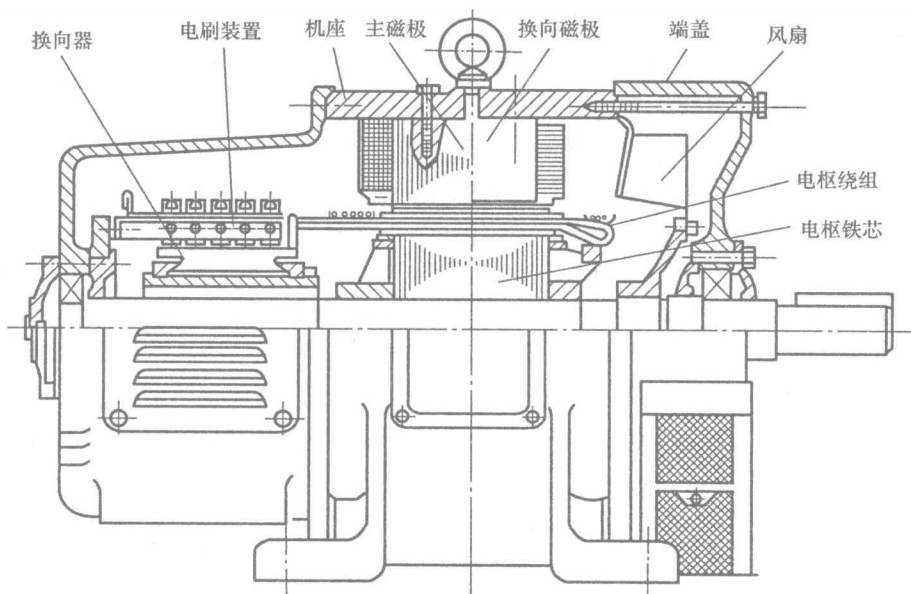


图 1-4 国产 Z2 系列直流电机的剖视图

### 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 1-5 所示。铁芯包括极身和极靴两部分,其中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 0.5~1.5 mm 厚的硅钢片或低碳钢板叠装而成,以减少因电机旋转时极靴表面磁通密度变化而产生的涡流损耗。

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。

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。

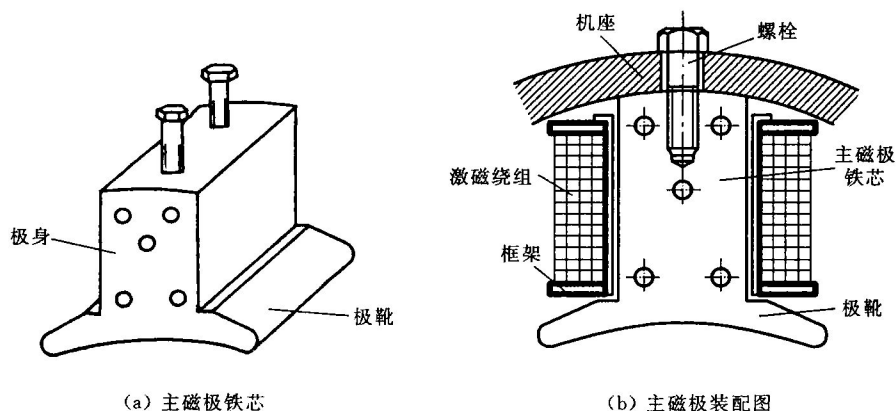


图 1-5 直流电机主磁极

## 2) 换向磁极

换向磁极又称附加磁极,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的小。换向磁极由铁芯和套在铁芯上的换向磁极绕组组成,如图 1-6 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。换向磁极绕组匝数不多,与电枢绕组串联。换向磁极的极数一般与主磁极的极数相同。换向磁极与电枢之间的气隙可以调整。

## 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,一般采用单独的轴承座。

## 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 1-7 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,电刷组的个数一般与主磁极的个数相同。

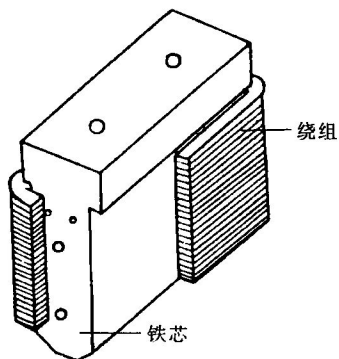


图 1-6 直流电机换向磁极



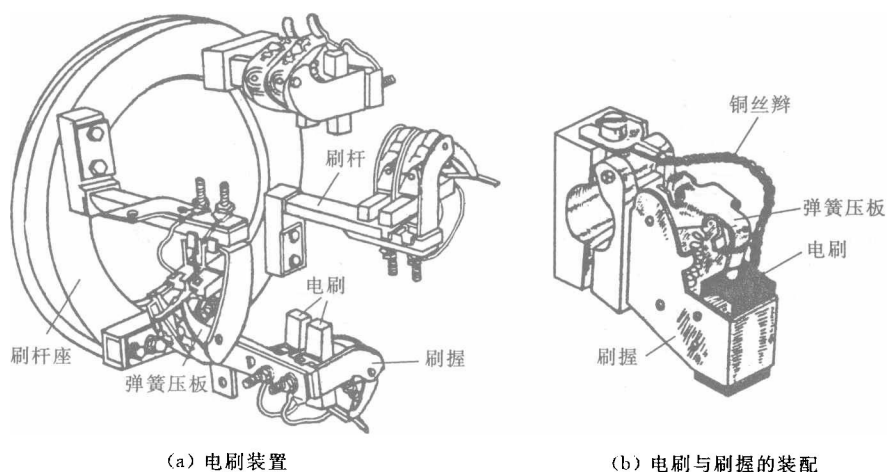


图 1-7 电刷装置

## 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。通过电枢铁芯的磁通是交变的,为减少磁滞和涡流损耗,电枢铁芯常用 0.35 mm 或 0.5 mm 厚冲有齿和槽的硅钢片叠压而成,为加强散热能力,在铁芯的轴向留有通风孔,较大容量的电机沿轴向将铁芯分成长 4~10 cm 的若干段,相邻段间留有 8~10 mm 的径向通风沟(见图 1-8)。

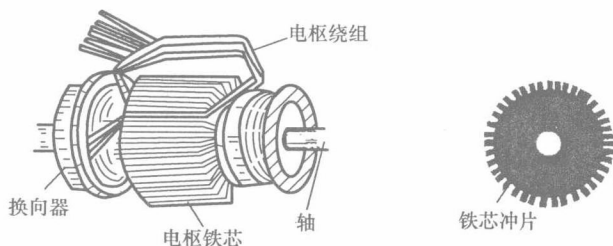


图 1-8 电枢

### 2) 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电动势和电磁转矩,从而实现机电能量的转换。电枢绕组是用绝缘铜线在专用的模具上制成一个个单独元件,然后嵌入铁芯槽中,每一个元件的端头按一定规律分别焊接到换向片上。元件在槽内部分的上下层之间及与铁芯之间垫以绝缘,并用绝缘的槽楔把元件压紧在槽中。元件的槽外部分用绝缘带