

全国煤炭高等职业教育电类规划教材

# 电机 与拖动

 主编 芦新茹 张春芝

煤炭工业出版社

中国电机工程学会 中国电机工程学会 中国电机工程学会

# 电机

与驱动

中国电机工程学会 中国电机工程学会



全国煤炭高等职业教育电类规划教材

# 电机与拖动

主 编 芦新茹 张春芝

煤炭工业出版社

·北 京·

## 内 容 提 要

本书是全国煤炭高等职业教育电类规划教材之一。全书共分八章,内容包括:直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电动机、控制电机、电力拖动系统电动机的选择等。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校电气自动化、机电技术、机电一体化等专业的“电机与拖动”课程的教材,也可供有关工程技术人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动/芦新茹,张春芝主编. —北京:煤炭工业出版社,2005

全国煤炭高等职业教育电类规划教材

ISBN 7-5020-2793-9

I. 电… II. ①芦…②张… III. 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 (2005) 第 127952 号

煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)  
网址: [www.cciph.com.cn](http://www.cciph.com.cn)  
北京京科印刷有限公司 印刷  
新华书店北京发行所 发行

\*  
开本 787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 12<sup>3</sup>/<sub>4</sub>

字数 307 千字 印数 1-4,000

2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

社内编号 5574 定价 21.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

# 前 言

本书是由中国煤炭教育协会和中国矿业大学(北京)教材编审室共同组织编写的,是全国煤炭高等职业教育电类规划教材之一。

为了配合高职高专教育的教学改革,满足培养生产第一线应用性人才的要求,本教材在编写中,依据“淡化理论,够用为度,培养技能,重在应用”的原则,力求做到概念准确、内容精炼、突出重点、联系实际、通俗易懂、便于自学。具体体现在以下几方面:

(1) 注重基本原理和基本概念的阐述,降低理论分析的难度,删去繁琐的公式推导,重点强调基本理论的实际应用。

(2) 注重反映新的调速技术,加强了交流拖动的内容,并适当编入工程中较成熟的技术。

(3) 为便于巩固应掌握的基本知识,书中配有本章小结、大量例题、思考题和习题。

(4) 教材中所涉及的实验、实训等实践环节的内容,有单独的实训教材与之配套。

(5) 内容叙述上力求简明扼要,通俗易懂,富于启发性。

本书由芦新茹、张春芝任主编,舒为清、张博、贺建华任副主编。编写分工为:辽宁工程技术大学职业技术学院芦新茹、北京工业职业技术学院张春芝编写绪论、第一章、第二章、第六章、第七章,江西工业工程职业技术学院舒为清、廖世海编写第三章,内蒙古科技大学高等职业技术学院张博编写第四章,徐州建筑工程职业技术学院贺建华编写第五章,山西煤炭职业技术学院黄华编写第八章,全书由芦新茹统稿。

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2005 年 9 月

# 目 录

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 绪论 .....                     | ( 1 ) |
| 第一章 直流电机 .....               | ( 5 ) |
| 第一节 直流电机的工作原理 .....          | ( 5 ) |
| 第二节 直流电机的磁场 .....            | (12)  |
| 第三节 直流电机的感应电动势和电磁转矩 .....    | (18)  |
| 第四节 直流电动机的工作特性 .....         | (20)  |
| 本章小结 .....                   | (25)  |
| 思考题与习题 .....                 | (25)  |
| 第二章 直流电动机的电力拖动 .....         | (27)  |
| 第一节 电力拖动系统的运动方程 .....        | (27)  |
| 第二节 生产机械的负载转矩特性 .....        | (29)  |
| 第三节 他励直流电动机的机械特性 .....       | (30)  |
| 第四节 他励直流电动机的起动 .....         | (37)  |
| 第五节 他励直流电动机的调速 .....         | (39)  |
| 第六节 他励直流电动机的制动 .....         | (50)  |
| 本章小结 .....                   | (58)  |
| 思考题与习题 .....                 | (59)  |
| 第三章 变压器 .....                | (61)  |
| 第一节 变压器的工作原理和结构 .....        | (61)  |
| 第二节 变压器的运行原理 .....           | (65)  |
| 第三节 变压器的运行特性 .....           | (78)  |
| 第四节 三相变压器 .....              | (80)  |
| 第五节 特殊变压器 .....              | (87)  |
| 本章小结 .....                   | (91)  |
| 思考题与习题 .....                 | (91)  |
| 第四章 异步电动机 .....              | (94)  |
| 第一节 三相异步电动机工作原理和结构 .....     | (94)  |
| 第二节 异步电动机的定子绕组 .....         | (101) |
| 第三节 三相异步电动机的运行原理 .....       | (108) |
| 第四节 三相异步电动机的功率与转矩 .....      | (115) |
| 第五节 三相异步电动机的工作特性及参数的测定 ..... | (117) |
| 第六节 单相异步电动机 .....            | (121) |
| 本章小结 .....                   | (124) |
| 思考题与习题 .....                 | (125) |
| 第五章 三相异步电动机的电力拖动 .....       | (128) |
| 第一节 三相异步电动机的机械特性 .....       | (128) |
| 第二节 三相异步电动机的起动 .....         | (134) |

---

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 第三节 三相异步电动机的调速 .....          | (143) |
| 第四节 三相异步电动机的制动 .....          | (151) |
| 本章小结 .....                    | (155) |
| 思考题与习题 .....                  | (156) |
| <b>第六章 同步电机</b> .....         | (158) |
| 第一节 同步电动机的结构和工作原理 .....       | (158) |
| 第二节 同步电动机的应用 .....            | (160) |
| 本章小结 .....                    | (162) |
| 思考题与习题 .....                  | (162) |
| <b>第七章 控制电机</b> .....         | (164) |
| 第一节 伺服电动机 .....               | (164) |
| 第二节 旋转变压器 .....               | (169) |
| 第三节 步进电动机 .....               | (172) |
| 第四节 直线电动机 .....               | (177) |
| 第五节 测速发电机 .....               | (179) |
| 第六节 自整角机 .....                | (182) |
| 本章小结 .....                    | (184) |
| 思考题与习题 .....                  | (185) |
| <b>第八章 电力拖动系统电动机的选择</b> ..... | (186) |
| 第一节 电动机类型的选择 .....            | (186) |
| 第二节 电动机的绝缘等级和工作制 .....        | (188) |
| 第三节 电动机参数的选择 .....            | (190) |
| 本章小结 .....                    | (194) |
| 思考题与习题 .....                  | (195) |
| <b>参考文献</b> .....             | (196) |

# 绪 论

## 一、电机与拖动在国民经济中的作用

电能是现代大量应用的一种能量形式。这种能量形式有生产和变换经济、传输和分配容易、使用和控制方便等许多优点。电能已成为国民经济各部门中动力的主要来源,而电能的生产、传输、分配和使用都必须使用电机这种进行能量变换的电磁装置。

在电力工业中,发电机和变压器是发电厂或变电所中的主要设备。例如,热力发电厂的汽轮发电机、水力发电厂的水轮发电机分别把热能和势能转换成电能。由于发电机发出的电压受结构和绝缘材料的限制,一般为 10 kV(最高只能是 27 kV 左右),进行远距离输电时,输电线路上将产生较大的电压降和能量损耗。为此,需在发电厂用变压器将电压升高,采用高压输电,这样在输送功率不变的情况下可减小线路电流,保证输电的经济;而在用电单位,再用变压器将电压降低,供给用电设备,保证用电的安全。

在工业企业和日常生活中,电动机的应用十分广泛。电动机将电能转换成机械能,拖动各种生产机械运转。如机械工业、冶金工业中的各种机床、吊车、轧钢机等都以电动机作为原动机,高炉和转炉都需由若干台电动机来拖动;在化学工业中常用同步电动机和异步电动机拖动大型压缩设备;在运输事业中采用大量的牵引电动机,拖动城市电车及实现铁道干线的电气化;在农业生产方面,使用电动机进行电力排灌、打稻、碾米等,可减轻繁重的体力劳动,提高劳动生产率。

在自动控制技术中,各种各样的小巧灵敏的微型控制电机广泛地作为检测、放大、执行和解算元件。

为了实现各种生产工艺过程,需要使用各种各样的生产机械。拖动生产机构运转的方法有气动、液压拖动和电力拖动。由于电力拖动控制简单、调节性能良好、效率高,并且能实现远距离控制和自动调节,因此大多数生产机械都采用电力拖动。电力拖动是生产过程电气化、自动化的重要前提。

综上所述,电机与拖动在电能的生产、传输、分配和使用中起着十分重要的作用。

## 二、电机及电力拖动发展概况

电机的发展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。电机的发展分为初期发展和近代发展两个时期。

初期发展时期(从 19 世纪 30 年代初到 20 世纪初)。这一时期已经具备各种电机的基本形式,分为四个阶段:

(1) 电磁感应定律的发现。法拉第于 1831 年发现了电磁感应定律,在这一定律指导下,1832 年出现了第一台原始形式的发电机。

(2) 直流电机的发展。电能工业上应用的初期,主要是满足弧光照明及电化学工业的需要,因此最初发展的电机为直流发电机,在 19 世纪 40 年代至 70 年代,直流发电机发展

很快。

(3) 单相交流电的应用。为了扩大供电区域和传送距离,需增大发电机的单机容量、提高其运行电压,这对直流电机来说很难实现。为解决这一矛盾,1884年,制成了变压器。由于单相变压器的推广,单相交流电的应用得到了迅速发展。

(4) 三相交流电的应用。19世纪末,三相异步电动机和三相变压器相继出现,三相交流制迅速取代了单相交流制。随后,三相交流制的发电厂迅速发展起来,汽轮发电机代替了以蒸汽机作为原动机的发电机。

近代发展时期(从20世纪初到现在)。在前一阶段实践的基础上,总结了运行、设计和制造的经验,进一步深化了对电机理论的探讨,在材料、工艺和设计方法上不断改进,主要表现在:电机的容量大大提高,因为随着电机冷却技术的发展,电机的温升已不再成为限制容量的主要因素;由于设计技术的进一步完善,结构和工艺措施的不断改进以及新型材料的应用,使电机不断向尺寸小、质量轻的方向发展;电机的系列和品种越来越多,除一般用途的电机之外,还有各种特殊用途的电机,如潜水电机、防爆电机等等,还出现了各种形式的电机放大机、控制元件用的微型电机等,其容量和体积都很小,在结构上已出现印刷电路电机和电子电机。

同样,应用电动机拖动各种生产机械的电力拖动,其发展也有一个过程,大致分为三个阶段。

(1) 成组拖动。电力拖动代替蒸汽拖动以后,最初由一台电动机拖动天轴,再经过皮带或绳索分别拖动许多工作机械,这种拖动称为成组拖动。成组拖动中电动机远离生产机械,车间里有大量的天轴、皮带和皮带轮等,能量在传递过程中损耗很大,效率很低,安全性差,且不能对电动机进行调速,另外,如果电动机发生故障,则成组的生产机械都将停车,甚至整个生产停顿。

(2) 单机拖动。为了克服上述缺点,采用单机拖动,即一台电动机拖动一台工作机械,这样电动机和生产机械在结构上密切配合,可提高效率,同时可以用电气方法调节生产机械的转速,从而简化了机械结构,也宜于实现自动化。

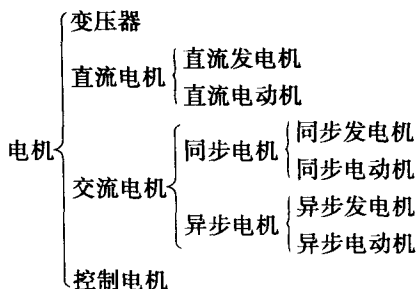
(3) 多机拖动。随着生产的发展,加工工艺越来越复杂,制造的机器设备越来越复杂,一台机器上有许多运动机构,如用一台电动机拖动,传动机构会很复杂。因此采用了多电动机拖动,即每一个工作机构用单独的电动机拖动,因而使机械结构大为简化。例如,具有二个主轴的龙门铣床用二台电动机拖动,每台电动机拖动一个主轴;造纸、印刷等由多个分部组成的生产机械,每一分部用一台电动机拖动。

随着生产的发展,对单机拖动系统和多机拖动系统提出了更高的要求,如要求提高加工精度和工作速度,要求快速起动、制动及反转,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,还必须有自动控制设备,组成自动化的电力拖动系统。

### 三、电机的分类及电力拖动系统的组成

电机是一种通过电磁感应实现能量转换、能量传递的装置。电机的类型很多,按其功能可分为发电机、电动机、变压器、控制电机;按转速可分为变压器和旋转电机,旋转电机又分为直流电机和交流电机,交流电机分为同步电机和异步电机。

综合以上两种分类方法,可归纳如下:



以电动机作为原动机拖动各种生产机械运转的系统,称为电力拖动系统。电力拖动系统如图 0-1 所示,主要由电源、控制设备、电机、传动机构、生产机械五部分组成。

电源是向电动机和控制设备供电。

控制设备是控制电动机运转的设备,由各种控制电器、自动化元件及工业控制计算机等组成。

电动机是实现电能与机械能互相转换的设备。在电动状态下,产生原动力,把电能转换为机械能;在制动状态下,产生制动力,把机械能转换为电能或热能。

传动机构用来传递动力,实现速度和运动方式的变换,如减速器、皮带、联轴节等。

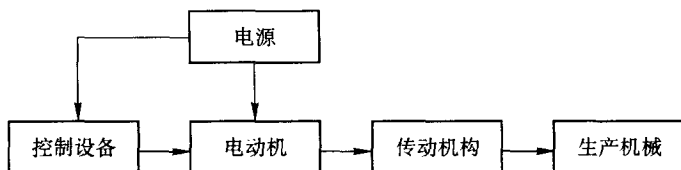


图 0-1 电力拖动系统组成示意图

#### 四、本课程的性质、任务和学习方法

本课程是电气类、机电类专业的一门主要技术基础课,是将电机学和电力拖动有机结合的一门课程。

本课程的任务是使学生掌握变压器、交流电机、直流电机和控制电机的基本结构、工作原理和工作特性,掌握电力拖动系统的启动、调速、制动、电动机选择等电力拖动基本问题,为后续课程的学习和未来的工作打下基础,同时也培养学生分析和解决实际问题的能力。

本课程运用电工基础的基本理论来分析电机内部的电磁过程,从而得出各类电机和拖动系统的工作特性;同时所研究的对象是具体的、实际的,其理论是与工程实际紧密结合的,在用理论分析电机及拖动的实际问题时,常采用工程观点和工程分析方法,因此要求学生在掌握基本理论的同时,注意理论与实际相结合,培养实践能力。要学好这门课,必须有一个良好的学习方法,学习时应注意以下几点:

(1) 清楚机械实物的具体结构,清楚电机各量的电磁关系,掌握基本概念、基本原理和主要运行特性。另外本课程注重定性分析,要理解公式所表达的物理概念。

(2) 要学会综合分析,善于对各类电机和各种拖动系统的原理、结构和特性进行比较,找出它们的共性和各自的特点,这样,就能对内容理解得更深刻。

(3) 要理论联系实际,善于用学过的理论去分析电机与拖动的实际问题。

(4) 要重视实验环节,认真做好本课程所开设的实验,通过实验加深对理论的理解,培养动手能力;还要重视下厂实习和实训环节,通过实习实训培养实践技能。

# 第一章 直流电机

直流电动机具有良好的调速性能、较大的起动转矩和过载能力,比较容易控制。因此,广泛地应用于对起动和调速性能要求较高的生产机械,如大型起重机、船舶机械、龙门刨床、轧钢机、矿井提升设备、电气机车、纺织机和造纸机等。但同时直流电动机也存在制造工艺复杂,生产成本较高,维修不便,换向困难等不足。随着近年电力电子技术的迅速发展,在很多领域内,直流电动机有逐步被交流调速电动机取代的趋势,但它仍将以自身的特点在电力拖动系统中占有重要的地位。

直流发电机供电的质量比一般整流电源好,故在一些特殊工作场所,如大型同步发电机的励磁电源,电解、电镀以及某些对电源要求特别高的场所,被广泛采用。

本章主要介绍直流电机的基本结构及工作原理。着重讨论直流电机的磁场分布、感应电动势的产生条件及性质、电磁转矩、电枢反应及其对电机的影响,分析直流电机的换向过程和各種换向方法以及如何改善直流电机的换向,并且从应用的角度较详细地分析直流电动机的工作特性。

## 第一节 直流电机的工作原理

### 一、直流电机的工作原理

电机是一种实现电能量转换的电磁装置。按能量转换的方向可分为直流电动机和直流发电机两类。

#### 1. 直流发电机的工作原理

图 1-1 所示为直流发电机的工作原理图,N 和 S 是一对固定的磁极,为直流发电机的定子。磁极之间有一个可以转动的铁质圆柱体,称为电枢铁心。 $abcd$  是固定在铁心表面的电枢线圈,线圈和铁质圆柱体是直流发电机可转动部分,称为电机转子。线圈的首末端  $a$ 、 $d$  分别接到相互绝缘的两个弧形铜片上,弧形铜片称为换向片,它们的组合体称为换向器。在换向器上放置固定不动而与换向片滑动接触的电刷 A 和 B,线圈  $abcd$  通过换向器和电刷接通外电路。在定子与转子间有间隙存在,称为空气隙,简称气隙。

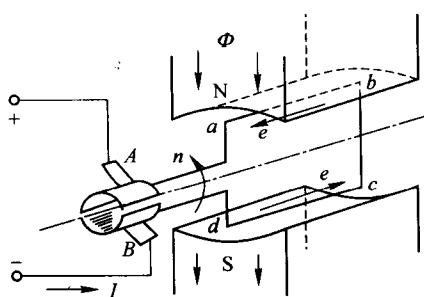


图 1-1 直流发电机的工作原理

当有原动机拖动转子以一定的转速逆时针旋转时,根据电磁感应定律可知,导体  $ab$  和  $cd$  分别切割 N 极和 S 极下的磁感应线,将产生感应电动势。感应电动势的方向用右手定则确定。导体  $ab$  在 N 极下,感应电动势的方向由  $b$  指向  $a$ ;导体  $cd$  在 S 极下,感应电动势的

方向由  $d$  指向  $c$ , 所以电刷  $A$  为正极性, 电刷  $B$  为负极性。当线圈旋转  $180^\circ$  后, 导体  $cd$  转至  $N$  极下, 感应电动势的方向由  $c$  指向  $d$ , 电刷  $A$  与  $d$  所连换向片接触, 仍为正极性; 导体  $ab$  转至  $S$  极下, 感应电动势的方向变为  $a$  指向  $b$ , 电刷  $B$  与  $a$  所连换向片接触, 仍为负极性。

由上述分析可知: 虽然直流发电机电枢线圈中的感应电动势的方向是交变的, 但通过换向器和电刷的作用, 电刷  $A$  的极性总为正, 而电刷  $B$  的极性总为负, 在电刷两端可获得方向不变的直流电动势。

实际直流发电机的线圈分布于电枢铁心表面的不同位置上, 并按照一定的规律连接起来, 构成电机的电枢绕组。磁极也是根据需要  $N$ 、 $S$  极交替放置多对。

## 2. 直流电动机的工作原理

若把电刷  $A$ 、 $B$  接到直流电源上, 电刷  $A$  接电源的正极, 电刷  $B$  接电源的负极, 则线圈  $abcd$  中将有电流流过。此时, 直流电机作电动机运行。

如图 1-2(a) 所示, 在导体  $ab$  中, 电流由  $a$  流向  $b$ ; 在导体  $cd$  中, 电流由  $c$  流向  $d$ 。载流导体  $ab$  位于  $N$  极下,  $cd$  位于  $S$  极下, 均处于  $N$  和  $S$  极之间的磁场中, 导体受到电磁力的作用。电磁力的方向用左手定则确定, 该电磁力与转子半径之积即为电磁转矩, 转矩的方向为逆时针方向, 使整个电枢逆时针方向旋转。当电枢旋转  $180^\circ$ , 导体  $cd$  转到  $N$  极下,  $cd$  中的电流变为由  $d$  流向  $c$ ;  $ab$  转到  $S$  极下,  $ab$  中的电流变为由  $b$  流向  $a$ , 如图 1-2(b) 所示。用左手定则判别可知, 电磁转矩的方向仍是逆时针方向, 线圈在此转矩作用下继续按逆时针方向旋转。

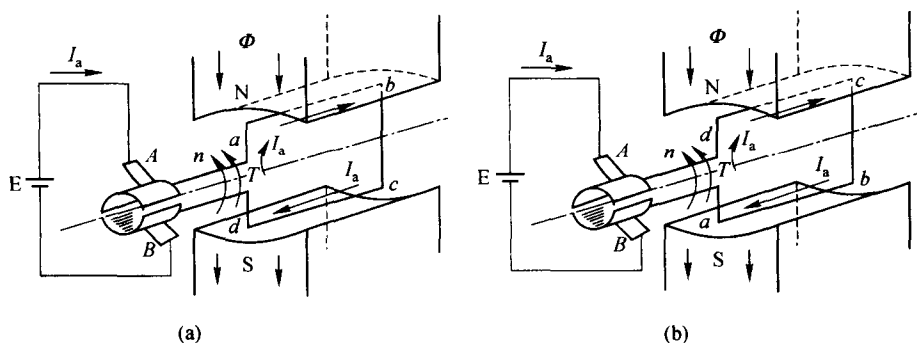


图 1-2 直流电动机的基本工作原理

由上述分析可知, 虽然导体中流过的电流为交变的, 但由于换向器和电刷的作用,  $N$  极下的导体受力方向和  $S$  极下导体所受力的方向并未发生变化, 电枢产生的电磁转矩的方向恒定不变, 电动机在此方向不变的转矩作用下转动。

同直流发电机相同, 实际的直流电动机的电枢并非单一线圈, 电枢圆周上均匀地嵌放许多线圈, 相应地换向器由许多换向片组成, 磁极也并非一对。

## 二、直流电机的结构

直流电动机和直流发电机在主要结构上基本相同, 都由定子和转子两大部分组成。常用的中小型直流电动机结构如图 1-3 所示。

### 1. 定子

定子由机座、主磁极、换向极、电刷装置和端盖等组成,其剖面结构如图 1-4 所示。它的主要作用是产生主磁场和作电机的机械支架。

### 1) 主磁极

主磁极的作用是产生气隙磁场。主磁极由铁心和励磁绕组两部分组成,通过螺钉固定在机座上,如图 1-4 所示。

为减小涡流损耗,主磁极铁心通常用 1 mm~1.5 mm 厚的钢板冲片叠压铆紧而成,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。极靴的作用是使气隙磁场分布比较理想,同时极靴对励磁绕组也起支撑作用。

励磁绕组是用来产生主磁通的,用绝缘铜线绕制而成。当给励磁绕组通入直流电时,各主磁极均产生一定极性,相邻两主磁极的极性是 N、S 交替出现的。

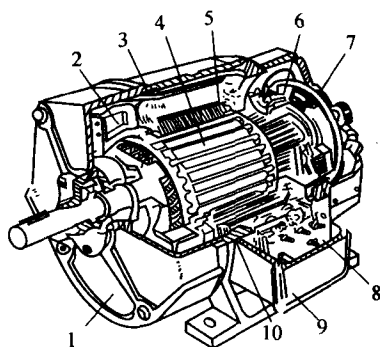


图 1-3 直流电机基本结构

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

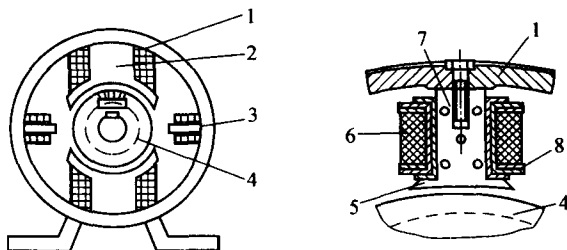


图 1-4 直流电机定子剖面结构

1—机座;2—主磁极;3—换向极;4—电枢;5—极靴;  
6—励磁线圈;7—极身;8—框架

### 2) 换向极

两相邻主磁极之间的小磁极称为换向极,又称为附加极或间极,其作用是改善直流电机的换向,减小电机运行时电刷与换向器之间可能产生的火花。换向极由换向极铁心和换向极绕组组成,换向极的铁心比主磁极的简单,一般用整块钢板制成,在其上放置换向极绕组。换向极的数目与主磁极数相等。

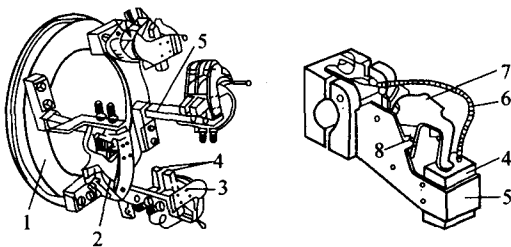


图 1-5 电刷装置

1—刷杆座;2—弹簧压板;3—刷架;4—电刷;  
5—刷握;6—刷辫;7—压指;8—弹簧

### 3) 机座

机座一般为铸钢件或由钢板焊接而成,有足够的机械强度和良好的导磁性能。机座一方面用来固定主磁极、换向极和端盖,对整个电机起支撑和固定作用;另一方面也是电机主磁路的一部分,用于构成磁极之间的通路,磁通通过的部分称为磁轭。

端盖固定于机座上,主要起支撑作用,其上放置轴承支撑直流电机的转轴,使直流电机能够旋转。

#### 4) 电刷装置

电刷装置是直流电机的重要组成部分,主要用于引入或引出直流电压和直流电流,通过该装置把电机电枢中的电流与外部电路相连或把外部电源与电机电枢相连。

电刷装置主要由电刷、刷握、刷杆、刷杆座及压紧弹簧片等组成。电刷一般由导电耐磨的石墨材料制成,放在刷握内,用弹簧压紧,使电刷与换向器之间有良好的滑动接触,如图 1-5 所示。刷握固定在刷杆上,刷杆固定在圆环形的刷杆座上,相互之间绝缘。刷杆座装在端盖或轴承内盖上,可以转动调整电刷在换向器表面上的位置,调好以后加以固定。刷辫的作用是将电流从电刷引入或引出。

#### 2. 转子

转子,又称电枢,主要由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。它的作用是产生电磁转矩或感应电动势,实现机电能量的转换。

##### 1) 电枢铁心

电枢铁心是直流电机主磁路的一部分,对放置在其上的电枢绕组起支撑作用。为了减小涡流和磁滞损耗,电枢铁心常采用  $0.35\text{ mm} \sim 0.5\text{ mm}$  厚的相互绝缘的硅钢片冲制叠压而成。有时为了加强电机冷却,在电枢铁心上冲制轴向通风孔,在较大型电机的电枢铁心上还安排有径向通风槽,用通风槽将铁心沿轴向分成数段。电枢铁心沿圆周上有均匀分布的槽用以嵌放电枢绕组,电枢铁心及冲片形状如图 1-6 所示。

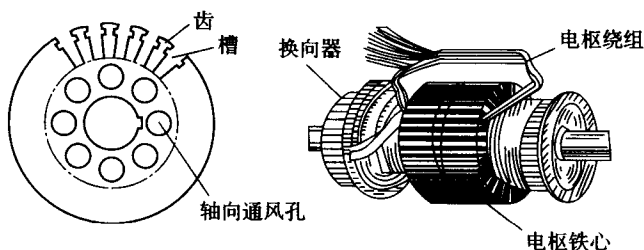


图 1-6 电枢冲片和电枢铁心

##### 2) 电枢绕组

电枢绕组是电机产生电磁转矩和感应电动势,进行能量变换的关键部件。电枢线圈用绝缘的圆铜线或扁铜线绕制成一定的形状,放置于电枢铁心槽中(线圈与槽之间有槽绝缘),并用非磁性槽楔封口,线圈的出线端按一定规律与换向器的换向片相连,构成电枢绕组。直流电机的电枢绕组多为双层绕组,线圈分上下两层嵌入铁心槽内,上下层之间有层间绝缘,如图 1-7 所示。

电枢线圈的边是产生感应电动势和电磁转矩的有效元件,简称元件,元件数用  $S$  表示。每个元件的首尾端按一定规律与换向片连接,使电枢绕组形成一个闭合绕组。电枢绕组每个元件的匝数  $N$  可以是单匝,也可以是多匝。按照元件首尾端与换向片连接规律的不同,电枢绕组可分为叠绕组和波绕组,叠绕组又有单叠和复叠之分,波绕组也有单波和复波之分,如图 1-8 所示。

单叠绕组和单波绕组是直流电机电枢绕组的基本形式,由于篇幅有限,本书只对单叠绕

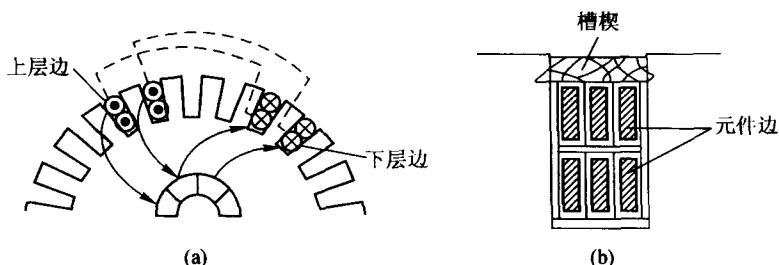


图 1-7 元件边在槽内的放置情况  
(a) 线圈元件嵌放次序; (b) 线圈槽的断面图

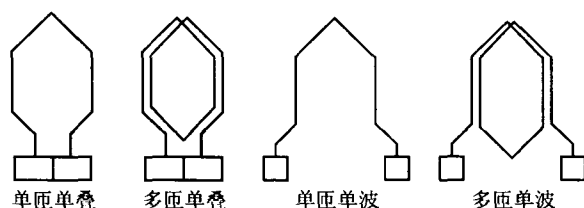


图 1-8 直流电机的绕组

组作详细说明。下面先介绍绕组中常用的基本知识。

每一个元件有两个元件边, 每片换向片又总是接一个元件的上层边和另一元件的下层边, 所以元件数  $S$  总等于换向片数  $K$ , 即  $S = K$ 。

每个元件有两个元件边, 而每个电枢槽分上下两层嵌放两个元件边, 所以元件数  $S$  又等于槽数  $Z$ , 即  $S = Z$ 。

对于小容量电机, 电枢直径小, 电枢铁心外圆不宜开太多槽时, 往往在一个槽的上层和下层各放  $u$  个元件边, 即把一个实槽当成  $u$  个虚槽使用。虚槽数  $Z_u$  与实槽数  $Z$  之间的关系为  $Z_u = uZ = S = K$ , 为分析方便起见, 本书中均设  $u = 1$ 。

表征电枢绕组元件本身和元件之间连接规律的数据为节距, 直流电机电枢绕组的节距有第一节距  $y_1$ 、第二节距  $y_2$ 、合成节距  $y$  和换向器节距  $y_k$  四种, 如图 1-9 所示。

极距  $\tau$ : 一个磁极在电枢圆周上所跨的距离;

第一节距  $y_1$ : 元件的两条边在电枢表面所跨的距离, 用两条边所跨的槽数表示;

第二节距  $y_2$ : 第一个元件的下层边与直接相连的第二个元件的上层边之间在电枢圆周上的距离, 用槽数表示;

合成节距  $y$ : 直接相连的两个元件的对应边在电枢圆周上的距离, 用槽数表示;

换向器节距  $y_k$ : 一个元件的首尾两端所接的两个换向片在换向器圆周上所跨的距离, 用换向片数表示。

叠绕组是后一元件的端接部分紧叠在前一元件的端接部分上。单叠绕组的换向器节距和合成节距均为 1, 即  $y = y_k = 1$ , 如图 1-9 所示。单叠绕组的连接特点是元件的首尾两端

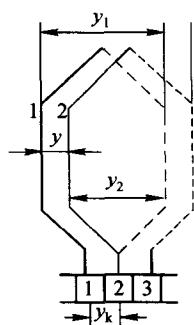


图 1-9 电枢绕组的节距

分别接到相邻的两个换向片上,并且前一元件的尾端与后一元件的首端接在同一换向片上。在图 1-10 中上层元件边用实线表示,下层元件边用虚线表示,所有相邻元件依次串联,形成一个闭合回路。下面举例说明单叠绕组的连接规律和特点。

一台直流电机,  $Z = S = K = 16, 2p = 4$ , 接成单叠绕组。假想把电枢从某一齿的中间沿轴向切开展成平面, 所得绕组连接图形称为绕组展开图, 如图 1-10 所示。

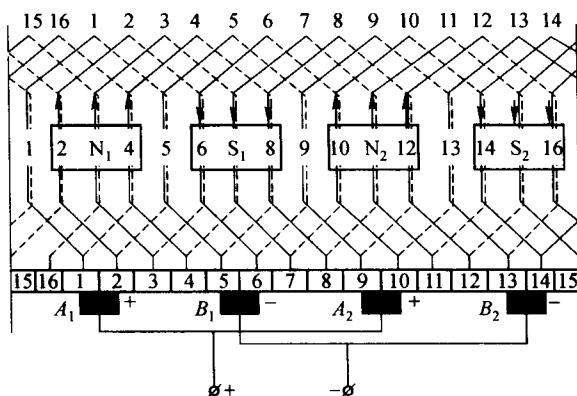


图 1-10  $Z=16, 2p=4$  单叠绕组展开图

保持图 1-10 中各元件的连接顺序不变, 将此瞬间不与电刷接触的换向片省去不画, 可以得到图 1-11 所示的并联支路图。对照图 1-10 和图 1-11, 可以看出单叠绕组的连接规律是将同一磁极下的各个元件串联起来组成一条支路。所以, 单叠绕组的并联支路对数  $a$  总等于极对数  $p$ , 即  $a = p$ 。

单叠绕组的特点: 在同一主磁极下的各元件串联起来组成一条支路, 并联支路对数等于极对数; 电刷数等于主磁极数; 当元件形状左右对称, 电刷在换向器表面的位置对准磁极中心线时, 正、负电刷间的感应电动势最大, 被电刷短路元件中的感应电动势最小; 电枢电流等于各并联支路电流之和。

### 3) 换向器

换向器是由许多换向片组成的圆柱体, 换向片之间用云母隔开, 彼此绝缘, 其结构如图 1-12 所示。对于直流电动机, 换向器配以电刷, 能将外加直流电源转换为绕组中的交变电

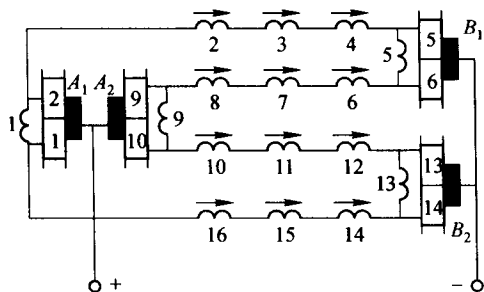


图 1-11 与图 1-10 相对应的并联支路图

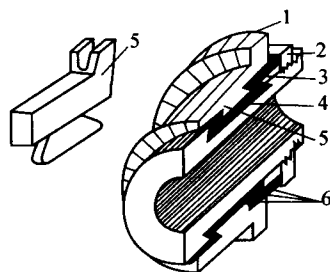


图 1-12 钢制换向器

1—片间云母; 2—锁紧螺母; 3—V形环;  
4—套筒; 5—换向片; 6—云母绝缘