

# 电机与控制

许建国 主编

武汉测绘科技大学出版社

301.2  
X76  
高等理工院校

电力拖动自动控制系统系列教材

# 电机与控制

许建国 主编

武汉测绘科技大学出版社

(鄂)新登字 14 号

#### 内 容 提 要

本书作为电力拖动自动控制系统系列教材中的第一本,其内容分三篇(电机篇、电源篇和控制篇)九章。主要阐述直流电机、变压器、交流电机、控制电机的基本理论;讲述直流电源和整流器、交流电源和逆变器的工作原理;介绍工厂供电、控制电器和可编程控制器的控制原理。

本书可作为高等理工院校自动化专业、电气技术专业的教材,亦可供有关师生和工程技术人员参考。

#### 图书在版编目(CIP)数据

电机与控制/许建国主编. —武汉:武汉测绘科技大学出版社,1998.8  
ISBN 7-81030-619-7

I. 电… II. 许… III. 电机-控制 IV. TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 12871 号

责任编辑:夏 非 封面设计:曾 兵  
武汉测绘科技大学出版社出版发行  
(武汉市路喻路 129 号,邮编 430079)  
汉川市地方税务局印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:20.75 字数:530 千字  
1998 年 8 月第 1 版 1999 年 12 月第 2 次印刷  
印数:1601—2600 册 定价:29.50 元

# 前 言

多年来,工业自动化专业一直以电力拖动自动控制系统作为专业方向,为此而开设了电机学、电力拖动、电力电子变流技术、工厂供电、自动控制系统、交流调速系统等一系列课程,课程门数多,学时数自然也多。而即将进入 21 世纪的高等教育重在加强基础,并强调拓宽专业面。因此,改革现有课程体系和课程内容势在必行。

鉴于此,华中理工大学、武汉纺织工学院、武汉工业大学、武汉汽车工业大学、武汉化工学院、湖北工学院等院校的自动化专业及相关专业的专家教授们,经过多次商讨沟通后达成共识:改革现有的电力拖动自动控制系统的课程体系和内容,编写一套电力拖动自动控制系统新教材。经过多位同仁的辛勤劳动和共同努力,这套包括《电机与控制》和《拖动与调速系统》的新教材终于问世了。《电机与控制》是第一本。它讲述了电力拖动自动控制系统的各种硬体设施和器件,如电机、变压器、逆变器、控制器等,属“硬件”部分。而电力拖动自动控制系统的拖动原理、调速方法、控制规律等“软件”部分,则在第二本教材《拖动与调速系统》中讲述。

《电机与控制》内容分三篇九章:第一篇为“电机篇”,含第一~四章;第二篇为“电源篇”,含第五~七章;第三篇为“控制篇”,含第八~九章。

本书第一章由邵可然教授编写,第二章由陈明辉副教授编写,第三章由徐云程教授编写,第四章由许建国教授编写,第五章由王明阳副教授编写,第六、七章由袁建桥副教授编写,第八章由罗维平编写,第九章由向阳编写。本书由许建国教授任主编,袁建桥副教授任副主编。

由于编者学识水平有限,加上时间仓促,书中难免会存在一些缺点和错误,敬请读者批评指正。

编 者

1998 年 2 月

# 目 录

## 第一篇 电机篇

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 第一章 直流电机                | (2)   |
| § 1.1 直流电机的工作原理         | (2)   |
| § 1.2 直流电机的结构和额定值       | (4)   |
| § 1.3 直流电机的电枢绕组         | (7)   |
| § 1.4 直流电机的磁场及感应电势和电磁转矩 | (13)  |
| § 1.5 直流电动机             | (19)  |
| § 1.6 直流发电机             | (24)  |
| § 1.7 直流电机的换向           | (29)  |
| 习 题                     | (34)  |
| 第二章 变压器                 | (37)  |
| § 2.1 概述                | (37)  |
| § 2.2 单相变压器的空载运行        | (40)  |
| § 2.3 单相变压器的负载运行        | (42)  |
| § 2.4 变压器的等值电路及相量图      | (44)  |
| § 2.5 变压器参数的试验测定        | (47)  |
| § 2.6 变压器的运行特性          | (49)  |
| § 2.7 三相变压器             | (51)  |
| § 2.8 自耦变压器及仪用互感器       | (59)  |
| 习 题                     | (61)  |
| 第三章 交流电机                | (64)  |
| § 3.1 三相异步电动机的结构和工作原理   | (64)  |
| § 3.2 三相异步电动机的定子绕组      | (70)  |
| § 3.3 三相异步电动机的等值电路及相量图  | (72)  |
| § 3.4 三相异步电动机的功率和转矩     | (76)  |
| § 3.5 三相异步电动机的特性        | (79)  |
| § 3.6 单相异步电动机           | (82)  |
| § 3.7 同步电动机             | (84)  |
| 习 题                     | (89)  |
| 第四章 控制电机                | (92)  |
| § 4.1 伺服电动机             | (92)  |
| § 4.2 测速发电机             | (100) |
| § 4.3 自整角机              | (105) |
| § 4.4 旋转变压器             | (112) |
| § 4.5 步进电动机             | (117) |
| 习 题                     | (120) |

## 第二篇 电源篇

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 第五章 工厂供电                       | (123) |
| § 5.1 工厂供电系统及电压选择              | (123) |
| § 5.2 工厂电力负荷的计算                | (129) |
| § 5.3 变电所位置及变压器容量和台数选择         | (133) |
| § 5.4 变电所的主电路图                 | (137) |
| § 5.5 工厂 380V 以下配电系统           | (142) |
| § 5.6 功率因数的提高                  | (143) |
| § 5.7 接地的目的和作用                 | (147) |
| 习 题                            | (155) |
| 第六章 直流电源及整流器                   | (156) |
| § 6.1 概述                       | (156) |
| § 6.2 晶闸管                      | (159) |
| § 6.3 单相可控整流电路                 | (176) |
| § 6.4 三相可控整流电路                 | (185) |
| § 6.5 变流装置的触发电路                | (198) |
| § 6.6 自关断型器件                   | (208) |
| § 6.7 斩波器及应用                   | (220) |
| 习 题                            | (232) |
| 第七章 交流电源及逆变器                   | (236) |
| § 7.1 有源逆变电路                   | (236) |
| § 7.2 无源逆变电路                   | (242) |
| § 7.3 交-交变频电路                  | (264) |
| 习 题                            | (272) |
| 第三篇 控制篇                        |       |
| 第八章 控制电器                       | (275) |
| § 8.1 常用控制电器                   | (275) |
| § 8.2 电工系统中线路图绘制原则、图形及文字符号     | (291) |
| § 8.3 组成电器控制线路的基本规律            | (293) |
| § 8.4 控制电路设计方法                 | (297) |
| 习 题                            | (299) |
| 第九章 可编程序控制器及应用                 | (301) |
| § 9.1 可编程序控制器工作原理              | (301) |
| § 9.2 FX <sub>2</sub> 系列 PC 简介 | (304) |
| § 9.3 FX <sub>2</sub> 的基本逻辑指令  | (308) |
| § 9.4 小型 PC 应用设计的基本方法与编程常识     | (313) |
| § 9.5 PC 应用系统设计举例              | (315) |
| 习 题                            | (320) |
| 附 表                            | (322) |
| 参考文献                           | (325) |

# 第一篇 电机篇

---

电机是一种机电能量转换的电磁装置,可以将电能转换为机械能,也可以将机械能转换为电能。将电能转换为机械能的称为电动机;将机械能转换为电能的称为发电机。本篇重点分析电动机。电动机一般可分为直流电动机和交流电动机。直流电动机使用直流电源,将直流电能转换为机械能;交流电动机使用交流电源,将交流电能转换为机械能。交流电动机又分为同步电动机和异步电动机。转子旋转速度与定子磁场的旋转速度相同的交流电动机称为同步电动机,否则,就称为异步电动机。异步电动机根据其转子结构的不同再分为鼠笼式异步电动机和线绕式异步电动机。鼠笼式异步电动机结构简单,维护方便,运行安全可靠,因而获得了广泛的应用。

还有一类小功率电机,主要不是用于能量转换输出机械功率,而是用于信号的检测、变换和传递,作执行元件或信号元件,这类小功率电机统称为控制电机,如交、直流测速发电机,自整角机和步进电动机等。

变压器虽然不能将电能转换为机械能,但能改变交流电压和电流的数量等级,用于电能的输送和分配,是电力系统的重要组成部分,因而把变压器也放在电机篇中讲述。

在本篇中先讲述直流电机(第一章),再讲述变压器(第二章),然后是交流电机(第三章),最后分析控制电机(第四章)。

# 第一章 直流电机

电机是一种机电能量转换的电磁装置。将直流电能转换为机械能的称为直流电动机；反之，将机械能转换为直流电能的称为直流发电机。

直流电动机的主要优点是起动性能和调速性能好，过载能力大，易于控制。因此，应用于对起动和调速性能要求较高的生产机械，例如电力机车、轧钢机、大型机床、矿井卷扬机、船舶机械、造纸和纺织机械等都广泛采用直流电动机作为原动机。

直流发电机主要用作直流电源，供给直流电动机、电解、电镀等所需的直流电能。

直流电机的主要缺点是结构复杂，使用有色金属多，生产工艺复杂，价格昂贵，有换向问题，因而限制了它的极限容量，运行可靠性差。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，但直流电机仍将在许多场合继续发挥作用。

本章主要分析直流电机的原理、结构和运行性能。

## § 1.1 直流电机的工作原理

### 1.1.1 直流电动机的基本工作原理

图 1-1 是一台最简单的直流电动机的模型，N 和 S 是一对固定的磁极（一般是电磁铁，也可以是永久磁铁）。磁极之间有一个可以转动的铁质圆柱体，称为电枢铁心。铁心表面固定一个用绝缘导体构成的电枢线圈  $abcd$ ，线圈的两端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。电枢铁心、电枢线圈和换向器构成的整体称为电枢。

此模型作为直流电动机运行时，将直流电源加于电刷 A 和 B，例如将电源正极加于电刷 A，电源负极加于电刷 B，则线圈  $abcd$  中流过电流，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  $ab$  和  $cd$  均处于 N、S 极之间的磁场当中，受到电磁力的作用，电磁力的方向用左手定则确定，可知这一对电磁力形成一个转矩，称为电磁转矩，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， $ab$  转到 S 极下，如图 1-1(b) 所示，由于电流仍从电刷 A 流入，使  $cd$  中的电流变为由  $d$  流向  $c$ ，而  $ab$  中的电流由  $b$  流向  $a$ ，从电刷 B 流出，用左手定则判别可知，电磁转矩的方向仍是逆时针方向。

由此可见，加于直流电动机的直流电源，借助于换向器和电刷的作用，使直流电动机电枢线圈中流过的电流，方向是交变的，从而使电枢产生的电磁转矩的方向恒定不变，确保直流电

动机朝确定的方向连续旋转。这就是直流电动机的基本工作原理。

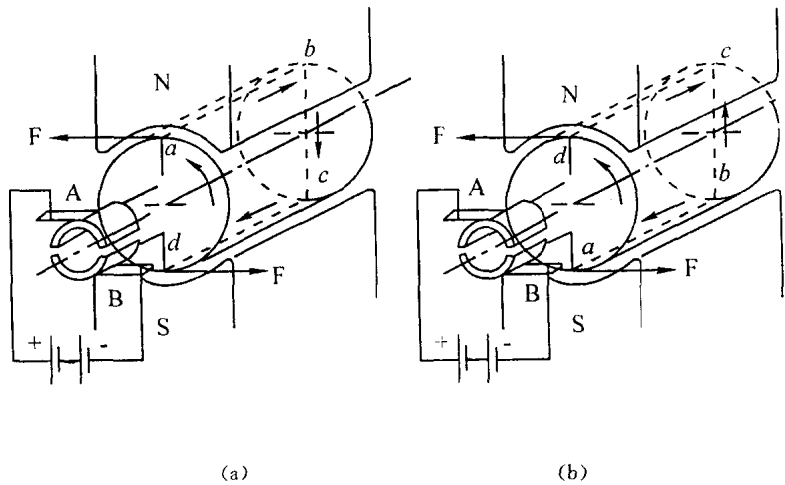


图 1-1 直流电动机的工作原理

实际的直流电动机,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,使电枢线圈所产生总的电磁转矩足够大并且比较均匀,电动机的转速也就比较均匀。

1.1.2 直流发电机的基本工作原理

直流发电机的模型与直流电动机相同,不同的是电刷上不加直流电压,而是利用原动机拖动电枢朝某一方例如逆时针方向旋转,如图 1-2 所示。这时导体  $ab$  和  $cd$  分别切割 N 极和 S 极下的磁力线。感应产生电动势,电动势的方向用右手定则确定。图示情况,导体  $ab$  中电动势的方向由  $b$  指向  $a$ ,导体  $cd$  中电动势的方向由  $d$  指向  $c$ ,所以电刷 A 为正极性,电刷 B 为负极性。电枢旋转  $180^\circ$  时,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。可见,直流发电机电枢线圈中的感应电动势的方向是交变的,而通过换向器和电刷的作用,在电刷 A、B 两端输出的电动势是方向不变的直流电动势。若在电刷 A、B 之间接上负载,发电机就能向负载供给直流电能。这就是直流发电机的基本工作原理。

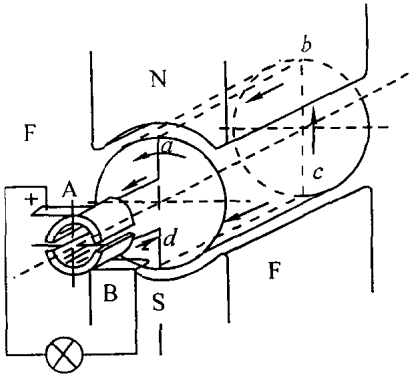


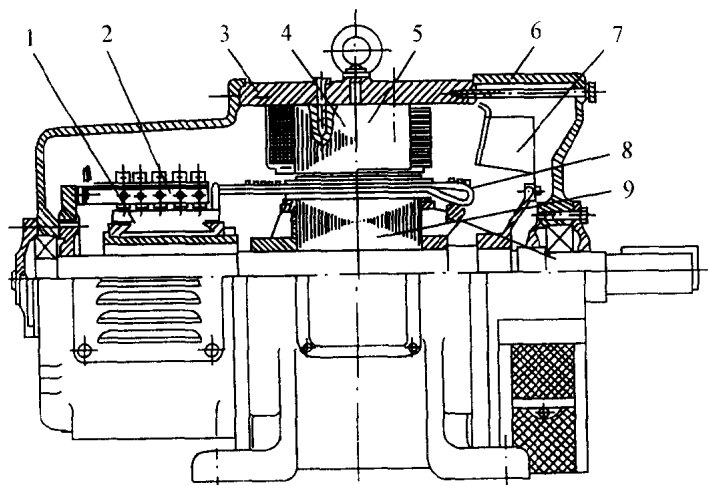
图 1-2 直流发电机的工作原理

从以上分析可以看出: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,取决于外界不同的条件。将直流电源外加于电刷,输入电能,电机能将电能转换为机械能,拖动生产机械旋转,作电动机运行;如用原动机拖动直流电机的电枢旋转,输入机械能,电机能将机械能转换为直流电能,从电刷上引出直流电动势,作发电机运行。同一台电机,既能作为电动机运行,又能作发电机运行的原理,在电机理论中称为可逆原理。

## § 1.2 直流电机的结构和额定值

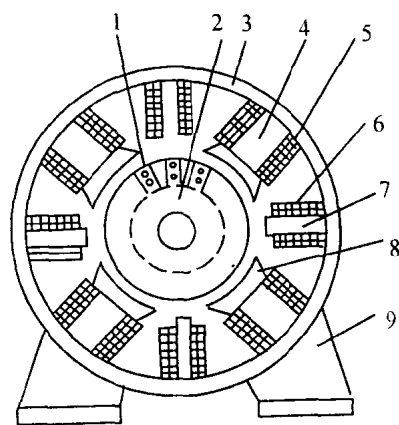
### 1.2.1 直流电机的结构

由直流电动机和直流发电机工作原理示意图可以看到,直流电机的结构应由定子和转子两大部分组成。直流电机运行时静止不动的部分称为定子,定子的主要作用是产生磁场,由机座、主磁极、换向极、端盖、轴承和电刷装置等组成。运行时转动的部分称为转子,其主要作用是产生电磁转矩和感应电动势,是直流电机进行能量转换的枢纽,所以通常又称为电枢,由转轴、电枢铁心、电枢绕组、换向器和风扇等组成。图 1-3 是直流电机的纵剖图,图 1-4 是横剖面示意图。下面对图中各主要结构部件分别作一简单介绍。



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

图 1-3 直流电机的纵剖面图



1. 电枢绕组;2. 电枢铁心;3. 机座;4. 主磁极铁心;  
5. 励磁绕组;6. 换向极绕组;7. 换向极铁心;  
8. 主磁极极靴;9. 机座底脚

图 1-4 直流电机横剖面示意图

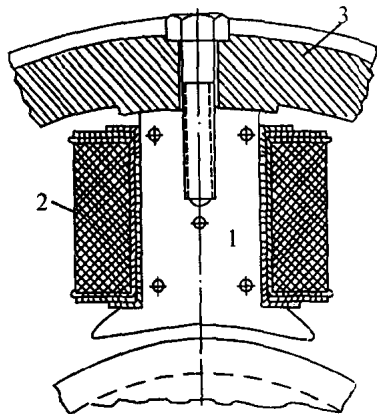
#### 1. 定子部分

1) 主磁极 主磁极的作用是产生气隙磁场。主磁极由主磁极铁心和励磁绕组两部分组成,如图 1-5 所示。铁心用 0.5~1.5mm 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,极靴宽于极身,既可使气隙中磁场分布比较理想,又便于固定励磁绕组。励磁绕组用绝缘铜线绕制而成。励磁绕组套在极身上,再将整个主磁极用螺钉固定在机座上。

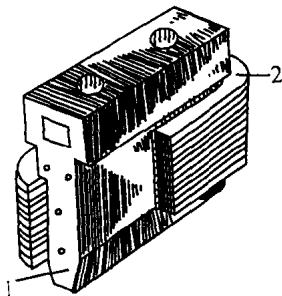
2) 换向极 两相邻主磁极之间的小磁极叫换向极,也叫附加极或间极。换向极的作用是改善换向,减小电机运行时电刷与换向器之间可能产生的火花。换向极由换向极铁心和换向极绕组组成,如图 1-6 所示。换向极铁心一般用整块钢制成,对换向性能要求较高的直流电机,换向极铁心可用 1.0~1.5mm 厚的钢板冲制叠压而成。换向极绕组用绝缘导线绕制而成,套在换向极铁心上。整个换向极用螺钉固定于机座上。换向极的数目与主磁极相等。

3) 机座 电机定子部分的外壳称为机座,见图 1-3 的 3。机座一方面用来固定主磁极、换向极和端盖,并起整个电机的支撑和固定作用;另一方面也是磁路的一部分,借以构成磁极之

间的通路,磁通通过的部分称为磁轭。为保证机座具有足够的机械强度和良好的导磁性能,一般为铸钢件或由钢板焊接而成。

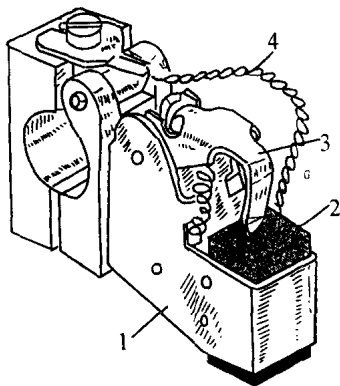


1. 主磁极铁心;2. 励磁绕组;3. 机座  
图 1-5 主磁极

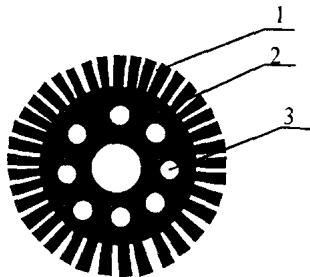


1. 换向极铁心;2. 换向极绕组  
图 1-6 换向极

4)电刷装置 电刷装置用以引入或引出直流电压和直流电流。电刷装置由电刷、刷握、刷杆和刷杆座等组成。电刷放在刷握内,用弹簧压紧,使电刷与换向器之间有良好的滑动接触,如图 1-7 所示,刷握固定在刷杆上,刷杆装在圆环形的刷杆座上,相互之间必须绝缘。刷杆座装在端盖或轴承内盖上,圆周位置可以调整,调好以后加以固定。



1. 刷握;2. 电刷;3. 压紧弹簧;4. 铜丝辫  
图 1-7 电刷装置



1. 齿;2. 槽;3. 轴向通风孔  
图 1-8 电枢铁心冲片

## 2. 转子(电枢)部分

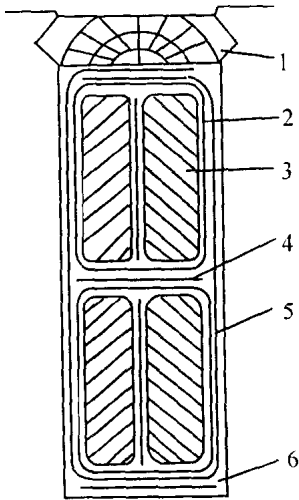
1)电枢铁心 是主磁通磁路的主要部分,同时用以嵌放电枢绕组。为了降低电机运行时的电枢铁心中产生的涡流损耗和磁滞损耗,电枢铁心用 0.5mm 厚的硅钢片冲制的冲片叠压而成,冲片的形状如图 1-8 所示。叠成的铁心固定在转轴或转子支架上。铁心的外圆开有电枢槽,槽内嵌放电枢绕组。

2)电枢绕组 电枢绕组的作用是产生电磁转矩和感应电动势,是直流电机进行能量变换的关键部件。它由许多线圈按一定规律连接而成,线圈用高强度漆包线或玻璃丝包扁铜线绕成,不同线圈边分上下两层嵌放在电枢槽中,线圈与铁心之间和上、下两层线圈边之间都必须

妥善绝缘。为防止离心力将线圈边甩出槽外,槽口用槽楔固定,如图 1-9 所示。线圈边的端接部分用热固性无纬玻璃带进行绑扎。

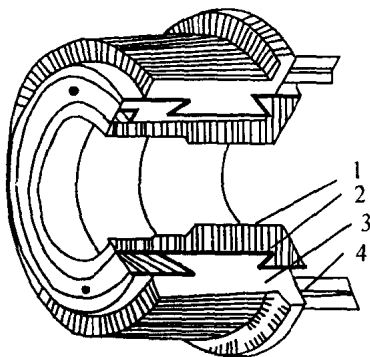
3)换向器 在直流电动机中,换向器配以电刷,能将外加直流电源转换为电枢线圈中的交变电流,使电磁转矩的方向恒定不变;在直流发电机中,换向器配以电刷,能将电枢线圈中感应产生的交变电动势转换为正、负电刷上引出的直流电动势。换向器是由许多换向片组成的圆柱体,换向片之间用云母片绝缘,换向片的紧固通常如图 1-10 所示。换向片的下部做成鸽尾形,两端用钢制 V 形套筒和 V 形云母环固定,再加螺母锁紧。对于小型直流电机,可以采用塑料换向器,如图 1-11 所示,是将换向片和片间云母叠成圆柱体后用酚醛玻璃纤维热压成形,既节省材料,又简化了工艺。

4)转轴 转轴起转子旋转的支撑作用,需有一定的机械强度和刚度,一般用圆钢加工而成。

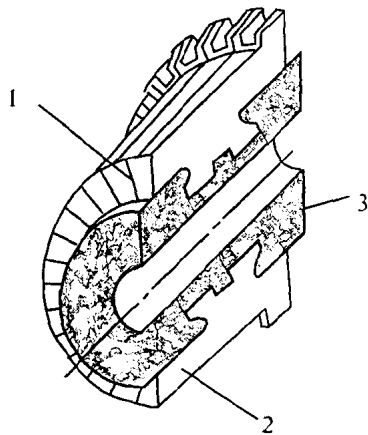


1. 槽楔;2. 线圈绝缘;3. 导体;  
4. 层间绝缘;5. 槽绝缘;6. 槽底绝缘

图 1-9 电枢槽内绝缘



1. V 形套筒;2. 云母环;3. 换向片;4. 连接片  
图 1-10 普通换向器



1. 云母片;2. 换向片;3. 塑料  
图 1-11 塑料换向器

### 1.2.2 直流电机的额定值

电机制造厂按照国家标准,根据电机的设计和试验数据而规定的每台电机的主要数据称为电机的额定值。额定值一般标在电机的铭牌上或产品说明书上。

直流电机的额定值主要有以下几项:

1. 额定功率  $P_N$ :额定功率是指按照规定的工作方式运行时所能提供的输出功率。对电动机来说,额定功率是指轴上输出的机械功率;对发电机来说,额定功率是指电枢输出的电功率,单位为 kW(千瓦)。

2. 额定电压  $U_N$ :额定电压是电机电枢绕组能够安全工作的最大外加电压或输出电压,单位为 V(伏)。

3. 额定电流  $I_N$ : 额定电流是指电机按照规定的工作方式运行时, 电枢绕组允许流过的最大电流, 单位为 A(安)。

4. 额定转速  $n_N$ : 额定转速是指电机在额定电压、额定电流和输出额定功率的情况下运行时, 电机的旋转速度, 单位为 r/min(转/分)。

额定值一般标在电机的铭牌上, 故又称为铭牌数据。还有一些额定值, 例如额定转矩  $T_N$ 、额定效率  $\eta_N$  和额定温升  $\tau_N$  等, 不一定标在铭牌上, 可查产品说明书或由铭牌上的数据计算得到。

额定功率与额定电压和额定电流的关系:

$$\text{直流电动机} \quad P_N = U_N I_N \eta_N \times 10^{-3} \text{ kW} \quad (1-1)$$

$$\text{直流发电机} \quad P_N = U_N I_N \times 10^{-3} \text{ kW} \quad (1-2)$$

直流电机运行时, 如果各个物理量均为额定值, 就称电机工作在额定运行状态, 亦称为满载运行。在额定运行状态下, 电机利用充分, 运行可靠, 并具有良好的性能。如果电机的电流小于额定电流, 称为欠载运行; 电机的电流大于额定电流, 称为过载运行。欠载运行, 电机利用不充分, 效率低; 过载运行, 易引起电机过热损坏。根据负载选择电机时, 最好使电机接近于满载运行。

例 1-1 某台直流电动机的额定值为:  $P_N = 12 \text{ kW}$ ,  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $n_N = 1\,500 \text{ r/min}$ ,  $\eta_N = 89.2\%$ , 试求该电动机额定运行时的输入功率  $P_1$  及电流  $I_N$ 。

解 额定输入功率

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{12}{0.892} = 13.45 (\text{ kW})$$

额定电流

$$I_N = \frac{P_N \times 10^3}{U_N \eta_N} = \frac{12 \times 10^3}{220 \times 0.892} = 61.15 (\text{ A})$$

例 1-2 某台直流发电机的额定值为:  $P_N = 95 \text{ kW}$ ,  $U_N = 230 \text{ V}$ ,  $n_N = 1\,450 \text{ r/min}$ ,  $\eta_N = 91.8\%$ , 试求该发电机的额定电流  $I_N$ 。

解 额定电流

$$I_N = \frac{P_N \times 10^3}{U_N} = \frac{95 \times 10^3}{230} = 413.04 (\text{ A})$$

## § 1.3 直流电机的电枢绕组

电枢绕组是直流电机产生电磁转矩和感应电动势, 实现机电能量转换的枢纽, 电枢绕组的名称由此而来, 并为此把直流电机的转子称为电枢。

电枢绕组由许多线圈(以下称元件)按一定规律连接而成。按照连接规律的不同, 电枢绕组分为单叠绕组和单波绕组等多种型式。本节先介绍元件的基本特点, 再以单叠绕组和单波绕组阐述电枢绕组的构成原理和连接规律。

### 1.3.1 元件与节距

#### 1. 电枢绕组元件

电枢绕组元件由绝缘铜线绕制而成,每个元件有两个嵌放在电枢槽中,能与磁场作用产生转矩或电动势的有效边,称为元件边。元件的槽外部分亦即元件边以外的部分称为端接部分,如图 1-12 所示。为便于嵌线,每个元件的一个元件边嵌放在某一槽的上层,称为上层边,画图时以实线表示;另一个元件边则嵌放在另一槽的下层,称为下层边,画图时以虚线表示。每个元件有两个出线端,称首端和末端,均与换向片相接,如图 1-12 所示。

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

$$S = K \quad (1-3)$$

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

$$S = K = Z \quad (1-4)$$

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

$$Z_u = uZ = S = K \quad (1-5)$$

为分析方便起见,本书中均设  $u = 1$ 。

#### 2. 节距

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。

1) 第一节距 同一元件的两个元件边在电枢周围上所跨的距离,用槽数来表示,称为第一节距  $y_1$ 。一个磁极在电枢圆周上所跨的距离称为极距  $\tau$ ,当用槽数表示时,极距的表达式为

$$\tau = \frac{Z}{2p} \quad (1-6)$$

式中:  $p$  为磁极对数。

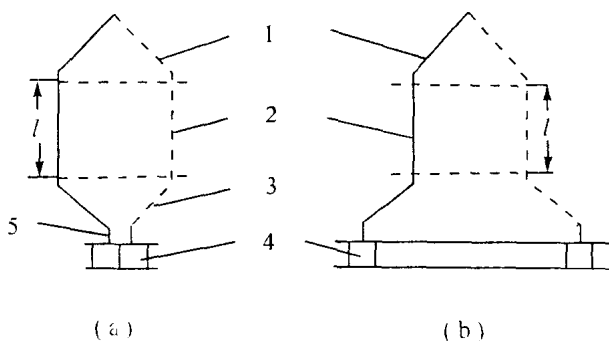
为使每个元件的感应电动势最大,第一节距  $y_1$  应等于一个极距  $\tau$ ,但  $\tau$  不一定是整数,而  $y_1$  必须是整数,为此,一般取第一节距

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon = \text{整数} \quad (1-7)$$

式中:  $\epsilon$  为小于 1 的分数。

$y_1 = \tau$  的元件为整距元件,绕组称为整距绕组;  $y_1 < \tau$  的元件称为短距元件,绕组称为短距绕组;  $y_1 > \tau$  的元件,其电磁效果与  $y_1 < \tau$  的元件相近,但端接部分较长,耗铜多,一般不用。

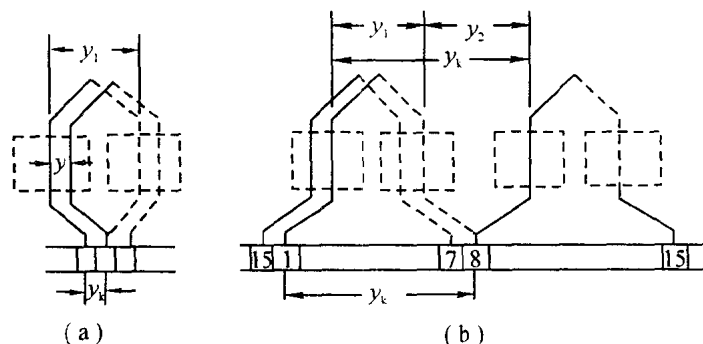
2) 第二节距 第一个元件的下层边与直接相连的第二个元件的上层边之间在电枢圆周上的距离,用槽数表示,称为第二节距  $y_2$ ,如图 1-13 所示。



(a) 叠绕组元件; (b) 波绕组元件

1. 端接部分; 2. 有效边; 3. 末端; 4. 换向片; 5. 首端

图 1-12 电枢绕组元件



(a)单叠绕组;(b)单波绕组

图 1-13 电枢绕组的节距

3)合成节距 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,称为合成节距  $y$ ,如图 1-13 所示。

4)换向器节距 每个元件的首、末两端所接的两片换向片在换向器圆周上所跨的距离,用换向片数表示,称为换向器节距  $y_k$ 。由图 1-13 可见,换向器节距  $y_k$  与合成节距  $y$  总是相等的,即

$$y_k = y \quad (1-8)$$

### 1.3.2 单叠绕组

后一元件的端接部分紧叠在前一元件的端接部分上,这种绕组称为叠绕组。当叠绕组的换向器节距  $y_k = 1$  时称为单叠绕组,如图 1-13(a)所示。

下面举一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。

#### 1. 计算节距

##### 第一节距

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon = \frac{16}{4} = 4$$

换向器节距和合成节距

$$y_k = y = 1$$

第二节距,由图 1-13(a)可见,对于单叠绕组

$$y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$$

#### 2. 绘制绕组展开图

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 1-14 所示。

绘制直流电机单叠绕组展开图的步骤如下:

1)画 16 根等长、等距的平行实线代表 16 个槽的上层,在实线旁画 16 根平行虚线代表 16 个槽的下层。一根实线和一根虚线代表一个槽,编上槽号,如图 1-14 所示。

2)按节距  $y_1$  连接一个元件。例如将 1 号元件的上层边放在 1 号槽的上层,其下层边应放在  $1 + y_1 = 1 + 4 = 5$  号槽的下层。由于一般情况下,元件是左右对称的,为此,可把 1 号槽的上层(实线)和 5 号槽的下层(虚线)用左右对称的端接部分连成 1 号元件。注意首端和末端之间相隔一片换向片宽度( $y_k = 1$ ),为使图形规整起见,取换向片宽度等于一个槽距,从而画出与

1 号元件首端相连的 1 号换向片和相邻的与末端相连的 2 号换向片，并依次画出 3 至 16 号换向片。显然，元件号、上层边所在槽号和该元件首端所连换向片的编号相同。

3)画 1 号元件的平行线，可以依次画出 2 至 16 号元件，从而将 16 个元件通过 16 片换向片连成一个闭合的回路。

单叠绕组的展开图已经画成，但为帮助理解绕组工作原理和电刷位置的确定，一般在展开图上还应画出磁极和电刷。

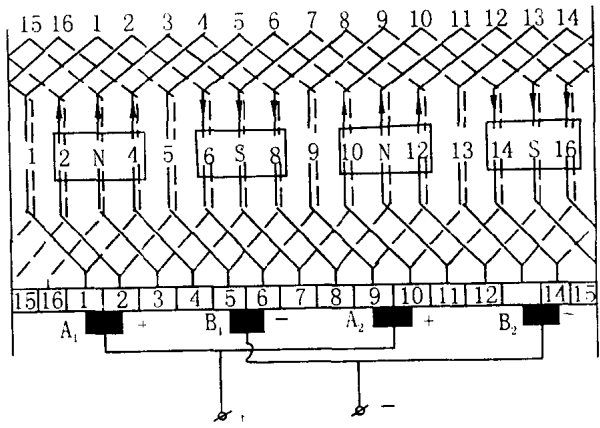


图 1-14  $Z=16, 2p=4$  单叠绕组展开图

4)画磁极。本例有四个主磁极，在圆周上应该均匀分布，即相邻磁极中心之间应间隔四个槽。设某一瞬间，四个磁极中心分别对准 3, 7, 11, 15 槽，并让磁极宽度约为极距的 0.6~0.7，画出四个磁极，如图 1-14 所示。依次标上极性  $N_1, S_1, N_2, S_2$ ，一般假设磁极在电枢绕组的上面。

5)画电刷。电刷组数也就是刷杆数等于极数，本例中为 4，必须均匀分布在换向器表面圆周上，相互间隔  $16/4=4$  片换向片。为使被电刷短路的元件中感应电动势最小，正负电刷之间引出的电动势最大，由图 1-14 分析可以看出：当元件左右对称时，电刷中心线应对准磁极中心线。图中设电刷宽度等于一片换向片的宽度。

设此电机工作在电动机状态，并欲使电枢绕组向左移动，根据左手定则可知电枢绕组各元件中电流的方向应如图 1-14 所示。为此应将电刷将  $A_1, A_2$  并联起来作为电枢绕组的“+”端，接电源正极；将电刷  $B_1, B_2$  并联起来作为“-”端，接电源负极。如果工作在发电机状态，设电枢绕组的转向不变，则电枢绕组各元件中感应电动势的方向用右手定则确定可知，与电动机状态时电流方向相反，因而电刷的正负极性不变。

### 3. 单叠绕组联接顺序表

绕组展开图比较直观，但画起来比较麻烦，为简便起见，绕组联接规律也可用联接顺序表表示。本例的联接顺序表如图 1-15 所示。表中上排数字同时代表上层元件边的元件号、槽号和换向片号，下排带“'”的数字代表下层元件边所在的槽号。

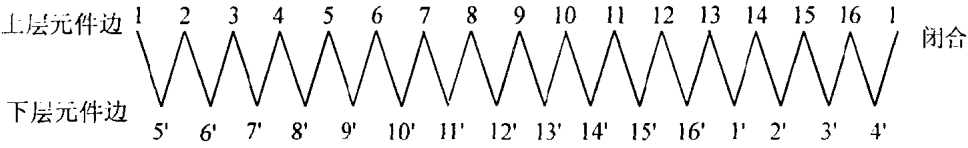


图 1-15 单叠绕组联接顺序表

### 4. 单叠绕组的并联支路图

保持图 1-14 中各元件的联接顺序不变，将此瞬间不与电刷接触的换向片省去不画，可以

得到图 1-16 所示的并联支路图。对照图 1-16 和图 1-14, 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

$$a = p \quad (1-9)$$

#### 5. 单叠绕组的特点

1) 位于同一磁极下的各元素串联起来组成一条支路, 并联支路对数等于极对数, 即  $a = p$ 。

2) 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。

3) 电刷刷杆数等于极数。

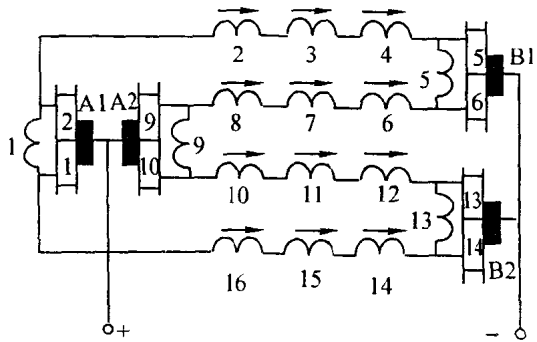


图 1-16 图 1-14 所示瞬间绕组的并联支路图

### 1.3.3 单波绕组

单波绕组的元件如图 1-13(b) 所示, 首末端之间的距离接近两个极距,  $y_k > y_1$ , 两个元件串联起来成波浪形, 故称波绕组。  $p$  个元件串联后, 其末尾应该落在起始换向片前 1 片的位置, 才能继续串联其余元件, 为此, 换向器节距必须满足以下关系:

$$p y_k = K - 1$$

换向器节距

$$y_k = \frac{K - 1}{p} = \text{整数} \quad (1-10)$$

合成节距

$$y = y_k$$

第二节距

$$y_2 = y - y_1$$

第一节距  $y_1$  的确定原则与单叠绕组相同。

下面亦以一例说明单波绕组的联接规律和特点。

一台直流电机:  $Z = S = K = 15, 2p = 4$  接成单波绕组。

#### 1. 计算节距

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon = \frac{15}{4} - \frac{3}{4} = 3$$

$$y = y_k = \frac{K - 1}{p} = \frac{15 - 1}{2} = 7$$

$$y_2 = y - y_1 = 7 - 3 = 4$$

#### 2. 绘制展开图

绘制单波绕组展开图的步骤与单叠绕组相同, 本例的展开图如图 1-17 所示。电刷在换向器表面上的位置也是在主磁极的中心线上。要注意的是因为本例的极距不是整数, 所以相邻主