

# 绪 论

## 一、电机在国民经济中的作用

在国民经济生产中，电机工业是机械工业的一个重要组成部分。电机是机电一体化中机和电的结合部分，是机电一体化的一个很重要的基础，电机被称为电气化的心脏。它对国民经济的发展有着重要的作用，并随着国民经济和科学技术的发展而不断发展。

电机的发展又与电能的发展紧密地联系在一起。电能是现今社会一种最主要的能源，是现代工业、农业、交通运输、科学技术和日常生活等各方面最常用的一种能源。这主要是由于它的生产、传输、分配、使用控制及能量转换较为方便。电机是与电能的生产、传输和使用有关的一种最重要的能量转换设备，它不仅是工业、农业和交通运输业的重要设备，而且也越来越广泛地应用于日常生活中的各类家电上。

电机、变压器是电力工业的主要设备之一。在发电厂，发电机将原始能源（如热力、水力、化学能、核能、风力、太阳能等），即一次能源转换为生产和生活中可使用的电能，又称二次能源。变电站的作用是经济地传输和分配电能。在远距离传输电能前，升压变压器把大型发电机输出的低压交流电转换成高压交流电；而在供给用户使用前，还必须把来自高压输电网的电能经过降压变压器降压后才能安全使用。由此可见，在电能的生产、传输和分配过程中，发电机和变压器起着重要的作用。

在电能的应用中，电动机也起着重要的作用。在机械工业、冶金工业、化学工业、交通运输及日常生活等各方面，电动机将电能转换成机械能，为各种工作机械提供动力。一个自动控制系统中往往会用到多个不同的电机（包括各种控制电机），一个现代化工厂拥有几百台至几万台电机是很平常的事。随着大功率半导体器件、大规模集成电路的发展和计算机技术的应用，电机的品种、质量和性能都有了进一步地提高，以全数字式的三相永磁同步电机伺服系统、三相异步电机伺服系统和直流电机伺服系统为代表的新型电机拖动系统的出现，带动了数控机床、工业机器人、交通运输、航空航天及家用电器等一系列高质量、高性能的以电机来拖动的机电一体化的高科技产品的迅速发展。综上所述，电机将在国民经济发展中发挥越来越重要的作用。

## 二、电机的发展概况

在电学和磁学分别发展的基础上，出现了电动机的雏形。从印刷工人出身的科学家法拉第发现载流导体在磁场内受力的现象起，一直到 1882 年，早期直流电机经过了在励磁、绕组、电枢结构上的不断完善及理论上不断完善的发展过程，励磁绕组由永磁改为电流励磁，他励改为自励；电枢由凸极改为环形，再发展到鼓形，后又改进为叠片铁心；绕组由集中到环形分布，后又发展到鼓形电枢绕组。大约在同一时期（1832 年），交流电机也出现了。但是直到 1870 年，由于直流输变电困难和直流电机的换向火花问题变得越来越突出，才促使交流电机有所发展。不同于直流电机的发展过程，交流电机的发展与旋转磁场理论的发展是

同步进行的。到 1891 年，和现代三相电力系统（由电机及变压器等组成）很相近的应用实例已制成。此后，交流三相制在电力工业中逐步占据主导地位，交流电机的理论、材料、工艺及性能发展异常迅猛，与此有关的电力工业（发电、输电、配电等）、机械加工工业、电镀电解、电焊等技术、自动化仪表、自控技术及通信技术等相继获得迅速发展。

20 世纪以来，由于工业、军工的需要和对电机内部电磁、发热等过程的理论研究的深入，加上电机新原理、新材料、新工艺的发展，使电机在很多方面突破了传统的概念。近几年来，国外结合科学技术的最新成就，已研制出一些新原理、新结构的电机，如利用“霍尔效应”相继研制出霍尔效应的自整角机、旋转变压器和霍尔效应无刷直流测速发电机；利用“压电逆效应”研制出压电直线步进电机，其步距可达到  $0.1\sim 5\ \mu\text{m}$ ；利用“介质极化”研制出驻极体电机；利用“磁性体的自旋再排列”研制出光电机。由此可见，电机的发展已经不再限于一般的电磁理论，而将与其他学科相互结合，相互促进，成为一门多学科互相渗透的边缘学科。

近几十年来，我国的电机工业同国民经济中的其他各部门一样，也得到了迅速的发展，建立了我国自己的电机工业体系，制定了电机的国家标准，并能制造各种类型的电机、变压器，以及成套的大、中型火力、水力发电设备，如  $30\text{MV}\cdot\text{A}$  的大型电力变压器等。

### 三、本课程的任务、要求和学习方式

通过本课程的学习，使学生在原来的基础上进一步全面了解各种交、直流电机（包括特种电机）和变压器的基本理论和运行性能；掌握各种电机和变压器的常见故障的分析、判断和处理，拓宽电机和变压器的相关知识，提高其分析、应用的综合能力，也为后续课程的学习，为今后从事电机和变压器设备的安装、维护、检修等工种，打下良好的基础。由于本课程包含的内容多，这里，提供几点学习方法供大家参考。

#### 1. 掌握分析问题的方法

在本课程中，所涉及的电机类型较多，如果将每一种电机作为一个独立的、新的内容来学，就会感觉到学习任务太重，如果在学习过程中能够掌握研究问题的方法，找出各类电机的共性及个性，就会学得轻松、应用自如。如三相异步电机的原理和变压器的原理有很多共同的部分，最后的数学模型也非常类似，只要掌握了分析问题的方法，就可较容易地掌握这两部分的内容。

#### 2. 要理解公式所表达的物理概念

本课程的公式较多，如果孤立地、单独地去记忆不同公式中所表达的各物理量之间的数量关系不是易事，必须理解公式所表达的物理概念。如直流电机的感应电动势公式  $E_a = C_e \Phi n$  和电磁转矩公式  $T_{em} = C_T \Phi I_a$ ，这两个公式看起来很简单，暂时记忆也较容易，而时间长了，很容易出错。如果理解了公式所表示的物理意义：感应电动势是导体在磁场中切割磁力线所产生的，必然与磁场和切割速度成正比；电磁转矩是载流导体在磁场的作用下所产生的，其大小必须与磁场的强弱和电流的大小成正比。这样就很容易记住公式中各物理量之间的相互关系了。

#### 3. 要理解课程的特性

本课程理论性和实践性均较强，考虑到学生已有一定的理论和实践知识，本教材从工程的视角，从使用与维修的角度叙述，注重物理概念，掌握电磁关系、机电能量转换关系，不涉及过多、过深的数学推导。学生在学习过程中，要注意把握学习重点。

# 第一章 直流电机

电机是用来进行机电能量转换的电气设备。直流电机的作用是将直流电能转换为机械能或者将机械能转换为直流电能。将直流电能转换为机械能的叫做直流电动机，将机械能转换为直流电能的叫做直流发电机。

直流电动机具有调速性能好、过载系数大、控制性能好等优点，在调速性能要求较高的场所，如在金属切削机床、轧钢机、电机车、造纸和纺织等设备上，直流电动机都得到较为广泛的应用。直流发电机主要用作各种直流电源。由于电力电子学的发展，直流发电机正在逐步被晶闸管整流装置所取代，因此，本章主要分析直流电动机的原理、结构和运行性能。

## § 1—1 直流电机的结构与工作原理

### 一、直流电机的结构

直流电机进行能量转换，必须有磁场以及与磁场耦合的线圈，磁场与线圈之间还必须有相对运动。因此，直流电机由静止部分和转动部分组成。静止部分称为定子，包括主磁极、换向极、电刷装置和机座等主要部件。转动部分称为转子。直流电机的转子通常称为电枢，它主要由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等部件组成。图 1—1 所示为直流电机的结构图。下面对直流电机的主要部件作简要介绍。

#### 1. 定子部分

(1) 主磁极 主磁极的作用是产生主磁场，以便电枢在此磁场中转动而产生感生电动势。主磁场有两种形式：永久磁铁和电磁铁。绝大部分直流电机采用电磁铁。电磁铁由主磁极铁心和励磁绕组组成，如图 1—2 所示。主磁极铁心一般由 1~1.5 mm 厚的钢板冲片叠压而成。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。主磁极总是成对出现的，各主磁极上的绕组连接时要能保证相邻磁极的极性按 N 极和 S 极依次排列。为了减少气隙中有效磁通的磁阻，改善气隙磁通密度的分布波形，磁极下的极掌（或称极靴）较极身宽，这样也可以使励磁绕组牢牢地套在磁极上。

(2) 换向极 换向极是用来改善直流电机换向的，减小电机运行时电刷与换向器之间可能产生的火花。换向极装在容量大于 1 kW 的直流电机的两主磁极之间，也是由换向极铁心

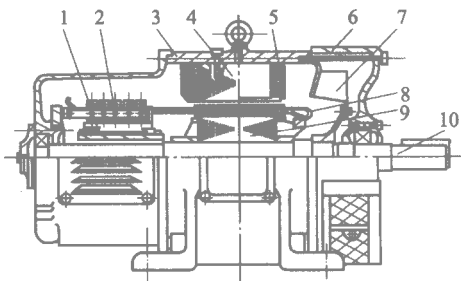


图 1—1 直流电机的结构

- 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 10—转轴

和换向极绕组组成，如图 1—3 所示。一般换向极铁心用整块钢板加工而成，也可用 1.5 mm 的钢板叠压而成。换向极绕组套在换向极铁心上，与电枢绕组串联。一般换向极的数量与主磁极相同，在小功率的直流电机中，也有所装置的换向极数为主磁极的一半，或不装换向极。

(3) 机座 电机定子部分的外壳称为机座。机座通常由铸钢或厚钢板焊成。它有两个作用，一是用来固定主磁极、换向极和端盖，并固定和支撑整个电机；二是作为电机磁路的一部分，构成磁极之间磁的通路。机座中有磁通经过的部分称为磁轭。

(4) 电刷装置 电刷的作用是将旋转的电枢与固定不动的外电路相连，把直流电压或直流电流引入或引出。因此，它与换向片既要有紧密的接触，又要有良好的相对滑动。电机中常用一套电刷装置来保证它的作用。电刷装置由电刷、弹簧、刷握、刷杆及刷杆座等组成。电刷是用石墨等制成的导电块，放置在刷盒内，用弹簧将它压紧在换向器上，刷握固定在刷杆上。容量大的电机，可在同一刷杆上并排安装一组刷握和电刷。一般刷杆数与主磁极数相等。由于电刷有正、负极之分，因此刷杆必须与刷杆座绝缘。电刷组在换向器表面应对称分布，刷杆座可与端盖或机座相连接。整个电刷装置可以移动，用以调整电刷在换向器上的位置。图 1—4 所示为电刷装置结构图。

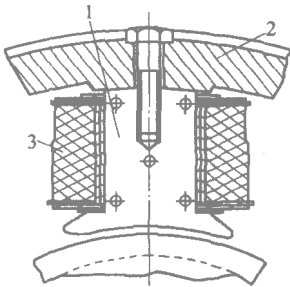


图 1—2 主磁极的结构  
1—主磁极铁心 2—机座  
3—励磁绕组

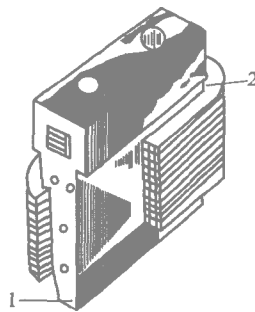


图 1—3 换向极的结构  
1—换向极铁心  
2—换向极绕组

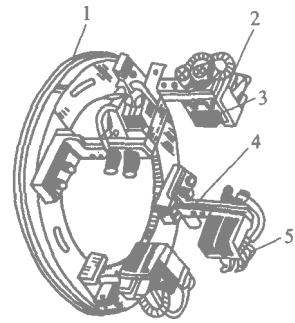


图 1—4 电刷装置的结构  
1—刷杆座 2—刷握 3—电刷  
4—刷杆 5—压力弹簧

## 2. 转子部分

(1) 电枢铁心 电枢铁心是主磁路的一部分，同时要安放电枢绕组。由于电机运行时，电枢与气隙磁场间有相对运动，铁心中也会产生感应电动势而出现涡流和磁滞损耗。为了减少损耗，电枢铁心通常由 0.5 mm 厚的表面绝缘的硅钢片经冲压叠装而成。冲片圆周外缘均匀地冲有许多齿和槽，槽内可安放电枢绕组，有的冲片上还冲有许多圆孔，以形成改善散热的轴向通风孔，图 1—5 所示为电枢铁心冲片的形状和电枢铁心主体图。

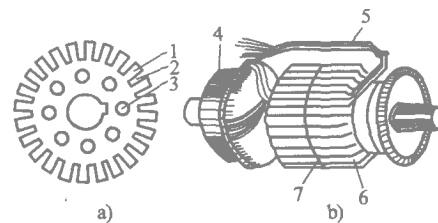


图 1—5 电枢铁心  
a) 电枢铁心冲片 b) 转子主体  
1—齿 2—槽 3—轴向通风孔 4—换向器  
5—电枢绕组元件 6—电枢铁心 7—径向通风道

电机容量较大时，电枢铁心的圆柱体还可分隔成几段，每段间隔 10 mm 左右，以形成径向的通风道。

(2) 电枢绕组 电枢绕组是直流电机电路的主要组成部分，它的作用是产生感应电动势或通过流过的电流产生电磁转矩，实现机电能量转换。电枢绕组由许多线圈按一定的规律连接而成。这种线圈通常用高强度聚酯漆包线绕制而成，绕制好的绕组或成型绕组放置在铁心槽内，放置在铁心槽内的直线部分在电机运转时将产生感应电动势，称为元件的有效部分，绕组元件的一条有效边嵌入某个槽中的上层，另一有效边则嵌入另一槽中的下层，如图 1—6 所示。在电枢槽两端把有效部分连接起来的部分称为端接部分，端接部分仅起连接作用，在电机运行过程中不产生感应电动势。绕组与铁心槽之间及上、下层有效边之间均绝缘，如图 1—7 所示。槽口处沿轴向打入绝缘竹片或用环氧酚醛玻璃布板制成的槽楔，将线圈压紧并防止它在运行时飞出。同样，端接线也要用玻璃带扎紧。线圈的两个端头按一定的规律焊接在换向片上。

(3) 换向器 换向器的作用是与电刷一起将直流电动机输入的直流电流转换成电枢绕组内的交变电流，或是将直流发电机电枢绕组中的交变电动势转换成输出的直流电压。

换向器是一个由许多燕尾状的梯形铜片间隔云母片绝缘排列而成的圆柱体。每片换向片一端有高出部分，上面铣有线槽，供电枢绕组引出端焊接用。所有换向片均放置在与它配合的具有燕尾槽的金属套筒内，然后用 V 形钢环和螺纹压圈将换向片和套筒紧固成一个整体。换向片组与套筒、V 形钢环之间均要用云母环绝缘，如图 1—8 所示。这样的换向器称为金属套筒式换向器。现代小型直流电机已广泛采用热压塑料代替金属套筒，这种塑料热压成型坚固的换向器，称为塑料换向器。

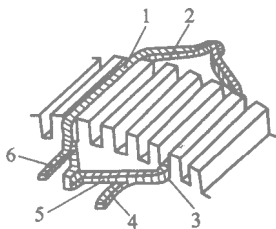


图 1—6 线圈在槽内的安放示意图

1—上层有效边 2、5—端接部分  
3—下层有效边 4—线圈尾端  
6—线圈首端

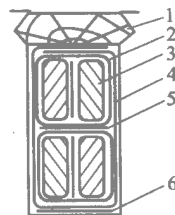


图 1—7 电枢槽内的绝缘

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

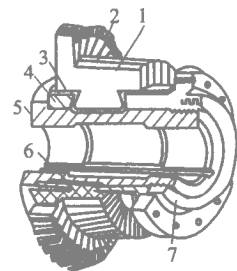


图 1—8 直流电机的换向器

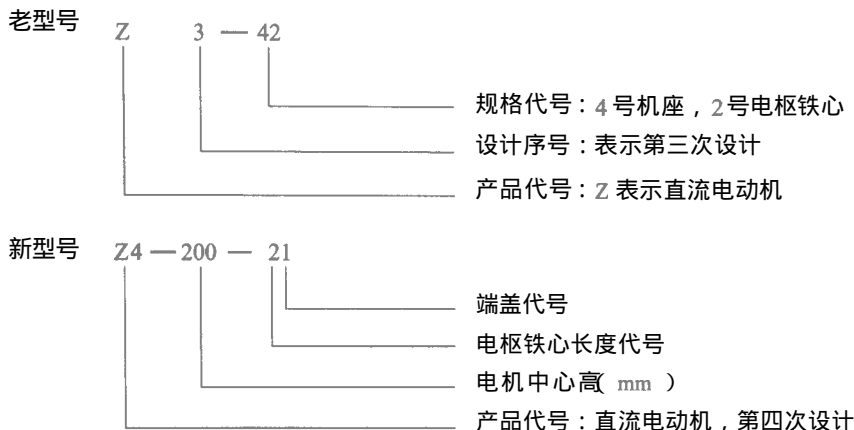
1—换向片 2—云母片  
3—燕尾槽云母套筒 4—V 形钢环  
5—钢套 6—绝缘套筒 7—螺纹压圈

## 二、直流电机的铭牌及连接方式

铭牌钉在电机机座的外表面上，上面标明电机的主要额定数据及电机产品数据，供使用者使用时参考。铭牌数据主要包括：电机型号、电机额定功率、额定电压、额定电流、额定转速和励磁电流及励磁方式等，此外还有电机的出产数据，如出厂编号、出厂日期等。

### 1. 电机型号

电机型号表示电机的结构和使用特点，国产电机的型号一般用大写的汉语拼音字母和阿拉伯数字表示，其格式为：第一部分字符用大写的汉语拼音表示产品代号；第二部分字符用阿拉伯数字表示设计序号；第三部分字符是机座代号，用阿拉伯数字表示；第四部分字符表示电枢铁心长度代号，用阿拉伯数字表示。现以老型号 Z3—42 及新型号 Z4—200—21 为例说明如下：



常见产品代号有：

Z系列：一般用途直流电动机。

ZJ系列：精密机床用直流电动机。

ZT系列：广调速直流电动机。

ZQ系列：直流牵引电动机。

ZH系列：船用直流电动机。

ZA系列：防爆安全型直流电动机。

ZKJ系列：挖掘机用直流电动机。

ZZJ系列：冶金起重直流电动机。

## 2. 额定功率 $P_N$

是指在额定条件下电机所能供给的功率。额定功率对电动机和发电机的含义是不同的。对于电动机额定功率是指电动机轴上输出的额定机械功率；对于发电机额定功率是指电刷间输出的额定电功率。额定功率的单位为 kW。

## 3. 额定电压 $U_N$

是指额定运行条件下，电机出线端的工作电压。对于电动机，是指输入额定电压；对于发电机，是指输出额定电压。额定电压的单位为 V 或 kV。

## 4. 额定电流 $I_N$

是指电机在额定电压情况下，运行于额定功率的电流。对于电动机，是指在额定运行时从电源输入的电流；对于发电机，是指额定运行时供给负载的输出电流。额定电流的单位为 A 或 kA。

## 5 额定转速 $n_N$

是指对应于额定电压、额定电流，电机运行于额定功率时所对应的转速。额定转速的单位为 r/min。

## 6. 额定励磁电流 $I_N$

是指对应于额定电压、额定电流、额定转速及额定功率时的励磁电流。

## 7. 励磁方式

是指直流电机的励磁线圈与其电枢线圈的连接方式。根据电枢线圈与励磁线圈的连接方式不同，直流电机可分为他励式和自励式两种，自励式又可分为并励、串励、复励三种。各励磁方式如图 1—9 所示。

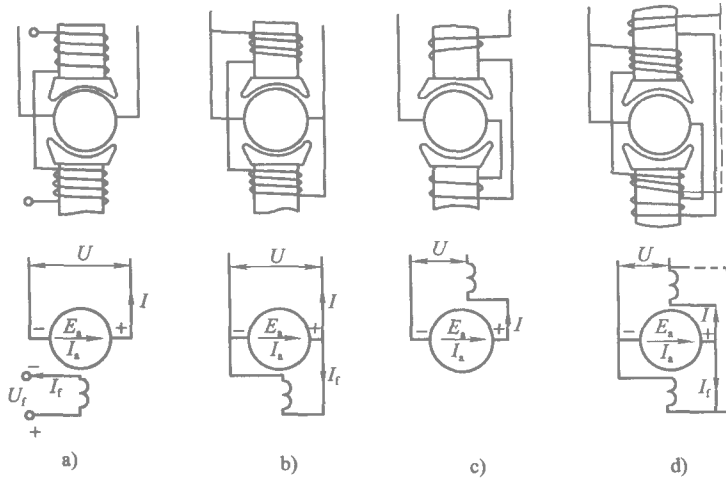


图 1—9 直流电机不同励磁方式的电路示意图

a) 他励式 b) 并励式 c) 串励式 d) 复励式

### 三、直流电机的工作原理

#### 1. 直流发电机的工作原理

直流发电机的工作原理是基于电磁感应原理，在磁感应强度为  $B_x$  的磁场中，一根长度为  $l$  的导体以匀速  $v$  作垂直切割磁力线的运动时，在导体中产生感应电动势，其值的大小按法拉第定律来计算，即

$$e = B_x lv \quad (1-1)$$

图 1—10 为直流发电机的工作原理模型。图中 N、S 是一对固定不动的磁极（可以是永久磁铁，也可以是电磁铁）， $abcd$  是安装在可以转动的圆柱体（导磁材料制成的）上的一个线圈（整个转动部分称为转子或电枢），线圈两端分别接到两个相互绝缘的半圆形铜环（称为换向片，这两个换向片就构成了最简单的换向器）1 和 2 上，换向片分别与固定不动的电刷 A 和 B 保持滑动接触，这样，旋转着的线圈可以通过换向片、电刷与外电路接通。

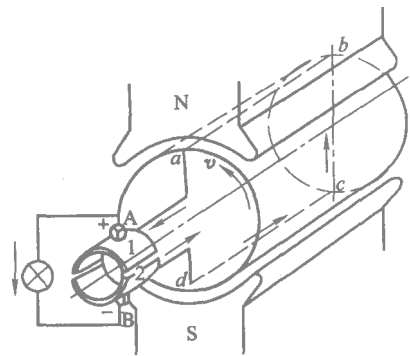


图 1—10 直流发电机的工作原理模型

当原动机拖着电枢以一定的速度在磁场中逆时针旋转时，根据电磁感应原理，线圈边  $ab$  和  $cd$  切割磁力线产生感应电动势，其方向用右手定则确定。如图 1—10 所示，线圈的  $cd$  边处于 S 极时，产生的感应电动势从  $d$  指向  $c$ 。从整个线圈来看，电动势的方向为  $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ；反之，当  $ab$  边转到 S 极、 $cd$  边转到 N 极时，每个边的感应电动势方向都要随之改变，于是，整个线圈的感应电动势方向变为  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。所以线圈中的感应电动势是交变的。假设磁场在电枢圆周上按正弦规律分布，即  $B_x = B_m \sin \alpha$ ，则

$$e = B_x lv = B_m l v \sin \alpha \quad (1-2)$$

表明线圈中的感应电动势按正弦规律变化。

那么，如何在电刷上得到直流电动势呢？这就要靠换向器的作用了。如图 1—10 所示，瞬间线圈的  $ab$  边处于 N 极时，电动势的方向从  $b$  指向  $a$  引到电刷 A，所以电刷 A 的极性为正。当线圈转过  $180^\circ$ ，线圈  $ab$  边与  $cd$  边互换位置，使  $cd$  边处于 N 极时，于是  $cd$  边与电刷 A 接触，其电动势的方向是从  $c$  指向  $d$  引到电刷 A，电刷 A 的极性仍为正。同理可分析出电刷 B 的极性为负。进一步观察可以发现，电刷 A 总是与旋转到 N 极的导体接触，所以电刷 A 总是正极性；而电刷 B 总是与旋转到 S 极的导体接触，所以电刷 B 总是负极性。故在电刷 A、B 之间得到如图 1—11 所示的直流电动势。

由右手定则可知，决定感应电动势方向的因素有两个：一是导体运动方向（电枢转向），二是磁场极性。所以，改变磁场的极性也可使直流发电机电刷两端输出的电动势极性改变。

显然，图 1—11 所示的直流发电机模型的输出电动势波形脉动幅度太大。如果在电枢圆周上均匀分布 4 个线圈，这些线圈的出线端接在 4 个换向片上，并构成闭合回路，则电刷两端的电动势为 4 个线圈电动势的叠加，其波形如图 1—12 所示，可见电动势的脉动幅度已大为减小。依次类推，电枢上分布的线圈越多，电动势的脉动幅度越小。所以，在实际发电机中，有许多线圈均匀分布在发电机转子表面，它们按一定规律连接起来，构成电枢绕组（详见本章第二节）。

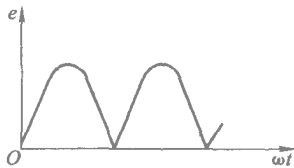


图 1—11 一个线圈时电刷两端电动势的波形

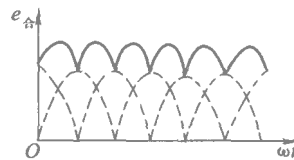


图 1—12 4 个线圈均匀分布时电刷两端的电动势波形

## 2. 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是基于电磁力定律，若磁场  $B_x$  与导体互相垂直，且导体中通以电流  $i$ ，则作用于载导体上的电磁力  $f$  为

$$f = B_x li \quad (1-3)$$

图 1—13 是直流电动机的工作原理模型。电刷 A、B 两端加直流电压  $U$ ，电流从电源的正极流出，经过电刷 A 与换向片 1 而流入电动机线圈，电流方向为  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ，然后再经过换向片 2 与电刷 B 流回电源的负极。根据电磁力定律，线圈边  $ab$  与  $cd$  在磁场中分别受到电磁力的作用，其方向可用左手定则确定，如图 1—13 所示。此电磁力形成的电磁转矩，使电动机逆时针方向旋转。当线圈边  $ab$  转到 S 极、 $cd$  转到 N 极时，流经线圈的电流方向必须改变，这样导体所受的电磁力方向才能不变，从而保持电动机转向不变。

如何才能使导体中的电流方向改变呢？这个任务将由换向器来完成。从图 1—13 中可以看出，原来电刷 A 通过换向片 1 与转到 N 极的导体  $ab$  相连；现在电刷 A 通过换向片 2 与转到 N 极的导体  $cd$  相连，电

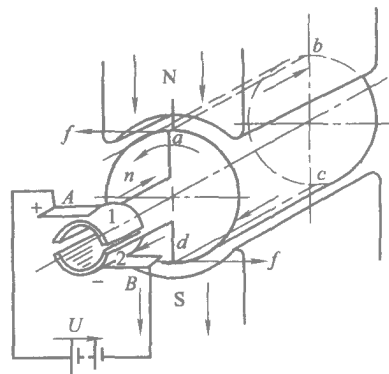


图 1—13 直流电动机的工作原理模型

刷B 通过换向片 1 与转到 S 极的导体  $ab$  相连。线圈中的电流方向改为  $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ，用左手定则判断电磁力和电磁转矩的方向未变，电枢仍逆时针方向旋转。

综上所述可知，不论是直流发电机还是直流电动机，换向器可以使正电刷 A 始终与转到 N 极的导体相连，负电刷 B 始终与转到 S 极的导体相连，故电刷之间的电压是直流电，而线圈内部的电流则是交变的，所以换向器是直流电机中换向的关键部件。通过换向器和电刷的作用，把直流发电机线圈中的交变电动势整流成电刷间方向不变的直流电动势；把直流电动机电刷间的直流电流变成线圈内的交变电流，确保电动机以恒定方向旋转。

## § 1—2 直流电机的电枢绕组

在实际电机中，电枢绕组是由许多分布在转子表面的绕组元件（线圈）按一定的规律连接而成的。根据连接规律的不同，电枢绕组可分为单叠绕组、单波绕组、复叠绕组、复波绕组及混合绕组 5 种形式。

电枢绕组是一个很重要的部件，其结构和制造工艺复杂，电机中绝大部分的铜和绝缘材料都用在电枢绕组上，它是运行中最容易发生故障的部位。直流电机对电枢绕组的要求是：在保证产生足够大的感生电动势和电磁转矩的前提下，要尽可能地节约有色金属和绝缘材料，并且要求结构简单，运行可靠，散热性良好。

### 一、电枢绕组的基本知识

电枢绕组是由结构和形状相同的绕组元件（线圈）组成，线圈有单匝、多匝之分，分别如图 1—14a、图 1—14b 所示。不论单匝或多匝线圈，它的两个边分别放在不同的槽中（见图 1—6），用来产生电动势和电磁转矩，故称为线圈有效边。而处于槽外的部分，仅起连接作用，称为端接部分。线圈的两个端头称为首端和尾端。电枢绕组大都为双层绕组，将一个线圈的有效边放在槽的上层，称为上层边（用实线表示）；另一个有效边放在有一定距离的另一槽的下层，称为下层边（用虚线表示）。

电枢绕组的线圈数和换向片数、槽数之间存在相应的关系：因为每一个线圈有两个边，而每一换向片总是把一个线圈的尾端与紧跟的另一个线圈的首端焊接在一起，因此，线圈数与换向片数相等；如果电枢铁心的每个槽内只安排一个上层边和一个下层边（称为一个单元槽），这样，线圈数又与单元槽数相等。但是，有些电机在一个槽里的上层和下层往往都并列楔放着多个线圈有效边。以图 1—7 为例，槽中上、下层各楔放着两个线圈的有效边，这样，一个槽实际起着两个单元槽的作用，称之为一个实槽包含两个虚槽，即实槽中单元槽数  $u=2$ 。由此可知，一台直流电机的线圈数  $S$  与换向片数  $K$ 、虚槽数  $Z_v$ 、实槽  $Z$ 、每槽单元槽数  $u$  之间有如下关系：

$$S = K = Z_v = uZ \quad (1-4)$$

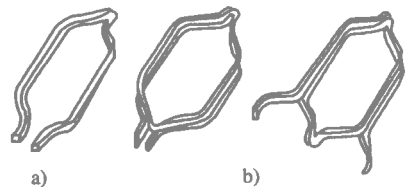


图 1—14 线圈的结构  
a) 单匝线圈 b) 多匝线圈

为了正确地把各元件安放入电枢槽内，并且和相应的换向片按一定的规律连接起来，需要先了解绕组的基本术语。

### 1. 极距 $\tau$

所谓极距，就是一个磁极在电枢圆周所占的弧长，如果用字母  $\tau$  来表示极距，用  $D_a$  表示电枢直径， $p$  表示磁极对数，则

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}$$

通常用一个磁极在电枢表面所占的虚槽数来表示极距，即

$$\tau = \frac{Z_u}{2p} \quad (1-5)$$

### 2. 绕组节距

绕组元件在槽内安放位置及其与换向片之间的连接规律，由以下 4 种节距确定：

(1) 第一节距  $y_1$  第一节距是指一个线圈两个有效边之间在电枢表面上的跨距，以虚槽数表示，如图 1—15 所示。由于线圈边要放入槽内，所以  $y_1$  应是整数。而为了让绕组能感生出最大电动势，应使  $y_1$  接近或等于极距  $\tau$ ，即

$$y_1 = \frac{Z_u}{2p} + \epsilon \quad (1-6)$$

式中， $\epsilon$  是使  $y_1$  凑成整数的一个小数。若  $\epsilon < 0$ ，则  $y_1 < \tau$ ，称为短距绕组；若  $\epsilon = 0$ ，则  $y_1 = \tau$ ，称为整距绕组；若  $\epsilon > 0$ ，则  $y_1 > \tau$ ，称为长距绕组。为了节省铜线及工艺上方便，一般采用短距或整距绕组。

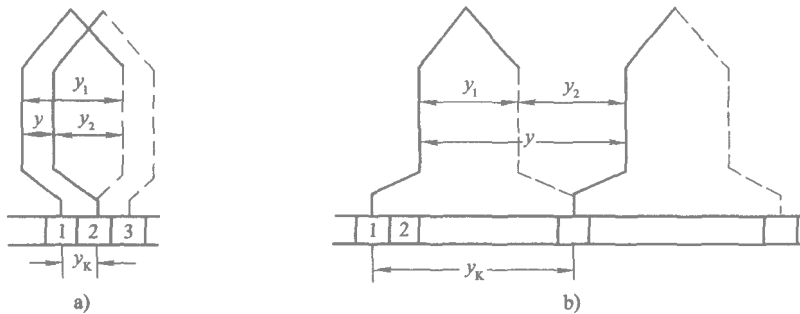


图 1—15 绕组画法和节距

a) 单叠绕组 b) 单波绕组

(2) 第二节距  $y_2$  它是指相串联的两个相邻线圈中，第一个线圈的下层边与第二个线圈的上层边之间的距离。 $y_2$  用虚槽数表示，如图 1—15 所示。

(3) 换向片节距  $y_k$  它是指线圈的两端所连接的换向片之间的距离，用该线圈跨过的换向片数来表示，如图 1—15 所示。

(4) 合成节距  $y$  它是指相串联的两个相邻线圈对应的有效边之间的距离，用虚槽数来表示。从图 1—15 可知：

$$y = y_k = \begin{cases} y_1 - y_2 & (\text{叠绕组}) \\ y_1 + y_2 & (\text{波绕组}) \end{cases}$$

## 二、叠绕组

叠绕组分为单叠绕组和复叠绕组。它们因其端部依次重叠排列而称为叠绕组。

### 1. 单叠绕组

单叠绕组的特点是相邻元件（线圈）依次叠压时互相错开一个虚槽，即合成节距和换向节距都等于 1。

$$y = y_k = \begin{cases} +1 & \text{右行绕组} \\ -1 & \text{左行绕组} \end{cases}$$

一般情况下采用右行绕组，如图 1—15a 所示，因为右行绕组端接部分较短，可节省铜材。下面举例说明单叠绕组的连接规律。

例 1—1 已知一台直流发电机， $2p=4$ ， $S=K=Z_u=16$ ，画出它的右行单叠绕组展开图（绕组展开图就是将电枢从某齿中间沿轴线剖开而展成一个平面绕组连接图）。

解：（1）计算数据

$$\text{极距} \quad \tau = \frac{Z_u}{2p} = \frac{16}{4} = 4$$

$$\text{第一节距} \quad y_1 = \frac{Z_u}{2p} + \epsilon = \frac{16}{4} + 0 = 4$$

$$\text{合成节距} \quad y = y_k = 1 \text{ (右行绕组)}$$

$$\text{第二节距} \quad y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$$

（2）画绕组展开图

1) 画 16 根等长等距且平行的实、虚线，实线代表各上层线圈边，虚线代表各下层线圈边，且标上从 1~16 的编号，如图 1—16 所示。一般来说，上层线圈边的编号代表该线圈的编号，亦代表该槽的编号，而下层线圈边不再给以编号。

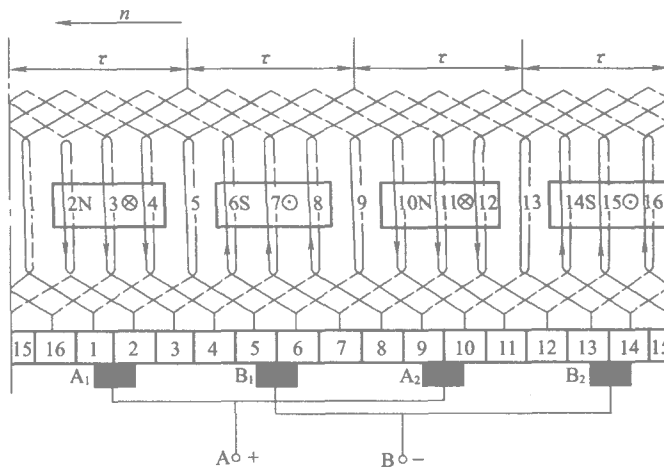


图 1—16  $Z_u=16$ ， $2p=4$  的单叠绕组展开图

2) 放置磁极，取磁极宽度约为  $0.7\tau$ ，且均匀对称分布，并标出相应的极性 N、S。假设磁极处于展开图的上方，因此 N 极的磁通指向纸内，而 S 极的磁通方向则相反。

3) 画 16 个与单元槽等距的小方块，代表换向片，并标上号码。注意：换向片编号应与所接线圈编号相同（见图 1—16）。

4) 将线圈连接成绕组，由第一换向片经第一槽（第一个线圈上层边），根据  $y_1=4$ ，则连到第五槽下层线圈边（虚线），然后回到第二换向片上，以此类推，便构成如图 1—16 所示的展开图。它们的连接次序如图 1—17 所示，从第一个线圈的上层边开始，绕电枢一周

后，把所有线圈串联起来，最后又回到第一线圈的上层边，构成一个闭合回路。

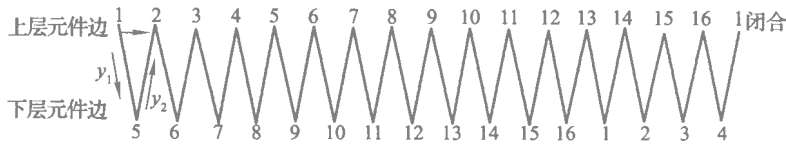


图 1—17 单叠绕组连接次序表

5) 安放电刷，电刷分布的原则是正负电刷间得到最大的感应电动势，或者说，每一电刷所短接的线圈中感应电动势应最小。在展开图上看，对称线圈的电刷应放在磁极轴线上，它所短接的线圈的两个有效边都处在磁极间的几何中性线上。电刷杆数应与磁极数相等。

6) 设定电枢旋转方向，通过右手定则画出有效边中电动势的方向。根据电动势方向判断电刷正负极性，并把同极性电刷并联引出，作为电源输出端。

以上的直流电机绕组展开图能清楚地表达电枢绕组在电枢圆周的分布规律，有时为了看清电刷两端的电动势与电枢各绕组电动势及电枢总电流与各支路电流的关系，常常用并联支路图来说明问题。如图 1—18 所示，图中每个元件的电动势等于上、下层元件边电动势之和，处于每一极面的上层元件边和相邻极面内的下层元件边组成一条支路；元件 2, 3, 4 组成

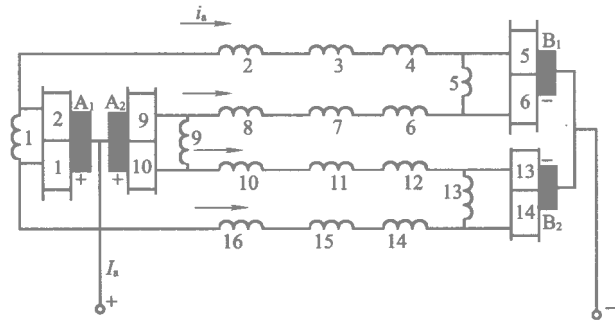


图 1—18 单叠绕组并联支路图

一条支路，元件 6, 7, 8 组成另一条支路；同样，元件 10, 11, 12 和 14, 15, 16 分别组成两条支路，这 4 条支路连同被电刷短路元件 1, 5, 9, 13 构成一个闭合回路。

从电枢绕组的并联支路图可看出单叠绕组的特点：

绕组将同一磁极下相邻的元件串联起来构成一条支路，所以对应一个磁极就有一条支路，即

$$a = p$$

式中  $p$ ——磁极对数；  
 $a$ ——支路对数。

为了获得最大电动势，电刷应放在磁极轴线上。这样也可以使被电刷短路的线圈电动势尽可能小。

单叠绕组的支路电动势由电刷引出，所以电刷数必定等于支路数，也等于磁极数。

若设支路电流为  $i_a$ ，则总电流  $I_a = 2ai_a$ 。

⑤ 电枢电动势等于支路电动势，即  $E_a = e_a$ 。

## 2. 复叠绕组

当叠绕组的节距  $y = y_k = |\pm m| > 1$ ，就是复叠绕组 ( $m$  为正整数)，也可分为左行 ( $y_k = -m$ ) 和右行 ( $y_k = +m$ ) 两类，它的并联支路数是单叠绕组的  $m$  倍。例如， $m=2$  为双叠绕组，它的并联支路数为  $2 \times 2p$ ，因为其并联支路数多，故适用于大电流、低电压的直

流电机。现以双叠绕组为例说明其连接规律。

例 1—2 已知一台直流电动机， $2p=4$ ， $S=K=Z=18$ ， $m=2$ ，绘制绕组展开图。

解：(1) 节距计算

$$y_1 = \frac{Z}{2p} + \epsilon = \frac{18}{4} - \frac{1}{2} = 4$$

$$y = y_K = m = 2$$

$$y_2 = y_1 - y = 4 - 2 = 2$$

(2) 绘制双叠绕组展开图，如图 1—19。

该例中  $K/y_K$  有公约数。而当  $K$  为奇数时， $K/y_K$  无公约数，这时，双叠绕组绕行一周仅一个闭路，称为单闭路双叠绕组。复叠绕组理论上  $m$  可以为 3，但实际上多用  $m=2$ 。

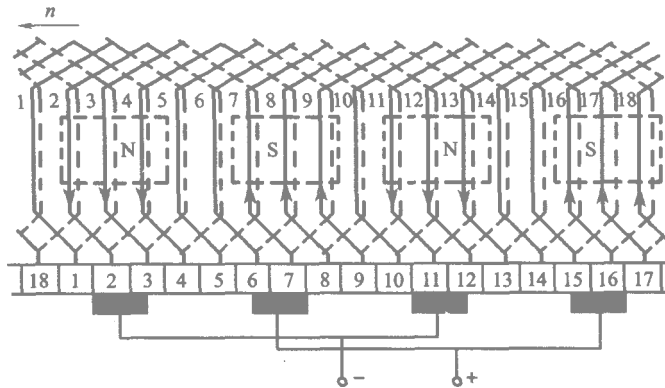


图 1—19 双闭路双叠绕组展开图

### 三、波绕组

波绕组分单波绕组和复波绕组。它们的共同特点是元件两端所连的换向片相隔较远，相串联的两个元件相距约两个极距，连接起来的元件像波浪起伏一样，故称波绕组。

#### 1. 单波绕组

单波绕组是直流电枢绕组的另一种基本形式，它的连接规律与单叠绕组不同。在单叠绕组中，每个元件都是与相邻的元件相连接，而单波绕组的每个元件是与相距约两个极距的元件相连接，即是与相邻的一对磁极下所处磁场位置相近的元件相连接，如图 1—15b 所示。

单波绕组的绕组节距也分为第一节距、第二节距、合成节距、换向器节距等。它们的定义和单叠绕组的节距定义相同。

第一节距  $y_1$  因为与元件连接方式无关，所以单波绕组的第一节距  $y_1$  的计算，与单叠绕组相同，即

$$y_1 = \frac{Z_u}{2p} + \epsilon$$

在单波绕组中合成节距  $y$  等于换向器节距依然成立，但因为单波绕组的连接方法与单叠绕组不同，所以计算公式也不一样。前面已经指出，合成节距  $y$  或换向器节距  $y_K$  是反映不同形式绕组的一个重要标志，下面将根据对单波绕组换向器节距计算公式的推导来进一步理解单波绕组的连接规律。因为单波绕组每连接一个元件就约前进了一对极距的距离，若电机有  $p$  对极，则连接了  $p$  个元件就沿电枢前进了一周，根据换向器节距的定义，元件将跨

过  $py$  个换向片，但不能回到起始的换向片上，否则绕了一周后，就自行闭合，无法再连接其他元件。所谓单波绕组就是指当连接了  $p$  个元件后，第  $p$  个元件的末端应落在与起始换向片相邻的换向片上，即

$$py_k = K \pm 1 \begin{cases} +1 \text{ (右行绕组)} \\ -1 \text{ (左行绕组)} \end{cases} \quad (1-7)$$

式中  $K$ ——换向片数。

若取  $py_k = K + 1$ ，表示绕完一周后，落在起始换向片右边的换向片上，称为单波右行，这时端接部分交叉，一般不采用。反之，若取  $py_k = K - 1$ ，表示绕完一周后，落在起始换向片左边的换向片上，称为单波左行。

由式 (1-7) 可得

$$y = y_k = \frac{K \pm 1}{p}$$

第二节距

$$y_2 = y - y_1$$

现举例说明单波绕组的连接。

例 1-3 设直流电动机， $2p=4$ ， $S=K=Z_u=15$ ，试作单波左行绕组展开图。

解：(1) 计算节距

$$y_1 = \frac{Z_u}{2p} + \epsilon = \frac{15}{4} - \frac{3}{4} = 3$$

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

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

(2) 作绕组展开图

作图的过程与单叠绕组的相仿，画出 15 个槽和换向片，并进行编号。将 1 号元件的上层边放在 1 号槽内（实线）并与 1 号换向片相连，1 号元件的下层边放在第四号（ $1+y_1=4$ ）槽内（虚线）并与第 8 号（ $1+y_k=8$ ）换向片相连，作图时同样应使元件左右对称。与 1 号元件相连的元件的上层边应在第 8 号（ $1+y=8$ ）槽内，与 8 号换向片相连，下层边在第 11 号（ $8+y_1=11$ ）槽内，并与第 15 号（ $8+y=15$ ）换向片相连。因为  $p=2$ ，所以绕了两个元件之后，就沿电枢前进了约一周，回到起始换向片的左边的换向片上。以此类推，最后连成一个闭合回路，如图 1-20 所示。绕组元件的连接顺序见图 1-21。

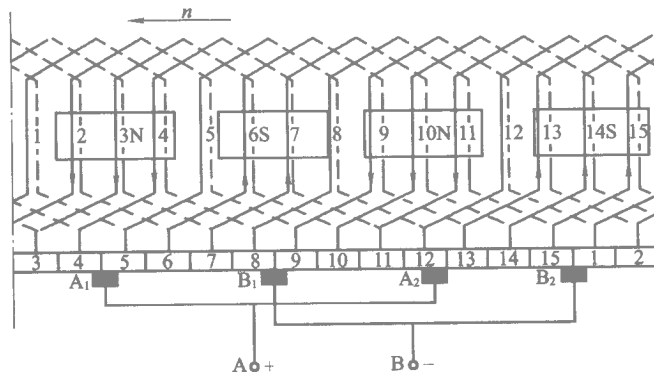


图 1-20 单波左行绕组的展开图

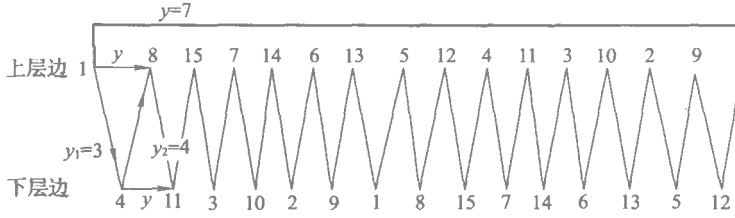


图 1—21 单波绕组连接次序表

(3) 放置磁极与电刷

因  $2p=4$ ，将 4 个磁极均匀分布。当采用对称元件时，电刷位置应在磁极的轴线上，依次为  $A_1, B_1, A_2, B_2$ 。

把图 1—20 所示瞬间的各元件连接情况与电刷的关系整理、排列，可画出图 1—22 的单波绕组并联支路图。

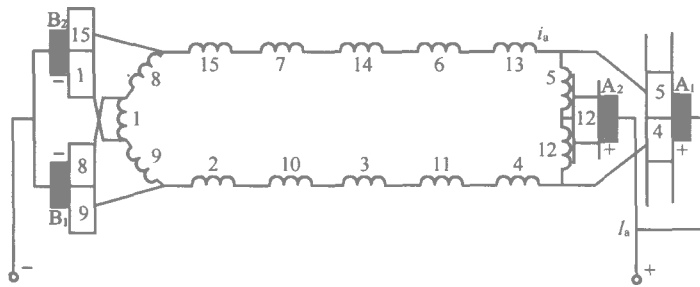


图 1—22 单波绕组并联支路图

由此可见，单波绕组具有以下特点：

同极性下各元件串联起来组成一个支路，支路对数  $a=1$ ，与磁极对数无关。

当元件的几何形状对称时，电刷在换向器表面上的位置对准主磁极中性线，支路电动势最大（即正负电刷间电动势最大）。

电刷数等于磁极数（采用全额电刷）。

电枢电动势等于支路感应电动势。

电枢电流等于两条支路电流之和，即  $I_a = 2i_a$ 。

2. 复波绕组

在波绕组中，如果  $p$  个绕组元件串联绕电枢一周后，不是回到与起始换向片相邻的换向片上，而是回到与起始换向片相距  $m$  个换向片的地方，这种绕组就叫做复波绕组，它的并联支路数是单波绕组的  $m$  倍。例如， $m=2$  叫做双波绕组，它有  $2 \times 2 = 4$  条并联支路数，即  $a=m$ 。

那么

$$py_K = K \pm m$$

即

$$y_K = \frac{K \pm m}{p}$$

下面举例说明双波绕组的连接。

例 1—4  $p=2, Z=S=K=18$  试绘出  $m=2$  的双波绕组的展开图。

解：(1) 计算节距

$$y_1 = \frac{Z}{2p} + \epsilon = \frac{18}{4} - \frac{2}{4} = 4$$

$$y = y_k = \frac{K \pm m}{p} = \frac{18 - 2}{2} = 8$$

$$y_2 = y - y_1 = 8 - 4 = 4$$

## (2) 绘制双波绕组展开图

如图 1—23 所示, 连接奇数换向片的元件和连接偶数换向片的元件, 分别各自形成独立闭路, 即这种绕组在电枢中有两组并联的回路, 故称为双闭路双波绕组。

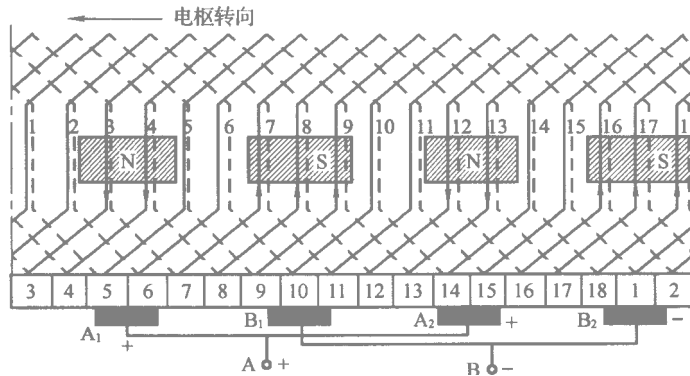


图 1—23 双闭路双波绕组展开图

以上简单介绍了直流电机的叠绕组和波绕组。从上面分析的单叠与单波绕组来看, 当电机的极对数、元件数以及导体截面积相同的情况下, 单叠绕组并联支路数多, 每个支路里的元件数少, 则支路合成感应电动势较低; 单叠绕组并联支路数多, 所允许通过的总电枢电流就大, 因此单叠绕组适合用于低电压、大电流的直流电机。而单波绕组, 支路对数与主磁极对数无关, 即永远等于 1, 每个支路里含的元件数越多, 支路合成感应电动势越高。由于并联支路少, 在其支路电流与单叠绕组支路电流相同的情况下, 单波绕组能允许通过的总电枢电流较小, 所以单波绕组适用于较高电压、较小电枢电流的直流电机。

混合绕组由一套波绕组和一套叠绕组复合组成, 由于它的叠元件和波元件合在一起时形如蛙, 故又称蛙形绕组。它的连接规律在此就不作介绍了, 相关内容可参阅其他电机学书籍。

## 四、均压线

电枢绕组是由几个并联支路组成的。由于绕组是有规律的连接, 如按其感应电动势同一方向处于同一极性下相应位置的导体串联规律连接, 当电机在磁路对称, 各元件一致性好, 且包括电刷接触电阻在内的各支路电阻相同时, 电枢电流是均匀分配在各支路中的。此时, 各支路有相同的电阻和电动势, 称为对称绕组。但如果由于某种原因, 造成各支路电流不均匀分布, 这样会增加损耗、导致温升、恶化换向、降低效率等。为此, 在容量较大的电机中, 在电枢绕组中理论上的等电位点采用“均压连接”或称“均压线”, 所有  $a > 1$  的绕组, 除蛙形绕组外, 均采用低电阻的均压线, 以获得满意的换向条件。

均压线按其作用分为两类: 一类用以改善电机磁场不对称, 称为甲种均压线, 一般用于单叠绕组, 如图 1—24a 所示; 另一类用于保证绕组各并联支路电阻相等, 称为乙种均压线,

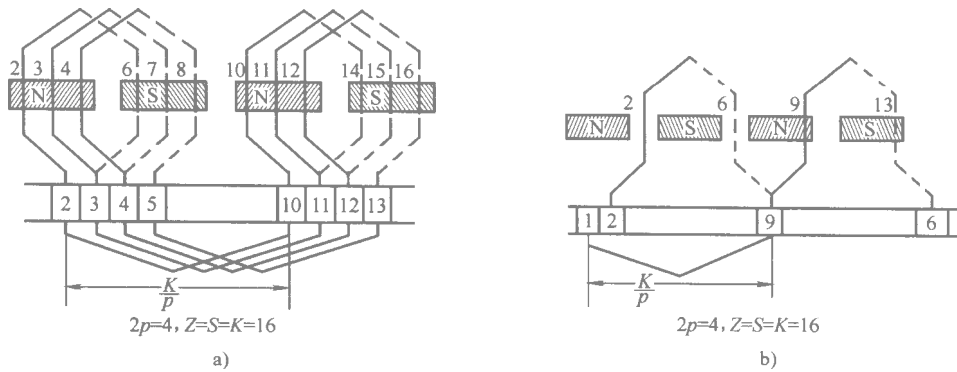


图 1—24 均压连接  
a) 甲种均压连接 b) 乙种均压连接

一般用于多重路绕组的各个重路之间，如图 1—24b 所示。

均压线一般都装在换向器端，也可装在非换向器的绕组端接部分。但双叠绕组的乙种均压连接因要穿过铁心而较复杂。一般用  $K/Z$  根全额均压连接，即所有等位点相应连接起来。这仅用于某些大型和换向困难的电机，对于一般中小型电机，可采用  $Z/2$  根均压线。均压线截面通常在电枢绕组导线截面的 20%~50% 范围内。

## § 1—3 直流电机的电枢感应电动势和电磁转矩

直流电机运行时，其电枢中产生电磁转矩和感应电动势。当直流电机作为电动机运行时，电磁转矩为拖动转矩，通过电机轴带动负载，电枢感应电动势为反向电动势，与电枢所加外电压相平衡；当其作为发电机运行时，电磁转矩为制动转矩，电枢感应电动势为正向电动势。

### 一、电枢绕组的感应电动势

不论是电动机还是发电机，也不论电机是空载运行还是负载运行，只要电枢在气隙磁场中旋转，电枢绕组的每根导体就会因切割气隙磁通而产生感应电动势。通常所说的电枢电动势，就是指正、负电刷之间的感应电动势。

由电枢绕组的并联支路图可知，正、负电刷之间的电动势等于绕组一条支路中各导体的感应电动势之和。这些导体分布在电枢槽里，因而它们在气隙磁场中也就处在不同的位置。电枢旋转时，每个导体切割的磁通密度不一样，所以它们产生的感应电动势的大小也不一样。在不同瞬间，同一导体中感应电动势的数值也不同。为了计算一条支路的总电动势，可先求出每根导体感应电动势平均值的大小。设导体在电枢表面均匀分布，图 1—25 表示一个极距内气隙磁通密度沿电枢表面的分布曲线，气隙磁通密度的平均值为  $B_{av}$ ，电枢表面的线速度为  $v$ ，则每根导体感应电动势的平均值为

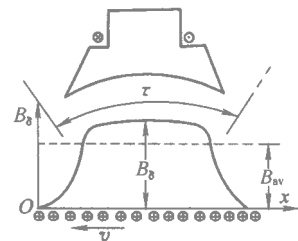


图 1—25 空载气隙磁通密度分布曲线