

全国农业广播电视学校教材

# 电机电气控制与供电

工程类专业

中央农业广播电视学校 组编

中国农业出版社

编 者 解海滨 李国瑞 李丽英  
审 稿 者 李丽英 王建平  
责任教师 邵明旭

## 编写说明

由中央农业广播电视学校组织编写的全国农业广播电视学校工程类专业文字教材,包括《机械制图》、《机械基础》、《机械制造基础》、《机电修理》、《汽车构造与维修》、《拖拉机》、《农业机械》、《农机管理》、《电机电气控制与供电》、《电工基础》、《电子技术基础》、《电机及其应用》、《农村电力网》、《农村变电站》、《农电管理》、《电工维护安装技术》等,全套共16册。

本套文字教材根据中央农业广播电视学校工程类中等专业指导性教学计划编写,力求使学员达到中等专业教育要求掌握的基本理论、基本知识和基本技能,解决农业工程中的实际问题,为农业经济建设培养应用型中等专业技术人才。

为适应广播电视教学特点,尽量做到文字通俗易懂,且安排了较多的插图和表格,各章后附有本章内容摘要和复习思考题,书后附复习思考题答案要点和实验实习指导;配合这套文字教材制作有录像、录音教材,并编写了教学辅导材料供教学使用。

本套教材由中央农业广播电视学校张博文、邵明旭任责任教师,负责具体组织编写并按照广播电视学校教学特点对教材进行审定。

《电机电气控制与供电》是专门为中央农业广播电视学校中等工程类专业编写的专业基础课教材。本教材主要讲述了交直流电机、变压器的结构、原理、特性及其使用,常用的低压电器和基本控制环节及有关供电等方面的内容。本教材由解海滨、李国瑞同志编写第一至第六章、第八至十二章,李丽英同志编写第七章,李丽英、王建平同志审稿。

热诚希望广大读者对教材中不妥之处提出宝贵意见,以期进一步修订和完善。

中央农业广播电视学校

1997年7月

# 目 录

## 第一篇 电 机

第一章 直流电机	1
第一节 直流电机的基本工作原理	1
第二节 直流电机的构造	3
第三节 直流电机的电枢绕组	5
第四节 电枢反应与换向	11
第五节 直流电机的分类和直流并励发电机	14
第六节 直流电动机	17
复习题	21
内容提要	22
第二章 变压器	23
第一节 单相变压器的工作原理	23
第二节 变压器的构造和铭牌	25
第三节 三相变压器	28
第四节 三相变压器的连接	31
第五节 三相变压器的并联运行和容量选择	36
第六节 特种变压器	38
复习题	40
内容提要	41
第三章 交流异步电动机	42
第一节 异步电动机的种类和构造	42
第二节 异步电动机的工作原理	44
第三节 异步电动机的特性	48
第四节 异步电动机的起动、调速和使用	49
第五节 单相异步电动机	54
复习题	57
内容提要	57
第四章 同步电机	58
第一节 同步电机的基本结构	58
第二节 同步发电机的原理	60
第三节 同步电机的电枢反应	61
第四节 同步发电机的运行特性	62
第五节 同步发电机的并联运行	64
第六节 同步电动机	66
复习题	68
内容提要	68

## 第二篇 电气控制

第五章 低压电器 .....	69
第一节 电器的基本知识 .....	69
第二节 低压开关 .....	72
第三节 主令电器 .....	77
第四节 熔断器 .....	80
第五节 接触器 .....	81
第六节 继电器 .....	84
第七节 低压电器的故障分析与检修 .....	91
复习题 .....	94
内容提要 .....	94
第六章 基本控制线路 .....	95
第一节 电气控制线路的原理图与接线图 .....	95
第二节 三相鼠笼式异步电动机直接起动控制线路 .....	102
第三节 三相鼠笼式异步电动机降压起动控制线路 .....	109
第四节 绕线式异步电动机的起动控制线路 .....	114
第五节 三相异步电动机的制动控制线路 .....	117
复习题 .....	122
内容提要 .....	124

## 第三篇 供 电

第七章 农村变电所及架空线路 .....	125
第一节 电力系统概述 .....	125
第二节 所址选择及主接线方式 .....	127
第三节 农村变电所一次设备的选择 .....	129
第四节 农村变电所的配电装置及平面图 .....	132
第五节 农村变电所的继电保护和二次回路 .....	138
第六节 农村电力网 .....	148
复习题 .....	153
内容提要 .....	153
第八章 工厂变配电所 .....	154
第一节 工厂电力负荷及短路电流的计算 .....	154
第二节 变配电所及一次系统 .....	166
第三节 选择电气设备的一般原则 .....	174
复习题 .....	175
内容提要 .....	176
第九章 线路装置 .....	177
第一节 电力线路及其接线方式 .....	177
第二节 导线和电缆截面的选择 .....	178
第三节 动力电气平面布置图 .....	180
第四节 室内布线 .....	183
第五节 架空线路的敷设 .....	185

第六节 电缆线路的敷设 .....	194
复习题 .....	197
内容提要 .....	198
<b>第十章 工厂的电气照明 .....</b>	<b>199</b>
第一节 照明技术的基本知识 .....	199
第二节 工厂常用的电光源和灯具 .....	201
第三节 人工照明的照度计算 .....	202
第四节 照明供电系统及导线截面的选择 .....	204
复习题 .....	208
内容提要 .....	209
<b>第十一章 防雷、接地和电气安全 .....</b>	<b>210</b>
第一节 雷电和防雷措施 .....	210
第二节 接地的基本概念和作用 .....	211
第三节 接地电阻的要求值及其测量 .....	213
第四节 接地装置的种类、型式及安装 .....	215
第五节 电气安全 .....	216
复习题 .....	218
内容提要 .....	218
<b>第十二章 实验 .....</b>	<b>219</b>
实验一 直流并励发电机的空载和负载实验 .....	219
实验二 直流电动机的起动、调速与反转 .....	221
实验三 单相变压器的空载和短路实验 .....	222
实验四 三相变压器的极性和连接组的判定 .....	224
实验五 三相异步电动机的理相与起动方法 .....	226
实验六 三相异步电动机点动和自锁控制线路 .....	229
实验七 三相异步电动机的正、反控制线路 .....	230
实验八 三相异步电动机反接制动控制线路 .....	232
<b>部分复习题答案 .....</b>	<b>234</b>

# 第一篇 电机

电机是一种转换能量的机器。由于电能工农业生产、科学实验和人们生活中占有愈来愈重要的地位，因而电机的应用也愈来愈广泛。

同步发电机是电力系统的电源设备；变压器是输、配电的关键设备；异步电动机是许多种转动机械的原动机；直流电机在许多场合也起重要的作用。所以电机是极重要而又应用得很广泛的设备。

本篇就直流电机、变压器、异步电机和同步电机的结构和基本原理进行讨论，并介绍4种设备的特性，为培养学员的专业知识和解决实际问题的能力打下基础。

## 第一章 直流电机

直流电机包括直流发电机和直流电动机。直流发电机将机械能转换为电能，供负载用电；直流电动机将直流电能转换为机械能，用以拖动工作机械。

直流发电机是工农业生产上直流电的主要电源之一。例如电镀、电解、蓄电池充电等化学工业，普遍采用直流电源；汽车、拖拉机等机动车辆大都采用直流发电机作为车用电源。

直流电动机有良好的起动性能、调速性能和稳定性能，因而被广泛地应用在需要均匀调速和重载起动的机械设备上。例如，龙门刨床、汽车、拖拉机上；家用电器如录音机、录像机要求转速稳定，也都采用直流电动机来拖动。

### 第一节 直流电机的基本工作原理

#### 一、直流发电机的基本原理

图1-1表示一台两极直流发电机原理图。在一对静止的磁极N和S之间，装有一个能转动的圆柱形铁心，铁心上绕着一个矩形线圈 $abcd$ 。线圈两端 $a$ 和 $b$ 分别接到两个互相绝缘的半圆形铜片1和2上。这两个铜片叫做换向片，两片之间互相绝缘，共同组成最简单的换向器。换向器上装有接通外电路的静止的电刷A和B，外电路中的用电器称为负载。

铁心、线圈及换向器组成的旋转部分称为电枢，意思是产生电的枢纽，是重要部分。当电枢被原动机拖动，以等速 $n$ 沿逆时针方向旋转时，线圈的 $ab$ 边和 $cd$ 边便切割磁力线产生感应电动势。感应电动势的方向可用右手定则判断，在图1-1(a)所示位置时， $ab$ 边在N极范围内运动，感应电动势方向是从 $b$ 指向 $a$ 。而 $cd$ 边在S极范围内运动，感应电动势方向是从 $d$ 指向 $c$ 。从整个线圈来看，感应电动势方向是 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 。如接通外电路，电流就从电刷A流出，经负载从电刷B流进。

当线圈的 $ab$ 边从N极范围转入S极范围， $cd$ 边从S极范围转入N极范围时，线圈中感应电动势方向改变为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ，如图1-1(b)所示。由于换向器随同电枢铁心一起旋转，

而电刷 A、B 则固定不动，因此电刷 A 总是接通 N 极范围内的导线，而电刷 B 总是接通 S 极

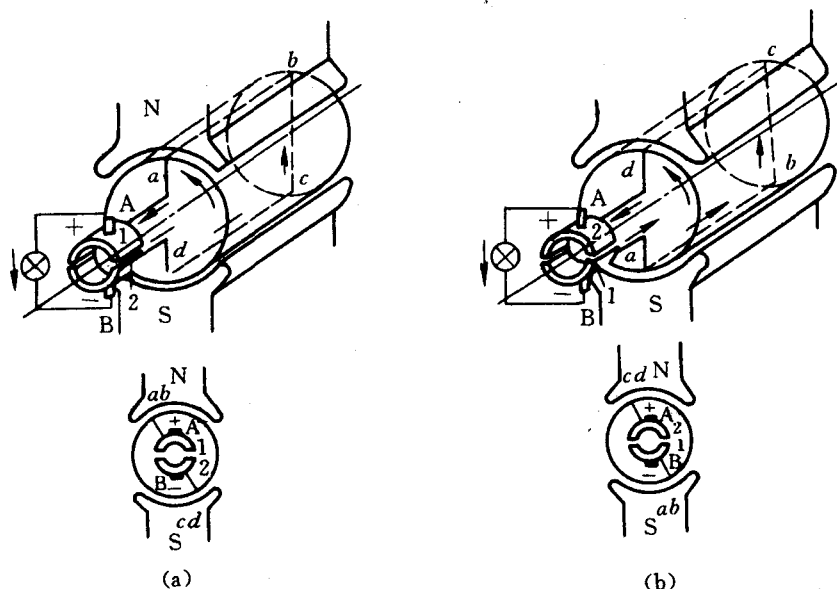


图 1—1 直流发电机工作原理

范围内的导线，所以电流仍从电刷 A 流出经负载从电刷 B 流进。即 A 永远为正极，B 永远为负极。因此外电路的电流方向不变。

从线圈内部来看，感应电动势仍然是交变的，而外电路电流方向不变，主要原因是换向器和电刷的作用。旋转的换向器及时地改变线圈与电刷的连接方向，将线圈产生的交变电动势改变为电刷两端方向恒定的电动势，使外电路的电流按一定方向流动，所以叫做直流发电机。

## 二、直流电动机的基本原理

图 1—2 表示一台两极直流电动机原理图。其基本结构和发电机完全相同。将电刷 A 接至电源的正极，电刷 B 接至负极。电流将从电源正极流出，经过电刷 A、换向片 1、线圈 *abcd* 到换向片 2 和电刷 B，最后回到电源负极。

根据电磁感应定律，载流导体在磁场中受到电磁力的作用，其方向应用左手定则确定。在图 1—2 所示瞬间，导体 *ab* 中的电流方向由 *a* 至 *b*，且导体 *ab* 处于 N 极下，由左手定则确定导体 *ab* 所受电磁力的方向向左；导体 *cd* 所受电磁力的方向向右。这样便产生了一个转矩。在这个转矩的作用下，线圈按逆时针方向旋转起来。线圈自图 1—2 位置转过 90° 时，换向片不与电刷接触，两换向片中间的绝缘物与电刷接触，此时线圈中没有电流，线圈转矩消失。但是，由于机械惯性的作用，线圈

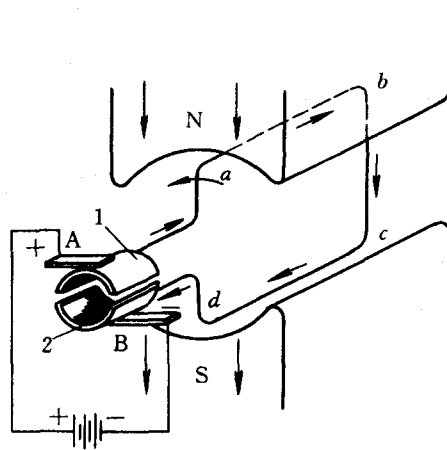


图 1—2 直流电动机工作原理  
1、2. 换向片

仍能转过一个角度,使电刷 A 与换向片 2、电刷 B 与换向片 1 接触,线圈中又有了电流流过。这时电流将从电源正极流出,经过电刷 A、换向片 2、线圈 *dcba* 到换向片 1 和电刷 B,最后回到电源负极。导体 *ab* 中的电流改变了方向,由 *b* 至 *a*,并且已由 N 极范围转到 S 极范围,故 *ab* 所受电磁力方向向右。同理,处于 N 极范围内的导体 *cd* 所受的电磁力方向向左。在两个电磁力产生的转矩作用下,线圈继续沿着逆时针方向旋转,且一直旋转下去。这就是直流电动机的工作原理。

直流电动机是输出机械能的装置,实际电动机的匝数要多得多。匝数多产生的电磁转矩大,才能拖动工作机械旋转。

## 第二节 直流电机的构造

直流电机由两个主要部分组成:一个是静止部分,叫做定子;另一个是转动部分,叫做转子或电枢。定子与转子之间的间隙,称为空气隙。其结构如图 1—3 所示。

### 一、定子部分

直流电机定子是用来产生磁场和作为电机机械支撑物的。它由主磁极、机座、端盖和电刷装置等组成。

(一) **主磁极** 主磁极的作用是产生主磁场。它包括主磁极铁心和励磁绕组两部分。如图 1—4 所示。

主磁极铁心一般用 0.5—1.0mm 厚的钢片冲制后叠压起来,再用铆钉铆紧。磁极铁心用螺杆固定在机座上。铁心靠近电枢的一端称极掌,极掌的作用是使定子与转子之间形成空气隙,并且使空气隙中的磁感应强度按一定规律分布。励磁绕组固定在铁心上。

励磁绕组一般用绝缘铜线绕制,套装在主磁极铁心上。励磁绕组、铁心与外壳牢固地装在一起,形成一个整体。

(二) **机座** 机座就是电机的外壳,一般用铸钢或钢板焊接而成,小型电机也有采用铸铁的。

机座是电机的机械支架,主磁极、端盖等部件就固定在上面。机座下部两边焊接或铸出两个底脚,以便与基础固定。

机座是磁路的一部分,其传导磁通的部分叫磁轭。主磁极、极掌、空气隙、电枢铁心和磁轭形成了电机的磁路。磁通通过整个电机的情况如图 1—3 所示。

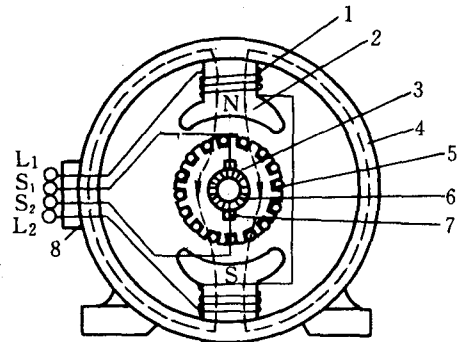


图 1—3 直流电机构造简图

1. 励磁绕组 2. 磁极 3. 电枢铁心 4. 磁轭
5. 电枢绕组 6. 换向器 7. 电刷 8. 出线盒

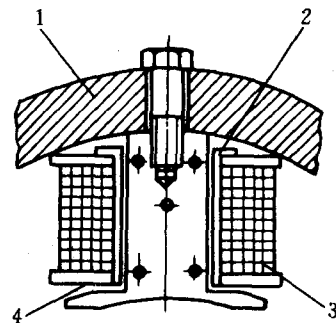


图 1—4 直流电机的主磁极

1. 机座 2. 铁心 3. 励磁绕组 4. 绝缘材料

(三) **电刷装置** 电刷装置的作用是通过固定的电刷和旋转的换向器之间的滑动接触,把电枢绕组中的交变电势变换为电刷上的直流电势(对发电机来说),输出直流电能。对于电动机来说,电刷装置把外电路的电能输送到电动机的绕组内,以产生机械能。

电刷装置由电刷、刷握、刷杆和刷杆座等零件组成,如图 1—5 所示。电刷放在刷握上的刷盒中,利用弹簧把电刷压在换向器上。刷握固定在刷杆上,刷杆装在刷杆座上,刷杆与其座之间是绝缘的。刷杆座与外壳相连接。刷杆与电刷之间用软铜线连接,再从刷杆上接引线与外电路相通。

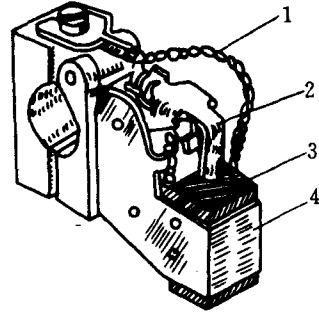


图 1—5 直流电机的电刷装置  
1. 铜丝辫 2. 弹簧压板 3. 电刷 4. 刷握

## 二、转子部分 (电枢)

电枢的作用是产生感应电势(发电机)或电磁转矩(电动机)。从而实现能量转换。它包括电枢铁心、电枢绕组、换向器、风扇和转轴等部件,如图 1—6 所示。

(一) **转子铁心** 转子(电枢)铁心的主要作用是放置电枢绕组和形成磁力线通路。其铁心一般用 0.5mm 厚的硅钢片冲制叠压而成。冲片形状如图 1—7 所示。为了减少涡流损耗,冲片之间用漆和氧化物绝缘。电枢铁心槽的形状有梨形和矩形两种,如图 1—8 所示。

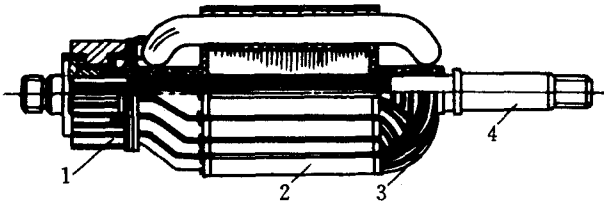


图 1—6 直流电机的转子  
1. 换向器 2. 铁心 3. 电枢绕组 4. 轴

(二) **电枢绕组** 电枢绕组是电机的主要部件之一,它的作用是产生感应电动势并通过电流,使电机实现能量转换。电枢绕组通常是将绝缘铜线在模型上绕成线圈后按一定规律嵌入铁心槽中。绕组与铁心之间以及上下层线圈之间都放有绝缘材料。在槽口用槽楔把线圈压住,以防止电枢绕组在旋转时飞散出来。

(三) **换向器** 换向器是直流电机的特有部件。换向器对于直流发电机,是将电枢绕组的交变电势和电流转换成电刷之间的直流电压和电流;对于电动机则是将输入的直流电流转换为电枢绕组内的交变电流,并保证在每一磁极下电枢导体内的电流方向不变,以产生恒定方向的电磁转矩。因此,换向器是直流电机中一个关键的、也是最易出故障、难于维修的部件。

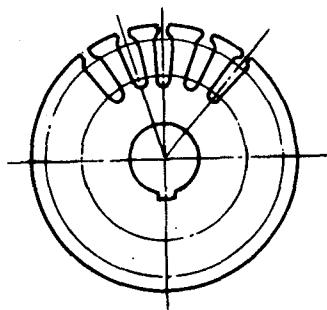


图 1—7 电机铁心冲片

换向器结构如图 1—9 所示。它由许多铜片构成,铜片内侧做成燕尾形,嵌在换向器轴套和压环组成的 V 形槽中,外表面成为圆形,铜片靠里端突起形成接线凸缘,电枢绕组的首端就焊接在凸缘的小槽内。各铜片之间、铜片与轴套之间、铜片与压环之间均用云母绝缘。

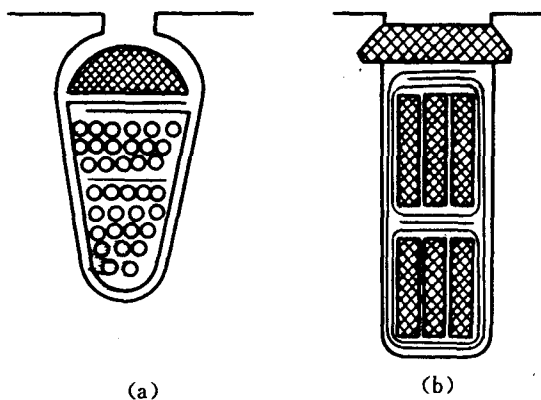


图 1—8 电枢铁心槽截面形状  
(a) 梨形槽 (b) 矩形槽

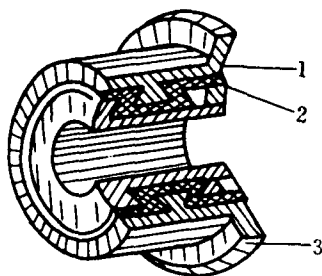


图 1—9 直流电机的换向器  
1. 换向片 2. 绝缘云母 3. 接线凸缘

### 三、空气隙

定子与电枢之间的间隙叫空气隙。由于定子固定不动，电枢高速旋转，它们既不能接触，又不能有过大间隙。因为空气隙是磁路的一部分，空气的磁阻非常大，气隙大，磁阻就大，磁场便减小，电机性能变坏。小容量的电机空气隙为 0.5—3mm，大容量电机为 10—12mm，在修理电机时，比如在拆卸、更换绕组、更换或安装轴承时要特别注意，不要改变间隙的大小。

## 第三节 直流电机的电枢绕组

### 一、概 述

电枢绕组是由许多单个线圈组成的，这些线圈均匀地按照一定的规律嵌放在电枢铁心的槽内，其两端分别接在两个换向片上。根据连接方法的不同，电枢绕组可分为叠绕组和波绕组两种。

#### (一) 电枢绕组的名称

1. 元件 组成绕组的每一个线圈称为绕组元件，一个元件可以是一匝也可以是多匝绕成。

2. 有效边、端接线 电枢槽中，元件在槽内能切割磁力线产生感应电动势的元件称为有效边。元件在槽外的部分不感应电动势，仅供连线之用，称为端接部分或称端接线。

3. 绕组元件数和换向片数 每个绕组元件有两个线端，这两个线端分别接在两个换向片上。每个换向片接有两个不同绕组元件的线端，因此，绕组元件数和换向片数是相等的。设换向片数为  $K$ ，元件数为  $S$ ，则

$$S=K$$

4. 上层边、下层边 电枢绕组一般做成双层，为了便于嵌线，绕组元件的两个有效边一个放在槽的上层叫上层边，另一个放在槽的下层叫下层边。绕组元件在槽内的放置法如图 1—10 所示。

5. 实槽、虚槽 电枢铁心表面具有一定几何形状的槽称为实槽，比如 12 槽、24 槽、36

槽等。一个电枢元件有两个有效边，一个有效边放在某一槽的下部，另一个有效边则要放在另一个槽的上部。一个电枢有许多元件，那么，每个实槽中至少有一个下层有效边和一个上层有效边。我们把上下两个有效边所占槽的空间称作一个虚槽（又称单元槽），可见，一个实槽就由若干个虚槽所组成，如图 1—11 所示。

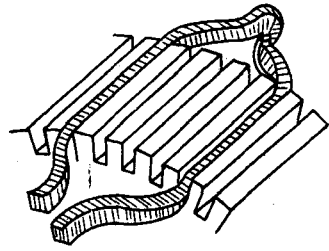


图 1—10 绕组元件在槽内的放置法

因为每一虚槽有上下两个不同元件的有效边，而每一元件也有两个有效边，所以总虚槽数  $Z$  等于总元件数  $S$ ，即

$$Z = S = K$$

(二) 节距 为了正确地把各元件及相应换向片互相连接起来，需要求出绕组的节距。绕组的节距包括以下 4 项内容：

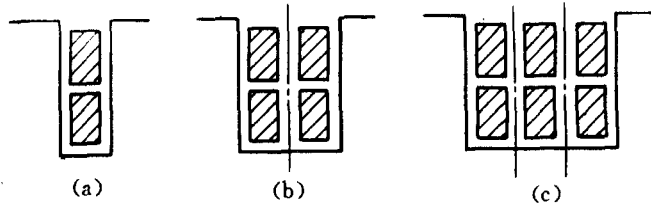


图 1—11 电枢的实槽和虚槽

(a) 一个虚槽 (b) 二个虚槽 (c) 三个虚槽

1. 第一节距  $Y_1$  表示同一绕组元件两有效边之间的距离，以虚槽数表示。为了使每一元件感应电动势为其一有效边感应电动势的两倍，其中一有效边若处在 N 极下，另一个有效边就应处在 S 极下相应的位置，它们之间的距离应接近或等于一个磁极间的距离。

设  $\tau$  为极距，以虚槽数表示，则

$$Y_1 \approx \tau$$

若以  $p$  表示磁极对数，则  $Y_1$  用虚槽数表示为

$$Y_1 \approx \tau = \frac{Z}{2p}$$

但虚槽数常不能被  $2p$  整除，而  $Y_1$  又必须为整数，因此

$$Y_1 = \frac{Z}{2p} \mp \epsilon$$

式中  $\epsilon$  为使  $Y_1$  凑成整数的一分数值。负号表示  $Y_1 < \tau$ ，即为短距绕组；正号表示  $Y_1 > \tau$ ，即为长距绕组。当  $\epsilon = 0$  时， $Y_1 = \tau$ ，表示为整距绕组。一般采用整距或短距绕组。

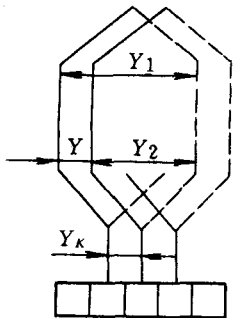


图 1—12 绕组元件

2. 第二节距  $Y_2$  第一个元件的下层有效边到与它相串联的第二个元件的上层有效边之间的距离（或者说与同一换向片相连的两个有效边间的距离），以虚槽数表示，如图 1—12。

3. 合成节距  $Y$  两个相连接的元件对应边之间的距离，以虚槽数表示，如图 1—12 所示。

4. 换向节距  $Y_k$  每一元件的两端所连接的两片换向片间的距离，以换向片数表示，如图 1—12 所示。

为了使下线不混乱，应使相邻两元件的对应边在电枢铁心上相隔的虚槽数，与这两边端头所接的换向片间相隔的换向片数相等。也就是说合成节距  $Y$  等于换向节距  $Y_k$  ( $Y = Y_k$ )。

电枢绕组分叠绕组和波绕组。叠绕组又分单叠和复叠；波绕组也分单波和复波。这里只简单介绍单叠绕组和单波绕组。

## 二、单叠绕组及其展开图

单叠绕组的连接方法是将第一个元件的下层边与第二个元件的上层边通过换向片连接在一起，并且第二个元件放在第一个元件相邻的虚槽内。最后一个元件的下层边与第一元件的上层边通过最后一个换向片连接成一闭合回路。

单叠绕组分右行绕组和左行绕组两种型式，如图 1-13。 $Y_k=1$  为右行绕组，表示第二个元件的首端在第一个元件的右边，依此类推。 $Y_k=-1$  为左行绕组，表示第二个元件在第一个元件的左边，往左推进。两种绕组在原理上是一样的，但左行绕组端接部分互相交叉，引线长，一般不采用。

绕组的连接，可以用展开图来分析。绕组展开图是假设将电枢从某齿中间沿轴向剖开，再展开成一个平面，能够清楚地显示出绕组的连接关系。作图步骤如下：

设  $2p=4$ ,  $Z=S=K=16$ 。作单叠绕组展开图。

(一) 画虚槽和换向片 实际电机的电枢表面有齿有槽，槽内每一层放置几个元件边。在绕组展开图上习惯以虚槽表示，而且是等分的，每一虚槽内放置两个有效边。上层有效边以实线表示，下层有效边以虚线表示。

在展开图上，换向器与电枢等宽，如图 1-14 所示。

### (二) 计算节距

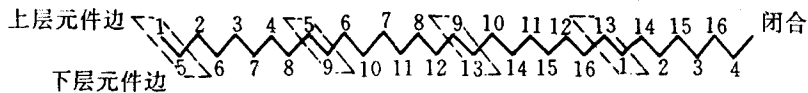


图 1-14 单叠绕组元件连接次序

根据公式：

$$Y = Y_k = 1 \text{ (右行)}$$

$$Y_1 = \frac{Z}{2p} \mp \epsilon = \frac{16}{4} - 0 = 4 \text{ 为全距绕组 (或等距绕组)}$$

$$Y_2 = Y_1 - Y = 4 - 1 = 3$$

(三) 连接绕组元件 绕组元件的连接是根据绕组节距数据进行的。如 1 号元件的上层边位于 1 号槽的上层，其下层边经过  $Y_1=4$  位于 5 号槽的下层。1 号元件的首、尾两端分别接到 1 号和 2 号换向片上。连接时应注意元件在展开图上要对称，1 号元件的下层边经  $Y_2=3$  接到

2号元件的上层边,依此类推,把各个元件依次连接起来。各元件的连接关系如图1—14所示。图中数字表示元件有效边所在的虚槽号。上层的数字同时也表示元件号。

图1—15为单叠绕组放射图,图1—16为展开图,两图可对应分析。从1号元件上层有效边开始绕电枢一周,将全部元件边都连了起来,又回到1号元件上层边,可见单叠绕组在内部自成一闭合回路。

**(四) 放置磁极和电刷** 电机磁极在圆周上对称分布,因而在展开图上须均匀布置。磁极的宽度一般为0.7倍极距。图上表示的磁极是在电枢表面展开图的上面,即靠近读者一边,因此,N极的磁力线方向是进入纸面的,而S极则是钻出纸面的。

电刷的位置必须使相邻的两个电刷间的电压达到最大值。因此,电刷应放在感应电动势改变方向处。图1—16中电刷放置在磁极中心线上,使电刷与几何中心线上的元件相连接。几何中心线位于两相邻磁极之间,此处磁通由一方向改变为相反方向,显然磁通为零。处在此处的元件感应电动势也为零。该处元件经过电刷短路,不会产生短路电流。

在单叠绕组中,元件电动势改变方向的次数和磁极数目相等,所以电刷的数目应等于磁极数目。电刷在换向器上对称分布,在展开图上也应均匀布置。图中电刷的宽度为一片换向片宽,实际上一般为2—3个换向片宽,因太窄了电刷易磨损,强度不够。

**(五) 确定元件感应电动势方向和电刷极性** 在磁极极性和电枢旋转方向确定之后,对于发电机来说,就可确定电动势方向与电刷的极性。根据图1—16,利用右手定则可确定元件感应电动势方向,电流自电刷 $A_1$ 和 $A_2$ 流出,故 $A_1$ 和 $A_2$ 为正电刷,而 $B_1$ 和 $B_2$ 为负电刷。极性相同的电刷,即 $A_1$ 和 $A_2$ 、 $B_1$ 和 $B_2$ 并联后引向外电路的用电器。

**(六) 并联支路** 从展开图中可以看出,在同一极下的元件上层有效边(或下层有效边)电动势方向是相同的,循着一个方向环绕电枢绕组闭合回路前进,每经过一个磁极,绕组电动势方向改变一次。比如 $N_1$ 极下面的上层有效边和相邻的 $S_1$ 极下层有效边相串联,实际上就是把元件1、2、3各有效边串联起来,它们组成了一条支路,这些有效边中的电势沿绕线方向是相加的。同理元件5、6和7组成第二条支路;元件9、10和11组成第三条支路;元件13、

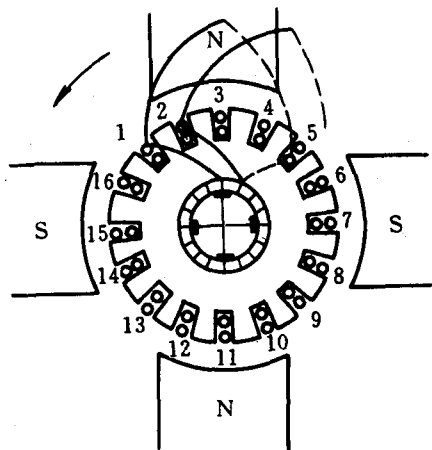


图 1—15 单叠绕组元件放射图

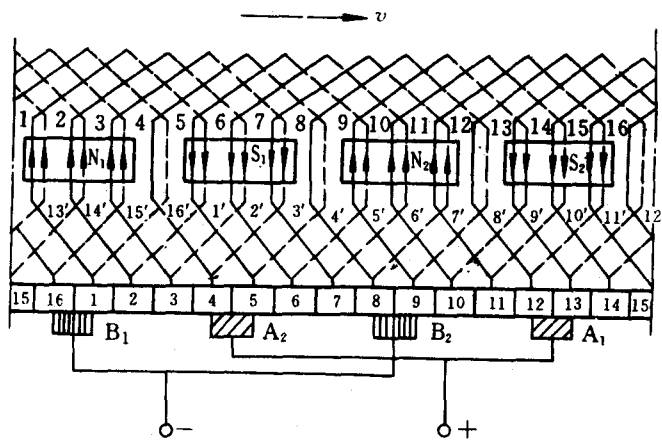


图 1—16 单叠绕组展开图

14 和 15 组成第四条支路。全部绕组对外电路来说,形成了 4 条并联支路,如图 1—17 所示。

从绕组并联支路中可以看出,直流发电机的端电压,由一条支路的电动势决定。而输给外电路的总电流则等于各条支路电流之和。

(七) 例题 拖拉机上常用的 F-29 型直流发电机,已知其为单叠绕组,磁极对数  $P=1$ ,实槽数  $Z_{实}=15$ ,换向片数  $K=30$ ,试画绕组展开图。

解:因为是单叠绕组,所以  $Y=Y_K=1$

又因虚槽数  $Z=S=K=30$ ,而实槽数为 15,因此每个实槽等于两个虚槽,每一实槽中有 4 个元件边(此例题,第一节距以实槽计算更为方便),则

$$Y_1 = \frac{Z_{实}}{2p} \mp \epsilon = \frac{15}{2} - \frac{1}{2} = 7$$

因  $\epsilon$  为负,故为短距绕组。由以上数据,可画绕组展开图,如图 1—18 所示。

电枢绕组连接方法是,第一元件起端与换向片 1 连接,起边放在 1 号槽内,末边放在 8 号槽内,末端与换向片 2 相接。

第 2 号元件起端与换向片 2 相接,起边放在 1 号槽内,末边也放在 8 号槽内,末端与换向片 3 相接……。依此类推,直到最后一个元件末端与换向片 1 相接,成为一个闭合回路为止。

此种电机有两只磁极,两个电刷,两条并联支路。

### 三、单波绕组

(一) 连接方法 单波绕组的连接规律和单叠绕组不同。它不是把元件依次串联,而是把相隔大约 2 个极距,即在磁场中的位置差不多相对应的元件连接起来。这种绕组连接的特点是,元件两线端所连的换向片相隔较远,相串联的两元件也相隔较远。这样连接起来的元件的形式犹如波浪一样向前延伸,所以称波绕组。

波绕组顺着串联元件绕电枢 1 周以后,元件的末端不能与起始元件上层元件边所连的换向片相连,而必须与其相邻的换向片相连,如图 1—19 所示。否则,元件绕 1 周后就会闭合,无法再把元件继续连接下去。这样一来,起始换向片与绕电枢 1 周后所连接换向片相隔为“1”个换向片的距离,即相邻的换向片。

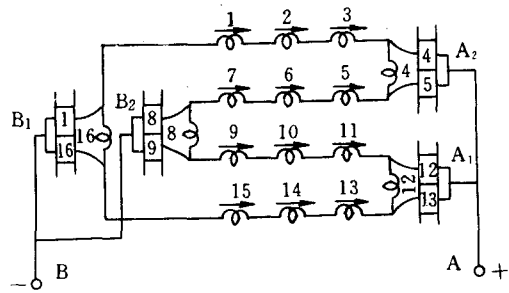


图 1—17 单叠绕组的电路图

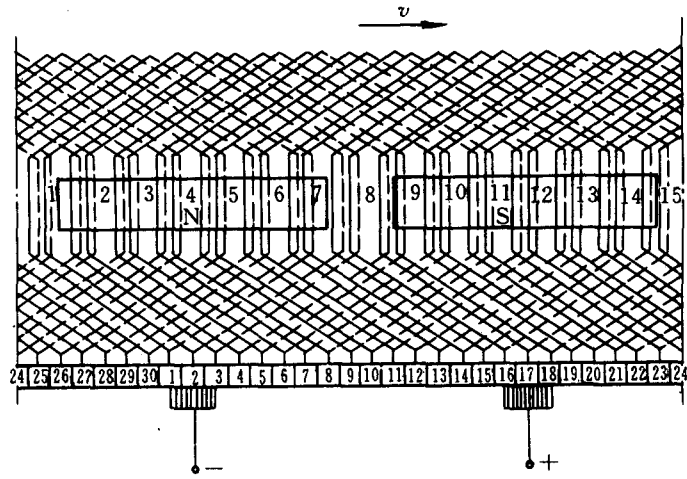


图 1—18 F-29 型直流发电机电枢绕组展开图

## (二) 节距计算

1. 换向节距  $Y_K$  设电机有  $p$  对磁极, 当绕电枢 1 周后, 便有  $p$  个元件串联起来。每一个元件在换向器上跨过  $Y_K$  个换向片。因此, 要使绕电枢 1 周后回到与起始元件相邻的元件边上, 就必须满足下列关系:

$$pY_K = K \mp 1$$

因此单波绕组的换向节距:

$$Y_K = \frac{K \mp 1}{p}$$

式中正、负号的选择为满足  $Y_K$  是一整数。取负号时, 绕电枢 1 周后, 回到起始元件的左边元件边上, 称为左行绕组; 取正号时, 则回到右边, 称为右行绕组。若正、负号都能得到整数的  $Y_K$  时, 一般选取负号, 这时端接部分稍微短一些, 如图 1—19 所示。

2. 第一节距  $Y_1$   $Y_1$  与叠绕组一样, 即

$$Y_1 = \frac{Z}{2p} \mp \epsilon$$

3. 合成节距和第二节距

$$Y = Y_1 + Y_2 \quad \text{或} \quad Y_2 = Y - Y_1$$

(三) 例题 设直流电机  $2p=4$ ,  $S=K=Z=17$ , 要求绕成单波左行绕组。试计算节距, 画展开图。

解: 根据公式各节距数据为

$$Y_K = Y = \frac{K \mp 1}{p} = \frac{17-1}{2} = 8 \quad (\text{因要求左行, 故选为“-1”})$$

$$Y_1 = \frac{Z}{2p} \mp \epsilon = \frac{17}{4} - \frac{1}{4} = 4$$

$$Y_2 = Y - Y_1 = 8 - 4 = 4$$

展开图的画法: 将换向片、绕组元件、电枢槽都编上号, 元件的连接如下: 将元件 1 的首端连接在换向片 1 上, 它的首边 1 放在 1 号槽的上层, 而末边 1' 则放在 5 号槽的下层 (因节距  $Y_1=4$ ), 末端连接在第 9 号换向片上 (因  $Y_K=8$ ); 接着绕第二个元件, 其始端连接在第 9 号换向片上, 始边 9 放在第 9 号槽的上层 ( $Y=8$ ), 末边 9' 放在第 13 号槽的下层, 末端连接第 17 号换向片上……, 如此排列下去, 直到绕组闭合为止, 如图

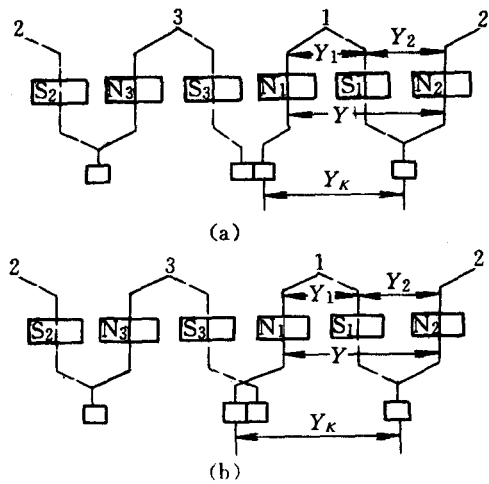


图 1—19 单波绕组  
(a) 左行绕组 (b) 右行绕组

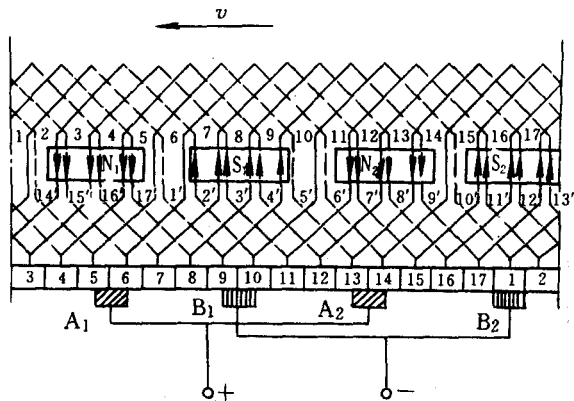


图 1—20 单波绕组展开图

1—20 所示。

图 1—21 为这一波绕组的电路图。从图中可以看出，元件 9、17、8、16、7、15 的电动势相加组成一条支路。元件 2、11、3、12、4、13 组成另一条支路，有相同的电动势。由此可见，波绕组是把所有 N 极下的元件（包括它在 S 极下的下层边）串联起来组成一个支路；又把所有 S 极下的元件串联起来组成另一条支路，一共组成两条支路。从而可以得出结论：无论极数为多少，单波绕组只有两条并联支路。这是单波绕组的特点。

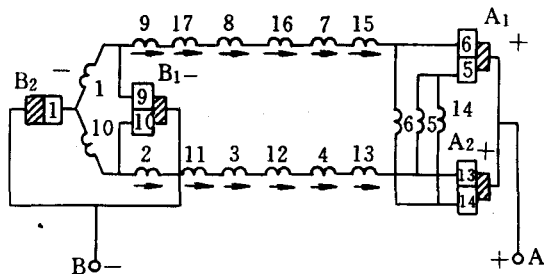


图 1—21 单波绕组的电路图

单波绕组只有两条并联支路，原理上只用电刷 A 和 B 就可以把电流引出来。但实际上仍安装与磁极数相等的电刷。这既可以使电流分配在较多的电刷上，又由于电刷的截面小了，换向器的尺寸自然也可以缩小。

## 第四节 电枢反应与换向

### 一、电枢反应

(一) 直流电机的磁场 直流电机主磁极的励磁绕组通过电流时产生的磁场，称为磁极磁场或主磁场。它的方向与磁极轴线  $Y-Y'$  一致，如图 1—22。从图上可以看出，在电枢表面上磁感应强度为零的地方，即物理中性线，即  $n-n'$  线正好是磁极的中性线，也叫几何中性线。就是说，主磁场的物理中性线和几何中性线是重合的。

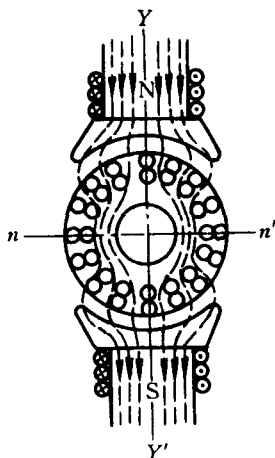


图 1—22 磁极磁场

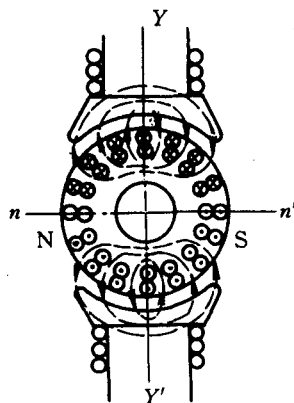


图 1—23 电枢磁场

当电机的电枢绕组有电流通过时，也产生磁场，称为电枢磁场。它穿过电枢内部的方向与磁极轴线  $Y-Y'$  相垂直，如图 1—23 所示。

直流电机在实际使用时，这两个磁场同时存在。因此，直流电机中的实际磁场是主磁场和电枢磁场互相叠加的结果。这两种磁场互相叠加就得到一合成磁场。如图 1—24 所示。