

中等专业学校教学用书

电机及电力拖动

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书
电机及电力拖动
吉林冶金电气化学校 杨宗豹 主编

冶金工业出版社出版
新华书店北京发行所发行
冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 20 1/4 字数 479 千字
1979年12月第一版 1979年12月第一次印刷
印数00,001~24,000册
统一书号: 15062·3508 定价 1.65 元

前 言

《电机及电力拖动》教材是根据冶金工业部1978年制订的冶金中等专业学校电气化专业“电机及电力拖动基础”课程教学大纲编写的。本书共分四篇：第一篇——直流电机，第二篇——变压器，第三篇——交流电动机，第四篇——控制用微电机和电动机容量的选择。

本书的任务是介绍各种常用电机的主要结构、工作原理和运行特性。全书包括电机学原理、维修和电力拖动基础等部分，以电力拖动基础为重点；较深入地分析交直流电动机的机械特性、起制动和调速过程以及有关的计算；最后扼要地介绍电动机容量选择的基本知识和控制用微电机的工作原理等。

我们考虑到冶金车间、冶金矿山各部门对本课程具体要求并不完全相同，因此除教学大纲规定编写的基本内容外，还增添了少量教学大纲以外的内容，这部分内容用标题上加“*”表示。

本书适于中等专业学校电气化专业教学使用，也可供工程技术人员和工人参考。

本书由吉林冶金电气化学校杨宗豹主编，参加部分编写工作的有鞍山冶金工业学校王奎选等同志。由于编者水平所限，疏漏及错误之处在所难免。热忱希望读者批评指正。

编 者

1979年4月

目 录

第一篇 直流电机

第一章 直流电机工作原理与构造

1-1 概述	1
1-2 直流发电机的工作原理	1
1-3 直流电动机的工作原理	2
1-4 直流电机的结构	3
1-5 直流电机的系列和铭牌	5
习题	6

第二章 电枢绕组

2-1 概述	6
2-2 绕组的特点和节距	7
2-3 单迭绕组	10
2-4 单波绕组	12
2-5 电枢绕组电动势	13
2-6 电磁转矩	14
2-7 小结	15
习题	16

第三章 直流电机的磁场

3-1 直流电机的空载磁场	17
3-2 负载时电机的磁场	18
3-3 发电机电枢反应	21
3-4 电动机电枢反应	22
习题	22

第四章 直流电机的换向

4-1 概述	23
4-2 换向的物理过程及产生火花的原因	23
4-3 改善换向的方法	28
4-4 电刷位置的调整	30
习题	31

第五章 直流发电机

5-1 直流电机的损失	32
5-2 直流发电机的功率、电压、转矩的平衡关系	33
5-3 他励发电机特性	34
5-4 并励发电机	36

习题	38
第六章 直流电动机	38
6-1 电机可逆原理	39
6-2 直流电动机功率、电压和转矩平衡方程式	39
6-3 效率	41
6-4 并励电动机自然机械特性	41
6-5 并励电动机的人造机械特性	46
6-6 电动机的运动方程式	47
习题	50
第七章 并励电动机起动和制动	52
7-1 并励电动机的起动	52
7-2 电动机的反转	58
7-3 并励电动机的制动	59
7-4 各种制动方法的比较	67
习题	68
第八章 并励电动机的调速	70
8-1 调速的要求和调速方法	70
8-2 改变电枢串联电阻调速	71
8-3 改变电动机的磁通调速	73
8-4 改变电枢电压调速	75
8-5 发电机-电动机组	76
习题	79
第九章 直流串励和复励电动机	81
9-1 串励电动机机械特性	81
9-2 串励电动机起动	83
9-3 串励电动机的调速	84
9-4 串励电动机的制动	85
9-5 复励电动机	87
9-6 复励电动机起动、调速和制动的特点	88
9-7 各种直流电动机的比较及其应用范围	88
*9-8 串励电动机起动电阻计算的图解法	90
习题	91
第十章 电力拖动的过渡过程	92
10-1 概述	92
10-2 并励电动机过渡过程的数学分析	92
10-3 并励电动机起动过渡过程	94
10-4 并励电动机能耗制动的过渡过程	98
10-5 并励电动机反接制动的过渡过程	100
10-6 $F-D$ 系统励磁过渡过程	101

* 10-7 $F-D$ 系统的机械、电气过渡过程	103
习题	107

第二篇 变 压 器

第十一章 变压器的基本知识	109
11-1 概述	109
11-2 变压器的基本结构	110
11-3 变压器的铭牌及额定值	113
习题	114
第十二章 变压器运行的分析	114
12-1 单相变压器的空载运行	114
12-2 变压器有载运行分析	121
12-3 变压器的折算	123
12-4 变压器的等值电路	125
12-5 变压器有载时的向量图	126
12-6 变压器的参数测定	127
12-7 变压器的运行特性	132
12-8 小结	134
习题	135
第十三章 三相变压器	138
13-1 三相变压器的磁路系统	138
13-2 变压器绕组的标记和极性	139
13-3 三相变压器的联接组	141
13-4 联接组别实验测定法	145
13-5 变压器的 \vee/\vee 联接	147
习题	148
第十四章 变压器的并联运行和特殊变压器	149
14-1 变压器的并联运行	149
14-2 自耦变压器	151
14-3 电焊变压器	153
14-4 仪用互感器	154
* 14-5 小型变压器的计算	156
习题	162

第三篇 交流电动机

第十五章 异步电动机基本原理和构造	164
15-1 异步电动机的基本原理	164
15-2 异步电动机结构的主要部件	165
15-3 单相交流绕组磁势	168

15—4	三相交流绕组磁势	173
15—5	交流绕组绕法的基本原则	176
* 15—6	单层绕组	176
15—7	双层迭绕组	179
15—8	双层波绕组	181
15—9	交流绕组电动势	183
* 15—10	异步电动机重绕简易计算	186
	习题	191
第十六章	异步电动机的运行分析	192
16—1	异步电动机的电势平衡和磁势平衡方程式	192
16—2	异步电动机的等值电路	195
16—3	异步电动机的能量转换	199
16—4	异步电动机的空载和短路试验	200
16—5	异步电动机的电磁转矩	202
16—6	异步电动机自然机械特性曲线的讨论	203
16—7	异步电动机自然机械特性曲线的点绘	207
	习题	208
第十七章	异步电动机的调速和人造机械特性	210
17—1	异步电动机的调速方法	210
17—2	绕线式电动机改变转子电路电阻的调速	211
17—3	绕线式电动机转子电路引入附加电动势进行调速	215
17—4	改变电源频率调速	217
17—5	改变电动机的磁极对数调速	218
17—6	利用电磁离合器调速	220
	习题	223
第十八章	异步电动机的起动和制动	224
18—1	概述	224
18—2	绕线式电动机在转子电路中串入起动变阻器起动	225
18—3	频敏阻抗器在异步电动机起动中的应用	228
18—4	鼠笼式电动机降压起动	230
18—5	深槽及双鼠笼电动机	235
18—6	异步电机再生制动运行	238
18—7	异步电机反接制动运行	240
18—8	异步电机能耗制动运行	243
18—9	小结	247
	习题	248
第十九章	异步电动机的特殊运行及特殊异步电动机	250
19—1	异步电动机低电压运行	250
19—2	单相异步电动机	251

19—3	三相电动机转子不对称运行	256
19—4	感应调压器	257
19—5	力矩异步电动机	258
19—6	三相并励换向器式电动机	260
	习题	262
第二十章	同步电动机	263
20—1	同步电动机结构和基本原理	263
20—2	同步电动机的机械特性	266
20—3	同步电动机功率因数特性	269
20—4	同步电动机的起动	273
20—5	小结	274
	习题	275

第四篇 控制用微电机和电动机容量的选择

第二十一章	控制用微电机	276
21—1	伺服电动机	276
21—2	测速发电机	280
21—3	旋转变压器	284
21—4	自整角机	288
21—5	步进电动机	297
	习题	299
第二十二章	电动机容量的选择	300
22—1	概述	300
22—2	电动机的发热和冷却	300
22—3	电机绝缘材料等级和电机的最高许可温升	302
22—4	电动机容量选择步骤与负载记录图	303
22—5	长期运转时电动机容量的选择	304
22—6	短期运转时电动机容量的选择	309
22—7	重复短期运转时电动机容量的选择	311
	习题	314

第一篇 直流电机

第一章 直流电机工作原理与构造

1-1 概 述

直流电机包括直流电动机和直流发电机。直流电动机和交流电动机相比，它的主要优点是速度调节范围宽广，而且平滑性、经济性较好；其次是它的起动转矩较大。这种性能对有些生产机械的拖动来说是十分重要的。例如大型可逆式轧钢机、矿井卷扬机、电力机车、大型电铲、大型车床和大型起重设备等生产机械中，大都采用直流电动机拖动。

直流电机也有它显著的缺点：一是制造工艺复杂，消耗有色金属较多，生产成本低；二是直流电机在运行时由于电刷与换向器之间容易产生火花，因而运行可靠性较差，维护比较困难。人们曾做过很多研究工作来改善交流电动机的特性，虽然取得了一些成绩，但是还不能够全部用交流拖动来代替直流拖动。因此，在某些生产机械的拖动中，应用直流电动机还是比较普遍的。

直流发电机过去是工业上用直流电的主要电源之一，广泛地用在电解、电镀、充电等设备中，也用作同步电机的励磁机和直流电动机的电源。近年来由于可控硅的应用日益广泛，它有可能逐步代替直流发电机。

1-2 直流发电机的工作原理

在电工基础课程中，我们已经知道在磁场中运动的导体，将产生感应电动势的客观规律——电磁感应定律。交流和直流发电机就是这个规律的实际应用的例子。

图1-1表示一台两极交流发电机的工作原理简图。固定部分简称定子，主要是由两个磁极组成，由它产生磁场；转动部分简称转子，在它的上面绕有线圈 $abcd$ 。线圈的两端和固定于转轴上的两个滑环相连接，滑环与静止的电刷 AB 滑动接触，通过电刷与外电路的负载接通。

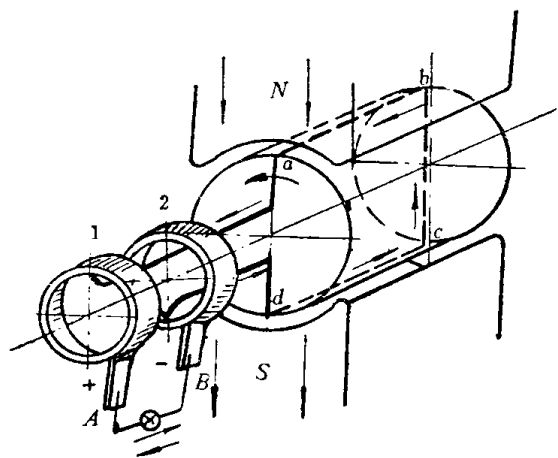


图 1-1 交流电机工作原理

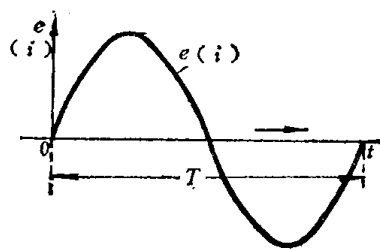


图 1-2 线圈中电动势的波形

如果电机被原动机拖动，逆时针方向以恒定速度旋转，用右手定则可以判定，导线 ab 切割磁力线而产生的感应电动势的方向是由 b 到 a ，而导线 cd 中电动势的方向则由 d 到 c 。这样外电路的电流应从滑环1经电刷 A 流出，而后再经电刷 B 流入滑环2。电流流出的电刷 A 具有正极性，用“+”号表示；电流流入的电刷 B 则具有负极性，以“-”号表示。

当电枢旋转 180° 后， ab 与 cd 位置互换，由于导线所处磁场极性已改变，所以导线中电动势的方向也跟着改变，又因为电刷 A 经过滑环1始终和 ab 相连，而电刷 B 经过滑环2始终和 cd 相连，所以电刷的极性及其外电路电流的方向也就随着改变了。这种发出交流电的发电机叫做交流发电机。假若沿电枢圆周磁感应强度是按正弦规律分布的，则电枢旋转一周时，感应电动势随时间变化的规律如图1-2所示。

怎样把交流电变成直流呢？我们知道线圈的感应电动势总是交变的，要想在外电路得到固定方向的直流电流，必须在导线电动势方向要改变的瞬间，及时改变导线和外电路的连接。图1-3所示的换向器，就是根据这个设想而装置的。线圈 $abcd$ 的两端接到换向器的两个半圆形铜片1和2上，这两个铜片叫换向片。

在图1-3所示的位置，和换向片1接触的电刷 A 为正极性（因为此时和电刷 A 接触的导线 ab 处在 N 极下），同时电刷 B 为负极性。电枢旋转 180° 后，电刷 A 不再经过换向片1与导线 ab 相连，而是经过换向片2和已转到 N 极下的导线 cd 相连了，所以电刷 A 仍为正极性，同样电刷 B 仍为负极性。这样虽然导线中的电动势是交变的，但是通过换向器的作用，及时改变导线与电刷（即外电路）的连接，使得电刷 A 不再固定的和导线 ab 相接触，而是固定的和 N 极下的导线相接触。因为在一定的磁极下，导线中电动势方向是一定的，所以，电刷 A 和 B 的极性也就是一定的了。这就是通过换向器将交流变为直流的原理。这时电刷两端电压波形如图1-4所示。由图可见，电动势的方向虽然不变，但它的大小却在零和最大值之间脉动，这种简单的直流发电机电压波动太大，而且电压也很低。为此实际的直流电机线圈数和换向片都是很多的，关于电枢绕组的连接规律在第二章再详细讨论。

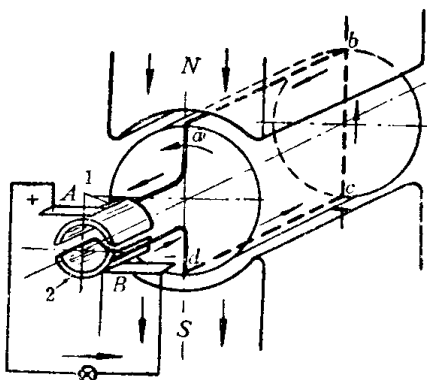


图 1-3 直流发电机工作原理

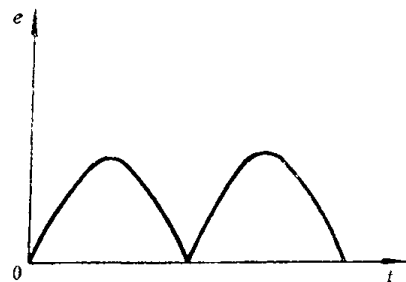


图 1-4 一个线圈的脉动电动势

1—3 直流电动机的工作原理

在电工基础中，已经知道通过电流的导体在磁场中会受到作用力这个客观规律——电磁力定律。直流电动机就是这个规律的实际应用的一个例子。

如图1-5所示的直流电动机，接到直流电源上，电刷 A 接到电源的正端，电刷 B 接到

电源的负端。这时电流从电刷 A 流入电枢的线圈中，从电刷 B 流出。在图1-5所示的位置时，在 N 极下导线的电流是由 a 到 b ，根据左手定则可知导线 ab 受力的方向向左；而导线 cd 受力的方向是向右的，两个电磁力所构成的电磁转矩是使电动机逆时针旋转。

当线圈转过 180° ，导线 ab 转到 S 极下，导线 cd 则转到 N 极下，由于这时导线的电流方向是由 d 到 c ，和 b 到 a 。因此电磁转矩的方向仍然是逆时针的，这样就使得电机一直旋转下去。和发电机一样，直流电动机通过换向器作用，使正电刷 A 始终和 N 极下导线相连，负电刷 B 则和 S 极下导线相连。由于在一定的磁极下的导线电流方向始终保持不变，所以电机的转矩和旋转方向保持不变。

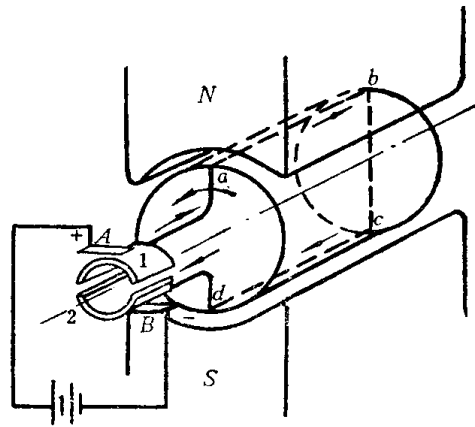


图 1-5 直流电动机工作原理

1-4 直流电机的结构

我们讨论电机结构的主要目的，是要了解电机各主要部件的名称、作用、形状、使用的材料以及怎样组装起来的。电机的结构是由以下几方面的要求来确定的。首先是电磁方面的要求：使电机产生足够的磁场，感应出一定的电动势，通过一定的电流，产生一定的电磁转矩，并要求有一定的绝缘强度。其次是机械方面的要求：电机能传递一定的转矩并保持机械上坚固、稳定。此外，电机的结构要满足冷却的要求，保证温升不过高。最后还要考虑节约材料，制造工艺简单，便于检修，性能好和运行可靠等。

直流电动机和发电机在结构上没有什么差别。只是由于外部条件不同，得到相反的能量转换过程：发电机是将机械能转换为电能，电动机则是将电能转变为机械能。

直流电机是由静止的定子和旋转的转子（又称电枢）两大部分组成，在定子和转子之间的间隙叫做空气隙。定子的作用是产生磁场和作为电机机械的支撑。它由主磁极、换向极、机座、端盖和轴承等组成，电刷装置也固定在定子上。电枢是用来产生电势和电磁转矩，实现能量转换的。它由电枢铁心、电枢绕组、换向器和转轴等组成；用以加强电机通风冷却的风扇也装在电机轴上。直流电机的结构示意图如图1-6和1-7所示。

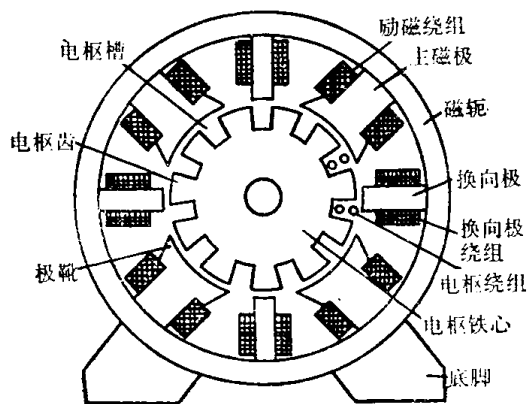


图 1-6 直流电机径向剖面

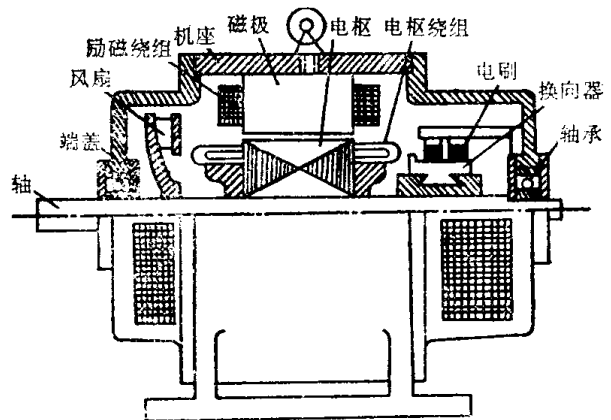


图 1-7 直流电机轴向剖面

下面介绍几个主要部件的构造和作用。

一、定子

1. 主磁极 主磁极的作用是产生主磁通，它由铁心和励磁绕组所组成。主磁极铁心包括极身和极掌（又叫极靴）两部分。主磁极铁心一般用0.5~1.5毫米厚的低碳钢板冲片迭压而成，小电机也有用整块的铸钢磁极。磁极用螺钉固定在磁轭上。磁极上套的线圈叫励磁绕组。线圈用绝缘铜线绕成，线圈和磁极间用绝缘纸和腊布或云母绝缘起来。各主极上的线圈一般都是串联起来的。

2. 换向磁极 在两个相邻的主磁极之间有一个小的磁极，构造与主磁极相似，这就是换向磁极。它的作用是为了改善换向，在以后将专章讨论。

3. 机座 机座一方面用来固定主磁极、换向极和端盖等；另一方面作为电机磁路的一部分。其导磁部分叫做磁轭，磁轭下部的支撑部分叫做底脚。机座一般由铸钢铸成，或用钢板弯成筒形焊接起来。

二、转子

1. 电枢铁心 电枢铁心的作用是通过磁通和安放电枢绕组。当电枢在磁场中旋转时，铁心将产生涡流和磁滞损失，为了减少损耗提高效率，电枢铁心用0.5毫米的硅钢冲片迭成。为了加强冷却，电枢铁心具有轴向通风孔，较大容量的电机沿轴向还分成几段，每段长4~10厘米，每段间空出10毫米作为径向通风沟。

2. 电枢绕组 它是电机的重要部分，电枢绕组在磁场中旋转，感应出电动势和电流并产生转矩，实现能量转换。它由绝缘铜线绕成线圈后嵌入电枢铁心的槽中。线圈与铁心之间以及上下层线圈之间必须妥善绝缘。为了防止电枢旋转时产生的离心力使绕组飞出来，绕组在槽内部分用竹楔或木楔等来锁住，伸出槽外的端接部分用玻璃丝粘带或钢丝扎紧在绕组支架上。绕组线圈的端接头按一定的规律焊接在各换向片上。电枢绕组的连接方法将在下一章专门讨论。

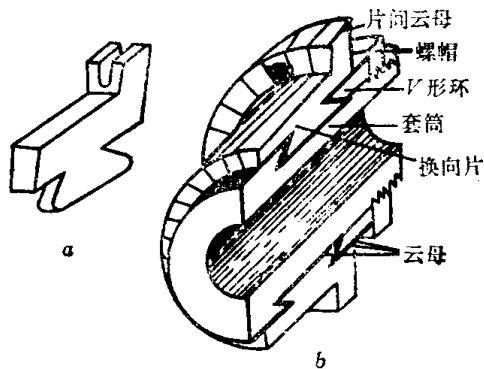


图 1-8 换向片和换向器
a—换向片；b—换向器

3. 换向器 换向器又叫整流子，它的作用在前两节已经介绍，简单来说它起到整流的作用。换向器的结构如图1-8所示，它是由许多带有鸽尾形铜片（换向片）迭成一圆筒形组成。在每相邻两换向片间都垫有0.6~1毫米厚的云母片。在整个圆筒的两端用两个V形截面的环紧紧夹住，在V形环和换向片组成的圆筒之间也垫以V形的云母绝缘垫圈。每一换向片上有一小槽或有一凸出的小铜片以便焊接绕组各线圈的引出线。小容量的电机可用塑料换向器，换向片组成的圆筒用塑料浇铸在一起，如图1-9所示。

4. 电刷装置 在直流电机中，为了使电枢绕组和外电路连接，必须装设固定的电刷装置，它由电刷、刷握和刷杆座所组成。

电刷主要是用碳-石墨等做成的导电块，它放在刷握（图1-10）中的刷盒内，用弹簧将它压在换向器上。刷握用螺钉夹紧在刷杆上，用铜丝编成的绞线将电刷和刷杆连接，刷杆装在刷杆座上，它们彼此是绝缘的，中小容量电机的刷杆座装在端盖上，大容量的电机则

装在机座上。

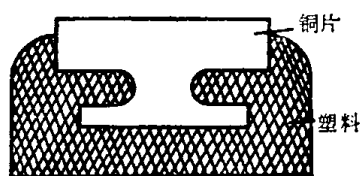


图 1-9 塑料换向器

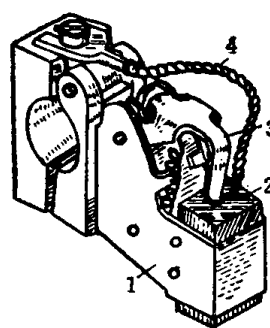


图 1-10 刷握和电刷

1—刷盒；2—电刷；3—加压弹簧；4—导电绞线

1—5 直流电机的系列和铭牌

一、国产直流电机系列

为了满足各行各业中对电机的不同要求，将电机制成不同型号的系列。所谓系列就是指结构和形状基本相似，而容量按一定比例递增的一系列电机。它们的电压、转速、机座号和铁心长都有一定的等级。

现将冶金工业中常用的国产直流电机系列简介如下：

1. Z型直流电机 Z为直流电机汉语拼音第一个字母。这种系列电机是通风防护式的，包括电动机、变速电动机和发电机，电动机适用于调速范围不大的生产机械的拖动。采用A级绝缘，运用于少灰尘，少腐蚀气体及温度低的场所。

2. Z₂型 这种系列是Z型电机系列的改进，也是防护式，有发电机、电动机和变速电动机（调速范围可达2:1，即可超过额定转速的一倍）；绝缘分E级、B级和F级三种；用途同Z型。

3. ZO型 这种电机是封闭式的，也是A级绝缘；用于多灰尘但无腐蚀性气体的场所。

4. ZF和ZD型 这两种型号的电机都属于大中容量的发电机(F)和电动机(D)，发电机做直流电源，电动机主要用于需要广泛调速，具有较大的过载能力的场所，如高炉卷扬机、轧钢机、电铲、大型机床及矿山竖井中。

5. ZZ和ZZK型 这两种电机主要用于起重和冶金机械中的直流电动机。型号中第二个字母Z代表起重，K代表高速。

6. ZQ、ZQD、ZQF系列直流牵引电机 这些系列电机主要用于电力机车、工矿电机车。型号中的字母Q代表牵引；F代表发电机，D代表电动机。

二、铭牌及额定值

为了保证电机安全而有效地运行，电机制造厂都对它出产的电机的工作条件加以规定，电机按制造工厂规定的条件工作时的情况，叫做额定工作情况。电机在额定工作时各种数据叫做额定值。这些数据都列在电机的铭牌上。

铭牌上标出的型号：Z₂-42中Z₂为防护式直流电机第二次设计的系列。引号后第一个数字“4”表示机座号，第二个数字“2”表示铁心长度。即第4号机座2号铁心长。

铭牌上标出的功率是指电机在额定工作时输出功率，又称为额定容量。对发电机来说，额定容量P_e是指出线端输出的电功率，它等于额定电压U_e和额定电流I_e的乘积，即

$P_e = U_e I_e$ 。对电动机来说，额定容量是指轴上输出的机械功率。它等于额定电压和电流的乘积再乘上该电机的效率，即 $P_e = \eta_e U_e I_e$ 。在使用一台电机以前，应认真熟悉铭牌上的数据，一般不应超过铭牌所规定的额定数据。

表 1-1 电 机 的 铭 牌

直 流 电 动 机			
型 号	Z ₂ -42	励磁方式	他 励
功 率	4 千瓦	励磁电压	220 伏
电 压	220伏	励磁电流	0.63安
电 流	22.7安	定 额	连 续
转 速	1500转/分	温 升	80℃
出品号数	× × × ×	出厂日期	年 月

习 题

1. 直流电机由那儿部分组成，它们的基本结构和各零部件的作用如何？
2. 直流电机的换向器在发电机中和在电动机中各起到什么作用？为什么它能起到这些作用？

第二章 电 枢 绕 组

2—1 概 述

电枢绕组是直流电机主要的部件，感应电动势、电流和电磁力的产生，机械能与电能的转换都发生在这里。电枢绕组的结构对电机最基本的参数和性能都有影响。电枢绕组也是比较容易出现故障的部分，它将直接影响到电机的正常运行。因此，对从事电机维护与检修人员来说，对电枢绕组的结构和绕制规律应有比较清楚的了解。

在讨论连接的规律前，首先根据实际的需要，提出对绕组一些要求，这些要求是：

(1) 满足电性能的需要，即要感应出规定的电动势，能够承受规定的电流。(2) 线圈材料要得到充分的利用，尽可能节省有色金属和绝缘材料。(3) 力求结构简单，运行时安全可靠等。由于直流电机的容量和电压等级不同，绕组的形式有多种，但最基本的有两种，即单迭绕组和单波绕组。本章只介绍这两种绕组。直流电机电枢绕组虽较复杂，但只要从简单的、具体的问题入手，从中找出规律性的东西，就不难掌握它。

当我们仔细观察直流电机的电枢绕组时，可以发现它是由许多个完全相同的线圈所组成。这些线圈是组成绕组的单元，叫做绕组元件。每个元件有两个边嵌在电枢槽内，如图 2-1 所示。处在槽内能切割磁通感应电动势的直线部分叫做有效边；在槽外两端不感应电动势，仅起连接作用称为端接部分。

为了工艺的方便，直流电机电枢绕组多采用双层绕组。每个元件的一边放在一个槽内，占着槽的上层；另一边则放在另一槽内，占着槽的下层。相邻的槽内将同样放着另一绕组元件，依次排列下去，直到填满所有的槽。

绕组元件是由一匝或多匝导线绕成,几个千瓦以下的小电机一般采用有绝缘的圆导线;电流较大的电机一般用矩形截面的扁导线。图 2-2 表示一个大容量直流电机电枢绕组槽的截面图,槽中上下层各包括三个元件边,每一元件边就是一根矩形导线(单匝元件)。在实际的电机中,为了减少槽的数目,每个槽中常放着四个、六个或更多的元件边。每个元件边都包有绝缘,每一层的各元件边,又用绝缘包在一起,上下层之间有绝缘垫片,外面与铁心接触处还有一层槽绝缘。较小的低压电机用 A 级绝缘,如棉纱、普通漆包线、绝缘纸、蜡布等。较大或工作条件恶劣的电机用 B 级绝缘如玻璃丝包线、云母纸等材料。在槽内用槽楔将元件压实,槽楔一般用木片、竹片或胶木板等做成。

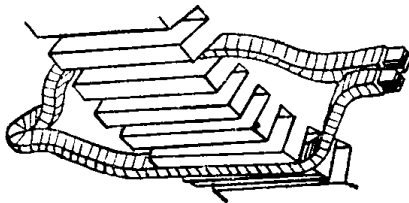


图 2-1 绕组元件在槽中位置

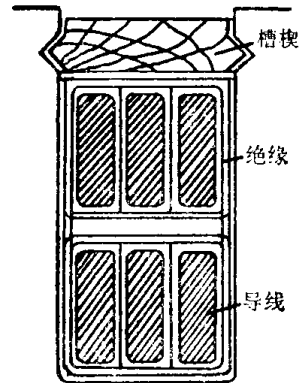


图 2-2 电枢槽的截面

最后让我们来观察绕组元件数、槽数和换向片数的关系:因为直流电机都是采用双层绕组。在有些电机中,每槽上下层各放一个元件的有效边,这样每槽就有两个有效边,而每一元件也有两个有效边,所以在这些电机中,元件总数等于槽的总数。但在大多数电机中,每槽每层的元件边数 $u > 1$ (例如图2-2所示的槽中 $u = 3$)。为了计算和作图编号方便,我们把 $u = 1$ 的槽作为单元槽,叫做虚槽。每个实槽有 u 个虚槽,设 Z_x 为虚槽数, Z 为实槽数,则有

$$Z_x = uZ \quad (2-1)$$

显然一个虚槽对应一个元件,元件数 S 和虚槽数 Z_x 相等。我们还注意到每个元件的头尾接到不同的两个换向片上,而每个换向片上接到不同的两个元件,即前一元件的尾和下一元件的头同接到一个换向片上。这样每对应一个元件就应该有一个换向片。所以换向片数 K 、元件数 S 和虚槽数 Z_x 是相等的。即

$$K = S = Z_x \quad (2-2)$$

2—2 绕组的特点和节距

在这一节里将讨论两个问题:一个是单迭绕组和单波绕组绕法基本特点;另一个是绕组节距。

一、单迭绕组和单波绕组的主要特点

现在我们从实际的绕组出发来研究它的规律。图 2-3 为单迭绕组的一部分放射图,它的展开图如图 2-4 左所示。展开图是把电枢沿轴向切开并把电枢表面展开在一平面上的绕组图形。由图2-4可知,单迭绕组绕法的基本特点是:每个元件头和尾各接在相邻的两换向片上。图 2-4 表示单迭绕组的两种绕法:第一种绕法是相邻的第二元件紧接着第一元

件，且在它的右边；而第二种则在左边。前者叫右行绕组或不交叉绕组；后者叫做左行绕组或交叉绕组。通常都采用不交叉绕组，因为它的端接用铜量较少。由图 2-4 所示的展开图可以看出，每个绕组元件都和第二个元件搭迭在一起，所以取名“迭”绕组。

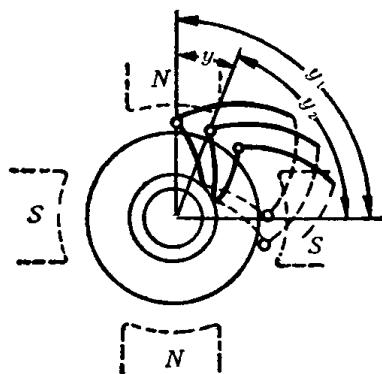


图 2-3 单迭绕组元件放射

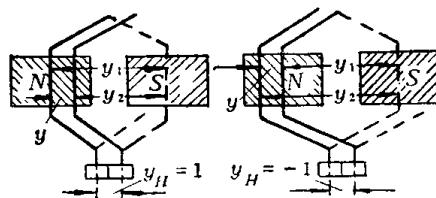


图 2-4 单迭绕组元件

图2-5和2-6所示是单波绕组的一部分。这种绕组的基本特点是绕组绕换向器一周后，回到和出发的换向片相邻的换向片上，以便于第二周继续绕下去。对于 P 对磁极电机，每绕一周，要经过 P 个元件。单迭绕组是每绕过一个元件则在换向器上位移一个换向片；单波绕组则须绕过电枢一周，经过 P 个元件才在换向器上位移一个换向片。单波绕组也分为左行绕组和右行绕组两种。如图 2-6 左所示，绕过电枢一周回到出发点的左边的叫做左行绕组或不交叉绕组；图 2-6 右所示的是右行绕组或交叉绕组。从该图可以看到，连接起来的元件像波浪一样向前延伸，所以叫做波绕组。

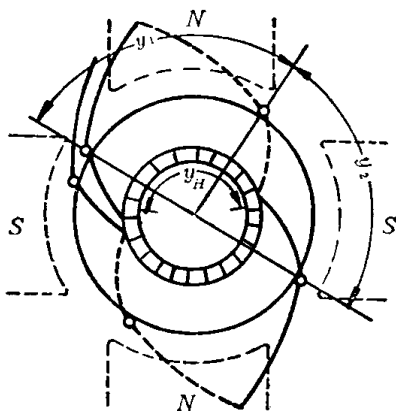


图 2-5 单波绕组元件放射图

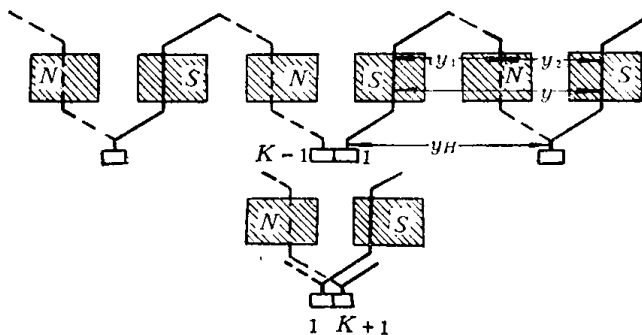


图 2-6 单波绕组元件

二、绕组的节距

为了正确地把各个元件及相应的换向片，彼此按一定规律连接起来，必须求出绕组的节距，而绕组的节距包括下列内容：

1. 换向器节距 y_H 它是每一元件的头和尾所连接的两个换向片之间的跨距，用换向片数来表示。

根据单迭绕组的特点，如图2-4所示，得到单迭绕组换向器节距为

$$y_H = \pm 1 \quad (2-3)$$

式中 正号表示不交叉绕组，负号表示交叉绕组。

根据单波绕组的特点，如图2-6所示，每个元件大约跨着两个极距，如果电机的极对数为 P ，则绕组绕电枢一周后，就有 P 个元件串联起来，并回到起绕时的换向片右一个或左一个换向片上，这就是说 P 个元件所跨过的换向片总数 $P y_H$ 应比换向片总数 K 多一个或少一个，即 $P y_H = K \mp 1$ 。由此可得单波绕组的换向器节距

$$y_H = \frac{K \mp 1}{P} \quad (2-4)$$

式中 负号表示不交叉绕组；正号表示交叉绕组。正负号的选择，首先要满足 y_H 是一个整数，其次应尽可能选负号，即选不交叉绕组。

2. 合成节距 y 紧接着相串联两元件的对应有效边（例如第一元件的上层边与紧接的第二个元件的上层边）之间在电枢上所跨的虚槽数。因为虚槽数是和换向片数是相等的，因此每绕过一个元件时，在电枢上所越过的虚槽数（ y ），应该和在换向器上跨过的换向片数（ y_H ）是相等的。否则就会发生空槽，或换向片过剩的现象。所以

$$y = y_H \quad (2-5)$$

3. 第一节距 y_1 指同一元件的两个有效边在电枢上的跨距，以虚槽数来表示。为了使元件的电动势为最大，要求节距 y_1 应等于或接近于一个极距 τ 。当 $y_1 = \tau$ 时（图2-7），叫全节距绕组；当 $y_1 < \tau$ 时，叫短节距绕组；当 $y_1 > \tau$ 时，叫长节距绕组。一般只采用全节距或短节距绕组。因为长距绕组电动势较全距小，而端接部分较长，用铜量较多，只是在特殊情况下采用。极距 τ 的跨度以虚槽计算应为 $\tau = \frac{Z_r}{2P}$ ，它有时不等于整数，例如 $Z_r = 18$ ，

$2P = 4$ ，则 $\tau = \frac{18}{4} = 4\frac{1}{2}$ 。因为第一节距 y_1 必须是整数，在这种情况下， $y_1 \neq \tau$ 而应取

$$y_1 = \frac{Z_r}{2P} \mp \varepsilon = \text{整数} \quad (2-6)$$

式中 ε 是用来凑成 y_1 与 $\frac{Z_r}{2P}$ 相接近的整数。负号为短距，正号为长距。

例 1 某电机磁极数 $2P = 4$ ，电枢的实槽数 $Z = 33$ ，每层元件边数 $u = 3$ ，求绕组元件第一节距 $y_1 = ?$

解 极距 $\tau = \frac{Z_r}{2P} = \frac{uZ}{2P} = \frac{3 \times 33}{4} = 24\frac{3}{4}$ ，现取 $y_1 = 24$ ， $\left(\varepsilon = -\frac{3}{4} \right)$ 比较合理，

因为以实槽计算 $y_1 = \frac{24}{3} = 8$ （整数），可以做成同槽式元件。即把同槽的三个元件包扎在一起（图2-8），简化下线工艺。

4. 第二节距 y_2 它是某一元件由下层边和它相串联的第二元件上层边间所跨的虚槽数。从图2-4和图2-6可以得出

在单迭绕组中： $y = y_1 - y_2$ (2-7)

或 $y_2 = y_1 - y$ (2-8)

在单波绕组中： $y = y_1 + y_2$ (2-9)

或 $y_2 = y - y_1$ (2-10)