

交通系统技工学校试用教材

船舶电机

(船舶电工专业用)

——南京海员学校 温效谟——编——

人 民 交 通 出 版 社

交通系统技工学校试用教材

船 舶 电 机

(船舶电工专业用)

南京海员学校 温效谟 编

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书主要讲述船舶直流电机、三相异步电机、同步电机以及常用特种电机的基本结构、工作原理、运行特性和维护保养。

本书为水运技工学校船舶电工专业试用教材，也可供船舶电工人员阅读。

交通系统技工学校试用教材

船 舶 电 机

(船舶电工专业用)

南京海员学校 温效谟 编

人民交通出版社出版、发行

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 006 号

人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092_{1/32} 印张：7.25 字数：176 千

1981 年 5 月 第 1 版

1981 年 5 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数：0001—1,700 册 定价：0.63 元

目 录

第一章 直流电机	1
第一节 直流电机概述	1
第二节 直流电机的作用原理	1
第三节 直流电机的主要结构	2
一、固定部分	2
二、转动部分	3
三、其它部件	4
第四节 直流电机的电枢绕组	5
一、单迭绕组	5
二、复迭绕组	8
三、单波绕组	9
四、复波绕组	11
第五节 电枢绕组均压线	12
第六节 电枢绕组的感应电势	13
第七节 直流电机的电枢反应与换向过程	14
一、电枢反应	14
二、换向过程	15
三、改善换向的方法	17
第八节 直流发电机	19
一、直流发电机按激磁方式分类	19
二、直流发电机的电磁转矩和电磁功率	20
三、直流发电机的特性曲线	22
四、他激发电机	22
五、并激发电机	24
六、串激发电机	26
七、复激发电机	27
八、发电机的并联运用	28
第九节 直流电动机	29
一、直流电动机的应用和分类	29
二、直流电动机的运行原理	29
三、直流电动机的运行性能	31
第十节 直流电动机的起动	35
第十一节 直流电动机的反转	36
第十二节 直流电动机的制动	37

第十三节 直流电动机的调速	39
第二章 三相异步电动机	42
第一节 三相异步电动机的构造	42
第二节 异步电动机的作用原理	44
一、旋转磁场的产生	44
二、异步电动机的运行原理	47
三、异步电动机的转差率	47
第三节 异步电动机的绕组	48
一、单层绕组的联接方法	49
二、双层绕组的联接方法	53
三、接线参考图	55
第四节 异步电动机的铭牌数据	55
第五节 异步电动机的工作特性	57
一、旋转磁场对定子绕组的作用	57
二、旋转磁场对转子绕组的作用和转子各量与转差率的关系	59
三、异步电动机的功率	61
四、异步电动机的电磁转矩	62
五、异步电动机的稳定运行区和机械特性	62
第六节 异步电动机的起动	63
一、概述	63
二、鼠笼式异步电动机的起动和起动设备	64
三、绕线式异步电动机的起动和起动设备	66
四、高起动转矩的鼠笼式电动机	67
第七节 异步电动机的调速	69
第八节 异步电动机的制动	71
第三章 同步发电机	73
第一节 同步发电机的构造原理	73
一、同步发电机转速与电动势频率的关系	73
二、同步发电机的基本结构	74
第二节 同步发电机的感应电动势	76
一、发电机的磁路	76
二、定子绕组中感应电动势的大小	77
三、感应电动势中的高次谐波	78
四、用短距绕组改善电动势的波形	80
五、消除三次谐波电动势	81
第三节 同步发电机的励磁系统	83
第四节 同步发电机的电枢反应	84
一、负载为纯电阻时的电枢反应	85
二、负载为纯电感时的电枢反应	86
三、负载为纯电容时的电枢反应	86

四、感性负载时的电枢反应	87
第五节 同步发电机的铭牌数据	88
第六节 同步发电机的运行特性	89
一、同步发电机的空载特性	89
二、隐极式同步发电机的电压平衡关系和同步电抗	90
三、隐极发电机的向量图	92
四、凸极式发电机的同步电抗和向量图	94
五、同步发电机的外特性	95
六、同步发电机的电压变化率和调节特性	96
第七节 同步发电机的功角特性	97
一、同步发电机功率与转矩的平衡	97
二、同步发电机的功率角和有功功率	98
三、同步发电机的功角特性	99
第八节 同步电动机	102
第四章 特种电机	104
第一节 单相异步电动机	104
一、单相异步电动机的磁场和电磁转矩	104
二、单相异步电动机的起动方法	106
第二节 自整角机	107
一、自整角机的结构	107
二、自整角机的传递系统	108
三、作用原理	109
第三节 执行电动机	109
一、交流执行电动机	109
二、两相异步执行电动机的运行情况	110

第一章 直流电机

第一节 直流电机概述

直流电机为直流发电机和直流电动机的总称。将机械能变换为直流电能的电机称为直流发电机；将直流电能变换为机械能的称为直流电动机。

直流发电机是工业交通上直流电的主要电源之一。目前直流电在有色金属的冶炼、蓄电池的充电等方面用得很广，还有一定数量的船舶采用直流电。因为直流电动机可以经济而均匀地调节转速，起动力矩又大，因此被应用在需要均匀调节转速的传动中，例如大型轧钢机、电机车牵引以及船上的起货机、起锚机等。

第二节 直流电机的作用原理

直流电机的作用原理是建立在电磁感应定律以及载流导体和磁场相互作用定律的基础上的。在本质上，直流电机是一台装有换向器的交流电机，用换向器把交流变成直流。图1-1a)表示交流发电机的作用原理，若磁极的磁通 Φ 是按正弦规律变化的，那么线圈在磁极间旋转时，在电刷A、B上量得的电势 e 也是按正弦规律变化的，如图1-1b)所示。

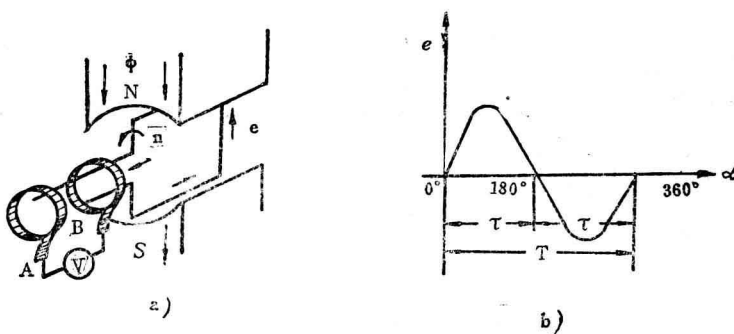


图1-1 交流发电机
a)原理图；b)正弦交流电动势

直流发电机的工作原理如图1-2a)所示。由两个互相绝缘的半环组成的换向器代替交流发电机的两个圆环，线圈中的感应电动势通过换向器引出来。可以看出，和电刷A接触的导线永远是在N极下运动的那一根。因此电刷A总是正极性的，电刷B总是负极性的。

在电刷A、B上量出来的电势为脉动电势，如图1-2b)所示。从图中可以看出，电势在零和最大值之间变化，波动显著。如将线圈数和相应的换向片数加多，并分布在不同的位置上，且相互串联起来，脉动程度可大为减小。

图1-3a)表示发电机有四个线圈边串联。从图1-3b)中可以看出，脉动的程度大大减轻。在现代直流电机中，由于相串联的线圈数较多，合成电势脉动程度很小，可视为恒定值。

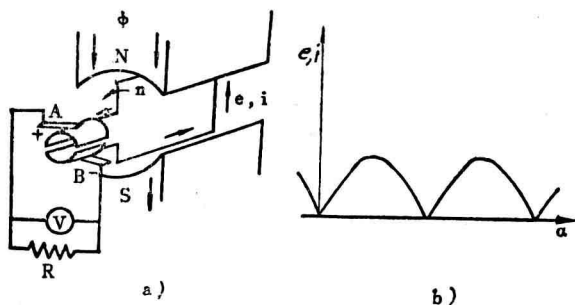


图1-2 直流发电机
a)原理图, b)A、B电刷间的脉动电势

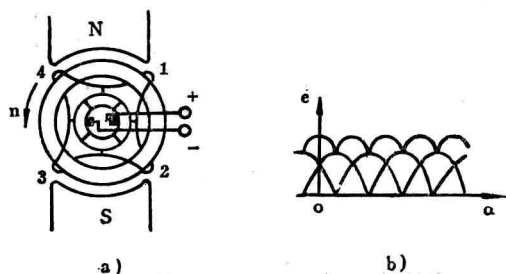


图1-3 直流发电机
a)四个线圈边相串联的直流发电机, b)合成脉动电势

第三节 直流电机的主要结构

一、固定部分

1. 主磁极

主磁极的作用是产生主磁场，由铁心和线圈组成。主磁极包括极身和极掌两部分，用0.5~1.0毫米厚的低碳钢片冲形后叠起来，用铆钉铆紧，固定在机座上，如图1-4所示。磁极上套有激磁线圈，线圈用绝缘铜线绕成，线圈与磁极之间用绝缘纸、腊布或云母纸绝缘起来。各极上的线圈一般是串联，主磁极总是偶数。

2. 机座

机座的作用一方面作为各磁极间的磁的通路，同时作为电机的机械支架，以固定主磁极和换向磁极等部件。机座一般用钢板弯成圆筒形焊起来，或是用钢铸成。在小电机中也有用铸铁的，它的厚度一方面须有足够的强度和刚度，另一方面要有足够的截面，使磁通密度不太高。在机座下部两边有两个底脚，以便固定电机。机座中用来传导磁通的部分叫磁轭。机座如图1-5所示。

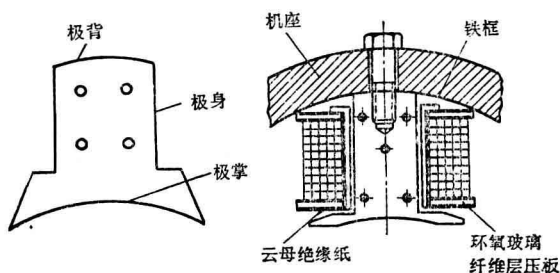


图1-4 主磁极及其固定方法

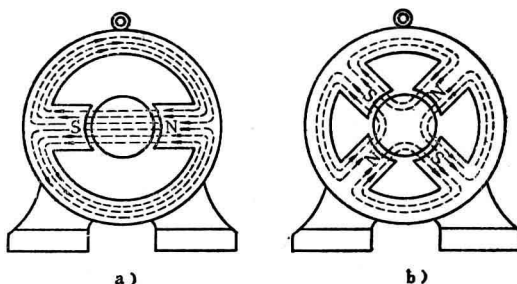


图1-5 机座
a)两极电机, b)四极电机

3. 换向极

在两相邻的主磁极间有一个小的磁极，构造与主磁极相似，叫做换向极。它的作用是为了在运行时在换向器上不产生火花。因为换向极对转子有较大的空气隙，因此涡流影响不

大。大多数换向极均用整块钢做成，只有在大型电机中才用钢片叠成。换向绕组一般和电枢绕组串联，通过换向绕组的电流就是电枢电流，因此换向绕组截面较大，如图 1-6 所示。

4. 空气隙

在极掌和转动电枢之间有一空气隙，主磁极产生的磁通在空气隙中分布成一定的形状，气隙的大小和形状对电机的运行有很大的影响。在小容量电机中气隙约为 1~3 毫米，在大电机中可大到 10~12 毫米，如图 1-7 所示。

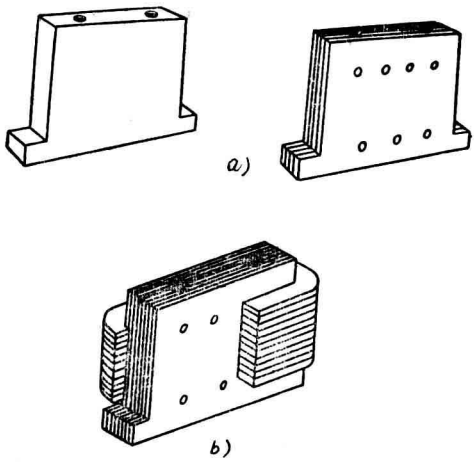


图1-6 换向极
a)换向极铁心；b)换向极绕组

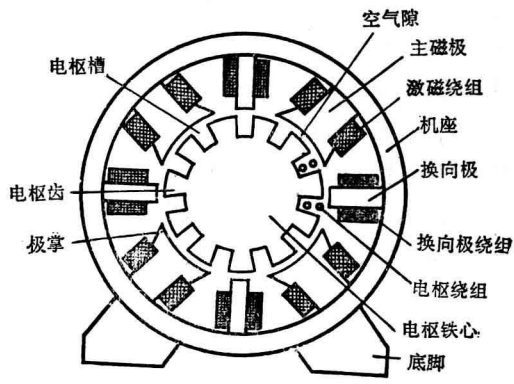


图1-7 直流电机的剖面图

二、转动部分

1. 电枢

电枢由电枢铁心和电枢绕组构成。电枢铁心用 0.5 毫米厚的硅钢片冲成如图 1-8 的形状叠起来，两端用夹件和螺杆夹紧。当电枢在磁场中旋转时，铁心中将产生涡流和磁滞损耗，用硅钢片可以减少损耗，提高效率。

在电枢铁心槽内安放电枢绕组。在容量稍大的电机中，电枢铁心在轴向分成几段，各段间留出一间隙，称为通风沟。在运转时空气可以吹进沟内，冷却铁心和绕组。电枢铁心槽分直槽和斜槽，斜槽的优点是能减少电势的脉动，船用电机多采用斜槽式。

电枢绕组是由许多个完全相同的绕组元件以一定的规律联接起来组成的。一个绕组元件

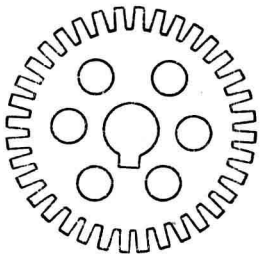


图1-8 电枢铁心冲片

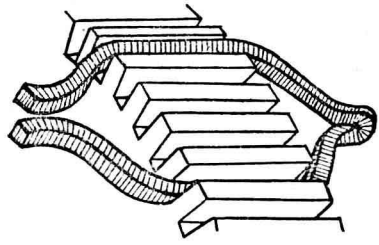


图1-9 绕组元件在槽中的位置

就是一个线圈，它的两个线端分别接到换向器的两个换向片上。各元件在换向片上是互相联接起来的。元件可能是单匝线圈，也可能是多匝。小容量电机是多匝的，大容量电机常是单匝的。每一个元件有两个元件边，就是放在两个槽内的线圈的直线部分。线圈在槽外的部分

称为端接部分。图 1-9 表示绕组元件在槽中安放的情况。可以看出，元件的一个边放在一个槽内，占着槽的上半部，另一边放在另一个槽内，占着槽的下半部。相邻的槽内将同样地安放另一组元件，依次排列下去，直到填满所有的槽。可以看出，槽内的导线分为上、下两层。

2. 换向器

换向器的作用是变交流为直流，即起换向作用。绕组各线圈的引线都接到换向器上，换向器的结构如图 1-10 所示。它是由许多带有燕尾形的铜片（换向片）叠成一个圆筒组成的，在每两片相邻的换向片间都垫有一层云母片。整个圆筒在两端用两个 V 形截面的环夹紧，在 V 形环和铜片组成的圆筒之间也垫以 V 形的云母绝缘垫圈。每一换向片上都有一个小槽或凸出一小片，以便焊接绕组端头。

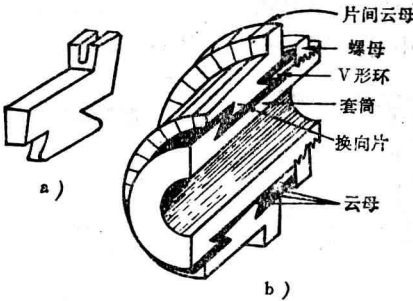


图 1-10
a) 换向片；b) 换向器(半剖视图)

三、其它部件

1. 电刷装置

电刷装置由电刷、刷握、刷杆、刷架等组成。它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，把电枢发出的电流通过电刷装置引出来。电刷是由石墨做成的导电块，放在刷握内，以一定压力的弹簧压在换向器上，其压力为 $0.15 \sim 0.25$ 千克力/厘米²（约 $15 \sim 25$ 千帕）^①。刷握用螺钉固定在电刷支臂上，如图 1-11 所示。按电流的大小，每一支臂上有几块电刷组成电刷组。各刷块的电流都通过软联线汇在一起，然后再把同极性支臂上的导线接到一处，引到出线匣内的接线板上。除了电枢出线外，在出线匣内还有激磁绕组的引出线。

电刷组的数目一般等于主磁极的数目，各电刷组之间在换向器表面上的距离是相同的。在正常运行时，电刷要放在一定的位置。为了便于调整电刷的位置，电刷支臂都装在同一个可以转动的座圈上，把电刷位置找准后，就把座圈用螺钉固定住。

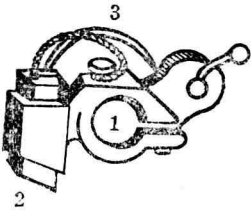


图 1-11 电刷装置

1-刷握；2-电刷；3-压板弹簧

2. 通风和防护装置

按照电机的功率大小和使用条件，电机有不同的冷却和防护装置。最简单的结构是开启式，电机各部分露在外面，依靠转子本身旋转带动空气来冷却。一般中、小型电机都采用防护式结构，在两端的端盖上开了进风口和出风口，在转轴上装有风扇，运转时，风扇把空气引入电机。空气经过一定的风路，冷却电机内部各部件，然后经出风口流出机外。在端盖的进、出风口上装着有孔的网罩，以防止杂物进入电机。目前船舶机舱里用的电机多采用封闭式，靠机壳外表面散热。

3. 铭牌

^①在国际单位制中，压力(压强)单位为帕，即牛/米²或 N/m²；在工程单位制中，其单位为千克力/厘米²或公斤力/厘米²，代号为 kgf/cm²。二者换算关系为 $1 \text{ 千克力/厘米}^2 = 9.80665 \times 10^4 \text{ 帕}$ 。为使叙述简便起见，本书取 $1 \text{ 千克力/厘米}^2 = 10^5 \text{ 帕}$ 。

每台电机上都有一个铭牌，标有下列各数据。

1) 型号。电机的型号系列说明电机的结构、形状和性能等，分别用汉字拼音大写字母和阿拉伯数字组成一定型号来表示。型号的字母 Z 表示直流，再根据电机的用途、性能、结构和设计序号分别编号。例如 Z₂-42，其中 Z 表示直流，脚注 2 表示第二次改进设计，直线后面的 4 表示 4 号机座，2 表示 2 号铁心长度。另外，F 表示发电机，D 表示电动机等。

2) 功率。功率表示电机正常连续运行的能力，一般用千瓦表示。对电动机来讲，功率是指轴上能拖动机械负载的能力；对发电机来讲，是指发电机发出的电力。

3) 电压。电压表示电机正常连续运行时的端电压，用伏特表示。

4) 电流。电流表示电机在正常连续运行时电枢所通过的电流，用安培表示。对电动机来讲，电流是指输入的电流。

5) 转速。转速是指电机正常连续运转时电机的旋转速度，以每分钟转数来表示。在激磁情况正常时，发电机在此转速下能发出额定电压。对于电动机，只有在输入额定电压时，才能保持这个转速。

6) 激磁。激磁表示电机的激磁方式，一般分为他激、并激、串激、复激四种形式。

7) 温升。温升表示电机允许发热的限度，用 °C 表示。例如温升 80°C，而环境温度为 40°C，则电机温度不超过 80°C + 40°C = 120°C，否则就会缩短电机寿命。

第四节 直流电机的电枢绕组

电枢绕组是直流电机的重要部件，通过它来实现电能与机械能之间的相互转换。对电枢绕组的要求是能够产生足够的电势，通过一定大小的电流和产生足够的力矩。直流电机的绕组主要有：单迭绕组、复迭绕组、单波绕组、复波绕组等。

一、单迭绕组

电枢绕组是由绕组元件组成的，一个绕组元件可以是单匝，也可以是多匝。第一绕组元件的终止点为第二绕组元件的出发点，以此类推，顺次通过各个绕组元件而至最初的出发点闭合，便成为整个电枢绕组，如图 1-12 所示。

每个元件有两个边嵌在电枢槽中。在槽内能切割磁力线产生感应电势的元件边称为有效边，元件在槽外的部分不产生感应电势，仅供联接用，称为端接线。绕组元件的一个有效边在 N 极下，另一个有效边就应在 S 极下。它们之间的距离应等于或接近等于磁极的极距，这样两个有效边感应电动势加起来为最大。因为绕组元件的两个接头分别接到两个换向片上，而每个换向片接有两个不同绕组元件的接头，因此总的元件数、槽数、换向片数之间有下列关系：总的元件数目 S 一定等于总的换向片的数目 K，即 $S = K$ 。如果各个槽内每一层只放一个元件边的话，那么槽的数目 N 也一定等于元件的数目，即 $S = K = N$ 。

在小型电机中往往由于槽数少而元件多，槽中每一层包含几个元件边。因此槽的数目将比元件数目少，它们的关系是

$$z = \frac{S}{u}$$

式中 u 是槽中每一层的元件边数。为了区别同一槽中的几个元件边，用“虚槽”来表示。就

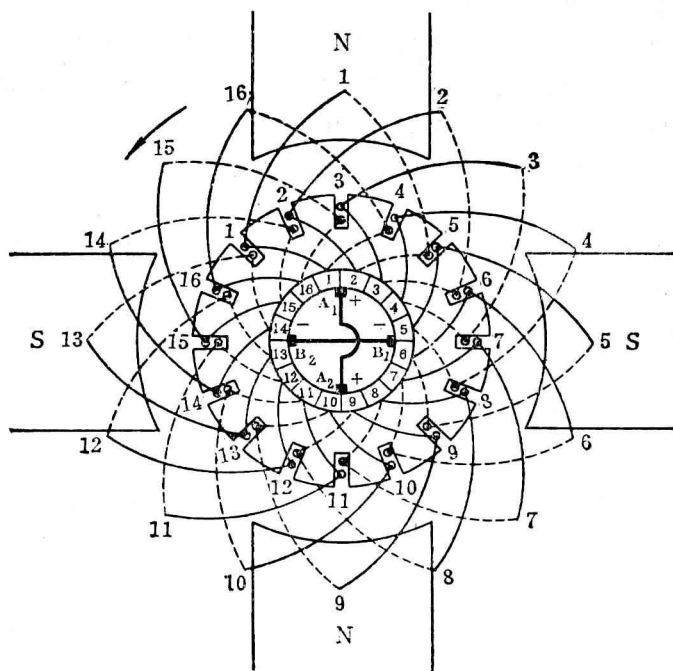


图1-12 单迭绕组

是把实际的槽看成是由 u 个虚槽所合成，每一元件边分别占一虚槽，这样虚槽数 u 就等于元件边数 S 。为了分析问题简单起见，假定 $u=1$ ，一个元件占一个槽。实槽和虚槽如图1-13所示。

绕组元件的联接规律是通过下列四个节距来确定的，如图1-14所示。

1) 第一节距，又称后节距 y_1 ，它表示一个元件两个边之间的跨距。 y_1 是以所跨的槽数来表示的，有虚槽的以虚槽为单位。它近似等于极距。

2) 第二节距，又叫前节距 y_2 ，它是第一元件在换向器端经过换向片联接到第二元件之间的跨距。单位也是以槽数来表示。

3) 合成节距 y ，它是第一元件和与它相联的第二元件对应边之间的距离，也是以槽数为单位。

4) 换向节距 y_k ，它是每一元件的首端和尾端所联的两个换向片之间的跨距。 y_k 是以换向片数为单位的。

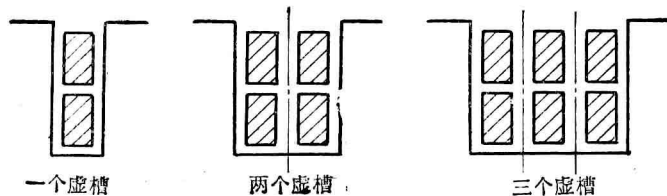


图1-13 实槽中的虚槽数

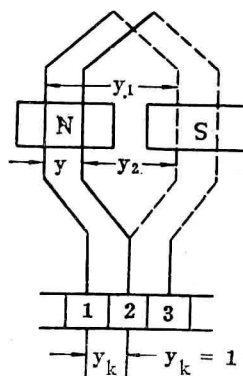


图1-14 单迭绕组元件的节距

1. 单迭绕组的节距

1) 第一节距 y_1 。 y_1 的大小应该使元件内的感应电动势尽可能大一些。这样就要求两元件边之间的距离等于一个极距，因为这时两元件边的电势总是相加的。每一极距内的槽数为 $\frac{z}{2p}$ ，其中 p 为电机的极对数。因此 y_1 应该等于 $\frac{z}{2p}$ ，这样的元件称为“整距”元件。如果 $\frac{z}{2p}$ 并不是一个整数， y_1 应该等于和 $\frac{z}{2p}$ 相近的一个整数。这时的 y_1 为 $y_1 = \frac{z}{2p} \pm \varepsilon =$ 整数。

式中 ε 是使 y_1 凑成整数的一个分数。当 $y_1 < \frac{z}{2p}$ 时，称为短距绕组；当 $y_1 > \frac{z}{2p}$ 时，称为长距绕组。不论长距或短距绕组，在运转时，两元件边中的电势略有不同，因此元件的平均电势要比整距元件的小。

2) 合成节距 y 和换向节距 y_k 。单迭绕组的特点是每一元件的两个线端接到两个相邻的换向片上，就是说 $y_k = 1$ ，同时可以看出，合成节距也等于 1，即 $y = y_k = 1$ 。

3) 第二节距 y_2 。 y_2 可以用 y_1 和 y 来计算决定，从图 1-14 中可以看出，迭绕组元件的节距 $y_2 = y_1 - y$ 。

2. 绕组的展开图

绕组的联接，可以用绕组的展开图来分析。把图 1-12 的电枢表面沿轴向剖开，并把它展开成一平面。画出各磁极的位置，这些磁极在圆周上的位置必须是对称的。每极的宽度约等于 0.7 极距。图上也画出电刷的位置，电刷在换向器圆周上的位置也必须是对称的，也就是各电刷之间相隔的换向片数必须是相等的。

电刷的位置相对于磁极有一定的关系。为了得到最大的电势，对于这种结构的绕组，电刷的中心线应该对着磁极的中心线。

例 有一台四极电机，电枢有 16 个槽，做单迭绕法，画出展开图。

解： $2p = 4, z = S = K = 16$

$$y_1 = \frac{z}{2p} \pm \varepsilon = \frac{16}{4} = 4$$

$$y = y_k = 1$$

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

所画展开图，如图 1-15 所示。

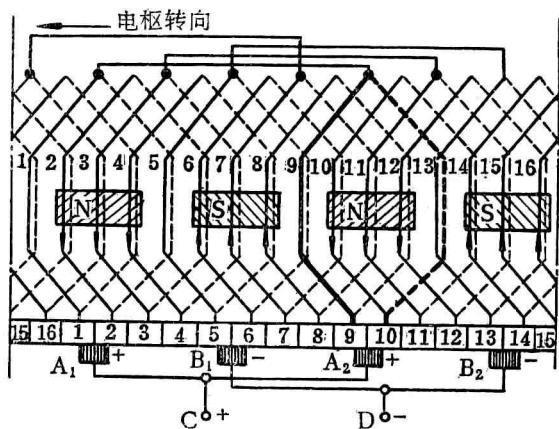


图 1-15 单迭绕组展开图

3. 元件联接次序

从按上列节距所画出的展开图中可以看出绕组的元件之间是如何联接起来的。第一槽放第一元件的上层边，经过 $y_1 = 4$ 接到第五槽的下层，第一元件的两个端接到第一和第二个换向片上。第五槽的下层边经过 $y_2 = 3$ 接到第二槽的上层，这样与第二元件联接起来。以此类推，从左到右把各元件联接起来。各元件联接次序可用图 1-16 表示。数字表示元件边所在的槽数。从第一元件开始，绕电枢一周后，将全部元件边都联接起来，又回到起始点 1，可见单迭绕组在内部是自成一闭合回路的。

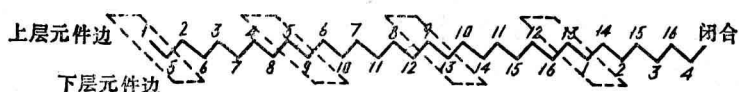


图1-16 元件联接次序

4. 从电刷外看绕组的联接图

上面联接次序图上用虚线框起来的几个元件，表示当电枢转到如图1-15所示的位置时，被电刷所短路的元件。从图1-15中的电势方向可以看出：电刷 A_1 和 A_2 的极性是相同的；电刷 B_1 和 B_2 是相同的。在对外联接时，同极性的电刷联在一起。因此当电枢转到图1-15所示的位置时，从电刷外面看元件联接的关系如图1-17所示。可以看出，从电刷外看进来，元件组成四条并联电路。电枢转到其它位置时，元件的位置可以变动，但从外面看进来仍然是一个四路并联的电路。实际上，在每一个磁极下的元件串联起来组成一个支路，其电势方向都是相同的。在这个例子中是四个磁极的电机，所以表现为四路并联。当极数加多时，并联的支路数将跟极数同样增多。因此，单迭绕组的特点是：电枢绕组的并联支路数等于电机的极数，即 $2a = 2p$ 。因为极数和支路数总是对称的，所以也可以说支路对数等于极对数，也就是 $a = p$ 。其中 a 是支路对数。

上面举的例子是 $y_k = 1$ 。如果 $y_k = -1$ ，也可以绕成一个单迭绕组，但这时元件联接的次序是倒过来的。元件 1 接到 16，再接到 15 等等，是向左方发展的，如图1-18所示。这种绕组称为左行绕组，这种绕法和右行的特点相同，但由于 y_2 比较大，前面的端接部分太废线，同时这种绕法并无优点，因此一般不用。

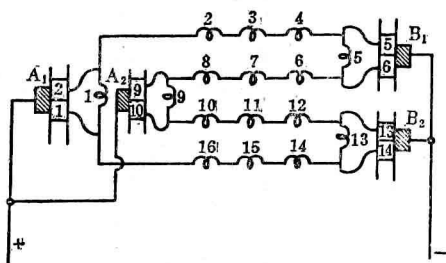


图1-17 单迭绕组并联支路图

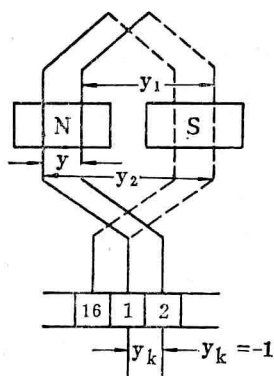


图1-18 单迭左行绕组

二、复迭绕组

1. 复迭绕组的节距

复迭绕组 y_1 的决定方法与单迭绕组一样，两种绕组的不同点决定于换向节距 y_k 。如果 y_k 等于 2，就是复迭绕组。从图1-19可以看出，当 y_k 等于 2 时，第一元件不是与第二元件串联而是联到第三元件去，并且有规律地一个隔一个联下去，组成一个单迭绕组。中间被跳过去的元件也组成一个单迭绕组，这两套绕组互相交迭在一起，并且通过电刷并联起来，这就组成一个复迭绕组。

例 某电机为 4 极，电枢有 24 槽，做复迭绕法，画展开图。

解：各数据如下： $2p=4$ ， $z=S=K=24$ ， $y_1=\frac{z}{2p}\pm\epsilon=6$ ， $y=y_k=2$ ， $y_2=4$ ，展开图如

1-20所示。从图中可以看出，这个绕组由两个在内部互不相联的单迭绕组所组成。

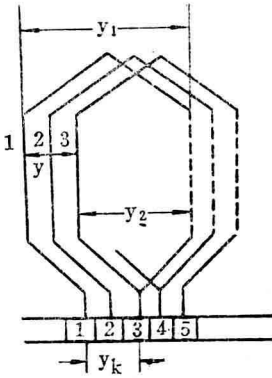


图1-19 复迭绕组的元件联接图

2. 元件联接次序

在上面所举的例题中，绕组元件的联接次序如图1-21所示。

3. 并联支路对数

实质上，上述复迭绕组是由两个单迭绕组所组成，这两个绕组通过共同的电刷并联起来。因此从电刷外看，电枢绕组的并联支路数必定是单迭绕组的两倍，也就是 $a=2p$ 。

根据上面的推论，如果 $y_k=3$ ，就会得到一个三重迭的迭绕组，支路对数也将增大三倍。从理论上分析，若 $y_k=m$ ，必有一个 m 重的迭绕组，支路对数 $a=mp$ 。实际上， m 大于2的绕组是很少用的。 m 称为绕组的复倍系数。

为了保证电刷能同时接触两个绕组，用在复迭绕组上的电刷宽度，要盖住两个换向片。

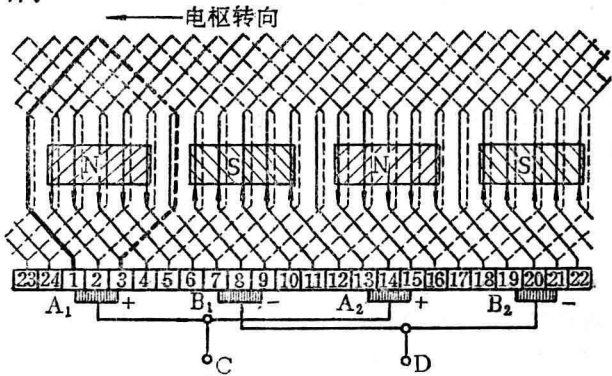


图1-20 复迭绕组展开图

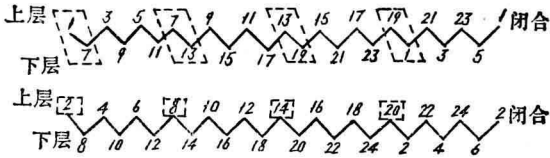


图1-21 元件联接次序

三、单波绕组

1. 单波绕组的节距

波绕组元件的特点是元件两端所联的换向片相隔较远，联接起来的元件象波形一样往前延伸，如图1-22所示，所以称为波绕组。

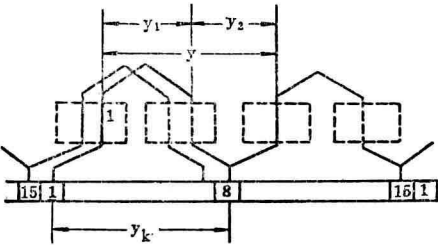


图1-22 单波绕组的节距

波绕组的第一节距 y_k 的决定原则和迭绕组一样，区别是在 y_1 上。选择 y_k 时，首先要求相串联的元件中的电势是同方向的，这就要求两个相串联的元件处在相同的磁极下面，并且占着磁场中差不多相对应的位置；其次，当顺着串联的元件绕电枢一周后，能落在起始元件紧邻的一个元件边上，以便于第二周继续联下去。从图中可以看出： $p=2$ ， $K=15$ ，每一个元件大约跨着两个极距。如果电机的极对数是

p ，绕组绕电枢一周后，就有 p 个元件串联起来，每个元件在换向器上跨过 y_k 个换向片。

要使绕一周后落在第一元件的紧邻，就要求满足下列关系：

$$y_k \phi = K \pm 1$$

因此，单波绕组的换向节距是

$$y_k = \frac{K \pm 1}{\phi}$$

式中正负号的选择首先要满足 y_k 是一个整数，若正负号都可以使 y_k 为整数，则应选负号，因为这时端接部分可以短些。其它节距为

$$y = y_k \quad y_2 = y - y_1$$

从上面可以看出，两个相串联的元件虽然处在极性相同的磁极下，但它们在磁极下的相对位置实际上是不相同的。这是因为，两者之间总是相差 $1/\phi$ 数值。就是说，相串联的两个元件在磁场内有 $1/\phi$ 的位移。这种场移现象在波绕组中是必需的。

图1-23是一个四极的单波绕组展开图，其参数如下：

$$2\phi = 4, \quad z = S = K = 15$$

$$y_1 = \frac{z}{2\phi} \pm \varepsilon = \frac{15}{4} - \frac{3}{4} = 3$$

$$y_k = \frac{K \pm 1}{\phi} = \frac{15 \pm 1}{2} = 7 \text{ 或 } 8$$

取 $y_k = 7, y = y_k = 7, y_2 = 7 - 3 = 4$ 。

根据以上数据所画的单波绕组展开图如图 1-23 所示。

2. 元件联接次序

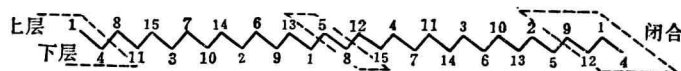


图1-24 元件联接次序

根据图1-23的绕组节距，列出元件联接次序，如图1-24所示。从图中可以看出，从第1元件接到第8元件，再接到15元件，间隔都是7。在图中所示的位置，这些元件的对应边都在同一极性的磁极下面，例如它们在上层的元件边都在 S 极下面，但从第5元件以后，所有元件的上层边都在 N 极的下面，最后到第1元件闭合。所以它的联接规律是：首先把同一极性的磁极下的元件串联起来，然后再接着联上在另一极性磁极下的各元件。这就是单波绕组的联接规律。

3. 并联支路对数

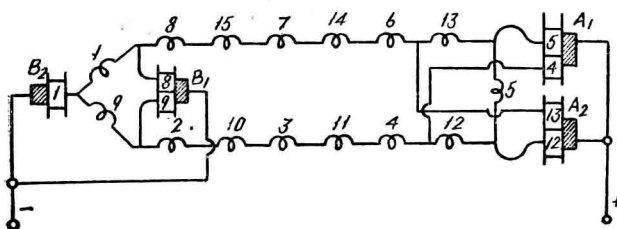


图1-25 单波绕组并联支路图

上面联接次序图中用虚线框起来的元件表示与电刷接触并被电刷短路的元件，元件5与正电刷 A_1 和 A_2 接触，元件1和9与负电刷 B_1 和 B_2 接触。从电刷外看进来元件联接关系如图1-25所示。可以看出，各元件在内部联接成一闭合回路，而对外面形成

4. 单波绕组中的几个特殊问题

2) 电刷的数目。图1-23表示一个四极绕组，共有四组电刷。从图1-25可以看出，如果去掉一对电刷，并不影响绕组的支路数，从理论上分析，任何极数的单波绕组只需一对电刷就行。但因总的电刷接触面积决定于通过的电流，减少电刷数，就要增大每组的接触面，在结构上并不有利。因此，一般单波绕组的电刷组数总是等于极数。

1. 复波绕组的节距

y_k 的值可由下式决定:

因为

$$\phi y_k = K \pm m$$

所以

$$y_k = \frac{K \pm m}{\phi}$$

其它的节距和单波绕组一样。

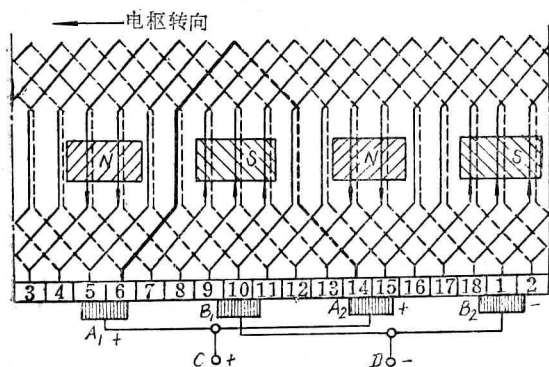


图1-26 复波绕组展开图

图1-26表示 $m=2$ 的复波绕组的展开图, 绕组数据如下:

$$2\phi = 4, \quad z = S = K = 18, \quad y_1 = \frac{18}{4} - \frac{2}{4} = 4$$

$$y_k = \frac{18 \pm 2}{2} = 8 \text{ 或 } 10, \text{ 选 } y_k = 8$$

$$y = y_k = 8, \quad y_2 = 8 - 4 = 4$$

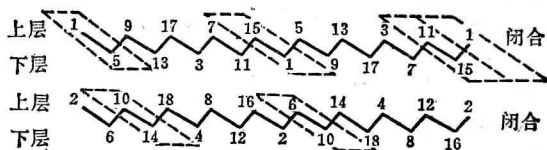


图1-27 元件的联接次序