

第七章 直流电机

直流电机包括直流发电机与直流电动机。直流电动机具有优良的转矩速率特性并能在大范围内平滑地调速等特点，因此在轧钢、矿井提升、电力机车等方面得到广泛应用；直流发电机逐渐被各种类型的整流装置所代替而日益减少，但目前仍有适当地位。

第一节 直流电机的基本原理与结构

一、直流发电机的原理

图 7-1-1 表示一台最简单的直流发电机。当电枢被原动机拖动，在均匀磁场中绕轴线逆时针方向旋转，按照右手定则，上边导体 ab 的感应电势方向朝外，使固定在上方的电刷 A 为正极；下边导体 cd 的感应电势方向朝内，使固定在下方的电刷 B 为负极。当导体 ab 和与它连接的半圆换向片一起转到下边时，它的感应电势方向与在上边时相反。但由于换向片与电刷的滑动转换，使导体 ab 通过换向片与电刷 B 相接触，仍保持电刷 B 为负极；导体 cd 的情况与此相反。因此，无论何时，电刷 A 总是与上边的在 N 极下的导体相连而为正极；电刷 B 总是与下边的在 S 极下的导体相连而为负极。当矩形线圈 $abcd$ 转到水平位置时，它位于磁场的中性位置，其感应电势为零。此时恰是换向片由一个电刷滑到另一个电刷的临界时刻，换向片虽被电刷短路而并没有短路电流。可以看出导体中的感应电势是交变电势，其波形如图 7-1-1 a 所示；电刷 A B 间的电压则是一个波动很大的脉动直流，其波形如图 7-1-1 b 所示。在实际发电机中，电枢绕组的导体和换向片都很多，它们均匀分布在电枢圆周的不同位置，这些不同位置元件的脉动峰值出现于不同时间，诸元件电势的合成结果，就成了大体上平稳的直流电。

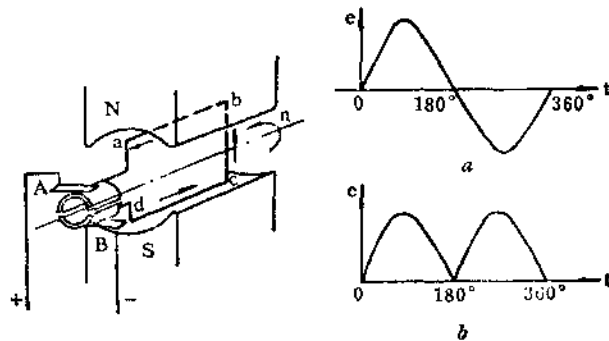


图 7-1-1 直流发电机原理

二、直流电动机的原理

图 7-1-2 表示一台最简单电动机的转动过程。在主磁场里，随轴旋转的矩形线圈 ab cd

(即电枢绕组)经换向片及电刷与直流电源(如电池)连接,构成了电流的通路。当线圈在图7-1-2 a 的位置时,右侧导体ab中的电流方向朝内,按照左手定则,它受到向上的力;左侧导体 cd 中的电流方向朝外,它受到向下的力。电枢受此力偶的作用而朝逆时针方向转动。当转到图 7-1-2 b 的位置时,正值换向片由一个电刷滑到另一个电刷的瞬间,导体ab及cd处在磁场的中性位置,没有力偶作用,电枢依靠惯性继续旋转渡过中性位置,换向片调换了它所接触的电刷,转到图 7-1-2 c 的位置,矩形线圈中的电流方向改变。导体ab转到了左侧,电流方向变为朝外,受到向下的力;导线cd转到了右侧,受到向上的力。在此力偶的作用下,电枢继续旋转。在实际电动机中,电枢绕组的导体和换向片都很多,它们均匀分布在电枢圆周的不同位置,除了个别处于中性位置的导体外,其余导体都受力的作用,无论电枢在什么位置,都能产生一个基本恒定的转矩。

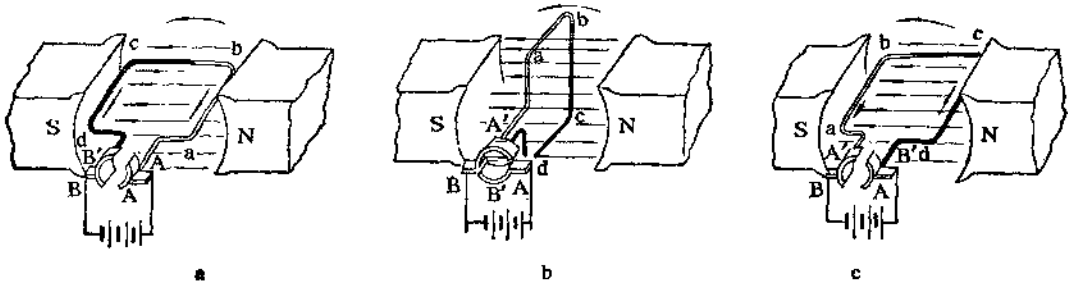


图 7-1-2 直流电动机原理

电动机的导体ab与cd在磁场中转动以后,它也和发电机时一样切割磁力线而产生电势,其方向与电源电势相反,称反电势。同样,当直流发电机有了负载电流以后,它的导体也和电动机时一样在磁场中将受力面有力矩,其方向与原动力矩方向相反,称制动力矩。可见直流电动机与直流发电机是直流电机的两种运行方式,它们是可逆的。

三、电枢反应及其补偿

(一) 电枢反应的表现

在直流发电机中,电机的主磁场通常由主极励磁绕组中的励磁电流产生,它在气隙中的分布是对称于主极轴线的,如图7-1-3 a 所示。如果电机顺时针方向旋转(图中 n)而发电,且电枢绕组中有了负载电流,则此电流的磁势方向由右向左(根据右手螺旋定则决定),与主极轴线垂直,称横轴磁势或交轴磁势,它产生一个电枢反应磁场,其分布状况如图7-1-3 b 所示。当电枢反应磁场迭加在主磁场后,使气隙磁场发生了变化,其合成结果如图7-1-3c所示。这现象称电枢反应。从图中可以看出,合成后的磁场被歪扭挤向旋转方向一边,即磁场的中性线朝旋转方向偏转一个角度 α ,这是电枢反应的一种表现。另外,在N极的左侧磁密减少;而在右侧则磁密增加。但由于磁路饱和的影响,右侧所增加的磁通量不足以补足左侧所减少的磁通量,因而总磁通量减少,即相当于产生了去磁作用,这是电枢反应的另一表现。

在直流电动机中,电枢反应的表现与发电机类似。不过,由于此时电流方向与在发电机时的方向相反,故电枢反应的横轴磁势方向、主磁场歪扭的方向,磁场中性线偏转角度 α 的方向都与在发电机时相反,但仍然是去磁作用。

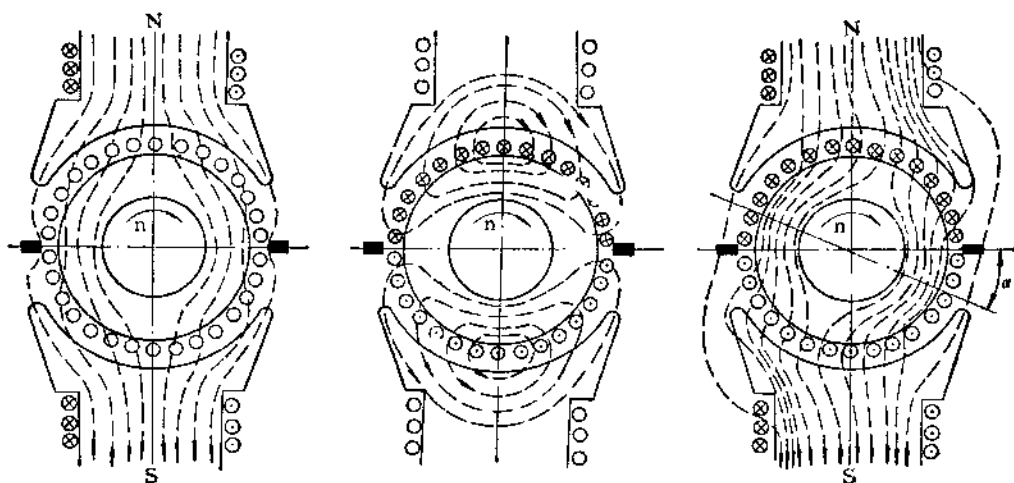


图 7-1-3 直流电机电枢反应磁场的影响

(二) 电枢反应的影响

1. 电机中原来处于主磁通中性位置的元件被电刷短路，即正在换向，此元件没有感应电势。由于出现了电枢反应的横轴磁场，此元件却切割该磁场而产生感应电势，此电势被电刷短路形成很大的短路电流，其方向（按右手定则决定）与换向前的负载电流方向相同，因而增加了换向的困难，电刷下冒出火花，电机不能正常工作。

2. 在磁路饱和的情况下，电枢反应有去磁作用，致使发电机感应电势降低，或电动机转速加快。

3. 电枢反应使主极一侧的磁密增大，故该处元件所感应的电势较高，使该处元件所连接的换向片的片间出现较大的最高片间电压，当换向器平均片间电压设计得较大时，此最高片间电压使电刷下的火花得以继续维持甚至发展，严重时跨过换向器表面而达到另一电刷，形成危害很大的环火。

(三) 电枢反应的补偿方法

1. 补偿绕组

为了补偿电枢反应，在最贴近电枢导体的地方，即仅隔一气隙的主极极靴表面，设置一批导体，其安匝数与各对应位置的电枢导体安匝数相等而磁势方向相反，这些导体所组成的绕组称补偿绕组。在两个相邻的主极极靴之间的空隙处，补偿绕组的导体没处安放，就绕在换向极上，合并到换向绕组中去。在换向极上，除了补偿电枢反应的安匝数以外，还多一些匝数，其磁势相当于电枢反应安匝数的20~30%，此磁势所产生的磁场，用以在换向元件中产生换向电势，它抵消换向元件中的电抗电势以协助换向。在换向极上的绕组称换向绕组，换向绕组与补偿绕组是同时存在的。图7-1-4是补偿绕组与换向绕组的原理与端部连接示意图。补偿绕组是比较完善的补偿电枢反应的方法，但结构复杂，只用于大中型电机中。为了在各种不同负载电流时抵消电枢反应及产生换向电势，补偿绕组及换向绕组中的电流应与电枢电流同时变化，故它们都与主电路串联。

2. 换向极

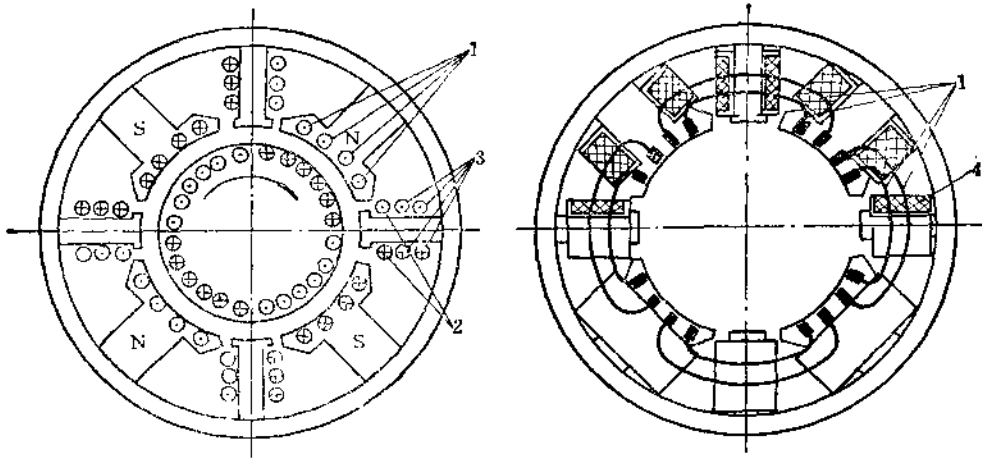


图 7-1-4 补偿绕组与换向绕组的原理与端部连接示意图

1—补偿绕组；2—换向绕组中抵消电枢反应的匝数；3—换向绕组中产生换向电势的匝数；4—换向绕组

在中小型电机里，把补偿绕组的安匝数集中绕在换向极上，其总的安匝数仍等于电枢反应的120~130%。合并后的绕组仍称换向绕组。换向绕组与主电路串联。这种方法简单易行，应用最广，但电枢反应没有得到最好的补偿，故其局部磁密仍有偏高的情况，会出现较大的换向器片间最高电压。

3. 偏移电刷

在小型电机里，安装换向极仍嫌复杂，故采用偏移电刷的方法。即将发电机（电动机）的电刷位置顺（逆）旋转方向略微移动，可使电枢反应得到适当补偿。此方法可以理解为在发电机（电动机）中，相当于把下一个（上一个）主极的一小部分转到中性位置充当换向极，故换向情况有所改善。偏移电刷的方法有较大的缺点，因为电机在运行中不能随时改变电刷位置偏转的角度，而电枢反应却随负载大小而变化，故只能在某一负载值时有较好的补偿效果，而其他情况下换向不良。

四、换 向

电枢旋转时，其绕组元件经过主磁场的中性位置，从一个极换到另一个极，即元件从一条支路进入另一条支路，其中的电流从一个方向变为相反方向，这个过程称换向过程。图7-1-5 a 为元件K换向开始前的瞬间，电刷仅与换向片1相接，元件K在右侧支路中，其中的电流 i_a 为逆时针方向。当电枢绕组以线速度 v_a 由右向左移动到图7-1-5c所示的位置，即为元件K换向终了的瞬间，电刷已离开换向片1而仅与2相接，元件K已移到左侧支路中，其中的电流 i_a 为顺时针方向。图7-1-5b表示元件K正在换向，它被电刷短接，其中电流 i_a 逐渐减小到零并由零向相反方向逐渐增长到 $-i_a$ 。换向过程的时间极短，只有千分之几秒。元件K中的电流急剧变换方向，就会感应一个电势 e_x ， e_x 称电抗电势，它力图阻止电流的变换以维持其原来的电流。另外，换向元件K切割在磁极中性线上的电枢反应磁场，感应另一个电势 e_{a1} ，称电枢反应电势。电势 e_{a1} 与 e_x 的方向相同，都是阻止元件K中的电流变换方向的，它们的数值越大，对换向越不利。有了换向极以后，换向元件K切割换向极的磁

场，在K中产生换向电势 e_K 以抵消 e_{an} 与 e_x ，换向得到改善。这是在电磁方面的粗浅解释。产生换向火花的原因很多，除了电磁方面的原因外，还有其他原因如：

(1) 换向器偏心、椭圆、跳片、云母片凸出、表面不平、不洁，各极片数分配不匀、片身不正等。

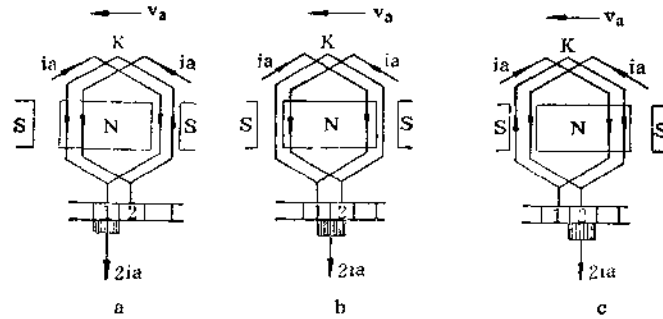


图 7-1-5 元件K的换向过程

(2) 电刷的压力不当、材质不符、滑动不灵活、接触面不好、位置不正确等。

(3) 定子磁极位置偏歪、气隙不符。

(4) 电机震动、外来的震动及过载。

此外，还有化学的、电热的各种原因。

五、结 构

直流电机是由定子、电枢和其他零部件组成如图7-1-6所示。

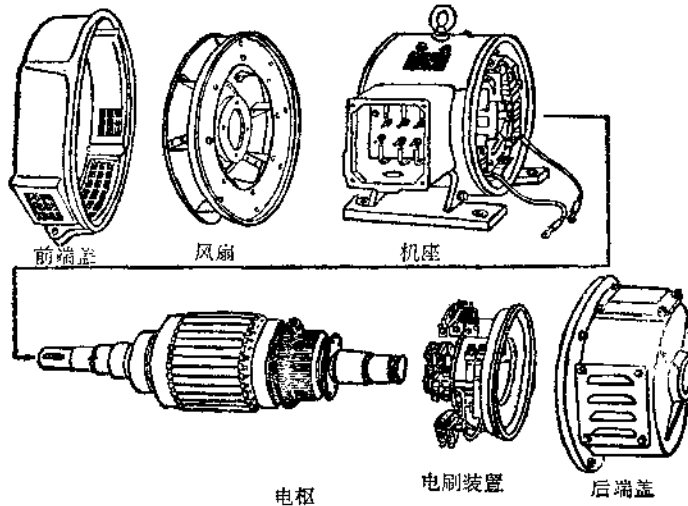


图 7-1-6 直流电动机部件图

(一) 定子

定子由主磁极、换向极、机座等组成，如图7-1-7所示。

1. 主 磁 极

2-7-6 电 动 机

主磁极分极身与极靴，通常用0.5~1.5毫米厚的硅钢片或普通钢板冲片迭合铆紧而成，极身处有励磁绕组，用以产生主磁场。当有补偿绕组时，补偿绕组装设在主极极靴上。

2. 换 向 极

换向极大都是整块锻钢作成，也有的用0.5~1.5毫米厚的硅钢片或普通钢板冲片迭压铆合而成。极身极靴都较窄，极身处有换向绕组。

3. 机 座

机座是支持整个电机零部件的。主磁极及换向极直接用螺钉固定在机座上。机座又是磁路的一部分，所以采用具有较好的导磁能力且有足够断面的铸钢或厚钢板作成。磁极极身与机座间可增加铁垫片以调整气隙。在换向极与机壳之间除了铁垫片之外，有些电机还

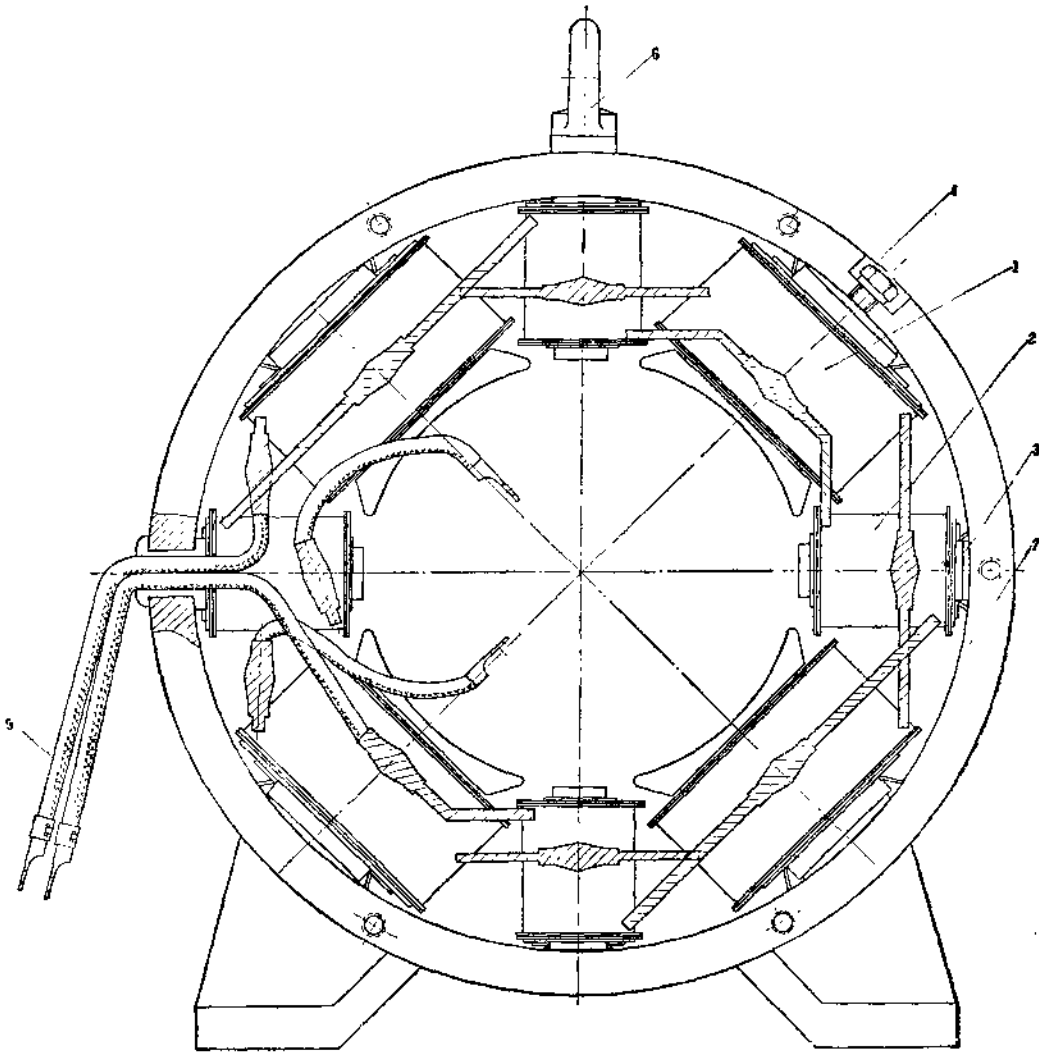


图 7-1-7 直流电机定子结构

1—主极绕组，2—换向绕组，3—第二气隙，4—磁极螺栓，5—引线，6—吊环，7—机座

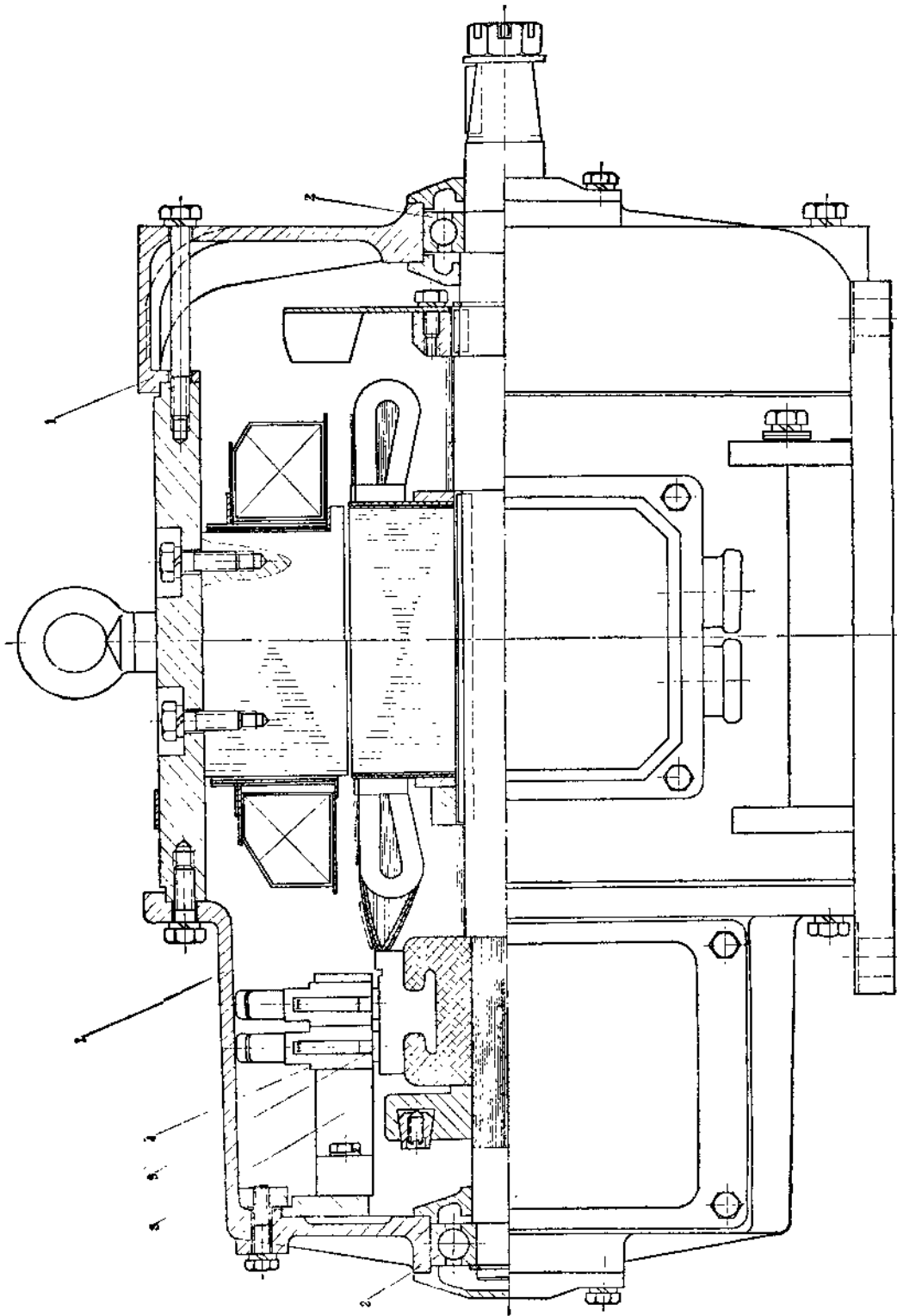


图 7-1-8 直流电机端盖轴承刷架侧面图
1—端盖, 2—轴承, 3—刷杆, 4—刷盒, 5—电刷

设计第二气隙，其材质用铜、铝、层压板等。第二气隙能减少涡流影响，提高换向磁场的跟随性。

4. 端盖、轴承及电刷架

端盖支撑电机的转子，它借助止口与机座固定，在端盖的中心孔中安装的轴承直接支持转轴，轴承中心与端盖止口外圆同心，使电枢的旋转中心线与机座中心线重合以保证电枢与磁极间的气隙均匀。端盖也是电机的防护盖。固定在机座内壁或端盖内侧的电刷架是由刷杆、刷盒和电刷组成，它是电枢与外电路的连接枢纽。图 7-1-8 是这些部件的侧面图。

(二) 电枢

电枢是由铁芯、绕组、换向器等组成，如图 7-1-9 所示。

1. 电枢铁芯及绕组

电枢铁芯由 0.5 毫米厚的硅钢片迭成，两端用端压环或线圈支架夹紧，铁芯中部有直径为 25 毫米左右的轴向通风孔，较大的电枢铁芯在轴向分段，段间为宽度约 10 毫米的径向通风沟，通风孔和通风沟是冷却空气的通道，用以增加散热能力。沿电枢铁芯圆周有轴向槽，槽内嵌放电枢绕组。为了防止线圈被离心力甩出，端部用绑线绑住，槽口处用槽楔或绑线固定。

2. 换 向 器

换向器由多片带燕尾的梯形铜排及同形状的云母片间隔组成圆柱形，两端用 V 形云母环及 V 形钢压环经螺帽或拉紧螺栓压紧，如图 7-1-10 所示。电枢绕组的端接引线与换向片的竖板或升高片之间用焊锡焊接，H 级的用氩弧焊焊接。小型电机的塑料换向器是整体压铸而成，不能拆修。

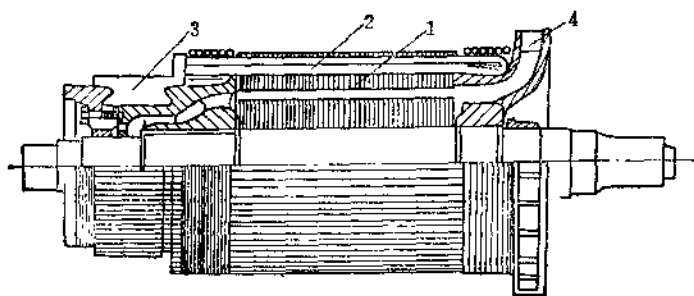


图 7-1-9 电枢

1—铁芯；2—绕组；3—换向器；4—风翅

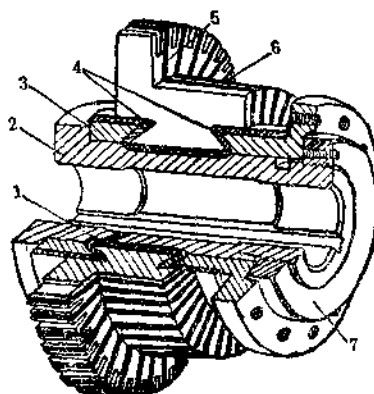


图 7-1-10 换向器结构

1—绝缘套筒；2—钢套；3—V形钢压环；4—V形云母环；5—云母片；6—换向片；7—螺帽

3. 风 翅

电枢轴上通常都装有风翅，其作用是加速电机散热。

(三) 空气隙

在静止的定子磁极极靴和转动的电枢铁芯柱面之间的间隙叫空气隙，它的大小和形状

直接影响电机的特性,不宜轻易改动。

六、电 枢 绕 组

电枢在主磁场中旋转,槽中嵌放的导体都切割磁力线而产生电势。在 N 极下的导体的感应电势朝某一方,而在 S 极下的导体的感应电势方向与它相反,把这些导体中的感应电势用端接线合理地顺次连接起来,使之得到有效利用,就组成一个绕组。不同的排列与组合构成不同型式的绕组。各种不同型式的绕组的并联支路数和等位点的分布状况又都有各自的特点,故适用范围也不同。但在槽内的每根有效导体的感应电势都是一样的。端接线只起连接作用,不产生有效感应电势或电动力。

绕组元件的构成方法与交流电机的绕组元件构成方法基本相同:元件的两个元件边之间的距离称第一节距,用 y_1 表示;某一元件的末端和与它连接的次一元件的始端之间的距离称第二节距,用 y_2 表示;某一元件和与它连接的次一元件的对称边之间的距离称合成节距,用 y 表示;元件的始端和末端所连接的两换向片之间的距离称换向器节距,用 y_K 表示。通常绕组元件很多,而电枢铁芯的槽数却较少,这样,一个槽里需要并列放置几个元件边。铁芯的槽叫实槽,每一个元件边所代表的槽叫虚槽,本节提到的槽是指虚槽。 y_1 、 y_2 、 y 都用虚槽数表示; y_K 则用换向片数表示。运用已知的节距的数据可以划出绕组的接线展开图。在展开图上,从电刷出发,可以沿电流路径把由各串联元件所组成的并联支路划出,称并联支路图。为了分析绕组,常常用绕组展开图和并联支路图来表示绕组内部的接线关系。

由电机的电刷所短路的元件正是感应电势最小,而且需要换向的元件。即当该元件在主磁场的中性线上时就是表示电刷在合理位置。故在电枢绕组展开图上,当确定了主极与绕组的对应位置以后,电刷位置就可确定。凡属元件始、末端引线长度相等的,即端接引线对称的绕组(如图 7-1-11a、b),其电刷位置正好在主极的轴线处;而端接引线不对称的绕组,其电刷位置应根据元件换向时的实际位置来确定。例如,常见的一种端接引线不对称的绕组,其元件一端的引线与该元件的一边对齐时(图 7-1-11c),电刷位置则在主极中性线上,即在换向极轴线上,它与端接引线对称时的电刷位置正好错开半个极距。

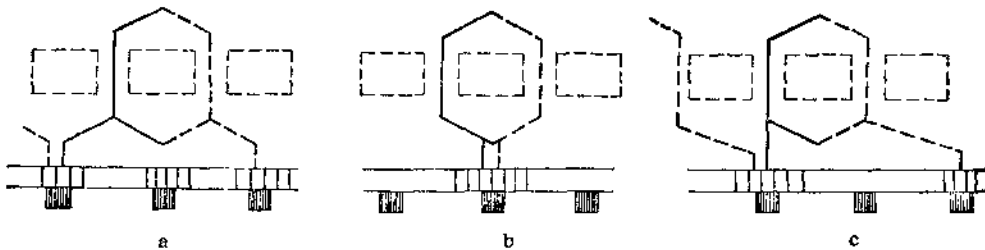


图 7-1-11 电刷位置与主极的相对关系

a、b—端接引线对称; c—端接引线不对称

(一) 单迭绕组

单迭绕组的节距如图 7-1-12 所示。

$$\text{第一节距} \quad y_1 = \frac{Z}{2p} - \mp \varepsilon = \text{整数}$$

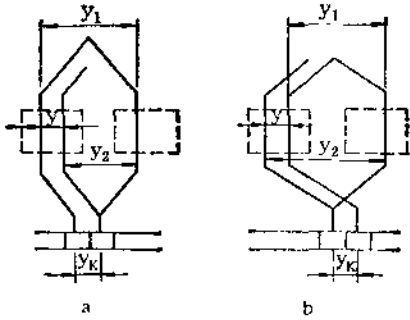


图 7-1-12 单迭绕组的节距
a—右行(前进); b—左行(后退)

式中 Z ——槽数;
 P ——极对数;
 e ——使 y_1 凑成整数的常数。如 e 为零时是整距绕组;取负值时是短距绕组(常用);取正号时是长距绕组(不常用)。

合成节距 $y = 1$

换向片节距 $y_k = 1$

第二节距 $y_2 = y_1 \mp y$

第二节距 y_2 的计算式中:取负号时为右行(或前进)绕组;取正号时为左行(或后退)绕组。

左行绕组的端接引线较长且交叉,其他毫无特点,

因此极少采用。在其他条件相同时,左行与右行绕组的电机端电压方向(或旋转方向)相反。

以四极电机为例,单迭绕组的展开图如图7-1-13所示。可以看出:凡是属于 N_2 极的上层导体与相邻 S_1 极的下层导体用端接线来回串联构成一条支路; S_1 的上层导体则与下一个极 N_2 的下层导体构成另一条支路。如此类推,每相邻两极之间都有一条支路,类似的支路一共四条。各元件边分上下层互相搭迭在一起,故称迭绕组。它的特点是:

1. 电枢的并联支路对数等于主极极对数,即 $a = p$ 。图7-1-13所介绍的四极单迭绕组的并联支路的连接关系如图7-1-14所示,它是四路并联。由于单迭绕组的并联支路数随极数而增加,故适用于较大电流的电机。

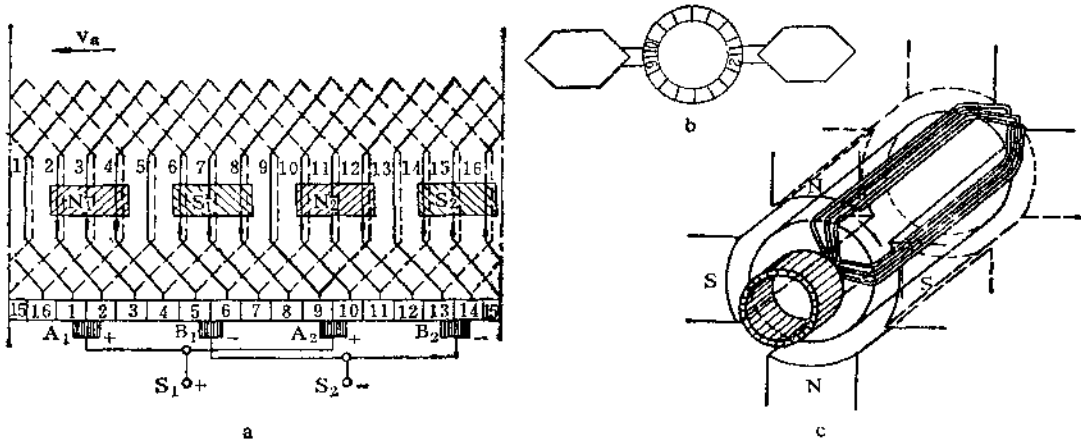


图 7-1-13 四极单迭绕组
a—展开图; b—元件连接示意; c—元件嵌放示意

2. 相邻两支路的相同极性的一端由同一组电刷引出,故电刷的组数等于极数。减少任何一组电刷,就会使与之连接的两条支路没有电流而导致其他支路过载。

3. 每一支路的串联导体属于同一对磁极,不和属于其他极的导体掺杂。如果某对主极的磁通量与其他主极的磁通量有偏差(如气隙不相等而引起的磁通不对称),则在绕组内部产生环流,因此,在较大的电机里需要添设均压线以消除这种缺陷。

(二) 复迭绕组

当迭绕组的换向器节距 $y_K = y = m$ ，而 m 为大于 1 的整数，则电枢导体构成的电路为 m 个并列的闭合环，称复迭绕组， m 称复倍系数。当 $m = 2$ 时，称双迭绕组。其绕组构成的闭合电路又分一次闭合与两次闭合两种，即单闭路与双闭路两种。当换向器片数为偶数时，构成双闭路，当换向器片数为奇数时，构成单闭路。两者性质相差不多。以四极电机为例，图 7-1-15 为双闭路双迭绕组，图 7-1-16 为单闭路双迭绕组。

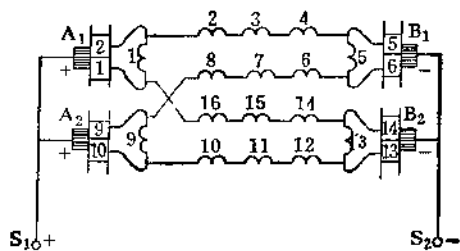


图 7-1-14 四极单迭绕组并联支路图

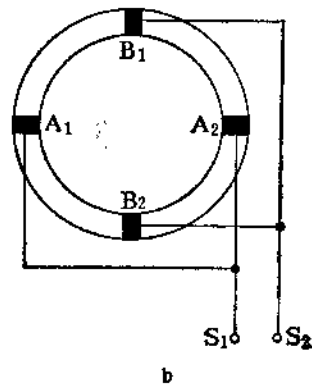
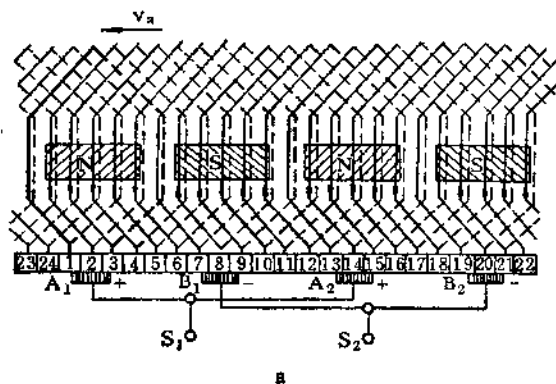


图 7-1-15 双闭路双迭绕组

a—展开图；b—电路简化示意

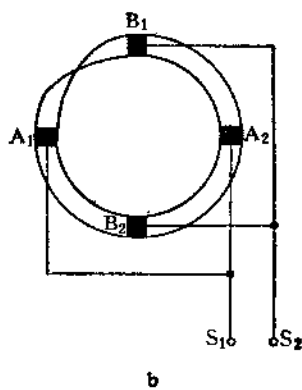
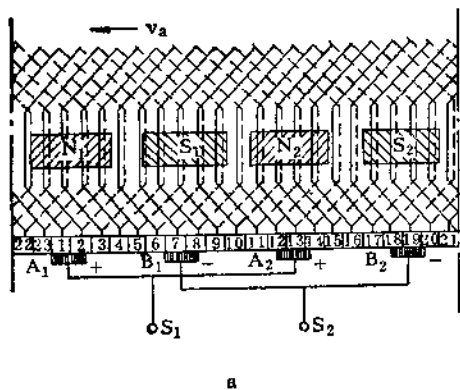


图 7-1-16 单闭路双迭绕组

a—展开图；b—电路简化示意

复迭绕组的特点和单迭时差不多，不过，它的并联支路对数 a 等于复倍系数 m 与极对数 p 的乘积，即 $a = m \cdot p$ 。可见其并联支路数比单迭时增加了 m 倍，因此适用于大电流的电机。很明显，此时的电刷要同时接触 m 套单迭绕组，所以，电刷跨接的换向器片数比单迭时要多。

(三) 单波绕组

单波绕组的节距如图 7-1-17 所示。

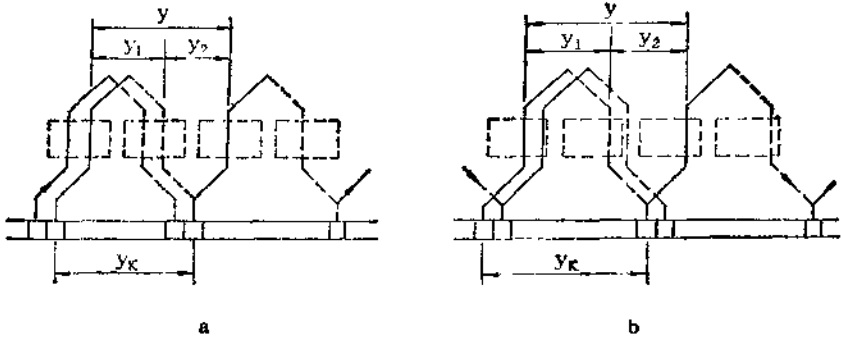


图 7-1-17 单波绕组的节距
a—左行（后退），b—右行（前进）

$$\text{换向器节距 } y_K = \frac{K \mp 1}{p} = \text{整数}$$

$$\text{合成节距 } y = y_K$$

$$\text{第一节距 } y_1 = \frac{Z}{2p} \mp \epsilon = \text{整数}$$

$$\text{第二节距 } y_2 = y - y_1$$

式中 K ——换向器片数；

p ——极对数；

Z ——槽数；

ϵ ——使 y_1 凑成整数的系数，与单迭时同。

换向器节距 y_K 的计算式中，取负号时为左行（或后退）绕组；取正号时为右行（或前进）绕组。二者相差不多，但右行绕组的端接引线略长且有交叉，故很少采用。

以四级电机为例，单波绕组的展开图如图7-1-18所示。可以看出，所有的电枢导体都通过向右（或左）的端接线往下顺次连接，它们的串联顺序总是沿电枢圆周波浪式地向右（或左）延伸，故称波绕组。它的特点是：

1) 无论电机的极数是多少，单波绕组的并联支路对数 a 等于1，即并联支路总是两条；所有属于N极的上层导体所构成的元件串联为一条；所有属于S极的上层导体所构成的元件串联为另一条。图7-1-18所介绍的单波绕组的并联支路的连接关系如图7-1-19所示。它是两路并联。由于单波绕组的并联支路数总是两条（不随极数变化），因此，它适用于电流不太大的电机。

2) 属于任何一个极的导体分上下两层分别串联于两条支路，故当各主极的磁通因气隙等影响而不相等时，各导体虽产生不同感应电势，但却均匀分配在两条支路上，每条支路的总电势仍相等，当它们在电刷处并联时，不会产生环流，不需要装设均压线。这是一个突出优点，因而单波绕组在电流低于600安的各种电压的电机中得到广泛应用。

3) 不同位置的同极性电刷总是被一个处于中性位置的没有感应电势的元件所连通，故单波绕组的电机只需设置两组电刷。通常每极都有电刷是为了降低电刷的电流密度以改善换向。

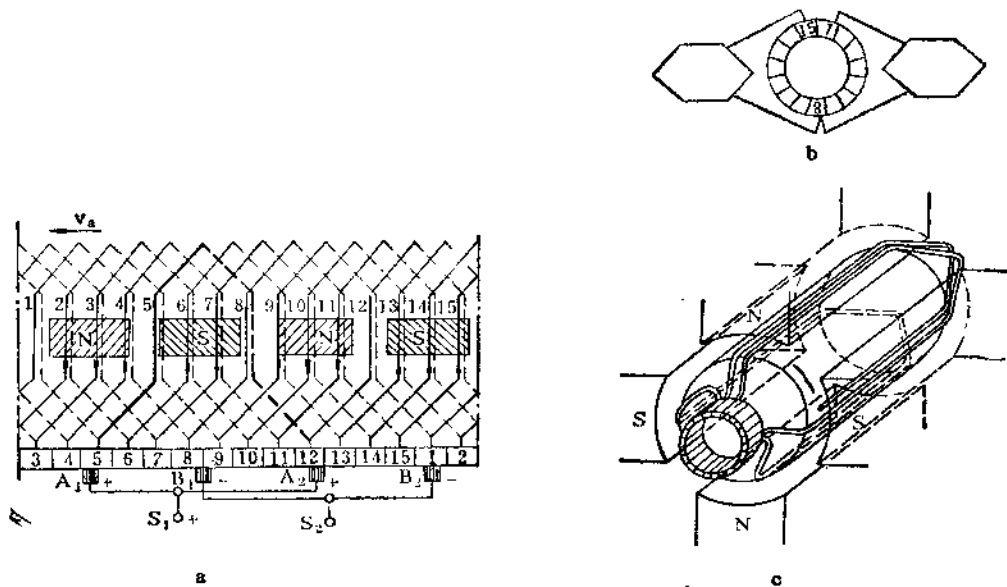


图 7-1-18 四极单波绕组

a—展开图；b—元件连接示意；c—元件嵌放示意

4) 从单波绕组的换向器节距 $y_K = \frac{K \mp 1}{p}$

可知：当极对数 p 为偶数时，则换向片数和元件数必须是奇数，否则因换向节距 y_K 不是整数而不能构成单波绕组。此时，若元件数是偶数，就必须采用假元件（即舍弃一个元件不与换向片连接，仅起着占据槽内位置及平衡重量的作用）。

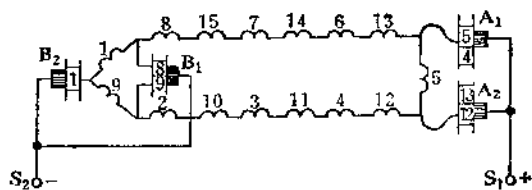


图 7-1-19 四极单波绕组并联支路图

(四) 复波绕组

当波绕组的换向器节距 $y_K = \frac{K \mp m}{p}$ ，而 m 为大于 1 的整数，则电枢导体构成的电路为 m 个并列的闭合环，称复波绕组， m 是复倍数。实质上它是由 m 套并列的单波绕组所

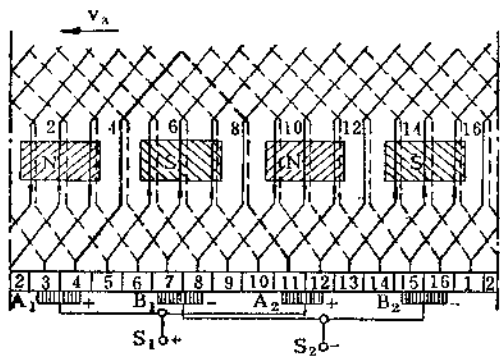


图 7-1-20 单回路复波绕组展开图

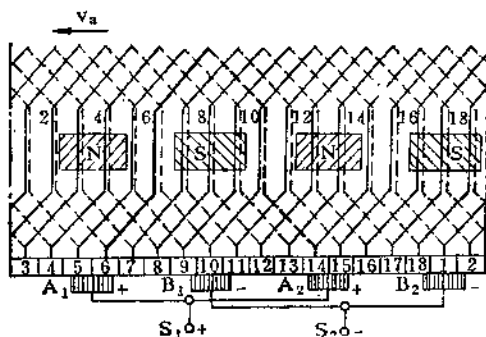


图 7-1-21 双回路复波绕组展开图

组成，最终通过电刷并联，它有 m 对并联支路，即 $a = m$ 。

复波绕组所构成的电路也和复迭绕组一样有一次闭合与多次闭合的区别。当换向器节距 y_K 与换向片数 K 没有公约数时为单闭路；有公约数 t 时为 t 次闭路。通常尽可能采取单闭路。图7-1-20、21是四极电机单闭路与双闭路的复波绕组 ($m = 2$) 展开图。

(五) 均压线

1. 甲种均压线

甲种均压线就是用一根电阻很小的导线，把单迭绕组或复迭绕组的各一条支路中在理论上的等电位点连接起来，当被连接点的电位不相等时，连接线中将产生均压电流，使被连接点的电位趋于相等，借以消除电机在磁方面的不对称，以达到减小绕组支路中的环流的目的。如图7-1-22所示。

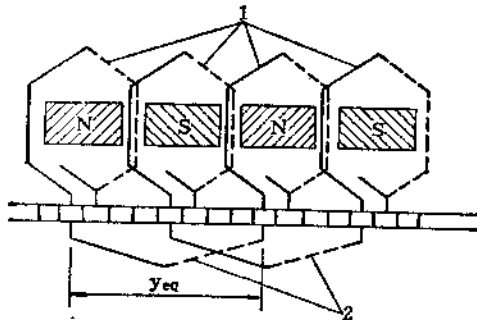


图 7-1-22 单迭绕组的甲种均压线的连接
1—单迭绕组元件；2—甲种均压线

通常，甲种均压线安置在换向器侧或非换向器侧的绕组端接线下部。当电枢直径与换向器直径之比远远大于1时，利用两层作渐开线状偏斜的升高片兼作均压线，称渐开线均压线，实质上是甲种均压线的一种，如图7-1-23所示。

$$\text{甲种均压线的节距 } y_{eq} = \frac{K}{p}$$

式中 K —— 换向器片数；
 p —— 极对数。

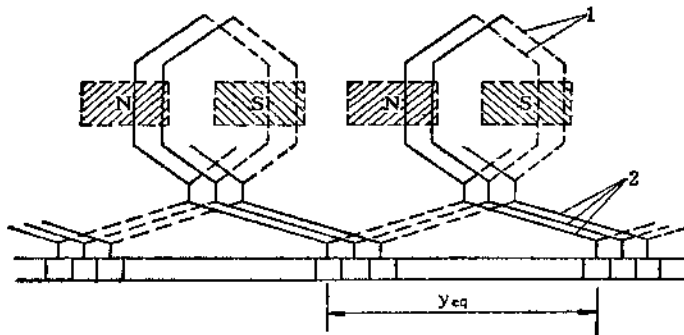


图 7-1-23 渐开线均压线连接
1—迭绕组元件；2—渐开线均压线

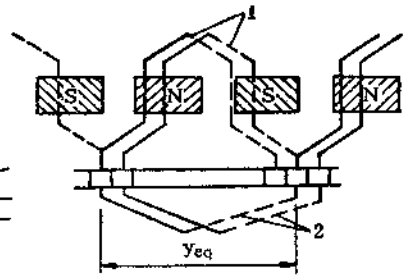


图 7-1-24 双闭路双波绕组乙种均压线的联接
1—双波绕组的元件；2—乙种均压线

2. 乙种均压线

以双闭路双波绕组为例，电枢上均匀地交错相间地分布着两套独立的单波绕组。奇数换向片为一套，偶数换向片为另一套，彼此无内部联系。当它们通过电刷并联到一起而接到外电路时，由于电刷接触电阻不完全相同，即相当于在并联支路内掺进不同的电阻，引起各支路内电流分配不相等。因此把两套独立的单波绕组的相应的等位点事先用导线（均压线）连接起来，使片间电位分布均匀，从而避免了各并联支路负载分配不均匀的现象。凡

是极对数 P 为偶数的双波绕组，都可连接这种均压线，称乙种均压线。图7-1-24表示双闭路双波绕组的乙种均压线连接法。

3. 丙种均压线

极对数 P 为奇数的双波绕组的两套单波绕组之间，双闭路双迭绕组的两套单迭绕组之间，也都有相应的等位点可以连接均压线。不过，它们的等位点不在电枢的同一端而分别在电枢的两端，只得用通过电枢内部无磁场处的导线来连接等位点，这种连接线称丙种均压线。图7-1-25表示六极双波绕组及双闭路双迭绕组的丙种均压线的连接。两种均压线的结构复杂，限制了某些型式绕组的应用范围。

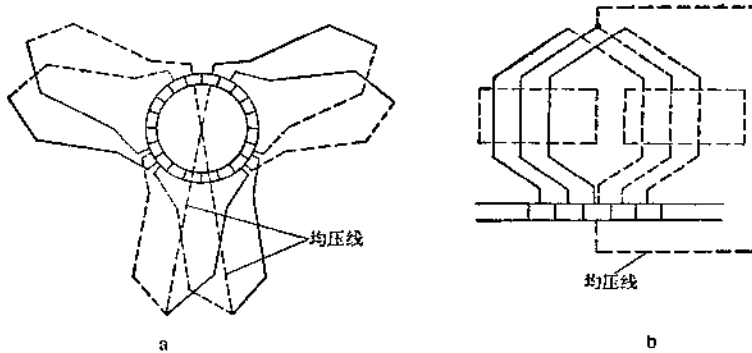


图 7-1-25 六极双波绕组及双闭路双迭绕组的丙种均压线的连接
a—六极双波绕组；b—双闭路双迭绕组

4. 均压线数量与截面

小型电机不连均压线，稍大电机的均压线可以少连或连一半（半均压线），大型电机的均压线则应全连（全均压线）。均压线不需要太大的截面，它约为电枢导线截面的 $1/4 \sim 1/2$ 。

(六) 混合绕组（蛙绕组）

混合绕组是由一套迭绕组和一套复波绕组混合构成。两套绕组有相同的元件数目，安装在共同的槽内，接到共同的换向片上。因此它们的每条支路必须有相等的串联元件数，从而得到相等的感应电势，然后在电刷处才能并联起来。

以四极电机为例，以单迭绕组为基础的混合绕组是由一套单迭绕组和一套双波绕组混合构成，因为单迭绕组有 4 条支路，双波绕组也有 4 条支路，故每支路具有相等的电势，可以在电刷处并联。图7-1-26是一台四级电机的以单迭为基础的混合绕组展开图。可以看出，电枢槽内至少有四层导体，两层属迭绕组，两层属复波绕组。它的元件像个青蛙（图7-1-27）故又称蛙绕组。以单迭绕组为基础的混合绕组简称单蛙；以双迭绕组为基础的混合绕组简称双蛙；以三重迭绕组为基础的混合绕组简称三蛙。

$$\text{蛙绕组的并联支路对数 } a = a_w + a_L = m_w + p \cdot m_L$$

式中 a_w 、 a_L ——复波绕组、迭绕组的并联支路对数；

m_w 、 m_L ——复波绕组、迭绕组的复倍数；

p ——极对数。

从图7-1-28中可以看出，蛙绕组的节距关系如下：

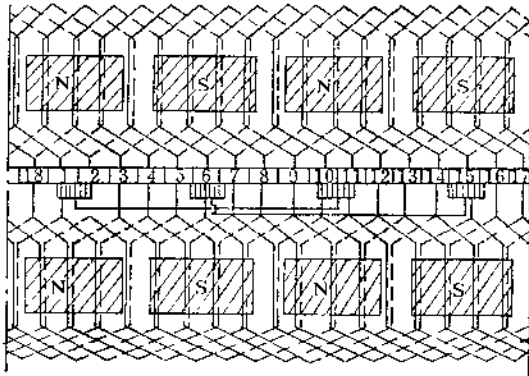


图 7-1-26 四极电机的由单迭与双波构成的混合绕组展开图

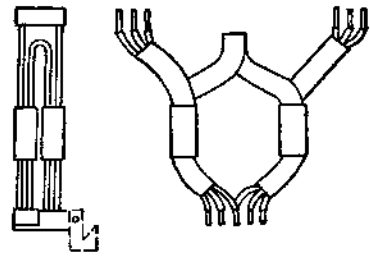


图 7-1-27 混合绕组的元件

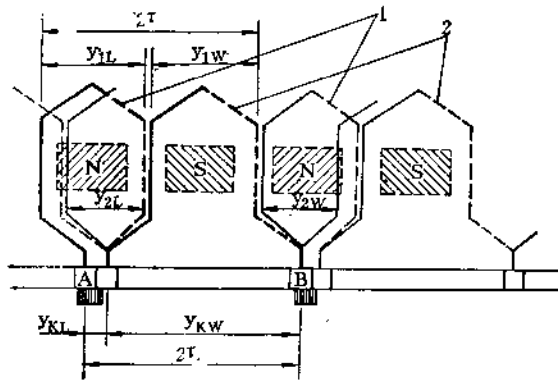


图 7-1-28 蛙绕组接线原理
1—迭绕组元件；2—复波绕组元件

$$y_{1W} + y_{1L} = \frac{K}{p} = 2\tau \text{ (以槽数表示)}$$

$$y_{KW} + y_{KL} = \frac{K}{p} = 2\tau \text{ (以换向片表示)}$$

$$y_{KW} = \frac{K + m_W}{p}$$

$$y_{KL} = \pm m_L$$

$$y_{2W} = y_{2L}$$

式中 y_{1W} 、 y_{2W} ——复波绕组的第一、二节距；

y_{1L} 、 y_{2L} ——迭绕组的 第一、二节距；

y_{KW} ——复波绕组换向器节距；

y_{KL} ——迭绕组换向器节距；

τ ——极距。

在换向器上相距两极距 (2τ) 的对应换向片，如图7-1-28中的A和B，其电位相等，这两片之间有一个迭绕组元件和一个波绕组元件串联后相连接 (图中粗线)，而这两个元件中的感应电势又大小相等而方向相反，串联后是一根电势为零的导线，即相当于均压线。它对于迭绕组来说是甲种均压线；对于波绕组来说是乙种均压线。故蛙绕组本身已经充当了均压线，无需再设均压线了。这是蛙绕组的突出特点。不过，这种均压线本身又同时参与主电路工作，它与专设的均压线并不完全相同，对换向的影响与专设的均压线也不一样，所以某些对换向要求高的电机，虽采用了蛙绕组以后，仍要专设均压线。

蛙绕组的并联支路数较多，通常又不需均压线，故在大、中型电机中得到广泛应用。

七、分类及运行特性

(一) 直流发电机分类及运行特性

发电机的性能主要依它的励磁方式而定，表 7-1-1 列出了以励磁方式分类的发电机及其简要运行特性。

表 7-1-1 直流发电机分类及运行特性

按励磁电源及绕组接法分类		接线图	空载特性 (磁化曲线)	外特性曲线及其主要特征
他励	励磁电流由发电机以外的其他电源供给 (包括永磁发电机)			<ol style="list-style-type: none"> 1. 基本平直, 稍微下倾 2. 电压变化率 $\frac{U_0 - U_N}{U_N}$ 约为 5~10%
	励磁绕组跨接于电枢两端			<ol style="list-style-type: none"> 1. 稍下倾, 电压变化率约为 30% 2. 电流增大到临界值后, 反而减小 3. 稳定短路电流 I_{sk} 较小, 突然短路时, 电流可达 I_N 的 8~12 倍
自励	励磁绕组与电枢串联			<ol style="list-style-type: none"> 1. 起初增长较快 2. 末期增长较缓 3. 实用价值较小
	并、串励两者兼有, 串励磁势与并励磁势方向相同者为积复励; 相反者为差复励			<ol style="list-style-type: none"> 1. 积复励中, 当串励强时曲线向上翘, 称过积复励 2. 积复励中, 当串励大小适当, 曲线基本水平, 称平复励 3. 差复励时, 曲线急剧下倾

注: 表中 U ——端电压; U_0 ——空载电压; U_N ——额定电压; U_R ——剩磁电压; I_f ——励磁电流; I_N ——额定电流; I_{sk} ——短路电流; n ——转速; R_f ——励磁电阻。