

第一章 电动机绕组基础知识

绕组是电动机进行电磁能量转换与传递,从而实现将电能转化为机械能的关键部件。绕组是电动机最重要的组成部分,又是电动机最容易出现故障的部分,所以在电动机的修理作业任务中大多属绕组修理。在本章中,主要介绍与电动机绕组有关的若干基础知识。

第一节 电动机绕组的类别

电动机绕组按其结构可有多种类别,今将数种较常用的分类简介于下:

一、集中式绕组与分布式绕组

1. 集中式绕组

安装在凸形磁极铁心上的绕组,例如直流电动机定子上的主磁极绕组和换向极绕组,是集中式绕组。对于三相电动机而言,如果每相绕组在每个磁极下只占有一个槽,在这种情况下,则也是集中式绕组。

2. 分布式绕组

分散布置于铁心槽内的绕组,例如直流电动机的转子绕组以及三相电动机的定子绕组和转子绕组,都是分布式绕组。

二、短距绕组、整距绕组与长距绕组

1. 短距绕组

绕组的节距小于极距的绕组，叫做短距绕组。短距绕组广泛应用于直流电动机的转子绕组以及三相交流单速电动机的定子绕组。

2. 整距绕组

绕组的节距等于极距的绕组，叫做整距绕组，又称全距绕组或满距绕组。

3 长距绕组

绕组的节距大于极距的绕组，叫做长距绕组。除了在三相交流单绕组多速电动机中会有长距绕组以外，一般情况下，不用长距绕组。

三、单层绕组、双层绕组与单双层绕组

1. 单层绕组

在铁心槽内仅嵌一层线圈边的绕组，叫单层绕组。单层绕组在 10 千瓦以下的小功率三相电动机中应用较多。

2. 双层绕组

在铁心槽内嵌有上、下两层线圈边的绕组，叫双层绕组。双层绕组广泛应用于直流电动机以及功率在 10 千瓦以上的三相电动机。

3. 单双层绕组

有少数三相异步电动机，定子铁心的一部分槽中仅嵌入单层线圈边，而在另一部分槽中则嵌有双层线圈边，这种既有单层又有双层的绕组，即单双层绕组。这种绕组是由双层短距绕组演变而来的。

四、整数槽绕组与分数槽绕组

1. 整数槽绕组

三相电动机绕组中，每极每相槽数为整数的叫整数槽绕组。

2. 分数槽绕组

三相电动机绕组中，每极每相槽数为分数的叫分数槽绕组。分数槽仅用于双层绕组。

五、 60° 相带、 30° 相带和 120° 相带绕组

1. 60° 相带绕组

相带为 60° 的绕组称为 60° 相带绕组。通常单速三相电动机都采用 60° 相带绕组。

2. 30° 相带绕组

在嵌有 Y 和 Δ 两套绕组，Y- Δ 混合连接的三相电动机中，把 60° 相带一分为二，即形成了 30° 相带绕组。

3. 120° 相带绕组

在单绕组三相多速电动机中，有 120° 相带绕组。

六、迭绕组与波绕组

1. 迭绕组

迭绕组一般应用于直流电动机的电枢，以及三相电动机的定子绕组和容量较小的三相电动机绕线型转子绕组。

2. 波绕组

波绕组通常应用于 4 极及 4 极以上的直流电动机的电枢，以及容量较大的三相电动机绕线型转子绕组。

七、笼型与绕线型转子绕组

1. 笼型转子绕组

笼型转子绕组结构较简单，造价较低，可靠性较高，在三相及单相交流电动机中，笼型转子绕组的应用最为广泛。

2. 绕线型转子绕组

与笼型相比较，绕线型转子绕组的结构较为复杂，造价较高，通常只应用于要求具有较大起动转矩及可有一定调速范围的三相电动机。

八、显极式与庶极式绕组

1. 显极式绕组

显极式绕组的特点为每个线圈组形成一个磁极，线圈组的数目与磁极数相等。在显极式绕组中，同一相相邻的线圈组应形成异性磁极，故采用“尾—尾”或“首—首”反串连接。图 1-1 为两极显极式绕组的示意图，图中表示有两个线圈组，形成 N-S 两个磁极。

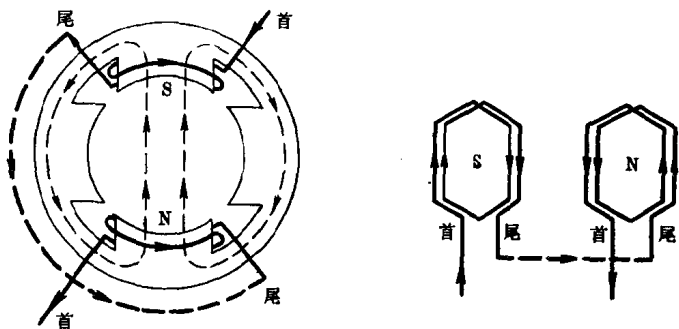


图 1-1 两极显极式绕组示意图

2. 庶极式绕组

庶极式绕组的特点为每个线圈组形成两个磁极，线圈组

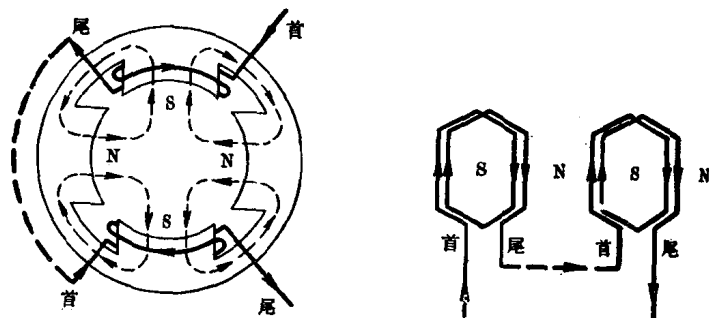


图 1-2 四极庶极式绕组示意图

的数目为磁极数的一半。在庶极式绕组中,同一相相邻的线圈组应形成同性磁极,故采用“尾—首”或“首—尾”正串连接。图 1-2 为四极庶极式绕组的示意图,图中表示有两个线圈组,形成四个磁极。庶极式接法的绕组,在三相单绕组多速电动机中较为常用。

第二节 电动机绕组的部分 常用名词和术语

一、线圈、线圈总数

1. 线圈

电动机绕组是由若干个线圈或线圈组组合而成的,所以线圈又称绕组元件。线圈通常由多匝导线构成,也可由单匝导线构成。图 1-3 为电动机的一种常用线圈的示意图。

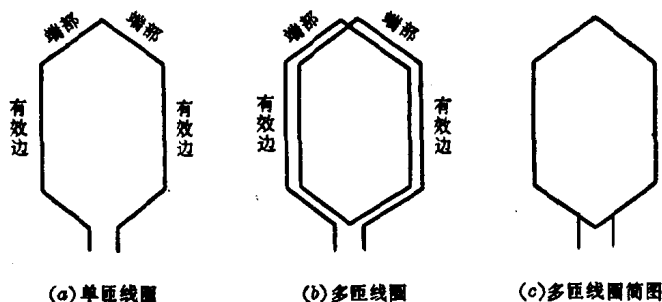


图 1-3 线圈(绕组元件)示意图

图 1-3 中线圈的直线段称为有效边,又称线圈边,是嵌在铁心槽中起电磁能量转换作用的部分。线圈两端伸出槽外的部分称为端部,端部起连接两个有效边的作用。

2. 线圈总数

在单层绕组中,线圈总数等于铁心总槽数的一半;在双层绕组中,线圈总数与铁心总槽数相等。例如 36 槽的铁心,用于单层绕组时,线圈总数为 18,用于双层绕组时,线圈总数为 36。

二、并绕根数、并联路数

1. 并绕根数

对于电流较大的电动机,为了便于线圈的绕制及嵌线,通常不采用单根大截面的导线,而用截面较小的多根导线合并在一起绕制线圈。这合并在一起的导线根数,即并绕根数。当拆除铁心中的旧线圈时,须注意该线圈是否由多根导线并绕,并应弄清其并绕根数。

2. 并联路数

并联路数又称并联支路数。对于大电流电动机,为了便于线圈的绕制及嵌线,除了上述可用截面较小的多根导线并绕线圈的办法外,还可采用增加绕组并联路数的办法。但要注意,每个支路的串联导体总数及线规应相同,否则易造成环流和发热。当修理绕组重绕拆线时,应弄清楚该绕组的并联支路数。

三、每槽导体数

每槽导体数即铁心每个槽中所嵌入的导体根数。对于单层绕组而言,每槽导体数即一只线圈的匝数。对于双层绕组而言,每槽导体数的一半才是一只线圈的匝数。

上面已经提及,在拆铁心中的线圈时,不能忽视线圈的并绕根数。今假设有一个铁心,每槽内可数出的导体数为 48,但经查明该线圈系三根导线并绕,故每槽导体的有效数应是 $\frac{48}{3} = 16$ 根,务请注意,不能误解成 48 根。在修理手册中列

出的每槽导体数,均是指每槽导体的有效数。

四、磁极对数、同步转速

1. 磁极对数 p

磁极对数简称极对数。电动机绕组通电后所形成的磁极是以N极和S极成对的形式出现的。在2极电动机中,因只有一对磁极,所以极对数 $p=1$;在4极电动机中有2对磁极,所以 $p=2$ 。同理,6极电动机, $p=3$; 8极电动机, $p=4$ 。

因 p 为磁极对数,则磁极数显然是 $2p$, 而且磁极数应是偶数。

2. 同步转速

交流电动机定子绕组通电后所产生的旋转磁场的转速,即该电动机的同步转速。异步电动机转子的实际转速略低于同步转速。同步转速 n_s 的数值与磁极对数 p 的数值密切相关, n_s 的数值由下式确定:

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (\text{转/分})$$

式中: f 是交流电源的频率,我国大陆地区工业电力网的频

表 1-1 同步转速与磁极对数和频率的关系

磁极数	磁极对数	同步转速(转/分)	
		50赫	60赫
2	1	3000	3600
4	2	1500	1800
6	3	1000	1200
8	4	750	900
10	5	600	720
12	6	500	600

率为 50 赫,我国台湾省电力网的频率则为 60 赫。

同步转速与磁极对数和频率的对应关系,见表 1-1。

五、机械角度、电角度与槽电角度

1. 机械角度与电角度

按照几何学的方法,把一个圆周划分为 360 个等分,其中每一等分即 1 度,共 360 度。这样划分的角度称为机械角度或几何角度。在电动机中,把一对磁极在铁心圆周上所占有的区间定为 360° 电角度。电角度与机械角度的关系可用下式计算:

$$\text{电角度} = \text{极对数} \times 360^\circ$$

或
$$\text{电角度} = \text{极数} \times 180^\circ$$

各种极数的电动机,其铁心圆周电角度见表 1-2。

表 1-2 各种极数电动机的电角度

极 数	2	4	6	8	10	12
极 对 数	1	2	3	4	5	6
电 角 度	360°	720°	1080°	1440°	1800°	2160°
机械角度	360°					

2. 槽电角度 α

电动机铁心每槽占有的电角度称为槽电角度。槽电角度 α 可用下式计算:

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2p \times 180^\circ}{Z}$$

式中 p ——极对数;
 Z ——铁心槽数。

六、极距、节距

1. 极距 τ

极距 τ 是指电动机每个磁极沿气隙圆周表面所占的距离。 τ 有槽数和长度两种表示方法:

(1) 用槽数表示

$$\tau = \frac{Z}{2p} \quad (\text{槽})$$

式中 Z ——交流电动机定子槽数, 直流电动机转子槽数;
 p ——磁极对数。

(2) 用长度表示

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (\text{厘米})$$

式中 D ——交流电动机定子内径, 直流电动机转子外径(厘米)。

2. 节距 y

节距是指一个线圈的两条有效边之间所跨占的槽数, 节距又称跨距, 节距 y 的数值以槽数表示, 例如: $y = 8$ (槽), 习惯上以 (1—9) 槽的方式表示, 即线圈的一条边嵌于第 1 槽, 另一条边嵌于第 9 槽, 两条边所跨槽的中心线间的距离为 8 槽 (第 1 槽和第 9 槽各算半槽)。

当线圈节距 $y = \tau$ 时, 称为整距绕组, 又称全距绕组; 当 $y < \tau$ 时, 称为短距绕组; $y > \tau$ 时, 称为长距绕组。

直流电动机电枢绕组 (转子绕组) 的节距较交流电动机的节距复杂, 有第一节距、第二节距、合成节距和换向器节距之分, 将在第二章中介绍。

七、每极每相槽数

每极每相槽数 q , 是交流电动机每相绕组在每个磁极下所占的槽数, 其值可用下式计算:

$$q = \frac{Z}{2pm}$$

式中 Z ——定子槽数;

p ——磁极对数；

m ——相数。

对于三相电动机而言，可得每极每相槽数 $q = \frac{Z}{6p}$ 。

q 可为整数亦可为分数，例如：

$$\textcircled{1} \quad Z = 54, m = 3, 2p = 6, \text{得: } q = \frac{Z}{2pm} = \frac{54}{6 \times 3} = 3, \text{为整数。}$$

$$\textcircled{2} \quad Z = 54, m = 3, 2p = 8, \text{则得: } q = \frac{Z}{2pm} = \frac{54}{8 \times 3} = 2\frac{1}{4}, \text{为}$$

分数。

q 是整数时称为整数槽绕组， q 是分数时称为分数槽绕组。中小型三相电动机，大多为整数槽绕组（通常 $q = 2 \sim 7$ ），仅在某些场合下，如上述六极和八极两种电动机为通用同一种铁心冲片，故使 8 极电动机采用分数槽绕组。

若 $q = 1$ ，即每个极下每相绕组只占一个槽时，就成为集中式绕组。当 $q > 1$ ，就称为分布式绕组。

八、极相组数

对于三相交流电动机，把属于同一相并形成同一磁极的线圈（一个或多个）定为一组，称之为极相组，又称线圈组，习惯上又称“联”。

在显极式绕组中，每相的极相组（线圈组）的组数等于极数（ $2p$ ）；在庶极式绕组中，每相的极相组（线圈组）的组数等于极对数（ p ）。

九、相带

从广义上看，三相电动机绕组的相带，可理解为：在槽电势矢量星形图上，同一相的全部槽电势矢量（负相号已归入正相号）所占区间的电角度叫做相带。例如在图 1-10 所示的三相四极 36 槽电势矢量图上，因 $\alpha = 20^\circ$ ，所以相带为 $20^\circ \times 3 =$

60°。三相单速电动机绕组,通常均为 60° 相带(此数值,即每极每相槽数 q 所占区间的电角度)。对于 Y- Δ 混合连接的单速电动机绕组,其相带则为 30°。对于单绕组多速电动机,除 60° 相带外,还会出现 120° 相带和 180° 相带。

第三节 分布系数、短距系数和绕组系数的含义及计算

一、分布系数 K_d

分布式绕组较之集中式绕组,能充分利用空间位置,并有利于散热,还可削弱谐波磁场优化电动机性能;但另一方面,一相所属全部导体基波的合成电势有所减小,分布系数 K_d 即反映其减小的程度。 K_d 的含义可用下式表示:

$$K_d = \frac{\text{一相所属全部槽电势的矢量和}}{\text{一相所属全部槽电势的算术和}}$$

一般情况下,分布系数 K_d 的值可用下式计算:

$$K_d = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

式中 q —— 每极每相槽数;

α —— 槽电角度。

计算所得的 K_d 值应小于 1, 但如果对集中式绕组而言, 因 $q=1$, 所以 $K_d=1$ 。

【例 1-1】 试计算三相四极 36 槽定子绕组的分布系数 K_d 。

$$\text{【解】 } q = \frac{Z}{2p \times 3} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

$$\alpha = \frac{2p \times 180^\circ}{Z} = \frac{4 \times 180^\circ}{36} = 20^\circ$$

$$K_d = \frac{\sin \frac{3 \times 20^\circ}{2}}{3 \sin \frac{20^\circ}{2}} = \frac{\sin 30^\circ}{3 \sin 10^\circ}$$

$$= \frac{0.5}{3 \times 0.1736} = 0.96$$

分布系数 K_d 的值, 还可以从槽电势矢量图上求出, 方法是: 将一相所含全部槽电势矢量, 用投影和三角函数计算出矢量和, 然后除以这些槽电势矢量的算术和, 即得分布系数 K_d 。

【例 1-2】 三相四极 36 槽绕组, 试利用槽电势矢量图, 求分布系数 K_d 。

【解】 先按图 1-9 和图 1-10 所示, 绘出 U 相全部槽电势矢量(负向已归到正向), 见图 1-4。

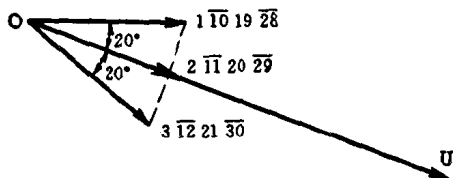


图 1-4 U 相全部槽电势矢量(三相 4 极 36 槽)

为简便起见, 假设每根槽矢量的长度为 1, 由图 1-4 可见, 共有三个方向的矢量。每个方向上含有四个槽矢量, 故其合成长度应是 4。于是 U 相三个方向上全部矢量在 OU 轴线上的投影的和, 即矢量和 OU , 其值为

$$OU = 4 \cos 0^\circ + 4 \cos 20^\circ + 4 \cos 20^\circ = 11.518$$

因三个方向上 12 个槽矢量的算术和为 12, 故得

$$K_s = \frac{11.518}{12} = 0.96$$

与【例1-1】中的计算结果完全一致。利用槽电势矢量图求分布系数的方法，可应用于任何绕组，无局限性。

表1-3为三相60°相带绕组的分布系数 K_s 的值。

表 1-3 三相绕组的分布系数 K_s

每极每相槽数 q	1	2	3	4	5	6	7	8	9
60°相带	1.000	0.966	0.960	0.958	0.957	0.956	0.956	0.956	0.955

二、短距系数 K_y

短距系数又称节距系数。短距绕组较之整距绕组，能显著削弱谐波磁场优化电动机性能，并可使线圈端部长度缩短，节省铜线；但另一方面，采用短距后，线圈内基波合成电势因而也有所减小，短距系数 K_y 即反映其减小的程度。 K_y 的含义可用下式表示：

$$K_y = \frac{\text{短距线圈合成电势}}{\text{整距线圈合成电势}}$$

K_y 的值可用下式计算：

$$K_y = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y}{\tau}\right) = \sin\left(90^\circ \frac{y}{\tau}\right)$$

或
$$K_y = \cos \frac{\gamma}{2}$$

式中 γ ——表示线圈节距 y 较之极距 τ 所短(或长)的电角度。

计算所得的 K_y 值应小于1，但若对整距绕组而言，因 $y = \tau$ ，故得 $K_y = \sin \frac{\pi}{2} = 1$ 。

表 1-4 绕组的短距系数 K_y

节距 y	极 距 τ (槽 数)															
	24	21	18	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6		
1-25	1.000															
1-24	0.998															
1-23	0.991															
1-22	0.981	1.000														
1-21	0.966	0.997														
1-20	0.947	0.989														
1-19	0.924	0.975	1.000													
1-18	0.897	0.956	0.996													
1-17	0.866	0.931	0.985	1.000												
1-16	0.832	0.901	0.966	0.995	1.000											
1-15	0.793	0.866	0.940	0.981	0.995	1.000										
1-14	0.752	0.826	0.906	0.956	0.978	0.994	1.000									
1-13	0.707	0.782	0.866	0.934	0.951	0.975	0.993	1.000								
1-12		0.733	0.819	0.882	0.914	0.944	0.971	0.991	1.000							
1-11		0.680	0.766	0.831	0.866	0.901	0.935	0.966	0.990	1.000						
1-10			0.707	0.773	0.809	0.847	0.884	0.924	0.960	0.988	1.000					
1-9				0.707	0.743	0.782	0.833	0.866	0.910	0.951	3.885	1.000				
1-8					0.669	0.707	0.749	0.793	0.841	0.891	0.940	0.981	1.000			
1-7							0.663	0.707	0.756	0.809	0.866	0.924	0.975	1.000		
1-6									0.655	0.707	0.766	0.832	0.901	0.966		
1-5											0.643	0.707	0.782	0.866		
1-4													0.624	0.707		

要注意,对于三相单层绕组,形式上虽可由短距线圈构成,但电磁本质上是整距绕组,故其 $K_y = 1$ 。

表 1-4 为三相绕组的短距系数 K_y 。

三、绕组系数 K_w

绕组系数 K_w 是分布系数 K_d 和短距系数 K_y 的乘积,即:

$$K_w = K_d \cdot K_y$$

绕组系数 K_w 的含义可用下式表示:

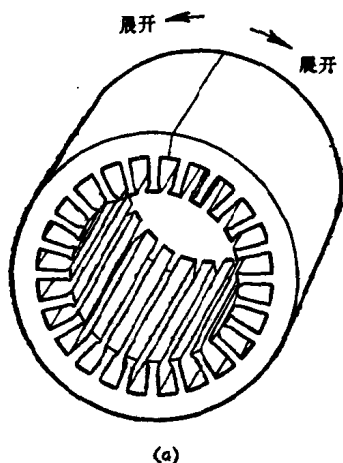
$$K_w = \frac{\text{分布式短距绕组每相合成电势}}{\text{集中式整距绕组每相合成电势}}$$

对于三相单层绕组,因短距系数 $K_y = 1$, 故 $K_w = K_d$ 。

第四节 绕组展开图和简化接线图

一、绕组展开图

绕组展开图是表示绕组结构的较常用的方法,今以一台三相电动机为例,见图 1-5。



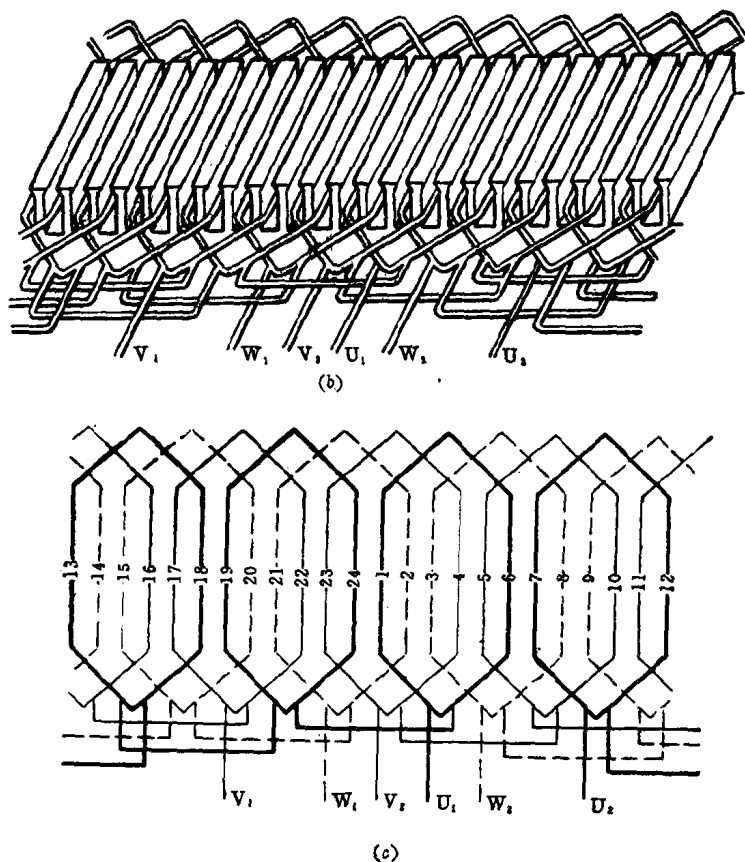


图 1-5 三相电动机定子绕组展开示意图

图 1-5(a) 表示该电动机的定子铁心〔为清楚起见, 图(a) 中未绘出绕组〕, 今假设将铁心切断, 并朝左、右方向展开在一个平面上, 如图 1-5(b) 所示。在图 1-5(b) 中, 既绘有铁心又绘有绕组, 今进一步假设将铁心移去, 只剩下绕组, 如图 1-5(c) 所示, 即是一台三相四极电动机定子单层绕组的展开图。图 1-5(c) 中用粗实线、细实线和细虚线三种线条表示

U、V、W 三相绕组。在绕组展开图上可以看出三相中任一相线圈分布在哪儿几个槽中，并可看出线圈的节距以及各相的线圈是怎样连接的。

二、简化接线图

除了绕组展开图以外，在修理电动机时为了能清楚地看出各线圈组间的连接方式，习惯上通常采用一种简化了的圆形接线图来表示。现以一台三相 2 极电动机显极式绕组为例，将作图步骤介绍如下[见图 1-6(a)]：

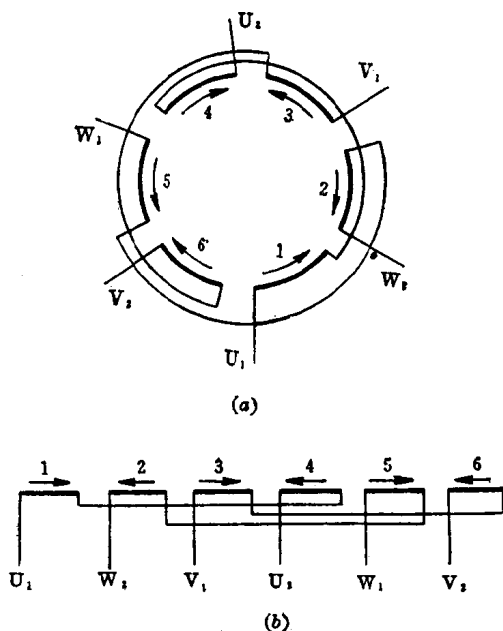


图 1-6 三相 2 极电机定子绕组的简化接线图

(1) 将定子圆周先分为 $2p \times 3$ 段圆弧，这样圆弧的段数就等于总的线圈组的组数。在本例中，圆弧的段数 $= 2 \times 1 \times 3 = 6$ 。