

关于三相异步电动机槽配合问题

一、气隙中的谐波磁场

当三相异步电动机定子绕组中通入电流以后,在气隙中产生磁势。分析磁势曲线的波形可知,在气隙磁势中,除了主磁场以外,还有一系列的谐波磁场。谐波磁势的次数为 $\nu = 2m_1k_1 + 1$ (对于整数槽绕组, m_1 —定子绕组相数, k_1 —任何正负整数或 0), 或 $\nu = \frac{2}{\beta_1}m_1k_1 + 1$ (对于 β_1 为双数的分数槽绕组, β_1 —定子每极每相槽数公约数的分母, k_1 —任何正负整数或 0) (参考资料 1)。为计算分析方便起见,通常取整个气隙圆周长度作为基波的波长(二个极距),则主磁场即成为 p 次谐波(p —极对数),而谐波磁势的次数则为 $\nu' = p(2m_1k_1 + 1)$ (对于整数槽绕组), 或 $\nu' = \frac{2p}{\beta_1}(m_1k_1 + 1)$ (对于 β_1 为双数的分数槽绕组)。

定子 ν' 次谐波磁势可以用下式表示:

$$f_{\nu'} = F_{\nu'} \cdot \sin\left(\omega t - \nu' \frac{\pi}{p\tau} \cdot x_1\right) \quad (1)$$

其中: τ ——主磁场极距;

x_1 ——沿气隙圆周展开的 x 轴座标,以一相绕组的中心线处为原点;

$F_{\nu'}$ —— ν' 次谐波磁势幅值,可按下式计算:

$$F_{\nu'} = F_1 \cdot \frac{p}{\nu'} \frac{k_{a\nu'}}{k_{a\nu'}} \text{ 安匝} \quad (2)$$

其中: $k_{a\nu'}$, $k_{a\nu'}$ ——对于主磁场及 ν 次谐波磁场的定子绕组系数;

$$k_{a\nu'} = \frac{\sin \nu \cdot 30^\circ}{q_1 \cdot \sin \frac{\nu \cdot 30^\circ}{q_1}} \text{ (对于 } 60^\circ \text{ 相带绕组, } q_1 \text{—定子每极每相槽数);}$$

$k_{p\nu'} = \sin \nu \cdot \beta \cdot 90^\circ$ (β —定子绕组跨距,以极距的百分率计)。

F_1 ——主磁场磁势幅值,

$$F_1 = 0.45 \frac{m_1 N_1 I_1 k_{a\nu'}}{p} \text{ 安匝} \quad (3)$$

其中: N_1 ——定子绕组每相串联匝数;

I_1 ——定子相电流,安。

在各次谐波磁势中,次数为 $\nu_1 = k_1 Q_1 + p$ 的谐波称为定子齿谐波(Q_1 —定子槽数, k_1 —任何正负整数)。当 $k_1 = \pm 1$ 时称为一次齿谐波, $k_1 = \pm 2$ 时称为二次齿谐波。齿谐

波的绕组系数数值大小与主磁场相同，因此其幅值较大，对电机各项性能的影响也较大。

为了确定定子 v' 次谐波磁势的速度，可取在 $f_{v'}$ 曲线上的某一点，当 $f_{v'}$ 旋转时此点的数值大小不变，因此 $\left(\omega t - v' \frac{\pi}{p\tau} x_1\right)$ 应为一常数，即 $\omega t - v' \frac{\pi}{p\tau} x_1 = C$ 。将此式对 t 微分可求出谐波磁势的速度 $v_{v'}$ ：

$$v_{v'} = \frac{dx_1}{dt} = \frac{2p\tau \cdot f_1}{v'} = \frac{pv_1}{v'} \quad (v_1 \text{——主磁场的速度}) \quad (4)$$

定子磁势的主磁场和谐波磁场都在转子中感生电流。这些转子电流又在气隙中产生磁场。定子主磁场和每一次谐波磁场所感生的转子电流在气隙中所产生的磁势曲线都可分解成一系列不同次数的磁势。由定子 v' 次磁场在转子中所感生的电流所产生的一系列磁势的次数为 $\mu' = k_2 Q_2 + v'$ （对于鼠笼型转子， Q_2 —转子槽数， k_2 —任何正负整数或 0），或 $\mu' = \frac{2}{\beta_2} \cdot k_2 p m_2 + v'$ （对于绕线型转子， p —极对数， m_2 —转子绕组相数， k_2 —任何正负整数或 0， β_2 —对于整数槽绕组 $\beta_2 = 1$ ，对于分数槽绕组， β_2 为每极每相槽数的最小公约数中的分母。但在绕线型转子中，按照转子绕组的参数，可能会有一些定子谐波磁势不能在转子中感生电流，因此这些定子谐波磁势不能产生转子谐波磁通，参见资料 1）。由定子主磁场在转子中感生电流所产生的次数为 $\mu' = \pm Q_2 + p$ 的谐波称为转子一次齿谐波，次数为 $\mu' = \pm 2Q_1 + p$ 的谐波称为转子二次齿谐波。

由定子 v' 次谐波所造成的转子 μ' 次谐波磁势可以用下式表示：

$$f_{\mu'} = F_{\mu'} \sin\left(s_{v'} \cdot \omega t - \mu' \frac{\pi}{p\tau} \cdot x_2\right) \quad (5)$$

其中： x_2 ——转子上某一点的座标，以转子上转子绕组一相中心线处为原点；

$s_{v'}$ ——转子对于定子 v' 次磁场的转差率，

$$s_{v'} = \frac{v_{v'} - v_m}{v_{v'}}$$

其中： v_m 为转子线速度， $v_m = (1 - s)v_1 = (1 - s) \frac{\tau}{\pi} \cdot \omega$

因此：
$$s_{v'} = \frac{v_{v'} - (1 - s)v_1}{v_{v'}} = 1 - (1 - s) \frac{v'}{p} \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式得：

$$f_{\mu'} = F_{\mu'} \sin\left\{\left[1 - (1 - s) \frac{v'}{p}\right] \omega t - \mu' \frac{\pi}{p\tau} \cdot x_2\right\} \quad (7)$$

假定当 $t = 0$ 时，定转子座标的原点处于同一直径上，则 x_1 与 x_2 间的关系式为：

$$x_1 = x_2 + v_m t$$

因此：
$$x_2 = x_1 - v_m t = x_1 - (1 - s) \frac{\tau}{\pi} \cdot \omega t \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式，得：

$$f_{\mu'} = F_{\mu'} \sin\left\{\left[1 + \frac{\mu' - v'}{p} (1 - s)\right] \omega t - \mu' \frac{\pi}{p\tau} \cdot x_1\right\} \quad (9)$$

为了求取转子 μ' 次谐波相对于定子的速度,与上面求所述求定子 ν' 次谐波速度的方法相似,可将(9)式中sin后括弧中项的数值使等于一常数 C' ,并将此等式对 t 微分,可得:

$$v_{\mu'} = \frac{p}{\mu'} \left[1 + \frac{\mu' - \nu'}{p} (1 - s) \right] \cdot v_1 \quad (10)$$

对于直槽转子,转子 μ' 次谐波磁势的幅值可按式计算(参考资料2):

$$F_{\mu'} = 0.45 \frac{m_1 N_1 I_1 k_{ap1\nu'} \cdot k_{ap2\mu'}}{p \cdot \mu' \cdot (1 + \sigma_{2\nu'}) \cdot k_{ap2\nu'}} \quad (11)$$

其中: $k_{ap1\nu'}$ —— 定子绕组对于 ν' 次磁场的绕组系数;

$k_{ap2\nu'}, k_{ap2\mu'}$ —— 转子绕组对于 ν' 次及 μ' 次磁场的绕组系数;

$\sigma_{2\nu'}$ —— 转子对于 ν' 次磁场的漏抗系数。

如将转子对于 ν' 次谐波的槽漏抗及端部漏抗忽略不计时,则直槽转子 $\sigma_{2\nu'}$ 的数值可按下式计算:

$$\sigma_{2\nu'} = \frac{1}{\eta_{2\nu'}^2} - 1 \quad (12)$$

其中:

$$\eta_{2\nu'} = \sin \frac{\nu' p \pi}{Q_2} / \frac{\nu' p \pi}{Q_2} \quad (13)$$

定转子各次谐波磁场在电机中产生附加转矩(包括异步附加转矩和同步附加转矩)、杂散损耗及电磁噪音。定转子谐波磁场产生同步附加转矩及噪音的情况可以排列定转子谐波表加以分析,举例如下:

(1) 四极鼠笼转子,槽配合60/50

(2) 六极,鼠笼转子,槽配合72/58

ν'	μ'				ν'	μ'			
	$k_2 = +1$	-1	+2	-2		$k_2 = +1$	-1	+2	-2
+2	+52	-48	+102	-98	+3	+61	-55	+119	-113
-10	+40	-60	+90	-110	-15	+43	-73	+101	-131
+14	+64	-36	+114	-86	+21	+79	-37	+137	-95
-22	+28	-72	+78	-122	-33	+25	-91	+83	-149
+26	+76	-24	+126	-74	+39	+97	-19	+155	-77
-34	+16	-84	+66	-134	-51	+7	-109	+65	-167
+38	+88	-12	+138	-62	+57	+115	-1	+173	-59
-46	+4	-96	+54	-146	-69	-11	-127	+47	-185
+50	+100	0	+150	-50	+75	+133	+17	+191	-41
-58	-8	-108	+42	-158	-87	-29	-145	+29	-203
+62	+112	+12	+162	-38	+93	+151	-35	+209	-23

(3) 六极绕线转子, 槽配合72/63

$$\mu' = 9k_2 + \nu'$$

ν'	μ'			
	$k_2 = +1$	- 1	+ 2	- 2
+ 3	+ 12	- 6	+ 21	- 15
- 15	- 6	- 24	+ 3	- 33
+ 21	+ 30	+ 12	+ 39	+ 3
- 33	- 24	- 42	- 15	- 51
+ 39	+ 48	+ 30	+ 57	+ 21
- 51	- 42	- 60	- 33	- 69
+ 57	+ 66	+ 48	+ 75	+ 39
- 69	- 60	- 78	- 51	- 87
+ 75	+ 84	+ 66	+ 93	+ 57

(4) 六极绕线转子, 槽配合72/54

$$\mu' = 18k_2 + \nu'$$

ν'	μ'			
	$k_2 = +1$	- 1	+ 2	- 2
+ 3	+ 21	- 15	+ 39	- 33
- 15	+ 3	- 33	+ 21	- 51
+ 21	+ 39	+ 3	+ 57	- 15
- 33	- 15	- 51	+ 3	- 69
+ 39	+ 57	+ 21	+ 75	+ 3
- 51	- 33	- 69	- 15	- 87
+ 57	+ 75	+ 39	+ 93	+ 21
- 69	- 51	- 87	- 33	- 105
+ 75	+ 93	+ 57	+ 111	+ 39

表中 ν' 的一直列表示定子谐波磁势 (包括主磁场) 的次数。对应于每一个 ν' 次谐波的另一横排中的各次 μ' 谐波是由 ν' 次定子谐波在转子中感生电流所造成的一系列转子谐波磁势 (表中仅列出 $k_2 \pm 1, \pm 2$ 的谐波, $k_2 = 0$ 及 $|k_2| > 2$ 的谐波未列出)。由谐波排列表判断槽配合对同步转矩及噪音影响的方法叙述于下节。

二、由定转子谐波磁场所造成的同步附加转矩及电磁噪音

如一个定子谐波 ν_b' 与由另一个定子谐波 ν_a' 所产生的转子谐波 μ_a' 次数相同, 且当电机在某一转速 n_s 时二个谐波磁场在空间的转速也相同时, 则二个谐波磁场之间将产生同步转矩。因此, 为了产生同步转矩, 必须满足下列条件:

$$\mu_a' = \pm \nu_b' \quad v_{\mu_a'} = v_{\nu_b'}$$

由式(10)及(4),
$$v_{\mu_a'} = \frac{p}{\mu_a'} \left[1 + \frac{\mu_a' - \nu_a'}{p} (1 - \mathcal{S}) \right] v_1, \quad v_{\nu_b'} = \frac{p}{\nu_b'} \cdot v_1$$

因此, 当 $\mu_a' = + \nu_b'$ 时, 为满足 $v_{\mu_a'} = v_{\nu_b'}$ 的条件, 必须

$$1 = 1 + \frac{\mu_a' - \nu_a'}{p} (1 - \mathcal{S}), \quad \text{即} \quad \frac{\mu_a' - \nu_a'}{p} (1 - \mathcal{S}) = 0$$

因 $\mu_a' \neq \nu_a'$, 故必须 $\mathcal{S} = 1$, 即: 当 $\mu_a' = + \nu_b'$ 时, 只有在 $\mathcal{S} = 1$ 时才产生同步转矩。

当 $\mu_a' = - \nu_b'$ 时, 为满足 $v_{\mu_a'} = v_{\nu_b'}$ 的条件, 必须

$$- 1 = 1 + \frac{\mu_a' - \nu_a'}{p} (1 - \mathcal{S}),$$

即:
$$1 - \mathcal{S} = \frac{2p}{\mu_a' - \nu_a'} = - \frac{2p}{k_{2a} \cdot Q_2} \text{ (对于鼠笼型电动机), 或 } - \frac{2}{k_{2a} \cdot m_2} \text{ (对于转子每极每相槽数为整数的绕线型电动机)}。$$

因此：
$$n_s = n_o(1 - s) = -\frac{60f_1}{p} \frac{2p}{k_{2a} \cdot Q_2} = -\frac{120f_1}{k_{2a} \cdot Q_2} \text{ (对鼠笼型电动机),}$$

或
$$n_s = -\frac{60f_1}{p} \frac{2}{k_{2a} \cdot m_2} = -\frac{120f_1}{p \cdot k_{2a} \cdot m_2} \text{ (对转子每极每相槽数为整数的绕线型电动机).}$$

因此,在谐波排列表中,如某一个定子谐波 $\nu_{b'}$ 与另一个定子谐波 $\nu_{a'}$ 所产生的转子谐波 $\mu_{a'}$ 次数相同,符号相同 ($\nu_{b'} = +\mu_{a'}$) 时,则 $\nu_{b'}$ 与 $\mu_{a'}$ 在 $s = 1$ 时产生同步转矩(起动转矩波动或死点)。如 $\nu_{b'}$ 与 $\mu_{a'}$ 次数相同,符号相反 ($\nu_{b'} = -\mu_{a'}$) 时,则在 $s > 1$ 或 $s < 1$ 时产生同步转矩。如其中的 $-\mu_{a'}$ 系由正的 k_2 值所产生时,在 $s > 1$ 时有同步转矩。如 $-\mu_{a'}$ 系由负的 k_2 值所产生时,在 $s < 1$ 时有同步转矩。

从上面的谐波排列表中可以看出:槽配合为60/50的四极电机,当 $k_2 = -2$ 时, $\nu_{b'} = -\mu_{a'}$, 因此在 $s < 1$ 时有同步转矩。同步转速为 $120 \times 50 / 2 \times 50 = 60$ 转/分。产生同步转矩的主要谐波是转子二次齿谐波 $\mu_{a'} = -98$ 与定子的非齿谐波 $\nu_{b'} = +98$ 。故同步转矩数值不大,对起动性能的影响并不严重。槽配合为72/54的六极绕线型电机(转子每极每相槽数为整数), $\nu_{b'} = +\mu_{a'}$, 因此在 $s = 1$ 时有同步转矩(起动转矩波动)。产生同步转矩的主要谐波是转子一次齿谐波 $\mu_{a'} = -51, +57$ 与定子的非齿谐波 $\nu_{b'} = -51, +57$, 以及定子一次齿谐波 $\nu_{b'} = -69, +75$ 与转子的非齿谐波 $\mu_{a'} = -69, +75$ 。

定转子谐波间产生电磁噪音的情况如下:

由于气隙中有磁通,使定转子铁芯间产生作用力,单位面积铁心上的作用力可按下式计算:

$$W = \frac{(\sum b)^2}{2\mu_o} \text{ 牛顿/米}^2 \quad (14)$$

其中: $\sum b$ 为定转子各次磁通之和(以韦/米²计); $\mu_o = \frac{1}{4\pi} \times 10^7$ 。

$(\sum b)^2$ 中包括: $2 \times \nu_{a'}$ 次定子谐波磁通 $\times \mu_{b'}$ 次转子谐波磁通,其乘积为:

$$\begin{aligned} 2b_{\nu_{a'}} \cdot b_{\mu_{b'}} &= 2B_{\nu_{a'}} \cdot B_{\mu_{b'}} \sin \left[\omega t - \nu_{a'} \frac{\pi}{p\tau} \cdot x_1 \right] \sin \left\{ \left[1 + \frac{\mu_{b'} - \nu_{b'}}{p} (1 - s) \right] \omega t \right. \\ &\quad \left. - \mu_{b'} \frac{\pi}{p\tau} x_1 \right\} \\ &= B_{\nu_{a'}} \cdot B_{\mu_{b'}} \cos \left\{ \left[\frac{\mu_{b'} - \nu_{b'}}{p} (1 - s) \right] \omega t + (\nu_{a'} - \mu_{b'}) \frac{\pi}{p\tau} \cdot x_1 \right\} \\ &\quad - B_{\nu_{a'}} \cdot B_{\mu_{b'}} \cos \left\{ \left[2 + \frac{\mu_{b'} - \nu_{b'}}{p} (1 - s) \right] \omega t \right. \\ &\quad \left. - (\nu_{a'} + \mu_{b'}) \frac{\pi}{p\tau} \cdot x_1 \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

上式表示有二个力波,一个力波的次数为 $\nu_{a'} + \mu_{b'}$, 频率为 $\left[2 + \frac{\mu_{b'} - \nu_{b'}}{p} (1 - s) \right] \cdot f_1$ 。另一个力波的次数为 $\nu_{a'} - \mu_{b'}$, 其频率为 $\left[\frac{\mu_{b'} - \nu_{b'}}{p} (1 - s) \right] \cdot f_1$ 。对于鼠笼型电动机, $\mu_{b'} - \nu_{b'} = k_{2b} \cdot Q_2$, 故上述二个力波的频率分别为 $\left[2 + \frac{k_{2b} \cdot Q_2}{p} (1 - s) \right] \cdot f_1$

及 $\left[\frac{k_{2b} \cdot Q_2}{p}(1-s)\right]f_1$ 。对转子每极每相槽数为整数的绕线型电动机， $\mu_b' - \nu_b' = k_{2b} \cdot p \cdot m_2$ ，故力波的频率为 $[2 + k_{2b} \cdot m_2(1-s)] \cdot f_1$ 及 $k_{2b} \cdot m_2(1-s)f_1$ 。

当力波在气隙中旋转时，定子铁芯即产生周期性的振动，因而产生电磁噪音。噪音的大小与力波的次数、频率及电机的结构有关。力波的次数愈少时（极对数愈少），则定子铁芯振动的节点间的距离愈长，定子铁芯的振幅也愈大，故电磁噪音也愈严重。因此在选择定转子槽配合时，要避免使定转子谐波次数之和或差为 $\pm 1, \pm 2, \pm 3$ 等情况。

对于2极、4极的鼠笼型电动机，当 Q_2 为奇数时，有可能会出 现 $\nu_b' \pm \mu_b' = \pm 1$ 的情况，因此一般不采用奇数槽。

在上面所举例的谐波排列表中，槽配合为72/58的六极电机，当 $k_2 = -1, -2$ 时定转子谐波次数相差2。因此有可能产生较大的电磁噪音。产生噪音的主要谐波是转子一次齿谐波 $\mu' = -55$ 次与定子 $\nu' = +57$ 次（非齿谐波）。槽配合为72/63的六极绕线型电机定转子谐波次数相差3，并且定转子一次齿谐波次数也相差3（定子-69次，转子+66次），因此可能产生较大的噪音。从上表中可以看出：绕线型电动机当转子采用分数槽绕组时，与采用整数槽绕组相比较，由于会产生额外的谐波次数，因此产生电磁噪音的可能性较大。

在考虑谐波磁通对同步转矩和噪音的影响时，从数量级上讲，由于定转子齿谐波的幅值较大，因此应避免由定转子齿谐波间相互作用而产生同步转矩或噪音的情况。在齿谐波中，一次齿谐波的幅值最大，因此特别要避免由一次定子齿谐波及一次转子齿谐波相互作用而产生同步转矩或噪音的情况，并最好也能避免由一个转子（或定子）齿谐波与一个定子（或转子）非齿谐波间相互作用而产生同步转矩或噪音的情况。

由定转子齿谐波相互作用产生同步转矩的情况分析于下：

(1) 由定转子一次齿谐波相互作用产生同步转矩：

定子一次齿谐波为： $\nu' = Q_1 + p$ 及 $-(Q_1 - p)$

转子一次齿谐波为： $\mu' = Q_2 + p$ 及 $-(Q_2 - p)$

产生同步转矩时， $\nu' = \pm \mu'$

为使 $\nu' = +\mu'$ ，必须 $Q_2 = Q_1$ （在 $s = 1$ 时产生同步转矩）

为使 $\nu' = -\mu'$ ，必须 $Q_1 + p = Q_2 - p$ ，即 $Q_2 = Q_1 + 2p$ （ $k_2 = -1$ ，在 $s < 1$ 时有同步转矩）；或 $Q_1 - p = Q_2 + p$ ，即 $Q_2 = Q_1 - 2p$ （ $k_1 = +1$ ，在 $s > 1$ 时有同步转矩）。

(2) 由定转子二次齿谐波相互作用产生同步转矩：

定子二次齿谐波为： $\nu' = 2Q_1 + p$ 及 $-(2Q_1 - p)$

转子二次齿谐波为： $\mu' = 2Q_2 + p$ 及 $-(2Q_2 - p)$

与上述同样方法，可得：当 $Q_2 = Q_1 + p$ 时，在 $s < 1$ 时有同步转矩；

当 $Q_2 = Q_1 - p$ 时，在 $s > 1$ 时有同步转矩。

(3) 由一次转子齿谐波与定子非齿谐波相互作用产生同步转矩：

转子一次齿谐波为： $\mu' = Q_2 + p$ 及 $-(Q_2 - p)$ ；

定子谐波次数为： $\nu' = 2pm_1k_1 + p = 6pk_1 + p$ 。

为使 $\nu' = +\mu'$ ，必须： $Q_2 + p = 6pk_1 + p$ ，或 $-(Q_2 - p) = 6pk_1 + p$ 。

即： $Q_2 = 6pk_1$ （在 $s = 1$ 时有同步转矩）。

为使 $\nu' = -\mu'$ ，必须： $Q_2 + p = -(6pk_1' + p)$

即： $Q_2 = 6pk_1 - 2p$ ($k_2 = +1$ ，在 $s > 1$ 时有同步转矩)；
 或 $-(Q_2 - p) = -(6pk_1 + p)$
 即 $Q_2 = 6pk_1 + 2p$ ($k_2 = -1$ ，在 $s < 1$ 时有同步转矩)。

定转子一次齿谐波相互作用产生噪音的情况如下：

如上所述：当 $Q_2 = Q_1$ ， $Q_2 = Q_1 \pm 2p$ 时，定转子一次齿谐波间产生同步转矩，即 $\nu' = \pm \mu'$ 。因此，当 $Q_2 = Q_1 \pm 1$ ， $Q_1 \pm 2$ ， $Q_1 \pm 3$ 及 $Q_2 = Q_1 \pm 2p \pm 1$ ， $Q_1 \pm 2p \pm 2$ ， $Q_1 \pm 2p \pm 3$ 时，定转子齿谐波次数的差值分别为 1、2、3，即有可能产生较大的电磁噪音。

同理，当 $Q_2 = Q_1 \pm p \pm 1$ ， $Q_1 \pm p \pm 2$ ， $Q_1 \pm p \pm 3$ 时，定转子二次齿谐波次数的差值分别为 1、2、3。当 $Q_2 = 6pk_1 \pm 1$ 或 $6pk_1 \pm 2p \pm 1$ ， $Q_2 = 6pk_1 \pm 2$ 或 $6pk_1 \pm 2p \pm 2$ ， $Q_2 = 6pk_1 \pm 3$ 或 $6pk_1 \pm 2p \pm 3$ 时，转子一次齿谐波与定子非齿谐波次数的差值为 1、2、3。也可能产生较大的电磁噪音。

三、槽配合对杂散损耗及异步附加转矩的影响

定子谐波磁通在转子中产生杂散损耗。转子谐波磁通在定子中产生杂散损耗。产生杂散损耗的谐波最主要的是一次齿谐波。如定转子槽数很接近时，转子齿宽大致等于定子齿谐波的波长。转子齿中谐波磁通的脉振较小。因此转子齿中脉振损耗及鼠笼导条中谐波电流损耗也较小。同样定子齿中谐波磁通的脉振及定子齿部脉振损耗也较小。所以，在选择电机的槽配合时，无论是那一种型式的转子，定转子槽数都应尽量接近，以减少杂散损耗的数值。但是，当定子槽数一定时，转子槽数多于定子槽数或转子槽数少于定子槽数（当 Q_1 与 Q_2 的差值一定时）对杂散损耗数值的影响则与转子的型式有关。对于绕线型转子、铜条鼠笼转子或直槽的铸铝转子，定子侧的杂散耗与转子侧的杂散耗在数量级上是接近的。当采用多槽转子时，转子中的谐波损耗虽然比采用少槽转子时有所增加。但由于转子齿谐波的幅值减小，转子齿谐波在定子齿中所产生的脉振损耗也减小。因此总的杂散耗数值与采用少槽转子时比较相差不大。但对于斜槽铸铝转子，由于导条间有横向电流损耗，其数值较大，转子侧的杂散耗数值比定子侧大得多。采用多槽转子时转子中杂散耗比少槽转子大得多。所以在斜槽铸铝转子电机中，一般都采用少槽一近槽配合。

当定转子槽数比 Q_2/Q_1 的数值不变，而定转子槽数都增加时，定转子齿谐波磁通的幅值都减小，它们的频率则增高。前者使杂散耗数值减小，后者则使杂散耗增大。但前一因素的影响大于后者，故总的杂散耗数值将减小。

资料(3)中所介绍的在一台 8 极电机上试验所得的槽配合与杂散耗数值间的关系曲线如图 1 中所示。

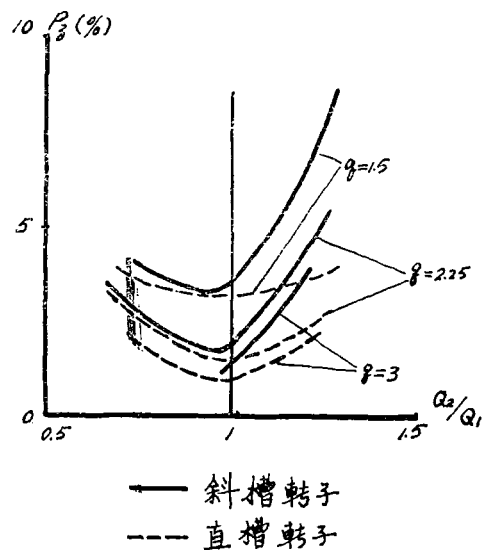


图 1

我室曾在 2JO—41—2, 5.5 瓩电机上进行试验, 试验结果如图 2、图 3 所示。图 2 中为斜槽铸铝转子, 图 3 中为铜转子(导条与铁芯绝缘)(参见资料 4)。

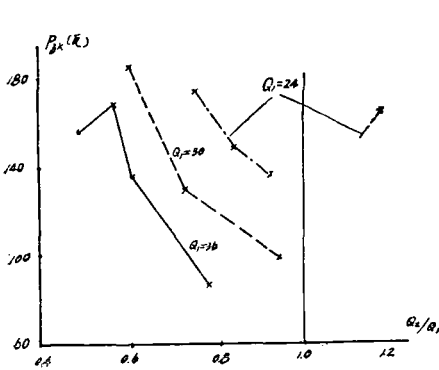


图 2

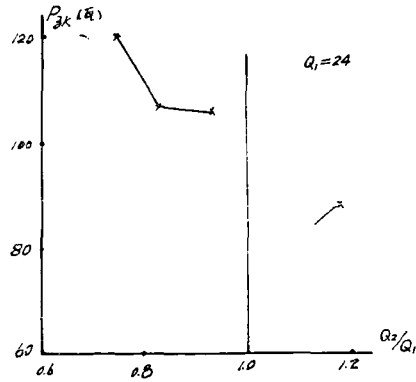


图 3

槽配合不但影响负载杂散耗的数值, 而且对空载杂散耗的数值也有影响。因为由槽口引起的磁导谐波磁通的次数也是齿谐波次数, 所以槽配合对空载杂散耗的影响与槽配合对负载杂散耗的影响是相似的。但当 Q_2/Q_1 数值不变, 而定转子槽数都变化时, 空载杂散耗的变化规律则与负载杂散耗的规律不同。在小型电动机中, 如果当定转子槽数变化时, 定转子槽口宽度保持不变, 则磁导谐波的幅值基本上是不变的。因此当定转子槽数增加时空载杂散耗的数值将随着谐波频率的增高而增大。我室曾在 2JO41-2, 5.5 瓩电机上对槽配合与空载杂散耗的关系进行了试验, (试验用转子为斜槽铸铝转子) 试验的结果如图 4 所示。

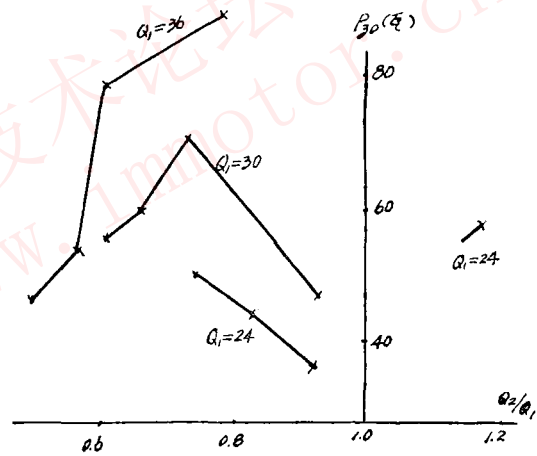


图 4

如上所述, 槽配合对电机的负载杂散耗与空载杂散耗(占铁耗中的很大部份)有很大影响。这两种损耗之和在电机总损耗中占有相当大的百分比数值。并且一般说来所采用的槽配合如负载杂散耗较大时空载杂散耗也较大(当定子槽数相同时)。因此槽配合选择是否恰当对电机温升也有显著影响。

槽配合对异步附加转矩的影响可考虑如下: 定子谐波磁场在转子中所感生的电流产生同样次数的谐波磁场($\mu' = \nu'$, 相当于 $k_2 = 0$)。它们间的相互作用产生异步附加转矩。如定转子槽数较接近时, 由定子齿谐波磁通在转子导条中所感生的电流数值较小, 因此由齿谐波磁通所造成的异步附加转矩数值也较小。其情况与槽配合对杂散耗的影响是相似的。因此, 为了减小齿谐波磁通所造成的异步附加转矩数值, 定转子槽数也要尽量接近。

按照资料(6)中的推导, 当 $Q_2 > Q_1$ 时, 由定转子槽口所引起的谐波磁场使定子齿谐波所产生的异步附加转矩增加很多。而当 $Q_2 < Q_1$ 时, 则其数值增加较少。在有些情况下甚至还可以使齿谐波异步附加转矩减小。因此为了减少槽口对定子齿谐波异步附加转矩的影响应使 $Q_2 < Q_1$ 。如上所述, 对于斜槽铸铝转子, $Q_2 < Q_1$ 时由定子齿谐波所引起的转子导条间

横向电流损耗较小，因此相应的异步附加转矩也较小。所以，一般说来，采用 $Q_2 < Q_1$ 对改善电机的起动性能是有利的。

四、其他设计参数对选择槽配合的影响

在选择电机的槽配合时，要使电机的附加转矩、电磁噪音和杂散损耗数值较小，并且电机的其他性能也较好。因此，槽配合的选择最好能通过计算电机的各项性能，包括附加转矩、电磁噪音和杂散损耗的数值，予以确定。上述的一些初步分析仅能作为参考。附加转矩、电磁噪音和杂散损耗的数值不但与槽配合有关，而且与电机其他各种设计与工艺参数有关。如果在某一种规格的电机中所选用的槽配合有可能会产生较大的附加转矩或电磁噪音，但可以通过调节电机的其他参数使附加转矩或电磁噪音减小，则这种槽配合仍可以采用。所以，电机其他的设计和工艺参数对槽配合的选择也有影响。其中主要如：定子绕组型式，转子绕组型式及结构、定转子斜槽度、定子绕组接法和并联支路数等，分别叙述于下：

1. 定子绕组型式：定子绕组型式决定定子的谐波磁势，因此对电机的谐波性能有较大影响。当定子绕组采用双层绕组或其他包含较少谐波成分的绕组（如华中工学院提出的：“正弦波形绕组”）时，电机的同步附加转矩和电磁噪音的数值就可以减小。因此，有些槽配合当定子为单层绕组情况下不能采用，而当定子绕组为双层绕组或“正弦波形绕组”时就可以应用。又如上述的当绕线型转子电机转子绕组采用分数槽绕组时，会产生电磁噪音，也是一例。当同步附加转矩或电磁噪音是由转子（或定子）的齿谐波与定子（或转子）的非齿谐波所引起时，在选择双层绕组的节距时要尽量使这一次非齿谐波的幅值减小。

2. 转子绕组型式及结构：例如上述的关于转子槽数少于或多于定子槽数时槽配合对杂散损耗数值的影响，即与转子绕组的型式及结构有关（是斜槽铸铝转子还是铜条转子或铸铝直槽转子）。又如西门子公司对槽配合为36/28的11 瓩4极电机采用的转子槽形如图5中所示。36/28槽4极电机在+214转/分时有同步转矩。采用图5中的槽形时，由于挤流效应的作用，当电机在起动过程中转速较低时有一半转子槽中电流数值相对较小。电机在低转速区的起动特性类似于槽配合为36/14的情况，因此其同步转矩数值就可以减小。在此情况下电机可以采用单层绕组（参考资料7）。

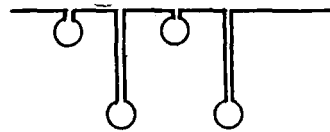


图 5

3. 转子（或定子）斜槽度：转子（或定子）斜槽可以使转子导条中所感应的齿谐波电流减小，并且定转子谐波间的相互作用力也减小，因此可以使同步附加转矩和电磁噪音的数值降低。关于转子斜槽对同步附加转矩数值的影响可参考资料(8)。转子斜槽对电磁噪音的影响可参考资料(9)。按照资料(9)中的推导，对于功率不大的导条与铁芯绝缘的鼠笼型电动机，当转子斜槽时，由转子 μ_b' 次谐波与定子 ν_a' 次谐波所产生的力波幅值等于直槽时力波幅值与转子对于 μ_b' 次谐波的斜槽系数 $k_{sk\mu_b}'$ 的乘积。由于声压与力波幅值的平方成正比，因此当转子斜槽时电机的声压级比直槽时约减小 $20 \log k_{sk\mu_b}'$ （绝对值）分贝。

转子对于 μ 次谐波的斜槽系数为：

$$k_{sk\mu} = \frac{\sin \frac{\mu \alpha}{2}}{\frac{\mu \alpha}{2}}$$

其中： α 为对于主磁场的转子斜槽电角度，以弧度计，

$$\alpha = p \frac{b}{R}$$

式中： b ——沿转子圆周测量的转子斜槽度；

R ——转子半径。

对于导条绝缘的鼠笼型电动机，当转子斜槽时由定子 ν 次谐波引起的异步附加转矩的数值比直槽时要小 k_{ν}^2 倍，并且其杂散耗的数值也较小。对于导条不绝缘的鼠笼型电动机，当转子斜槽时，会在相邻导条间产生横向电流，因而使异步附加转矩、负载杂散损耗和空载杂散损耗的数值都比直槽时增大。增大的数值与斜槽度及导条与铁芯间的接触电阻数值有关。参见资料(10)、(11)。

国外有些工厂在中型电机(鼠笼型和绕线型的)中采用转子(或定子)斜槽来改善起动性能和电磁噪音。如英国 A.E.I. 公司, English Electric 公司采用转子斜槽, 英国 Brush 公司采用定子斜槽。

4. 定子绕组接法和并联支路数：在上面的讨论中，只考虑了由定子磁势在转子中所感应的电流和磁通，而没有考虑由转子中的谐波电流所产生的谐波磁场在定子绕组中所感应的电流以及由这些电流所产生的磁场以及更高次数的反应的影响。在有些情况下这些电流和磁场对电机的转矩特性有显著的影响，会使附加转矩的数值增大，或产生其他次数的异步附加转矩，从而使电机的转矩特性变坏。它们的作用与定子绕组的接法 (Δ 、 Y)，并联支路数及绕组节距有关。按照资料(12)中的介绍：对于 2 极及 4 极的鼠笼型电动机，当 $|Q_1 - Q_2|$ 为下表中的数值时定子绕组并联支路数及 Δ -接法有可能对电机的转矩特性有较大的影响：

绕组节距	连接方式	当 $ Q_1 - Q_2 $ 为下列数值时 并联支路有影响	当 $ Q_1 - Q_2 $ 为下列数值时 Δ -接法有影响
$y/\tau = 1$	2 p 个并联支路	—	2 P, 4 P, 8 P, 10 P, 14 P...
	p 个并联支路, 端部长连接*	—	2 P, 4 P, 8 P, 10 P, 14 P...
	p 个并联支路, 端部短连接	—	2 P, 4 P, 8 P, 10 P, 14 P...
	串联连接		2 P, 4 P, 8 P, 10 P, 14 P...
$2/3 < y/\tau < 1$	2 p 个并联支路	1 P, 3 P, 5 P, 7 P...	2 P, 4 P, 8 P, 10 P, 14 P...
	p 个并联支路, 端部长连接	1 P, 3 P, 5 P, 7 P...	2 P, 4 P, 8 P, 10 P, 14 P...
	p 个并联支路, 端部短连接	—	2 P, 4 P, 8 P, 10 P, 14 P...
	串联连接		2 P, 4 P, 8 P, 10 P, 14 P...
$y/\tau = 2/3$	2 p 个并联支路	1 P, 3 P, 5 P, 7 P...	—
	p 个并联支路, 端部长连接	1 P, 3 P, 5 P, 7 P...	—
	p 个并联支路, 端部短连接	—	—
	串联连接		—

* 注：4 极电机当定子绕组接成二个并联支路时，所谓端部“长连接”即同一相绕组中位于定子同一直径二端上的线圈组成一个并联支路；“短连接”即相邻二个线圈组成一个并联支路。

上述情况举例说明如下：

对槽配合为 48/42 的四极电机，其谐波排列表如下：

ν'	μ'			
	$k_2 = +1$	-1	+2	-2
+2	+44	-40	+86	-82
-10	+32	-52	+74	-94
+14	+56	-28	+98	-70
-22	+20	-64	+62	-106
+26	+68	-16	+110	-58
-34	+8	-76	+50	-118
+38	+80	-4	+122	-46
-46	-4	-88	+38	-130
+50	+92	+8	+134	-34

当定子绕组接成二个并联回路($\gamma/\tau < 1$)时, 可以有下列二种接法, 如图6 a 及 b 所示。

在图 6 (a) 中, 由转子 8 极 ($\mu' = 4$) 谐波磁场在定子绕组每一并联支路的二只线圈中所感应电势方向是相反的。一个支路中感应电势的总和为 0。因此在定子绕组中没有 $\mu' = -4$ 的谐波电流流通。定子绕组对 $\mu' = -4$ 次磁场不起阻尼作用。转子 $\mu' = -4$ 磁场的数值较大, 即转子对于定子 $\nu' = -46$ 次磁场的谐波漏抗较大。故转子中 $\mu' = -46$ 次电流数值较小, 相应的异步附加转矩也较小。同理定子绕组对转子 + 8 次谐波磁场也不起阻尼作用, 故定子 $\nu' = +50$ 次磁场所产生的异步附加转矩也较小。

当绕组端部长连接时 (图 6 (b)), $\mu' = -4$ 次谐波磁场在定子绕组每一并联支路的二只线圈中所感应的电势方向相同。一个支路中感应电势的总和不等于 0。因此在定子绕组中有 $\mu' = -4$ 次的谐波电流通过。定子绕组对 $\mu' = -4$ 次磁场有阻尼作用。因此转子 $\mu' = -4$ 磁场的数值较小, 即转子对于定子 $\nu' = -46$ 次磁场的谐波漏抗较小。故由定子 $\nu' = -46$ 次谐波所产生的异步附加转矩数值较大。同理 $\nu' = +50$ 次磁场所产生的异步附加转矩也较大。

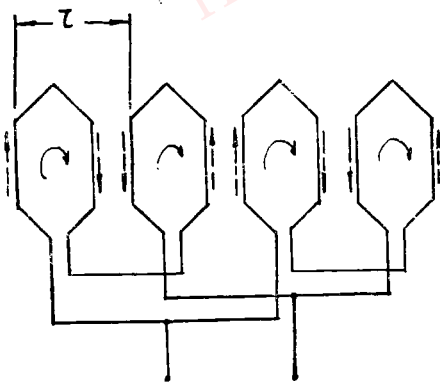


图6(a) 端部短连接

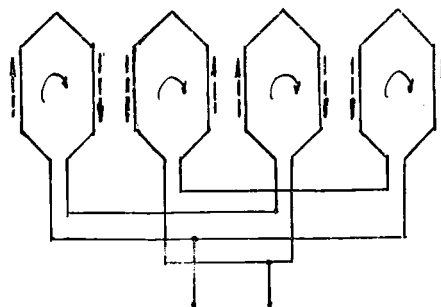


图6(b) 端部长连接

虚线箭头指主磁场感应电势, 实线箭头指 8 极谐波磁场感应电势

又如槽配合为 36/28 的 4 极电机, 其谐波排列表如下:

ν'	μ'			
	$k_2 = +1$	-1	+2	-2
+2	+30	-26	+58	-54
-10	+18	-38	+46	-66
+14	+42	-14	+70	-42
-22	+6	-50	+34	-78
+26	+54	-2	+82	-30
-34	-6	-62	+22	-90
+38	+66	+10	+94	-18

从上表可见：相当于 $k_2 = +1$ 的各次转子谐波（包括转子一次齿谐波 $\mu' = +30$ ）都是 3 的倍数。当定子绕组为 Y 接法时由这些转子谐波在每二相绕组上所感应的电势方向是相反的。因此在定子绕组中不感生这些谐波次数的电流。而当定子绕组为 Δ 接法时则由这些转子谐波在定子绕组中所产生感应的电势相互叠加。会在定子绕组中产生较大的电流。因而产生额外的异步附加转矩。

5. 按照资料(13), (14), 同步附加转矩对电机起动过程的影响与电机净起动转矩（等于电动机转矩 M_e 与负载转矩 M_f 之差）对于转速的特性曲线的形状有关。如果在产生同步转矩的转速处净起动转矩—转速特性的斜率是正的（如图 7 (a) 所示），则电机很容易通过这一转速而起动到全速。如果在这一转速处净起动转矩—转速特性的斜率是 0 或是负的（如图 10 b 所示），则电机在这一转速下潜行的可能性就较大。因此，同步转矩对电机起动性能的影响不但与其数值大小有关，而且与净起动转矩—转速特性的斜率有关。

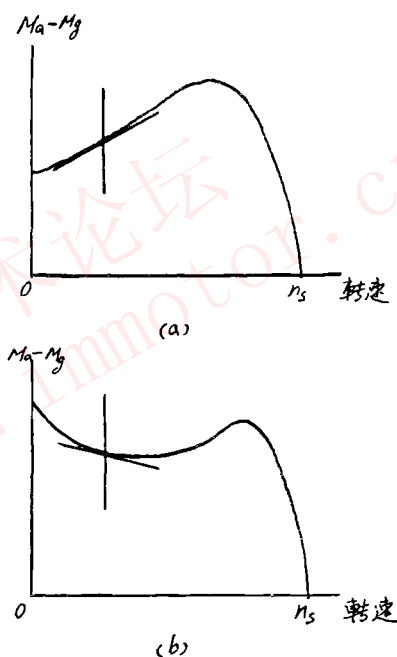


图 7

五、国外电机中所采用的槽配合

国外电机中采用槽配合的情况，在资料中见到的不多，现将所了解的情况叙述于下：

苏联 A、AO 系列 100~1000 瓦鼠笼型电动机（#10~13 号机座）采用下列槽配合（参考资料 15、16、17）。

2 极：48/38, 48/58

4 极：60/50, 60/70

6 极：72/58, 72/82, 72/86

8 极：72/58, 72/86

10 极：90/74, 90/104, 90/106

苏联 AK 系列绕线型电机（#10~11 号机座）采用下列槽配合（参考资料 17）

4 极：60/72,

6 极：72/90,

8 极：72/96,

10 极：90/75, 90/105, 60/90

据报导德国有些中型鼠笼型电机的槽配合为：（参考资料18）

2极：42/34, 48/38, 54/46 4极：60/50
6极：72/58 8极：72/58 10极：90/74

资料（19）中提到英国English Electric公司400马力~10,000马力电机采用下列槽配合（转子都斜一定子槽）：

2极：60/46, 4极：60/46, 60/74 6极：90/106, 108/130
8极：120/146, 10极：120/146

资料(19)中还提到在30马力、4极电机中采用48/40槽。

资料（20）中提到：100马力、4极电机采用60/52槽（定子双层绕组， $\nu/\tau = 11/15$ ，试验研究用样机中采用）。

资料（21）中提到：Brown Boveri公司3500瓩、4极电机用60/74槽，转子直槽。

资料（6）中提到：Oerlikon公司70瓩、4极电机用48/42槽（定子双层绕组 $\nu/\tau = 5/6$ ），转子直槽，未发现有明显噪音。

资料（3）中建议：当电机的电磁噪音可控制在容许值范围以内时，可采用 $Q_1 - Q_2 = p$ 的槽配合。

资料（22）中提出：从降低电磁噪音出发，通常采用 $Q_1 - Q_2 = 4p$ 的槽配合（2极电机除外），二极电机通常采用 $Q_2 = Q_1 - 8$ 。

六、对鼠笼型电动机中选用槽配合的讨论

如上面第四节中所述，槽配合的选择与电机的其他参数是有关系的，同时还要考虑不同极数电机转子的通用性等，所以它的选择要按照每种规格电机的具体情况而定。这里只能对它的选用原则进行一些讨论。由于我们过去在这方面未进行系统的试验研究工作，因此这些初步讨论只能供作参考。

从降低电磁噪音的角度出发，可选用下列的槽配合： $Q_2 = Q_1 \pm 2p, Q_2 = Q_1 \pm 4p$ 。因为在这些情况下定转子一次齿谐波次数的差值都是 $2p$ ，所以电磁噪音较小。

当 $Q_2 = Q_1 \pm p, Q_2 = Q_1 \pm 3p$ 时，定转子一次齿谐波次数的差值是 p ，对于功率较小或极数较多的电机，电磁噪音也较小，也可以考虑采用。

但上述这些槽配合都要产生同步转矩， $Q_2 = Q_1 \pm 2p$ 时定转子一次齿谐波在 $\nu < 1$ 时产生同步转矩。 $Q_2 = Q_1 \pm 4p$ 时转子一次齿谐波与定子非齿谐波在 $\nu > 1$ 时产生同步转矩，（符合上述的 $Q_2 = 6pk_1 \pm 2p$ 的条件）。 $Q_2 = Q_1 \pm p$ 时定转子二次齿谐波在 $\nu < 1$ 时产生同步转矩。 $Q_2 = Q_1 \pm 3p$ 时转子二次齿谐波与定子非齿谐波在 $\nu = 1$ 时产生同步转矩。由于二次齿谐波幅值较小，故 $Q_2 = Q_1 \pm p, Q_2 = Q_1 \pm 3p$ 时电机同步转矩的数值较小，对电机起动性能影响较小。对于不在制动状态下运行的电机，在 $\nu > 1$ 时有同步转矩对电机运行性能影响不大，因此可以考虑采用 $Q_2 = Q_1 - 2p, Q_2 = Q_1 + 4p$ 的槽配合。 $Q_2 = Q_1 \pm 4p$ 时定转子槽数相差较多，因此杂散耗数值较大。

当定转子槽数差值不等于极对数的倍数时，电机不产生同步转矩。但定转子一次齿谐波次数的差值要小于 p 或 $2p$ 。转子一次齿谐波与定子非齿谐波次数的差值也较小。因此可能产生较大的电磁噪音，如：

1. $Q_2 = Q_1 \pm p \pm 1, Q_2 = Q_1 \pm p \pm 2$ ：当 $Q_2 = Q_1 \pm p$ 时定转子二次齿谐波次数相等（ $\nu' = -\mu'$ ）。因此， $Q_2 = Q_1 \pm p \pm 1, Q_2 = Q_1 \pm p \pm 2$ 时，定转子二次齿谐波次

数相差 2、4。定转子一次齿谐波次数相差 $p \pm 1$, $p \pm 2$ 。由于二次齿谐波的幅值较小, 所以它们所产生的噪音一般较小。对于极数较少的电机由定转子一次齿谐波产生的次数为 $p \pm 1$, $p \pm 2$ 次的力波有可能造成较大的噪音。

2. $Q_2 = Q_1 \pm 2p \pm 1$, $Q_2 = Q_1 \pm 2p \pm 2$: 当 $Q_2 = Q_1 \pm 2p$ 时定转子一次齿谐波次数相等 ($\nu' = -\mu'$)。因此当 $Q_2 = Q_1 \pm 2p \pm 1$, $Q_2 = Q_1 \pm 2p \pm 2$ 时, 定转子一次齿谐波次数相差 1、2, 有可能产生较大的噪音。

3. $Q_2 = Q_1 \pm 3p \pm 1$, $Q_2 = Q_1 \pm 3p \pm 2$: 当 $Q_2 = Q_1 \pm 3p$ 时转子二次齿谐波与定子非齿谐波次数相等 ($\mu' = +\nu'$)。因此当 $Q_2 = Q_1 \pm 3p \pm 1$, $Q_2 = Q_1 \pm 3p \pm 2$ 时转子二次齿谐波与定子非齿谐波次数相差 2、4。定转子一次齿谐波次数相差 $p \pm 1$, $p \pm 2$ 。对于极数较少的电机, 后者有可能产生较大的噪音。

4. $Q_2 = Q_1 \pm 4p \pm 1$, $Q_2 = Q_1 \pm 4p \pm 2$: 当 $Q_2 = Q_1 \pm 4p$ 时转子一次齿谐波与定子非齿谐波次数相等 ($\mu' = -\nu'$)。因此当 $Q_2 = Q_1 \pm 4p \pm 1$, $Q_2 = Q_1 \pm 4p \pm 2$ 时, 转子一次齿谐波与定子非齿谐波次数相差 1、2。定转子一次齿谐波次数相差 $2p \pm 1$, $2p \pm 2$ 。有可能产生较大的噪音。

由上述情况可见: 当定转子槽数的差值不是极对数的倍数时, 电机产生电磁噪音的可能性一般要比定转子槽数相差为极对数的倍数时来得大。

对于极数较多的电机可以考虑采用 $Q_2 = Q_1 \pm 3p \pm 1$ 的槽配合 (如 6 极 72/82, 10 极 90/74, 90/104, 90/106)。在此情况下, 定转子一次齿谐波次数相差 $p \pm 1$ 。如 p 值较大时它们的次数还是较高的。转子二次齿谐波与定子非齿谐波次数相差 2, 所产生的噪音一般不大。

由上面的分析可见: 电机槽配合的选择要根据电机的具体情况而定。如果电机的同步转矩数值不大, 或其危害性并不严重时, 可以采用定转子槽数差值为极对数的倍数的转子槽数。而如电机的电磁噪音较小, 或者可以采用其他方法加以抑制时, 则可以采用定转子槽数差值不等于极对数倍数的转子槽数。

对上述国外中型电机中所采用的槽配合的情况分析于下:

1. 2 极电机: 国外 2 极电机所采用的槽配合有: 42/34、48/38、54/46 等。42/34, 54/46 都是 $Q_2 = Q_1 - 8p$, 在 $s > 1$ 时有由一次转子齿谐波所产生的同步转矩。48/38 槽 $Q_2 = Q_1 - 10p$, 在 $s < 1$ 时有由一次转子齿谐波所产生的同步转矩。

2. 4 极电机: 国外 4 极电机所采用的槽配合有 60/46、60/50、60/52、60/74 等。60/46 及 60/74 都是 $Q_2 = Q_1 \pm 7p$ 。60/50 槽 $Q_2 = Q_1 - 5p$, 都有由二次转子齿谐波所产生的同步转矩 (60/46 在 $s > 1$ 时, 60/50, 60/74 在 $s < 1$ 时), 60/52 槽 $Q_2 = Q_1 - 4p$, 在 $s < 1$ 时有由转子一次齿谐波所产生的同步转矩。

3. 6 极及 8 极电机: 苏联 6 极、8 极电机的槽配合是通用的, 都采用 72/58 或 72/86。如 $Q_2 = Q_1 \pm 4p$ 时, 对于 6 极电机为 72/60 或 72/84, 对于 8 极电机为 72/56 或 72/88。因此 72/58 或 72/86 是解于二者之间的, 其槽数为 $Q_2 = Q_1 \pm 4p \pm 2$ 。转子一次齿谐波与定子非齿谐波次数相差 2。电磁噪音可能较大。苏联 6 极电机也有采用 72/82 槽的, $Q_2 = Q_1 + 3p + 1$ 。转子二次齿谐波与定子非齿谐波次数相差 2。其电磁噪音相对较小。

4. 10 极电机: 苏联 10 极电机采用的槽配合有 90/74, 90/104, 90/106。三种槽子槽数都是 $Q_2 = Q_1 \pm 3p \pm 1$ 。转子二次齿谐波与定子非齿谐波次数相差 2。噪音也较小。

对国外中型电机中所采用的槽配合, 可以看到有下列一些情况:

1. 国外中型电机中, 有采用由一次转子齿谐波与定子非齿谐波在 $s < 1$ 时产生同步转

矩的槽配合,如2极48/38槽,4极60/52槽。有可能是由于定子采用双层绕组,可以抑制定子非齿谐波的幅值,使同步转矩的数值控制在允许范围内。

2. 英国English Electric公司电机,除4极电机外其他电机的定转子槽数都比苏联电机多。4极及以上电机定子每极每相槽数差不多是一样的。这对于降低电机的负载杂散耗是有利的。苏联6极、8极电机采用同样的槽配合,而English Electric公司则8极、10极电机采用同样的槽配合。

对于三相异步电动机的槽配合,由于我们过去在这方面工作做得很少,所了解的情况也不多,以上仅是一些初步看法,如有错误或不妥当之处请读者予以指正。

参 考 资 料

1. Oberretl; Field—harmonic theory of slip-ring motor taking multiple armature reaction into account P.I.E.E. 1970 №8
2. Schuisky; Induktionsmaschinen 1957
3. Гаинцев; Влияние Числа Пазов Ротора и Статора на Характеристики Асинхронных Двигателей Электротехника 1972 №8
4. 上海电器科学研究所:小型三相异步电动机(铸铝转子)设计和工艺参数对负载杂散损耗的影响(ОАН.126.006G);三相异步电动机槽配合、气隙长度和定子绕组型式对附加损耗影响的研究(ОАН.122.005G)
5. 胡明正:鼠笼式异步电动机的谐波附加损耗及其与槽配合的关系。(重庆大学)
6. Heller, Jokl; Tangential forces in squirrel-cage induction motors PAS-88, 1969 №4
7. Benecke; Entwicklungsprobleme bei Kleinen Drehstrom-Asynchronmotoren Siemens Zeitschrift 1967 H.10
8. Richter; Elektrische Maschinen Bd. IV, Induktionsmaschinen.
9. Jordan, Müller—Tornfelde; Akustische Wirkung der Schrägung bei Drehstrom—asynchronmaschinen mit Käfiganker E.T.Z. 1961 H.24
10. Гаинцев, Петрянков; Исследование Добавочных Потерь Асинхронного Двигателя Электротехника 1969 №6
11. Chalmers, Richardson; Investigation of high-frequency no load losses in induction motors with open stator slots P.I.E.E. 1966 №10
12. Oberretl; Über den Einfluss von parallelen Wicklungszweigen, Dreieckschaltung, Spulensehnung, Nutschlitzbreite und Nutenschrägung auf das Drehmoment von Käfigläufermotoren. E.T.Z. 1965 H.19
13. Buttkeleit, Jordan, Weis; Das Durchfahren von synchronen Drehmomentsätteln von Drehstromasynchronmotoren mit käfigläufern E.U.M. 1968 H.8
14. Геллер, Гамата; Дополнительные Поля, Моменты и Потери Мощности в Асинхронных Машинах 1964
15. 考察报告:AO#10~11封闭式三相异步电动机技术设计说明(OAG.127.119.7)
16. 考察报告:AO#12~13技术数据(OAG.127.123.1)
17. 考察报告:A、AK#10~11设计数据(OAG.127.119.8)
加里宁电机厂A、AK#10~11电动机技术设计(1954)
18. 考察报告:德国100~1000千瓦封闭式电机数据(OAG.127.123.4)
19. Chalmers; High frequency stray load losses in cage induction motors Electrical Times 1967 v.152 №20
20. Binns, Hindmarsh, Short; Effect of skewing slots on flux distribution in induction machines P.I.E.E. 1971 №3/4
21. Kron, Pfau; Beitrag zur Kenntnis der Zusatzverluste grosser Asynchronmotoren E.T.Z. 1969 H.21
22. Alger; Induction Machines, their Behavior and Uses (1970), 或The Nature of Poly-phase Induction Machines (1964)