

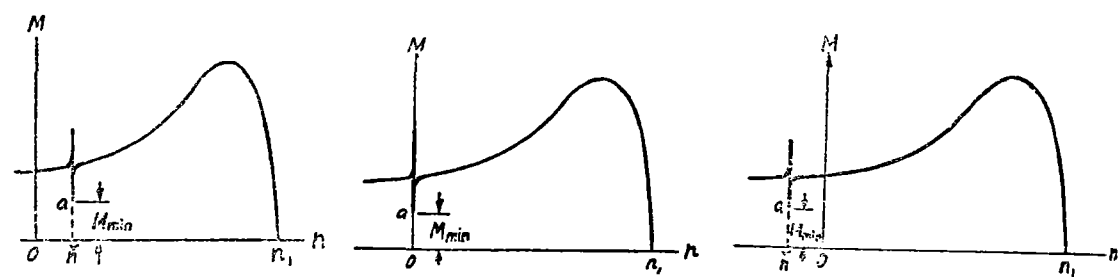
按解决最小转矩问题 的要求适当选用异步电动机槽配合

工业自动化系 徐宁寿

【提要】 本文对鼠笼型三相异步电动机采用整数槽绕组情况下发生的最小转矩现象，着重从三种同步附加转矩的根源作了具体分析，按所导出的定、转子槽数配合禁忌关系式造出了便于实用查照的数据表格。

如所周知，鼠笼型三相异步电动机在制造和使用上常感迫切要求解决的一个问题就是如何防止出现最小转矩。如果电机转矩特性曲线在某一低转速处有下凹现象，并且下凹最深处的“谷点”所对应的最小转矩 M_{min} 又过低于转速 $n=0$ 处的起动转矩 M_q (图 1a)，则当

电机带一定负载起动时，便有可能导致电机在此低转速 n^v 下“爬行”不已。于是，过大的定子电流便会使绕组很快烧毁。倘若很深的谷点正好出现在 $n=0$ 处 (图 1b)，那么电机甚至会根本不转。而对于起吊设备等方面应用的电机，即使在 $n<0$ 的制动运行区出现明显的谷点 (图 1c) 也是不允许的。



(a) 谷点 a 在 $n=n^v>0$ 处 (b) 谷点 a 在 $n=n^v=0$ 处 (c) 谷点 a 在 $n=n^v<0$ 处

图 1 异步电机转矩曲线上的最小转矩 M_{min}

按异步机理论，转矩曲线上形成谷点的原因主要来自异步附加转矩和同步附加转矩。两者都是由于定、转子绕组在气隙中建立的同极对数磁坊相互作用所产生的。

对于一般每极每相槽数 q 为整数的三相定子绕组，由它在气隙中建立的谐波旋转磁坊 F_{1v} 的次数为 $\gamma=6k\pm 1$ ($k=1, 2, 3\cdots$)，相应的同步转速为

$$n_{\gamma} = 6k \pm 1 = \pm \frac{n_1}{\gamma} = \frac{n_1}{1 \pm 6k} \quad (1)$$

等式两边均取“+”号时， n_{γ} 与基波磁坊同步速 n_1 同方向，均取“-”号时则反方向。这

些谐波磁场中须特别注意的是 k 值恰为 q 的整数倍的齿谐波, 其次数为

$$\nu_c = 6qg_1 \pm 1 = \frac{Q_1}{p} g_1 \pm 1 \quad (2)$$

(式中 $g_1 = 1, 2, 3 \dots$ —— 定子齿谐波磁场的阶数; Q_1 —— 定子槽数; p —— 极对数), 因为定子绕组对于这种谐波的绕组系数总是等于基波的绕组系数, 它们的幅值仅随次数 ν_c 的增大而呈反比例地缓慢减小, 以致有必要考虑到 49 次为止。至于其他对应于 $k \approx qg_1$ 的相带谐波, 在 $q \geq 2$ 的实际电机产品中普遍受绕组的分布效应所削弱。故 19 次以上的均可忽略。即使是 19 次以下的相带谐波, 还有可能针对其中特定的一、两项, 采用适当的短距措施予以大大削弱。当须削弱的相带谐波次数为 ν 时, 短距比应尽量接近于

$$\beta_\nu = 1 - \frac{\lambda}{\nu} \quad (3)$$

在三相整数槽绕组情况下, ν 全是奇数次的, 上式中的 λ 也应只取奇数 1、3、5、 \dots 。

形成异步附加转矩的物理机制与作为异步机本质的异步基波转矩相同。上述诸 ν 次谐波磁场旋转切割转子导体后引起各自的转子感应电流 $i_{2\nu}$, $i_{2\nu}$ 在气隙中建立极对数与 $F_{1\nu}$ 相同的转子谐波磁场 $F_{2\nu}$, $F_{2\nu}$ 再与 $F_{1\nu}$ 相作用便产生 ν 次谐波异步转矩 M_ν 。与计算基波异步转矩的方法相似, M_ν 也可利用相应的等值电路进行估算。结果表明, 即使按 JO_2 系列电机中谐波磁场最严重的、定子采用 $q=2$ 的单层(整距)绕组情况来分析: 对 $n=0 \sim n_1$ 范围内转矩曲线形状影响最大的是 $\nu=6k+1=7$ 次相带谐波和 $\nu_c = \frac{Q_1}{p} g_1 + 1 = 13$ 次 ($g_1=1$) 一阶齿谐波。7 次相带谐波异步转矩形成的 M_{\max} 最多不过比 M_q 低 2%, 因而可不予考虑。一阶齿谐波异步转矩的后果较严重些, 有可能使 M_{\max} 比 M_q 低一倍以上。但在 $q \geq 3$ 后, 一阶齿谐波引起的 M_{\min} 不致低于 $0.8M_q$ 。理论和实践都已证明, 只要采用下面两个措施之一即可使定子一阶齿谐波磁场在转子导条中不感生电流, 因而基本上消除这种齿谐波异步转矩:

① 转子槽扭斜过定子一阶齿谐波磁场的一对极距, 即 $\frac{Q_1}{Q_1+p} t_1$ (t_1 —— 定子齿距)。

这是多年来一直流行的作法, 但其不良后果是引起横向电流附加损耗。

② 使转子上相邻两根导条的间距(即转子齿距)恰好等于定子一阶齿谐波磁场一对极距 $\frac{Q_1}{Q_1+p} t_1$ 的整数倍 a , 也就是使转子槽数为

$$Q_2 = \frac{1}{a} (Q_1 + p) \quad (4)$$

【文1】的分析表明, 只要在复盖上式所定数值的范围

$$Q_2 \leq 1.25(Q_1 + p) \quad (5)$$

以内选取 Q_2 , 即可使齿谐波异步转矩大为削弱。由此可见, 为了防止出现异步附加转矩, 对槽配合的要求是简单而宽松的。

这样, 实际上有必要认真对付的只是同步附加转矩, 由它引起的 M_{\min} 值往往很低(甚至有可能是负值), 从而造成对起动的严重威胁。形成这种转矩的物理机制与同步机的情况相似, 也可分为激磁式、应式式和减速式三类。在各类情况下, 定、转子槽数的搭配关系均对同步附加转矩是否能出现, 以及出现的转速有极大影响。现一一具体分析如下。

(一)、激磁式同步附加转矩与槽配合的关系

定子基波磁场切割转子导体所引起的电流 i_2 ，除了建立转子基波磁场 F_2 以与 F_1 相互作用，产生有用的基波异步转矩 M_1 外，还会建立起一系列次数为 μ 的转子谐波磁场 $F_{2,\mu}$ 。在鼠笼转子情况下， $F_{2,\mu}$ 实际上全是齿谐波，其次数为

$$\mu_o = \frac{Q_2}{p} g_2 \pm 1 \quad (6)$$

式中 $g_2 = 1, 2, 3, \dots$ — 转子齿谐波阶数。显然，若 Q_2 选择不当，就有可能使诸 $\mu = (Q_2/p)g_2 \pm 1$ 次转子齿谐波磁场中的某一个或两个（甚至更多个）恰好与定子诸 $\nu = 6k \pm 1$ 次谐波磁场中的某一个或两个（甚至更多个）次数各各相等，因而具有相同的极对数。由于 F_1 引起的 i_2 只有在 $n = n_1$ 时才消失，所以在 $n \neq n_1$ 的异步运行情况下， i_2 产生的各次谐波磁场 $F_{2,\mu}$ 都是存在的，并且当转子转速改变时， $F_{2,\mu}$ 的转速也会改变。这样就造成一种可能性：当 n 改变到恰好使 $F_{2,\mu}$ 的转速等于同次数定子谐波磁场 $F_{1,\nu}$ 的转速 n_1 时，二磁场处于相对静止的同步状态，因而可形成稳定的电磁转矩，正象激磁式同步电动机那样。在异步电动机中，这种激磁式谐波同步转矩叠加到基波异步转矩上，便使转矩曲线在该转速下出现一个图 1 所示下凹的谷点。

按以上观点，可导出有可能产生激磁式同步附加转矩的定、转子槽数关系式及出现附加转矩的谷点转速 n 。

① 对应于定子 $\nu = 6k \pm 1$ 次分别与同极对数转子 $\mu = \frac{Q_2}{p} g_2 \pm 1$ 次谐波磁场相作用，在 $n = 0$ 时出现附加转矩的情况有

$$\begin{cases} Q_2 = 6p \frac{k}{g_2} = \frac{k}{qg_2} Q_1 \\ n = 0 \end{cases} \quad (7)$$

② 对应于定子 $\nu = 6k + 1$ 次与同极对数转子 $\mu_o = \frac{Q_2}{p} g_2 - 1$ 次谐波磁场相作用，在 $n > 0$ 时出现附加转矩的情况有

$$\begin{cases} Q_2 = 2p \frac{3k+1}{g_2} = \frac{3k+1}{3qg_2} Q_1 \\ n = \frac{2p}{Q_2 g_2} n_1 = \frac{n_1}{3k+1} \end{cases} \quad (8)$$

③ 对应于定子 $\nu = 6k - 1$ 次与同极对数转子 $\mu_o = \frac{Q_2}{p} g_2 + 1$ 次谐波磁场相作用，在 $n < 0$ 时出现附加转矩的情况有

$$\begin{cases} Q_2 = 2p \frac{3k-1}{g_2} = \frac{3k-1}{3qg_2} Q_1 \\ n = -\frac{2p}{Q_2 g_2} n_1 = -\frac{n_1}{3k-1} \end{cases} \quad (9)$$

按以上三式求出的, 可能在 $n=0$ 、 $n>0$ 和 $n<0$ 时出现激磁式同步附加转矩的转子槽数分别列于表 1 的 0 栏、 $+a$ 栏和 $-a$ 栏下。

原则上说, 在表中对应于某极数 $2p$ 的一个大行中, 左边所列任一 Q_1 值若与右边各栏下的任一 Q_2 值组成搭配, 都可能产生激磁式附加同步转矩, 共出现的转速 n 和起作用的谐波磁势次数 $\nu (= \mu_c)$ 标在 Q_2 值所在一列的顶端。例如, 在设计 $2p=4$ 的电机时, 为了防止在 $n>0$ 情况下出现这种转矩, 按表中第二大行 ($2p=4$) 数据, 右边

$$q = 2, 3, 4, 5, 6, 7$$

$$Q_1 = 24, 36, 48, 60, 72, 84$$

中的任何一个定子槽数都不宜与右边 $+a$ 栏下

$$\begin{array}{cccccccc} \nu & n=n_1/4, & n_1/7, & n_1/10, & n_1/13, & n_1/16, & n_1/19, & n_1/22, & n_1/25 \\ \nu (= \mu_c) = & 7, & 13, & 19, & 25, & 31, & 37, & 43, & 49 \\ k = & 1, & 2, & 3, & 4, & 5, & 6, & 7, & 8 \\ Q_2 = & 16, & 28, & 40, & 52, & 64, & 76, & 88, & 100 \\ & & 14, & 20, & 26, & 32, & 38, & 44, & 50 \end{array}$$

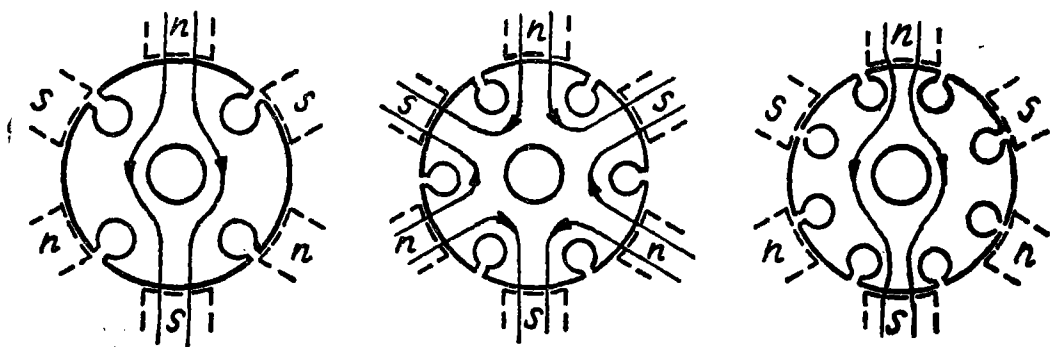
中的任何一个转子槽数 Q_2 构成配合关系。但实际上, 这样筛选未免过于严格。前已指出, 对定子齿谐波要考虑到 49 次为止, 而不同 Q_1 值下, 因 q 不同, 齿谐波次数 ν_c (或对应的 $k=qg_1= q, 2q, 3q, \dots$) 也不同。另外, 对定子相带谐波只须考虑到 19 次 (对应的 $k \leq 3$) 为止。于是在上例中, 若已选定 Q_1 为 24 或 48 或 60 时, Q_2 只须分别忌取下列数值 (括号内的 Q_2 因过大或过小而无实用意义) :

	$k =$	1	2	3	4	5	6	7	8
$Q_1 = 24 (q=2)$	$Q_2 =$	$\hat{16}^7$	28	$\hat{40}^{19}$	(52)		(76)		(100)
			14	$\hat{20}^{19}$	26		38		(50)
$Q_1 = 48 (q=4)$	$Q_2 =$	$\hat{16}^7$	$\hat{28}^{13}$	$\hat{40}^{19}$	52				(100)
			$\hat{14}^{13}$	$\hat{20}^{19}$	26				50
$Q_1 = 60 (q=5)$	$Q_2 =$	$\hat{16}^7$	$\hat{28}^{13}$	$\hat{40}^{19}$		64			
			$\hat{14}^{13}$	$\hat{20}^{19}$		32			

并且, 凡 Q_2 值上方有符号“ $\hat{}$ ”者, 表示附加转矩由定子相带谐波磁场所产生, 其次数 ν 注在右上角; 因而只要按 (3) 式要求取短距比 β_ν , 使绕组对于该 ν 次谐波的短距系数 $K_{\nu} < 0.1 \sim 0.3$ (次数 ν 愈低, K_{ν} 应愈小), 则此 Q_2 值仍可采用。

(二)、反应式同步附加转矩与槽配合的关系

若撇开转子绕组中的电流不予考虑,那么开有槽口的转子铁芯在定子各次谐波磁场中的作用,便与反应式同步机凸极转子铁芯在基波磁场中的作用十分相似。磁力线总是力图寻求和保持一条磁阻最小的路径。磁路磁阻随转子与定子磁场间的相对位移而改变得愈大,则在转子随磁场同步旋转时所引起的反应式同步转矩便愈大。为了充分利用这一效应,一般反应式同步机的转子铁芯多半做成凸极形状,并且极对数恰好与定子基波磁场相等。而在异步机中,转子铁芯对基波磁场来说,可以认为是隐极的,不会由此产生反应式同步转矩。但转子铁芯上的齿形对于极距很小的谐波磁场来说,则可看成凸极形状(尤其是当转子槽口较大时)。由图2可以看出,在转子齿数(即槽数 Q_2)恰好等于 ν 次谐波磁场极数 $2p\nu$,或者更普遍地说,在 Q_2 与 $2p\nu$ 间有最大偶数公约数 ξ 情况下,转子铁芯就可以为 ν 次谐波磁



(a) $Q_2=4, \xi=2$ (b) $Q_2=6, \xi=6$ (c) $Q_2=8, \xi=2$

图2 转子铁芯对 ν 次谐波磁场提供的最小磁阻路径数等于 Q_2 与 $2p\nu$ 间的最大偶数公约数 ξ (图示为 $2p\nu=6$ 情况)

场的 $n-s$ 极间提供 ξ 条磁阻最小的通道。对于同一 ν 次谐波磁场,若 $Q_2 \leq 2p\nu$,最大偶数公约数 ξ 至多等于 Q_2 ,而若 $Q_2 \geq 2p\nu$,则 ξ 至多等于 $2p\nu$ 。显然, ξ 值愈大,反应式附加转矩也会愈大。因此,我们应着重注意 ξ 值较大的情况。

由以上分析可推知,能与正转的 $\nu=6k+1$ 次和反转的 $\nu=6k-1$ 次谐波磁场形成反应式附加转矩的转子槽数及该转矩出现的转速(即 $\nu=6k \pm 1$ 次谐波磁场同步速)分别为

$$\begin{cases} Q_2 = 2p(6k+1) \frac{j}{l} = \frac{6k+1}{3q} \frac{j}{l} Q_1 \\ n = \frac{n_1}{6k+1} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} Q_2 = 2p(6k-1) \frac{j}{l} = \frac{6k-1}{3q} \frac{j}{l} Q_1 \\ n = \frac{n_1}{6k-1} \end{cases} \quad (11)$$

式中 l —能使谐波磁场极数 $2p(6k \pm 1)$ 得出较大偶数商(即偶数 ξ 值)的整数除数,一般可只取 $l=1$ 和 2 ; $j=1, 2, 3, 4 \dots$

按(10)、(11)式求出的,可能在 $n>0$ 和 $n<0$ 时出现反应式附加转矩的转子槽数 Q_2 。

的值，分别列于表2中 $+\beta$ 栏和 $-\beta$ 栏下。由表2按 Q_1 值所对应的19次以下相带

表2可能出现反应式
附加同步转矩的定、转子槽配合

		$+\beta (n < 0)$							$-\beta (n < 0)$													
v	n	n_1	n_1	n_1	n_1	n_1	n_1	n_1	$-n_1$	$-n_1$	$-n_1$	$-n_1$	$-n_1$	$-n_1$	$-n_1$							
		7	13	19	25	31	37	43	5	11	17	23	29	35	41							
	$v (= \mu_e)$	7	13	19	25	31	37	43	5	11	17	23	29	35	41							
2	3	4	5	6	7	8	g	k														
							Q_1	$2p$	Q_2													
							1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7		
12	18	24	30	36	42	48	2	1	14	26	38	50	62	74	86	10	22	34	46	58	70	82
								2	28	52	76					20	44	68				
24	36	48	60	72	84		4	1/2	14	26	38	50	62	74	86	10	22	34	46	58	70	82
								1	28	56	76	100	124			20	44	68	92	116		
								3/2	42	78	114					30	66	102				
								2	56	104						40	88					
36	54	72	90	108			6	1	42	78	114	150				30	66	102	138			
								2	84	156						60	132					
48	72	96	120	144			8	1/2	28	52	76	100	124	148		20	44	68	92	116	140	
								1	56	104	152	200				40	88	136	184			
								3/2	84	156	204					60	132	204				
								2	112	208						80	176					
60	90	120	150				10	1	70	130	190					50	110	170				
								2	140	260						100	220					
72	108	144	180				12	1/2	42	78	114	150	186			30	66	102	138	174		
								1	84	156	228					60	132	240				
								3/2	126	234						90	198					
								2	168							120	264					
84	126	168					14	1	98	182	266					70	154	238				
								2	196							140						
96	144	192					16	1/2	56	104	152	200				40	88	136	184			
								1	112	208	304					80	176	272				
								2/3	168	312						120	264					
								2	224							160						
108	162	216					18	1	126	232						90	198	306				
								2	252							180						
120	180	240					20	1/2	70	130	190	250				50	110	170	230			
								1	140	260	380					100	220	340				
								3/2	210							150	330					
								2	280							200						

谐波和49次以下齿谐波来具体确定 Q_2 的实用值,其方法与表1相似。由于 $\frac{j}{l}=1$ 情况下, $\xi=Q_2=2pv$,最小磁阻路径数 ξ 最多,反应式附加转矩较明显。而在 $\frac{l}{j} \neq 1$ 情况下, ξ 比 Q_2 和 $2pv$ 都小,转矩减弱很多,以致在转子槽口不大时,问题未必严重。表2中,在相应的 Q_2 值上方加注“-”号,以资区别。

(三) 减速式同步附加转矩与槽配合的关系

除了开槽的转子与定子 p 次谐波磁场等速同步旋转时产生上述反应转矩外,如果再考虑定子槽口的作用,那么在一定的槽配合 Q_1/Q_2 下,还有可能再产生一种“减速式”反应转矩。其物理机制与减速式的同步电动机及步进电动机相似。现举 $2p=2$ 、 $Q_1/Q_2=12/14$ 的实例来分析。此时,每个极分配到的定子槽数 $Q_1/2p=12/2=6$ 和转子槽数 $Q_2/2p=14/2=7$ 都是整数,并且互质,后者比前者多1。由图3a很容易看出,当转子上第1齿对准定子上第1齿时,在圆周上相差一个极距处转子上第8齿对准定子上第7齿,而定、转子上的其他齿之间则没有对准的关系,并且距离这两对齿愈远,定、转子齿错开愈甚。如果定子基波旋转磁场轴线 $N-S$ 在某个瞬时正好转到定子上的第1—7齿处时,按照转子必定要趋于磁场磁阻最小位置的规律,转子上1—8齿对准了定子上1—7这对齿。那么,按同样规律,当定子磁场轴线 $N-S$ 转到定子上的第2'—8'齿处时,转子第2'—9'齿又必定就近对准到定子上2—8这对齿下,以再次形成磁阻最小的状态。于是,尽管定子基波磁场转过了一个定子齿距角 $360^\circ/Q_1=360^\circ/12=30^\circ$,但转子只转过定、转子齿距角之差,即

$$\frac{360^\circ}{Q_1} - \frac{360^\circ}{Q_2} = \frac{360^\circ}{12} - \frac{360^\circ}{14} = 30^\circ - 25\frac{5}{7}^\circ = 4\frac{2}{7}^\circ$$

以后的时刻情况也都一样。定子旋转磁场的角位移与转子的角位移之间,总是保持 $30^\circ - 4\frac{2}{7}^\circ$,即 $\frac{360^\circ}{Q_1} : \left(\frac{360^\circ}{Q_1} - \frac{360^\circ}{Q_2} \right) = Q_2 : (Q_2 - Q_1)$ 的比例关系。于是转子便相对于基波磁场作减速运动,减速倍数即为 $Q_2/(Q_2 - Q_1)$ 。这时产生的反应转矩即称作“减速式”的。

按同样原理分析图3b中 $Q_1/2p$ 和 $Q_2/2p$,也都是互质的整数,但后者比前者少1的情况,可以看出 $Q_2 < Q_1$ 时,转子转向是与磁场转向相反的。

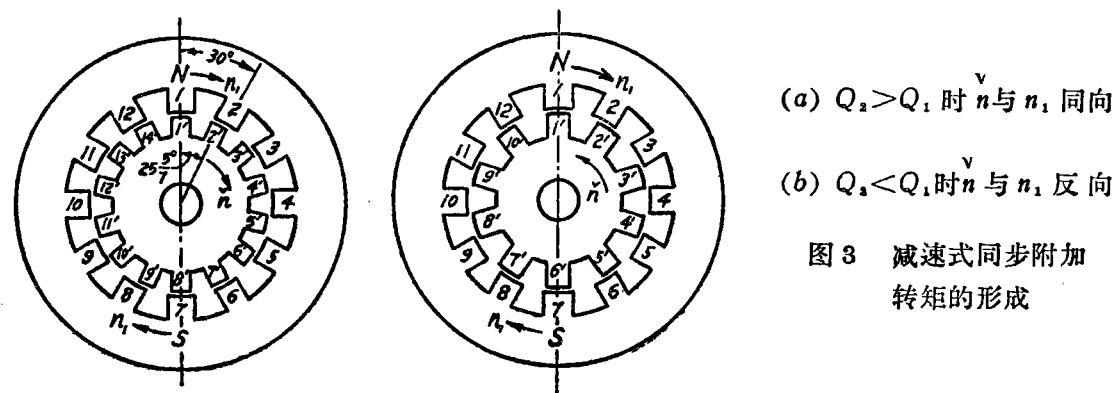


图3 减速式同步附加转矩的形成

在三相整数槽绕组情况下, $Q_1/2p=3q$ 总是整数。不难断定, 只要 $Q_2/2p$ 与 $Q_1/2p$ 相差一不大的整数 ε ($\ll Q_1/2p$) = 1、2、3、..., 那就都会产生上述现象。因此, 对于基波磁坊来说, 可能形成减速式反应转矩的槽数关系式及其出现的转速为

$$\begin{cases} Q_2 = Q_1 \pm 2p\varepsilon \\ \frac{\nu}{n} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} n_1 = \pm \frac{2p\varepsilon}{Q_2} n_1 \end{cases} \quad (13)$$

二式应同时取 + 号或 - 号, ν 取 - 号时表示与 n_1 反方向。

同理可推知, 对于极数为 $2p\nu=10p$ 、转速为 $n_\nu = -\frac{n_1}{5}$ 的 $\nu=5$ 次谐波磁坊, 当 Q_1 值满足 $\frac{Q_1}{2p\nu} = \frac{3q}{5} = \text{整数}$ 这一要求 (即 $q=5、10、\dots$) 时, 能够形成减速式反应转矩的条件式是

$$\begin{cases} Q_2 = Q_1 \pm 2p\nu\varepsilon = Q_1 \pm 10p\varepsilon \\ \frac{\nu}{n} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} n_\nu = \pm \frac{10p\varepsilon}{Q_2} \left(-\frac{n_1}{5}\right) = \pm \frac{2p\varepsilon}{Q_2} n_1 \end{cases} \quad (14)$$

而对于极数为 $2p\nu=14p$ 、转速为 $n_\nu = \frac{n_1}{7}$ 的 $\nu=7$ 次谐波磁坊, 当 Q_1 值满足 $\frac{Q_1}{2p\nu} = \frac{3q}{7} = \text{整数}$ 这一要求 (即 $q=7、14、\dots$) 时, 能够形成减速式反应转矩的条件式是

$$\begin{cases} Q_2 = Q_1 \pm 2p\nu\varepsilon = Q_1 \pm 14p\varepsilon \\ \frac{\nu}{n} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} n_\nu = \pm \frac{14p\varepsilon}{Q_2} \cdot \frac{n_1}{7} = \pm \frac{2p\varepsilon}{Q_2} n_1 \end{cases} \quad (15)$$

对于其他更高次 ($\nu \geq 11$) 谐波磁坊, 若要形成这种转矩, 仅当 $q \geq 11$ 才有可能, 因而在一般 $q < 8$ 的电机产品上已不必考虑了。

按 (13)、(14)、(15) 式算出的, 可能在 $n > 0$ 和 $n < 0$ 时出现减速式附加转矩的转子槽数分别列在表 3 中 + ν 栏和 - ν 栏下 (Q_2 上方打“-”号者对应于减速式转矩较弱的 $\varepsilon \geq 2$ 情况)。

附带指出, 当转子转速 $n \approx n_\nu$ 时, 减速式转矩表现为作用在定、转子齿上的交变切向磁拉力。在 $q \leq 3$ 情况下, (如表 3 中打“*”号的 Q_1/Q_2 值) 由于每极齿数很少, 磁坊更集中, 这种力便尤为强大, 致使电机在 $n \approx n_\nu$ 时出现剧烈的振动。有的异步电机 (如附录中例 3) 在测量起动转矩时, 磅秤或弹簧秤作大幅度抖动, 以致无法读数, 往往就是由于电机中不论是在 $n > 0$ 或 $n < 0$ 时起作用的减速式附加转矩都会在起动初始产生切向振动力之故。

图 4 中示有一台在 $n = n_1/4$ 时, 出现减速式转矩的电机 ($2p=2$, $Q_1/Q_2=6/8$) 于 $n=0$ 状态下转子所受切向磁拉力方向交变的情况。当基波磁坊 $N-S$ 转到定子 2-5 齿处时, 转子 2'-6' 齿受正切向力; 而当 $N-S$ 转到定子 3-6 齿处时, 转子 4'-8' 齿受反切向力。

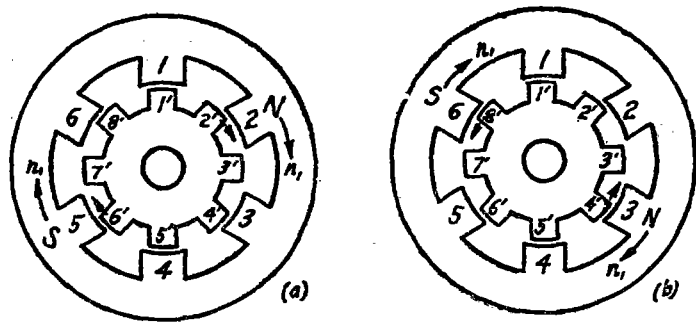


图4 $n=0$ 时的交变切向磁拉力引起振动

(四)、定、转子槽配合禁忌值汇总表及其使用要点

表1、2、3对于已制成的异步机产品发现有 M_{min} 后,要按其 Q_1/Q_2 来查究附加转矩的性质、推测其出现转速和有关的谐波磁场次数,都是很有用的。但对于电机设计工作来说,尚嫌不便。为此,把不同 $2p$ 和 Q_1 下由三个表查出的 Q_2 汇总在一起,再考虑到防止出现异步附加转矩所要求的(5)式后,只取实用范围 $(0.6\sim 1.5)Q_1$ 以内的 Q_2 值按大小顺序排列,最后得出表4。表中 Q_2 划分成 $n \geq 0$ 和 $n < 0$ 两大类, $n \geq 0$ 类供一般电机查用;对须作制动运行的电机还要用到 $n < 0$ 类。各 Q_2 值右下角所注符号 0 、 α 、 β 、 γ 等,表示该值引自表1、2、3中的哪一栏,因而也就表示了对应的同步附加转矩性质。 Q_2 值上方打有“^”号并右附小字码者,仍表示同步转矩系由小字码所示次数的定子相带谐波磁场产生,因而只要按(4)式要求选取 β 后,该 Q_2 值仍属可用。 Q_2 值上方标有“-”号者,表示对应的谐波磁场作用较弱,在转子斜槽或转子槽口较小的情况下即使采用了,问题也未必严重。 Q_2 值右上方打“*”号者表示起动初始可能有切向交变磁拉力引起的振动。

由于一般小型异步机定转子槽口都较狭,在三种同步附加转矩中,激磁式是主要的。因此,对表中下角为“0”和“ α ”的 Q_2 值应着重注意避开。中型以上异步机定子采用开口槽后,减速式附加转矩会增大。这时,对下角为“r”的 Q_2 值也应予以足够重视。反之,某些微型或特殊电机的转子采用具有饱和磁桥的闭口槽后,反应式和减速式附加转矩还会进一步削弱。以致对下角为“ β ”和“r”的 Q_2 值基本上可不予考虑。此外,由表4中可看出,在某些槽配合下可能有两种、甚至三种同步附加转矩同时出现(如 $2p=2$ 时的 $Q_1/Q_2=18/20_{\alpha\gamma}$ 和 $24/26_{\beta\gamma}$ 等)这类槽配合尤应忌用。

本文分析结论与[文2]中对同步附加转矩所作的大量实验结果是很好吻合的。

【附录】JO₂电机中某些槽配合不当的实例分析

例1 某厂JO₂-41-4电机产品采用 $3Q_1/Q_2=36/28$,试验中发现在 $n=n_1/7=213$ 转/分时有明显的 M_{min} 妨碍起动。但在#6、#7的4极电机中也有采用 $Q_1/Q_2=36/28$ 的,却少见起动不顺利的情况。

由表4中 $n > 0$ 栏下,查出此槽配合对应于 $2p=4$ 、 $Q_1=36(q=3)$ 一行里的 $Q_2=28_{\alpha\beta}$ 。

表4 为防止出现较大附加同步转矩的定、转子槽配合禁忌值汇总表

2p	q	Q ₁	Q ₂	
			ν $n \geq 0$	ν $n < 0$
2	2	12	$\widehat{8}_{\alpha}, \widehat{9}_{\beta}, \widehat{10}_{\gamma}, \widehat{12}_{\alpha}, \widehat{13}_{\beta}, \widehat{14}_{\gamma}, \widehat{18}_{\alpha}$	$\widehat{8}_{\alpha}, \widehat{10}_{\beta}, \widehat{11}_{\gamma}, \widehat{16}_{\alpha}$
	3	18	$\widehat{12}_{\alpha}, \widehat{14}_{\beta}, \widehat{18}_{\alpha}, \widehat{20}_{\beta}, \widehat{22}_{\gamma}, \widehat{26}_{\alpha}$	$\widehat{14}_{\beta}, \widehat{16}_{\gamma}, \widehat{17}_{\alpha}, \widehat{22}_{\beta}$
	4	24	$\widehat{14}_{\alpha}, \widehat{16}_{\beta}, \widehat{18}_{\gamma}, \widehat{20}_{\alpha}, \widehat{24}_{\beta}, \widehat{26}_{\gamma}$	$\widehat{22}_{\alpha}, \widehat{34}_{\beta}$
	5	30	$\widehat{20}_{\alpha}, \widehat{26}_{\beta}, \widehat{30}_{\gamma}, \widehat{32}_{\alpha}, \widehat{38}_{\beta}$	$\widehat{22}_{\beta}, \widehat{26}_{\gamma}, \widehat{28}_{\alpha}, \widehat{34}_{\beta}, \widehat{40}_{\gamma}$
	6	36	$\widehat{26}_{\beta}, \widehat{36}_{\alpha}, \widehat{38}_{\beta}, \widehat{38}_{\gamma}$	$\widehat{34}_{\alpha}, \widehat{34}_{\beta}$
	7	42	$\widehat{26}_{\beta}, \widehat{38}_{\gamma}, \widehat{42}_{\alpha}, \widehat{44}_{\beta}, \widehat{46}_{\gamma}, \widehat{56}_{\alpha}$	$\widehat{28}_{\beta}, \widehat{34}_{\gamma}, \widehat{38}_{\alpha}, \widehat{40}_{\beta}$
	8	48	$\widehat{38}_{\beta}, \widehat{48}_{\alpha}, \widehat{50}_{\gamma}$	$\widehat{34}_{\beta}, \widehat{46}_{\gamma}$
	2	24	$\widehat{16}_{\alpha}, \widehat{18}_{\beta}, \widehat{20}_{\gamma}, \widehat{24}_{\alpha}, \widehat{28}_{\beta}, \widehat{36}_{\gamma}$	$\widehat{16}_{\alpha}, \widehat{20}_{\beta}, \widehat{22}_{\gamma}, \widehat{32}_{\alpha}$
4	3	36	$\widehat{24}_{\alpha}, \widehat{28}_{\beta}, \widehat{36}_{\alpha}, \widehat{40}_{\beta}, \widehat{44}_{\gamma}, \widehat{52}_{\alpha}$	$\widehat{28}_{\beta}, \widehat{32}_{\gamma}, \widehat{44}_{\alpha}$
	4	48	$\widehat{36}_{\alpha}, \widehat{40}_{\beta}, \widehat{48}_{\gamma}, \widehat{52}_{\alpha}, \widehat{76}_{\beta}$	$\widehat{32}_{\alpha}, \widehat{44}_{\beta}$
	5	60	$\widehat{40}_{\alpha}, \widehat{52}_{\beta}, \widehat{60}_{\gamma}, \widehat{64}_{\alpha}, \widehat{68}_{\beta}, \widehat{76}_{\gamma}$	$\widehat{44}_{\beta}, \widehat{52}_{\gamma}, \widehat{56}_{\alpha}, \widehat{80}_{\beta}$
	6	72	$\widehat{52}_{\beta}, \widehat{72}_{\alpha}, \widehat{76}_{\gamma}$	$\widehat{44}_{\beta}, \widehat{68}_{\gamma}$
	7	84	$\widehat{76}_{\beta}, \widehat{84}_{\gamma}, \widehat{88}_{\alpha}, \widehat{92}_{\beta}, \widehat{112}_{\gamma}$	$\widehat{56}_{\gamma}, \widehat{76}_{\alpha}, \widehat{80}_{\beta}$
	2	36	$\widehat{24}_{\alpha}, \widehat{30}_{\beta}, \widehat{36}_{\gamma}, \widehat{42}_{\alpha}, \widehat{54}_{\beta}$	$\widehat{24}_{\alpha}, \widehat{30}_{\beta}, \widehat{48}_{\gamma}$
	3	54	$\widehat{36}_{\alpha}, \widehat{42}_{\beta}, \widehat{54}_{\gamma}, \widehat{60}_{\alpha}, \widehat{66}_{\beta}, \widehat{78}_{\gamma}$	$\widehat{42}_{\beta}, \widehat{48}_{\gamma}, \widehat{66}_{\alpha}$
6	4	72	$\widehat{42}_{\alpha}, \widehat{54}_{\beta}, \widehat{60}_{\gamma}, \widehat{78}_{\alpha}$	$\widehat{48}_{\beta}, \widehat{66}_{\gamma}$
	5	90	$\widehat{60}_{\alpha}, \widehat{78}_{\beta}, \widehat{90}_{\gamma}, \widehat{96}_{\alpha}, \widehat{102}_{\beta}$	$\widehat{66}_{\beta}, \widehat{78}_{\gamma}, \widehat{84}_{\alpha}, \widehat{120}_{\beta}$
	6	108	$\widehat{78}_{\beta}, \widehat{108}_{\alpha}, \widehat{114}_{\gamma}$	$\widehat{66}_{\beta}, \widehat{102}_{\gamma}$
	2	48	$\widehat{32}_{\alpha}, \widehat{36}_{\beta}, \widehat{40}_{\gamma}, \widehat{48}_{\alpha}, \widehat{56}_{\beta}, \widehat{72}_{\gamma}$	$\widehat{40}_{\beta}, \widehat{44}_{\gamma}, \widehat{64}_{\alpha}$
8	3	72	$\widehat{48}_{\alpha}, \widehat{56}_{\beta}, \widehat{72}_{\gamma}, \widehat{80}_{\alpha}, \widehat{88}_{\beta}, \widehat{104}_{\gamma}$	$\widehat{56}_{\beta}, \widehat{64}_{\gamma}, \widehat{88}_{\alpha}$
	4	96	$\widehat{72}_{\alpha}, \widehat{80}_{\beta}, \widehat{96}_{\gamma}, \widehat{104}_{\alpha}$	$\widehat{64}_{\beta}, \widehat{88}_{\gamma}$
	5	120	$\widehat{80}_{\alpha}, \widehat{104}_{\beta}, \widehat{120}_{\gamma}, \widehat{128}_{\alpha}, \widehat{136}_{\beta}$	$\widehat{88}_{\beta}, \widehat{104}_{\gamma}, \widehat{112}_{\alpha}, \widehat{160}_{\beta}$
	6	144	$\widehat{104}_{\beta}, \widehat{144}_{\alpha}, \widehat{152}_{\gamma}$	$\widehat{88}_{\beta}, \widehat{136}_{\gamma}$

续上表

2p	q	Q ₁	Q ₂	
			$\nu \geq 0$	$\nu < 0$
10	2	60	$\widehat{40}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{50}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{60}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{70}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{90}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{50}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{80}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	3	90	$\widehat{30}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{70}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{90}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{100}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{110}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{130}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{70}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{80}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{110}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	4	120	$\widehat{70}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{90}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{100}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{120}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{130}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{80}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{110}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	5	150	$\widehat{100}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{130}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{150}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{160}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{170}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{130}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{140}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{170}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{200}^{\alpha\beta\gamma}_0$
12	2	72	$\widehat{48}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{54}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{60}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{72}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{84}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{108}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{48}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{60}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{66}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	3	108	$\widehat{72}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{84}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{108}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{120}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{132}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{84}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{96}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{132}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	4	144	$\widehat{108}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{120}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{144}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{156}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{96}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{132}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	5	180	$\widehat{120}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{156}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{180}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{192}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{204}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{156}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{168}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{240}^{\alpha\beta\gamma}_0$
14	2	84	$\widehat{56}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{63}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{70}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{84}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{98}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{126}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{56}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{70}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{112}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	3	126	$\widehat{70}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{84}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{98}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{126}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{140}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{154}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{70}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{98}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{112}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{154}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	4	168	$\widehat{98}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{126}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{140}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{168}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{182}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{112}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{154}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	5	210	$\widehat{140}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{168}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{182}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{210}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{238}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{154}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{210}^{\alpha\beta\gamma}_0$
16	2	96	$\widehat{64}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{72}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{80}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{96}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{112}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{144}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{64}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{80}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{128}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	3	144	$\widehat{96}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{112}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{144}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{160}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{176}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{112}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{128}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{176}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	4	192	$\widehat{112}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{160}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{192}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{208}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{128}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{176}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	5	240	$\widehat{160}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{192}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{208}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{240}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{272}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{176}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{240}^{\alpha\beta\gamma}_0$
18	2	108	$\widehat{72}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{81}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{108}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{126}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{162}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{72}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{90}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{144}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	3	162	$\widehat{108}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{126}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{162}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{180}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{198}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{232}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{126}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{144}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{198}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	4	216	$\widehat{126}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{180}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{216}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{232}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{234}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{144}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{198}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{306}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	5	270	$\widehat{180}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{216}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{232}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{234}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{270}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{306}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{198}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{306}^{\alpha\beta\gamma}_0$
20	2	120	$\widehat{80}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{90}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{120}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{140}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{180}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{80}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{100}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{160}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	3	180	$\widehat{120}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{140}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{180}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{200}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{220}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{260}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{140}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{160}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{220}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	4	240	$\widehat{140}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{180}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{200}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{240}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{260}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{160}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{220}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{340}^{\alpha\beta\gamma}_0$
	5	300	$\widehat{200}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{240}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{260}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{300}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{340}^{\alpha\beta\gamma}_0$	$\widehat{220}^{\alpha\beta\gamma}_0, \widehat{340}^{\alpha\beta\gamma}_0$

再由表 1 中 $+\alpha$ 栏和表 2 + β 栏下查知, 这时定子 13 次相带谐波与转子一阶齿谐波相互作用,

在 ν 处产生激磁式转矩, 同时定子 7 次相带谐波与 28 个转子齿作用, 又形成反应式转矩。

但因转子槽口不宽, 反应转矩较小。若认为必须采用这个槽配合, 就应当着重于采用 $\beta_y \approx \frac{12}{13}$

或 $\frac{10}{13}$ 以抑制定子13次相带谐波。但 JO_2-41-4 电机定子绕组是单层的,电磁上属于整距

($\beta_y=1$),13次和7次谐波都得不到削弱,以致 M_{min} 必然出现。至于*6、*7的4极电机,定子绕组为双层,可采用 $\beta_y=\frac{7}{9}$ ($\approx\frac{10}{13}$),使 $K_{y13}\approx 0.18(\ll 1)$,从而大大削弱13次谐波及其附加转矩(7次谐波也有所削弱),所以这一槽配合未引起严重后果。但若采用 $\beta_y=\frac{8}{9}$, $K_{y13}\approx 0.7$,13次谐波削弱不多,仍可能出现问题。

例2 某厂 JO_2-52-2 电机产品采用 $Q_1/Q_2=24/20$,在 $n=n_1/10=300$ 转/分时产生明显的 M_{min} ,电源电压稍低,即难以起动。改用 $Q_1/Q_2=24/22$ 后,问题即得解决。

由表4中 $n\geq 0$ 栏查到这个槽配合对应于 $2p=2$ 、 $Q_1=24(q=4)$ 一行里的 $Q_2=20$ 。再由表1中 $+\alpha$ 栏查知,是定子19次相带谐波与转子一阶齿谐波相互作用,在 $n=n_1/10$ 处产生激磁式同步转矩。 JO_2-52-2 电机定子绕组因是单层,19次谐波无法通过短距削弱,因而造成严重问题。改用 $Q_1/Q_2=24/22$ 后,查表4可断定在 $n\geq 0$ 时不致出问题。但在表4中 $n<0$ 栏下查到 $Q_2=22$,再由表1中 $-\alpha$ 栏、表2中 $-\beta$ 栏和表3中 $-r$ 栏查知,在此槽配合下,当 $n=-n_1/5$ 时,由11次相带谐波会引起激磁式、反应式转矩,由基波会引起减速式转矩。因此,采用槽配合24/22的电机不宜作制动运行。

例3 JO_2-61-4 电机采用 $Q_1/Q_2=36/22$,起动之初振动严重,以致用磅秤测起动转矩时,难于读数。

由表4中 n 栏查到此槽配合对应于 $2p=4$ 、 $Q_1=36(q=3)$ 一行里的 $Q_2=32$ 。再查表1中 $-\alpha$ 栏和表3中 $-r$ 栏可知,在 $n=-n_1/8$ 时,17次定子齿谐波引起激磁式转矩,基波引起减速式转矩。故此电机不宜作制动运行,并且由于 q 不大,在接近于 $-n_1/8$ 的 $n\approx 0$ 状态下,减速式转矩便表现为较强的切向振动力。

例4 JO_2-91-8 电机采用 $Q_1/Q_2=72/56$ 和 $\beta_y=8/9$,有时出现 M_{min} 过低现象。改为 $Q_1/Q_2=72/66$ 后,问题得到解决。

由表4中 $n\geq 0$ 栏查到槽配合72/56对应于 $2p=8$ 、 $Q_1=72(q=3)$ 一行里的 $Q_2=56$ 。再由表1中 $+\alpha$ 栏和表2中 $+\beta$ 中栏可知,在 $n=n_1/7$ 时,定子13次相带谐波引起激磁式转矩,7次相带谐波引起反应式转矩。而 $\beta_y=8/9$ 时, $K_{y7}\approx 0.3$, $K_{y13}\approx 0.7$,故13次谐波作用仍较强,使 M_{min} 可能过低。(若取 $\beta_y=7/9$,虽可使13次谐波大为削弱,但基波也损失较多。)改用 $Q_1/Q_2=72/66$ 后,按表4核查可知,在 $n\geq 0$ 和 $n<0$ 情况下都不会有 M_{min} 出现。

例5 JO_2-51-4 电机采用 $Q_1/Q_2=36/26$,有时出现起动不顺利现象,改用 $Q_1/Q_2=36/32$ 后,情况好转,只是起动之初有振动。

由表4中 $n\geq 0$ 栏查到 $2p=4$ 、 $Q_1=36(q=3)$ 一行里的 $Q_2=26$ 。再查表2中 $+\beta$ 栏可

知, 当 $n=n_1/13$ 时, 13 次相带谐波与 26 个转子齿形成反应转矩。而 JO_2-51-4 定子绕组是单层的, 无法用短距来削弱谐波。因此若转子斜槽不当, 反应转矩有可能造成危害。改用 $Q_1/Q_2=36/32$ 后出现的振动, 其原因见例 3。

以上诸实例启示我们: 在采用单层绕组的电机中, 应充分注意相带谐波引起的附加转矩后果, 槽配合的选择不得不严格些。而在采用双层绕组的电机中, 只要巧妙地运用短距手段, 对于附表内那些右上角用小字码标出了起危害作用的相带谐波次数的 Q_2 值, 也可有条件地加以使用。

参 考 文 献

【文1】 M. П. Косыченко “电机学 (特殊部分)” 第三册, 434页, (高教出版社)。

【文2】 Bedrich Heller, Vaclav Hamata, “Harmonic Field Effects in Induction Machines”, pp.160~166, (Elsevier Holland), 1977。