

# 少槽近槽配合在中型高压异步电动机中的应用分析

南京汽轮机厂 王济松

**摘要** 此文介绍了新系列中型高压异步电动机应用少槽、近槽配合后的情况，并对由槽配合引起的低阶次径向力波产生的电磁噪声作了理论分析和计算，从而找出解决大电磁噪声的办法，为提高新系列中型高压异步电机的性能进行了探索。

**关键词** 中型高压异步电动机 槽配合 电磁噪声

## 一、样机试制情况

我厂在新系列的中型高压电机上试制了一个规格，型号 YL450-8、功率 355kW、电压 6000V、8极、槽配合 72/68、铁心外径 = 740mm、铁心长度 = 490 + 7 × 10 (风道) = 560mm，本电机为箱式结构，直槽铜条鼠笼式转子。

试制后经型式试验证实：采用少槽近槽配合后定子铁耗、转子铜耗及定子绕组温升均比设计值低，其对比值见表 1。

表 1

	定子铁耗 (W)	转子铜耗 (W)	定子绕组温升 (K)
设计值	7246	3258	64
试验值	5270	2978	52

电机效率提高到 94.1% (附加损耗仍按 0.005 计算，因电机温升较低，风扇直径还可减小，进一步提高其效率)，使电机效率达到了国外同类产品较先进的水平。电机轴承处振动不大，所测 6 点的振动速度在 0.7~1.2mm/s 之间。本电机试制后性能很好，唯一的问题就是电磁噪声大。

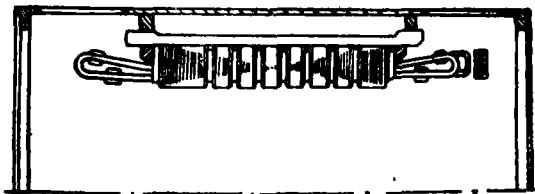


图 1 定子结构图

因本电机定子采用外压装结构(见图1)，铁心外圆焊有10根40×40方钢拉筋与铁心压

圈焊成一体，每根筋与铁心段交错焊(见图2)，焊缝高度原设计为10，但实际上只焊了

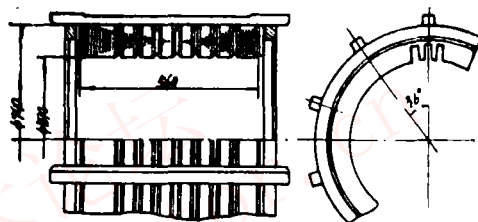


图 2 外压装定子铁心图

1mm，焊缝刚度很差，相当于筋与铁心是分开的，定子铁心在径向力波作用产生了较大的变形和电磁噪声，空载额定电压下实测声压级为 95dB (平均值)。满载时电机四周实测声压级分别为 112、110、105、106dB，即负载下产生了较强的电磁噪声。

## 二、样机电磁噪声大的原因

异步电机电磁噪声主要是定子铁心轭部的径向振动引起的，由于电机气隙中存在各次谐波磁场，它们除产生切向力矩外，还会相互作用产生径向力波作用在定子铁心上使轭部产生径向变形和振动，从而引起电磁噪声。为了分析定转子各次谐波相互作用可能出现的各种情况，可排出谐波谱表，以本电机  $2p = 8, Q_1/Q_2 = 72/68$  为例列出表 2。表中  $\nu$  的一直列表示定子谐波(包括主波  $\nu = p = 4$ ) 的次数，同一横排中各  $\mu$  次谐波都是由该排的  $\nu$  次定子谐波在转子中产生的，在分析噪声时一般不考虑  $K_2 = 0$  及  $> 2$  的情况，用 ( ) 及 [ ] 分别标出一、二阶齿谐波。由于定子谐波所产生的转子谐波磁场幅值一般很小，故在粗略估算时可以忽略，因此转子谐波次数往往只列出由定子 P 次基波产生的转子谐

表 2 定子和转子谐波谱表

转子谐波		$\mu = K_2 Q_2 + \nu = K_2 \times 68 + \nu$			
定子谐波		$K_2$			
$K_1$	$\nu$	-1	+1	-2	+2
0	4	(-64)	(72)	[-132]	[140]
-1	-20	-88	48	-156	116
1	28	-40	96	-108	164
-2	-44	-112	24	-180	92
2	52	-16	120	-84	188
-3	(-68)	-136	0	-204	68
3	(76)	8	144	-60	212
-4	-92	-160	24	-228	44
4	100	32	168	-36	236
-5	-116	-184	-48	-252	20
5	124	56	192	-12	260
-6	[-140]	-208	-72	-276	-4
6	[148]	80	216	12	284

注：1. 定子齿谐波  $\nu_1 = K_1 Q_1 + P = K_1 \times 72 + 4$   
 当  $K_1 = \pm 1$  为一次齿谐波，表中(-68)及(76)；  
 当  $K_1 = \pm 2$  为二次齿谐波，表中[-140]及[148]。  
 2. 转子齿谐波  $\mu_2 = K_2 Q_2 + P = K_2 \times 68 + 4$   
 当  $K_2 = \pm 1$  为一次齿谐波，表中(-64)及(72)；  
 当  $K_2 = \pm 2$  为二次齿谐波，表中[-132]及[140]。  
 3. 表中带( )的谐波为一阶齿谐波，带[ ]的谐波为二阶齿谐波。

波磁场。表3列出了相应于某定转子谐波所产生的低次力波次数和频率。从表3可见  $\mu = (-64)$  与  $\nu = (-68)$  分别产生4次力波； $\mu = (+72)$  与  $\nu = (-68)$  及(76)分别也产生4次力波。由于在齿谐波中，一次齿谐波的幅值最大，上表中产生4次力波的均为1次齿谐波，其中有二个力波为842Hz的，形成较大的径向力波。

电机的电磁噪声还与定子的固有频率有关，如与径向力波频率一致则产生共振效应，引起极大的电磁噪声。由于样机定子铁心外圆的拉筋与铁心未焊接好，此时可以不考虑机座对铁心振动和固有频率的影响，相当于铁心作单个圆环的振动，可按下式求得铁心单独振动时的固有频率<sup>[1]</sup>：

表 3 力波次数n/力波频率f

转子 $\mu$	(-64)	(72)	[-132]	[140]
定子 $\nu$				
4				
-20				
28				
-44				
52				
(-68)	4/842	4/942		
(76)		4/842		
-92				
100				
-116				
124				
[140]				0/1583
[148]				

注：1. 定转子一次齿谐波相互作用产生的力波频率如下：

1) (-68)与(-64)产生的力波频率为  

$$f = \left[ \frac{\mu_1 - \nu_1}{P} (1-S) \right] f_1 = \frac{Q_2}{P} (1-S) f_1$$

$$= \frac{68}{4} (1-0.009) 50 = 842 \text{ Hz}$$

2) (76)与(72)产生的力波频率为

$$f = \frac{68}{4} (1-0.009) 50 = 842 \text{ Hz}$$

3) (-68)与(72)异号产生的力波频率为

$$f = \left| 2 + \frac{Q_2}{P} (1-S) \right| f_1$$

$$= \left| 2 + \frac{68}{4} (1-0.009) \right| 50 = 942 \text{ Hz}$$

2. 与电机负载时分频后测得值：

频率：63.5、125、250、500、1000

噪声值：75、70、72、92.5、108.5

频率：2000、4000、8000、16000

噪声值：103、90、80.5、69.5

是一致的。

$$f_{1n1} = F_{n1} \frac{n(n^2-1)}{\sqrt{n_2+1}} \sqrt{\frac{g E_1 h_1^3 l_1}{24 \pi G_1 R_1^3}}$$

式中  $F_{n1}$ —系数，是铁心轭厚与平均半径之比的函数查曲线<sup>[2]</sup>， $F_{n1} = 0.965$

$n$ ——力波次数

$g$ ——重力加速度(9.8m/s<sup>2</sup>)

$E_1$ ——铁心弹性模量,

$$E_1 = 2.058 \times 10^{11}, \text{ N/m}^2$$

$h_1$ ——铁心轭厚度,  $h_1 = 0.042, \text{ m}$

$l_1$ ——铁心长度,  $l_1 = 0.49 + 0.06$  (二个压圈长)  $= 0.55, \text{ m}$

$G_1$ ——铁心(包括齿、轭、绕组、压圈)的总质量,  $G_1 = 204 + 322.2 + 172.8 + 34 = 733, \text{ kg}$

代入上式可得:

$$f_{1n1} = 0.965 \frac{4(4^2 - 1)}{\sqrt{4^2 + 1}} \times \sqrt{\frac{9.8 \times 2.058 \times 10^{11} \times 0.042^3 \times 0.55}{24\pi \times 733 \times 0.349^3}} = 831 \text{ Hz}$$

从上述计算值可见四次径向力波的频率与铁心的固有频率正好一致产生了共振效应,由此引起了很强的电磁噪声。

### 三、解决样机电磁噪声大的措施

电机的电磁噪声数值与气隙中径向电磁力大小、电机结构的振动响应以及电机表面的声幅射特性三者有关,因为降低电磁噪声的各种方法可以归结为:

1. 降低电磁激振力(径向力波)的幅值及提高激振力波次数;
2. 改善电机结构的振动响应特性;
3. 降低电机结构的振动响应特性。

因本样机定子铁心为开口槽(未用磁性槽楔),转子为直槽的铜条转子(未用斜槽),形成电磁激振力较大,又在激振力频率与铁心固有频率接近而产生的共振情况下必然产生很强的电磁噪声。以往各电机厂对于已产生较大电磁噪声的大中型异步电机(包括部分采用分数槽的中、大型绕线型异步电机),都感到很棘手,难于在已制成的电机上解决,我厂为了解决少槽近槽配合在高压电机上的试用问题,决心探索一下电磁噪声大的改进办法,先后在试制的样机上采取下列措施进行试验:

(上接第11页)

算精度满足设计要求,数据库内容较完整丰富,实现对CAD系统的支持。系统的完整性及先进性在国内具有领先地位,填补了国内中小型电机行业的一个空白,并与国外先进的电机制造公司同类产品CAD系统先进水平相当,在系统总体设计的某些功能及某些

(1) 先在电机内部敷设吸音材料,其效果甚微,未能解决电磁噪声大的问题;

(2) 又将电机拆开,将定子环氧玻璃布板槽楔换成磁性槽楔,减小开口槽产生的齿谐波幅值,从而降低电磁激振力波。经试验仅能将电机的空载电磁噪声降低5dB,仍未解决负载时电磁噪声大的问题。

(3) 最后决定将外压装的定子铁心从机座中压出,再将铁心外圆的10根拉筋两侧与每段铁心全部焊接,将拉筋与铁心焊成一个整体,使重新焊接以后的焊缝高度达6mm,则拉筋的重量折算到铁心的重量中去,来改变定子铁心的固有频率,此时的固有频率为:

$$f_{1n1} = F_{n1} \frac{n(n^2 - 1)}{\sqrt{n^2 + 1}} \sqrt{\frac{gE_1 h_1^3 l_1}{24\pi G_1 R_1^3}} = 0.965 \frac{4(4^2 - 1)}{\sqrt{4^2 + 1}} \times \sqrt{\frac{9.8 \times 2.058 \times 10^{11} \times 0.042^3 \times 0.55}{24\pi \times 845 \times 0.349^3}} = 773 \text{ Hz}$$

使定子铁心的固有频率避开主要力波频率,达到减小铁心轭部振动和电磁噪声的目的。另外因铁心拉筋外圆与机座中壁的内孔为过盈(0.2mm)配合,当拉筋与铁心焊牢后,就形成了机座对铁心振动的阻尼作用,从而减小了共振时定子铁心轭部的振动幅值,同时阻尼还减少了振动能量沿结构的传递,使电磁噪声进一步减小。最后样机经试验实测空载时电机噪声平均声压级降为87dB,而负载时电磁噪声大幅度下降16dB,达到了与老的远槽配合相接近的电磁噪声,取得了满意的效果。但其应用应根据具体情况分析后慎重对待。

#### 参考文献

- 1 Ю.В.ГАЙНЦЕВ.定、转子槽数对异步电动机特性的影响.中小型电机技术情报,1972(4)
- 2 陈永校、诸自强编.电机噪声的分析和控制.浙大出版社,1987年6月出版。

设计分析程序项目的先进合理性上优于国外同类产品CAD系统。系统已用于小型及中型异步电机部分系列产品设计,并推广到行业中十余家厂试用,普遍反映计算精度提高,解决了过去很多项目无法定量计算的问题,提高了产品设计质量,缩短新产品开发周期,取得很大的经济效益。