

## YX3 系列高效率三相异步电动机设计 及 IEC 高效率电机标准动态

上海电器科学研究所(集团)有限公司 电机分所 李秀英

据统计,电动机的用电量在全国的总用电量中占有相当大的比重,其用电量约占工业用电量的 66%,占全国总用电量的 50%左右。因此,提高电动机的效率、积极推广高效率电动机或节能电动机的应用,对国民经济建设、能源节约及环境保护等有积极的促进作用。

目前世界上许多国家(包括我国在内)对电动机系统的节能均给予了高度重视,美国、欧洲、加拿大、澳大利亚等国家和地区都制订了有关电动机的能效标准。1992 年美国能源部发布了新的能源法规,规定了高效率三相异步电动机的效率标准,并从 1997 年 10 月 24 日正式开始实施。加拿大也于 1992 年制订了相应的能源效率法令,并规定从 1999 年开始正式生效。欧洲电机和电子制造商协会(CEMEP)于 1999 年决定到 2003 年要削减 50%较低效率水平电动机的生产。并在 2006 年后不再生产较低效率水平电动机。CEMEP 并根据欧盟指示对电动机效率水平进行分级,将效率分为 EFF1、EFF2、EFF3 三个等级。目前欧洲的 SIEMENS、ABB 等公司已开发出效率为 eff1 等级的高效率电机,并已投放市场。

从国际和国内的发展趋势来看,开发中国高效率电机是非常必要的。2003 年 3 月,由上海电器科学研究所(集团)有限公司牵头组织的中小型电机行业第一个“以冷代热”基本系列——Y3 系列三相异步电动机(H63~355)通过了由机械工业联合会组织的专家鉴定,在此工作的基础上,为进一步推广“以冷代热”工作,开发出既能满足出口到欧洲的满足 EFF1 效率指标的高效电机,同时也能满足 GB18613-2002《中小型三相异步电动机能效限值及节能评价》中的电动机节能评价(等效于欧洲 eff1 能效标准)的中国高效率电机是电机行业的当务之急。为此,由上海电器科学研究所(集团)有限公司、中小型电机行业内有代表性且积极性高的河北电机股份有限公司、北京毕捷电机股份有限公司、山东华力电机集团股份有限公司、江门市江晟机电厂有限公司、广东江门电机股份有限公司、嘉兴华年电机有限公司、卧龙电机股份有限公司、江苏大中电机股份有限公司、江苏贝得电机股份有限公司、威灵清江电机股份有限公司、浙江金龙电机股份有限公司、西安西玛电机有限公司、闽东南亚南电机有限公司、德州恒力电机有限责任公司、浙江光陆振动器股份有限公司、山西电机制造有限公司、安徽六安江淮电机股份有限公司等共同组成了 YX3 系列高效率三相异步电动机联合设计工作组。

联合设计工作组于 2003 年 11 月在上海成立,经过讨论,工作组成员对如何开展此项工作达成了共识,讨论通过了《YX3 系列高效率三相异步电动机(机座号 80~355)技术任务

书》。明确了新系列总体目标 and 设计原则，并且根据本项目特点，提出主要在以下三个方面开展研究工作：

1. 导磁材料的选择（包括退火工艺的研究）；
2. 冲片三园的研究；
3. 通风技术的研究。

设计工作分二个阶段进行，第一阶段从2003年11月~2004年9月，主要进行关键技术研究，及H80~112机座号设计及样机试制。2004年3月30日在上海召开的80~112机座的设计审查及试制用技术条件的审查及样机试制安排，本阶段共试制17个规格中的12个规格56台样机。2004年9月在上海召开了第一阶段试制总结会，样机试制结果达到了设计要求。第二阶段从2004年9月~2005年9月，主要进行132~355机座号的设计及样机试制。2004年9月~10月进行了设计，2004年10月21日召开设计审查及试制安排会。第二阶段共试制了43个规格，124台样机。

## 一、技术研究工作

众所周知，三相异步电动机的主要损耗有定子铜耗、转子铝耗、铁耗、风摩耗和附加损耗五类，为了提高电动机的效率，就必须从降低这五大损耗上来采取措施。

电动机的效率（ $\eta$ ）和损耗的相对值（ $\Sigma p$ ）的关系如下：

$$\eta = \frac{1}{1 + \Sigma p} \quad (1)$$

式中  $\Sigma p = \frac{\Sigma p}{P_2}$ ， $\Sigma p$  为损耗， $P_2$  为输出功率。

从（1）式可知损耗与效率的关系，较大的损耗相对值对应了较低的效率，电机原有的损耗相对值不同时，降低同一比例的损耗时效率提高的幅度也是不同的。表1列出了本系列电机效率提高的幅度、损耗降低的比例及损耗分布情况与Y3系列的对比。为降低损耗，显然应着力于主要损耗分量的下降，从损耗分布比例来看，小电机特别是4、6P电机还是以铜耗和铝耗为主，提高效率的主要措施还是在降低铜耗和铁耗，降低电流密度和磁通密度，这样就势必是放大导线截面和增加铁心长度，多用材料，从后面的用料分析也可以看出，小电机材料增加的比例比较多。在大功率部分则应通过各种措施来降低风摩耗、铁耗和杂耗，而不能主要依靠通过材料增加来降低绕组损耗。如表1中所示，2P电机风摩耗所占比例由H80~112的12.64%上升到H132~315的27.41%，提高较多，故减少风摩耗对提高大机座号的2P电机的效率有显著效果，本系列电机风摩耗占总损耗的比例由Y3的27.41%降低到22.58%。

表1: 损耗分析

	$\Delta \eta$	YX3 总/KW	Y3 总/KW	损耗 下降	YX3 铜 /总	YX3 铝 /总	YX3 铁 /总	YX3 机 /总	Y3 铜/总	Y3 铝/总	Y3 铁/总	Y3 机/总
80~112-2P	4.47	16.99	23.3	27.2	44.51	23.72	17.62	10.45	43.76	23.33	17.50	12.64
80~112-4P	6.63	16.24	26.84	38.31	41.84	25.57	21.58	7.16	48.19	26.78	16.99	5.49
80~112-6P	6.62	21.78	33.77	34.76	51.05	24.85	16.81	4.40	54.67	26.33	13.76	3.18
平均	5.91	18.34	27.97	33.42	45.80	24.71	18.67	7.34	48.87	25.48	16.08	7.10
132~315-2P	1.46	6.92	8.96	21.11	27.11	19.16	22.53	22.58	27.48	17.73	20.47	27.41
132~315-4P	1.66	6.73	8.7	20.57	33.21	20.57	25.32	12.16	35.22	21.25	23.69	12.74
132~315-6P	1.73	8.59	10.9	19.06	40.07	20.43	24.41	7.74	41.28	21.17	23.59	7.88
平均	1.62	7.41	9.52	20.25	33.46	20.05	24.09	14.16	34.66	20.05	22.58	16.01

通过损耗分析, 为提高电机的效率, 主要采取的措施如下:

#### 1. 采用铁损较低的导磁材料, 降低铁耗。

铁心材料的磁性能(导磁率和单位铁损)对电动机的效率和其他性能影响较大, 同时, 铁心材料费用又是构成成本的主要部分, 因此选用合适的磁性材料是设计和制造电动机的关键。在Y3系列电机的研制工作中, 关于导磁材料的选择和磁负荷的确定已作了大量的研究工作, 在此工作的基础上, 本系列电机设计时又进一步进行了分析研究。

小功率电机中空载电流(主要是磁化电流)在满载电流中占了相当大的比例, 达70%左右, 因此在小功率电动机中采用较高导磁率的电工钢片有助于提高电机的效率; 但在大功率电动机中, 由于空载电流所占比例较小, 提高材料导磁率的效果不明显, 大功率电机中, 铁耗在总损耗中占到相当大的比重, 因此降低铁心材料的单位损耗值即选用  $P_{15/50}$  较低的材料将有助于电动机铁耗的下降。表2也分析了不同牌号硅钢片对铁耗及效率的影响。通过分析, 本系列选择冷轧硅钢片DW470为导磁材料, 即  $B_{50} \geq 1.67$  (T),  $P_{15/50} \leq 4.5$  W/kg, 图纸上标注为牌号1。

表 2: 不同硅钢片对效率的影响

规格	YX3 与 Y3	牌号 1	牌号 2	效率	牌号 1	牌号 2
	效率差值	效率	效率	差值	铁耗	铁耗
132S1-2	2.9	89.578	88.9	0.678	119.8	164
160M1-2	2.1	91.337	90.984	0.353	214.3	258.5
200L2-2	1.3	94.043	93.792	0.251	498.1	602.7
250M-2	1	94.433	94.2	0.233	707.4	850.5
280M-2	1.1	95.276	95.059	0.217	1054.3	1268.8
132M-4	3.1	90.79	90.114	0.676	148.95	208
160M-4	2.6	91.762	91.378	0.384	229.3	279.4
200L-4	1.8	93.546	93.188	0.358	546.4	666.9
250M-4	1.2	94.424	94.105	0.319	872.7	1067.3
280M-4	1.1	95.232	94.95	0.282	1287	1559.6
132S-6	3.9	86.206	85.376	0.83	81.1	113.8
160M-6	3	90.11	89.638	0.472	190.1	233.3
200L2-6	2	92.544	92.159	0.385	425.7	521.3
250M-6	1	93.4	93.026	0.374	671.8	827.28
280M-6	1	94.284	93.989	0.295	808.72	985.3

从表 2 可以看出, 当选用较好的导磁材料时, 可以降低铁耗, 由于不同极数电机铁耗在总损耗中所占比例不同, 故其影响也就不同。对于 H132 及以下电机, 由于 Y3 系列电机选用的是牌号 4 为导磁材料, 本系列选用牌号 1, 提高了几个等级, 因而效果更加明显, 对 2、4P 电机, 可以提高效率 0.6 个百分点, 对 6P 电机可以提高 0.8 个百分点; H160 及以上电机, Y3 选用的是牌号 2, 本系列提高 1 级, 同时由于 H160 以上电机损耗分布比例与小机座号电机还有些不一样, 故其对效率的贡献率也有所不同, 2、4、6P 电机分别平均可提高 0.25, 0.3, 0.4 左右。

## 2. 增加有效材料用量, 以降低铜耗和铁耗

根据电动机相似原理, 当电磁负荷不变, 且不考虑机械损耗时, 电动机的损耗与电动机线性尺寸的 3 次方成比例, 而电动机的输入功率约与线性尺寸的 4 次方成比例。

$$\eta = 1 - \frac{1}{a}(1 - \eta_0)$$

$a$  为电动机的尺寸比例系数,  $\eta_0$  为原始电动机的效率, 从该式可见, 损耗与有效材料尺寸的线性增长成反比。所以, 在效率较低时, 如小功率电动机中, 增加材料, 效率提高较大, 而在大功率电机中, 则效果不如小功率电机明显。为了在一定的安装尺寸条件下, 获得较大的空间, 以便能放置较多的有效材料来提高电动机的效率, 定子冲片外径尺寸就成为一个重要因素。我们知道在同样机座范围内, 美国电动机一般均采用较大外径的定子冲片, 而

欧洲电动机则出于考虑防爆电动机等结构派生的需要，以及减少绕组端部用铜量和生产成本，一般均采用较小外径的定子冲片。由于我们一直沿用的是欧洲体系，故冲片外径的选择上也是较小的。在本系列电机设计中，通过分析，工作组达成共识，对小机座号由其效率提高幅度较大，仅靠轴向尺寸的增加来提高效率是很困难的，为此，对 80、90、100 三个机座选择了放大冲片外径的方案。在考虑到凸缘结构允许的条件下，三个机座外径放大情况见表 3。

表 3：定子冲片外径和中心高的对应关系

中心高 H	80mm	90mm	100mm
外径 D1	130mm	138mm	165mm
H-D1/2	15mm	21mm	17.5mm

为降低绕组中的损耗和铁心损耗，需要适当降低电流密度和磁感应强度，因此相应放大了导线截面和增长了铁心长度，从而使有效材料用量增加。

表 4 列出了 H132~315 机座有效材料增加情况。

表 4：高效率电机比 Y3 系列有效材料增加

规格	功率 (kW)	效率增加 (%)	铜、铁、铝有效材料		
			铜增加	铁增加	铝增加
YX3-132S1-2	5.5	2.9	38.73%	28.07%	12.86%
YX3-132S-4	5.5	3.5	65.77%	39.99%	71.25%
YX3-132M2-6	5.5	3.4	36.00%	27.58%	42.41%
YX3-160M1-2	11	2.1	45.94%	22.80%	23.17%
YX3-160M-4	11	2.6	58.70%	26.98%	62.81%
YX3-160L-6	11	2.5	52.99%	24.21%	44.44%
YX3-200L-4	30	1.8	66.79%	29.73%	37.16%
YX3-200L1-6	18.5	1.5	50.20%	15.62%	25.97%
YX3-225M-2	45	1.2	15.36%	21.87%	11.82%
YX3-225S-4	37	1.6	34.74%	23.53%	19.95%
YX3-250M-2	55	1.0	6.02%	22.86%	15.20%
YX3-280M-2	90	1.2	17.68%	20.00%	13.62%
YX3-280S-4	75	1.1	20.64%	21.95%	21.01%
YX3-280S-6	45	1.0	36.06%	20.59%	31.43%
YX3-315L1-2	160	0.8	8.98%	4.84%	16.76%
YX3-315M-4	132	0.6	13.63%	7.94%	28.80%
YX3-315L2-4	200	0.5	7.12%	0.00%	23.16%
YX3-315L2-6	132	0.8	-1.20%	13.25%	38.12%
平均		1.66	20.46%	30.00%	20.14%

表 5: 材料增加分类统计

规格	效率增加	铜增加	铁增加	铝增加
H132~315-2P	1.46	20.58%	18.59%	15.37%
H132~315-4P	1.66	39.91%	21.34%	39.17%
H132~315-6P	1.85	29.49%	20.50%	34.89%
H80~112	5.86	51.48%	36.67%	46.30%
H132~315	1.66	20.46%	30.00%	20.14%
H80~315	2.76	21.06%	35.61%	24.47%

### 3. 改进风扇设计, 降低风摩耗

对于较大功率的 2、4 极电动机, 风摩耗占有相当大的比例, 如 90kW 2 极电机风摩耗可达总损耗的 30%左右。风摩耗主要是由风扇消耗的功率所构成。由于效率提高, 热负荷降低, 在不增高温升的前提下, 电机所需风量可以减少, 因此风扇尺寸可以缩小, 从而使通风损耗减少。风扇减少其对效率的贡献从计算上可以见表 6。

表 6: 风扇对效率的影响

规格	效率差值	小风扇效率	大风扇效率	效率差值
132S1-2	2.9	89.578	88.594	0.984
200L2-2	1.3	94.043	93.241	0.802
250M-2	1	94.433	93.824	0.609
132M-4	3.1	90.79	90.640	0.150
200L-4	1.8	93.546	93.393	0.153
250M-4	1.2	94.424	94.217	0.207
132S-6	3.9	86.206	85.647	0.559
132M1-6	4.1	87.438	86.997	0.441
200L2-6	2	92.544	92.159	0.385
250M-6	1	93.4	93.273	0.127

此外通风结构和风扇外型的合理设计, 对提高通风效率, 降低风摩耗、降低噪声也是很重要的。在本项目的研制过程中, 安排了改进风扇设计的对比试验, 试验数据见表 7。

表 7: 风扇对比试验

型号	编号	功率	效率	功率因数	温升	空载噪声	铁耗	机械耗
Y2-180M-2	标准	22	90.50	0.9000	80.0	89.0		
	设计		90.56	0.9110			459.8	600.0
	原风扇试验		88.82	0.8917	77.6	87.1	590.0	700.0
	改风扇 1 试验		89.63	0.9051	81.5	84.2	477.5	640.0
Y2-180M-4	标准	18.5	90.50	0.8500	80.0	76.0		
	设计		90.98	0.8568			398.3	149.9
	原风扇试验		89.91	0.8542	76.5	71.0	469.0	109.0
	改风扇 1 试验		89.45	0.8678	77.2	71.2	518.3	189.2
	改风扇 2 试验		90.06	0.8693	73.6	68.4	500.6	129.4
	无风扇					62.3	487.6	83.0
Y2-200L1-2	标准	30	91.20	0.9000	80.0	92.0		
	设计		91.50	0.9089			435.0	801.0
	原风扇试验		90.92	0.9082	73.4	89.4	470.0	810.0
	改风扇 1 试验		91.37	0.9070	67.8	87.3	528.0	628.5
	特制风扇		91.59	0.9081	67.1	87.2	540.0	510.0
	特制风扇		91.72	0.9086	61.5	85.9	526.0	480.0
	特制风扇		91.77	0.9130	66.4	84.4	525.0	460.0
Y2-225M-2	标准	45.00	92.30%	0.9000	80.0	92.0		
	设计		92.79%	0.9100			663.9	949.5
	原风扇试验		92.60%	0.8900	75.0	98.0	736.2	1023.7
	改风扇 1 试验		92.80%	0.8900	75.0		709.6	936.1
	改风扇 2 试验		93.30%	0.8900	75.0	90.0	734.7	698.8
	原风扇试验		92.5	0.9175	63.0	87.6	442.5	1461.0
	改风扇试验		93.56	0.8848	63.4	83.9	896.0	868.8
	铝风扇		93.64	0.8855	65.5	82.9	877.0	867.0
	铝风扇加工		93.66	0.8814	63.2	82.5	877.3	795.5

上述数据中, 改风扇 1 试验是不动风扇的外径、宽度, 仅在外形上有所改动, 从试验数据来看, 对电机温升影响不大, 但却提高了效率, 降低了噪声, 说明风扇设计更为合理。改风扇 2 为改变了风扇外径和宽度。在此对比试验的基础上, 设计了较为合理的风扇外形, 在 Y2-200L1-2 上进行试验, 结果为, 用原来的风扇, 效率为 90.92%, 温升 73.4K, 噪声 89.4dB, 改风扇外形不改外径、宽度的情况下, 效率 91.59%, 温升 67.1K, 噪声 87.2dB; 将外径减小 20mm, 效率 91.72%, 温升 61.5K, 噪声 85.9dB。所以, 合理的风扇设计不仅可以提高效率, 降低噪声, 同时, 对温升也是有利的。该风扇设计申请了国家实用新型专利, 专利申请号为: 200420110149.7。该成果不仅可以应用到 YX3 系列高效率三相异步电动机, 而且设计思路可以应用到 Y、Y2 等基本系列中。按此方案, 设计了本系列电机的风扇形状和尺寸, 经过样机试验表明, 达到了预期的效果。

#### 4. 冲剪退火工艺验证

冷轧硅钢片对冲剪应力比较敏感, 从理论上说, 冲剪以后进行退火处理, 可以消除应力, 恢复冷轧硅钢片的良好性能, 这一试验在 Y3 系列电机研制过程中已做过大量试验工作见表 8。但由于增加一道退火工艺, 给制造过程带来很多麻烦, 同时也增加了成本。所以, 方案的可行性一直未能得到采用。本系列设计时, 我们又探讨了用钢厂提供的半工艺片进行对比试验, 由武钢提供的半工艺片, 经测试, 冲剪退火后, 其性能可以达到 DW470 的水平, 见表 9。而由于其出厂时未经退火处理, 价格上就比较便宜, 由电机厂冲剪后退火处理, 其增加的成本就不多了, 如果工厂有退火设备, 该种材料不失为一种备选方案。我们用该材料在 Y2 系列电机上也做了一些对比试验, 试验结果见表 10。

表 8: 武钢冷轧硅钢片退火前后性能比较

磁性能	3mm		6mm		7.5mm		10mm		30mm	
	未退火	退火	未退火	退火	未退火	退火	未退火	退火	未退火	退火
P10	3.897	2.21	3.254	2.227	3.061	2.171	2.971	2.171	2.564	2.178
P15	7.585	4.972	6.753	4.98	6.386	4.912	6.211	4.888	5.704	4.881
B10	1.322	1.553	1.471	1.561	1.503	1.563	1.517	1.553	1.546	1.565
B25	1.595	1.632	1.626	1.637	1.634	1.639	1.635	1.639	1.661	1.642
B50	1.712	1.714	1.722	1.718	1.725	1.719	1.723	1.72	1.745	1.722

表 9: 武钢半工艺片退火前后性能比较

磁性能	3mm		6mm		30mm	
	未退火	退火	未退火	退火	未退火	退火
P10	5.856	1.901	5.33	1.876	5.043	1.759
P15	10.294	4.7	9.67	4.608	9.252	4.351
B10	1.055	1.476	1.165	1.487	1.223	1.495
B25	1.513	1.575	1.539	1.581	1.56	1.584
B50	1.692	1.666	1.692	1.67	1.696	1.673



表 10: 半工艺片样机试验数据

型号	备注	功率	效率	功率 因数	温升	定子 铜耗	转子 铝耗	铁耗	风摩擦	总损耗
Y2-80M2-2	标准	1.10	77.00	0.8400	80					
	未退火	设计	74.09	0.8524		153.5	73.0	121.0	29.9	384.6
		样机 1	76.89	0.8510	65	139.0	61.2	89.0	32.7	329.0
		样机 2	77.02	0.8530	68	138.2	61.3	80.6	40.9	328.2
		平均值	76.96	0.8520	66.5	138.6	61.3	84.8	36.8	328.6
		样机 1	杂散实测	75.27	0.8540	144.4	64.3	89.0	32.7	361.4
		样机 2	杂散实测	75.18	0.8560	144.3	64.8	80.6	40.9	363.2
		平均值		75.23	0.8550	144.4	64.5	84.8	36.8	362.3
	退火	设计	79.38	0.8780		126.0	63.4	59.1	29.9	285.6
		样机 1	79.92	0.8510	65	128.9	60.6	57.8	22.2	276.3
		样机 2	80.48	0.8470	55	127.9	57.0	58.5	16.5	266.7
		平均值	80.20	0.8490	60.0	128.4	58.8	58.2	19.4	271.5
		样机 1	杂散实测	78.25	0.8540	133.5	63.4	57.8	22.2	305.7
		样机 2	杂散实测	79.38	0.8490	130.8	58.8	58.5	16.5	293.3
Y2-80M2-4	标准	0.75	73.00	0.7700	80					
	未退火	设计	69.06	0.7678		154.6	74.4	90.0	12.0	336.1
		样机 1	69.98	0.7220	83	171.9	56.7	73.8	14.0	321.7
		样机 2	71.02	0.7590	77	150.5	60.3	77.8	12.2	306.1
		平均值	70.50	0.7405	80.0	161.2	58.5	75.8	13.1	313.9
		样机 1	杂散实测	69.68	0.7240	172.8	57.3	73.8	14.0	326.4
		样机 2	杂散实测	70.37	0.7610	152.5	61.6	77.8	12.2	315.8
	退火	设计	74.36	0.7742		131.1	63.9	46.5	12.0	258.6
		退火	73.41	0.7550	61	143.1	57.0	57.0	9.3	271.5
		退火	杂散实测	73.25	0.7550	143.7	57.3	57.0	9.3	273.8

型号	备注	功率	效率	功率 因数	温升	定子 铜耗	转子 铝耗	铁耗	风摩擦	总损耗
未退火	设计		69.06	0.7779		152.4	76.5	90.1	12.0	336.1
	样机1		73.27	0.7630	63	137.1	56.7	66.2	8.6	273.7
	样机2		72.82	0.7770	64	132.9	60.6	65.9	8.5	273.0
	平均值		73.05	0.7700	63.5	135.0	58.6	66.1	8.6	273.3
	样机1	杂散实测	73.06	0.7640		137.8	57.1	66.2	8.6	276.6
	样机2	杂散实测	72.82	0.7770		134.4	60.6	65.9	8.5	279.0
退火	设计		75.04	0.7956		123.4	64.5	44.5	12.0	249.5
	样机1		74.41	0.7680	66	131.4	61.3	48.9	11.3	257.9
	样机2		75.03	0.7740	64	127.1	59.0	51.1	7.3	249.5
	平均值		74.72	0.7710	65.0	129.3	60.1	50.0	9.3	253.7
	样机1	杂散实测	73.96	0.7690		132.6	62.1	48.9	11.3	264.0
	样机2	杂散实测	74.56	0.7750		128.3	59.9	51.1	21.2	269.8
Y2-112M-2		4.00	85.00	0.8700	80					
	未退火		83.31	0.9014		317.5	177.0	192.6	90.0	801.1
	未退火		82.19	0.9160	67	294.3	190.9	151.6	205.5	866.6
	未退火	杂散实测	80.58	0.9170		305.4	199.1	151.6	205.5	964.1
	未退火		82.08	0.9200	75	293.2	184.0	150.6	221.0	873.2
	未退火	杂散实测	80.18	0.9210		306.6	193.6	150.6	221.0	988.8
	退火		86.03	0.9246		283.0	165.9	86.6	90.0	649.5
	退火		84.04	0.9280	69	274.3	211.2	97.7	152.6	759.6
	退火	杂散实测	82.94	0.9280		281.1	217.1	97.7	152.6	822.6
	退火		82.76	0.9300	69	281.0	186.0	111.8	230.0	833.0
	退火	杂散实测	81.21	0.9310		291.4	193.5	111.8	230.0	925.2

## 5. 转子闭口槽试验验证

转子闭口槽对降低杂散损耗是有利的，但同时制造工艺也提出较高的要求，否则会造成桥拱不对称，反而影响电机性能。国外电机采用闭口槽的很多，这可能和他们的制造工艺水平、装备比我国好有关，国内推行闭口槽还存在一些困难，本次样机试制也安排了几个规格试制，但从数据来看，效果不明显，详见数据汇总表。国内要大力推广闭口槽，还有待进一步工作。

## 6. 槽配合的一些考虑

槽配合的选择是一个很复杂的问题，涉及的因素较多，有的槽配合对降低附加损耗有利，但对电机的噪声可能就不是最好，所以，选择槽配合必须兼顾到电机的各项要求综合考虑。Y2系列电机设计时在槽配合的选择上做了大量工作，经使用大多数还是比较满意的。Y3系列电机在此基础上，仅调整了个别规格。经试验效果也不错。本系列设计经讨论原则上对槽配合不做大调整，继续沿用Y2、Y3证明已使用的较好的槽配合。结合本系列特点，只对个别规格进行了调整。

## 7. 定子绕组技术的试验研究

定子绕组的形式决定了绕组的基波分布系数和谐波含量，对电机性能有很大影响，因此，如何提高定子绕组的基波系数和降低或削弱其谐波含量一直是人们所研究的问题。在本系列电机开展系列设计前，由上海电器科学研究所（集团）有限公司在前期准备工作中也进行了定子绕组形式的试验研究工作，如采用普通绕组和能提高基波分布系数和降低谐波含量的正弦绕组做对比试验，结果表明，用正弦绕组对提高电机效率有些好处，但由于其制造工艺比较复杂，在工厂大批量生产中还不是最适合，因而，本次设计没有再做进一步的试验研究。

## 8. 提高加工精度改善电机性能

通过采取适当的工艺措施提高一些关键零部件的加工精度，改善电机性能。具体的措施有：

- (1) 定子铁心内圆（下公差）提高半个等级；
- (2) 机座铁心挡增加圆跳动的要求；
- (3) 轴承室加工精度提高一个等级，由H6提高到H5。

## 9. 西门子 EFF1 样机试验数据与样本值对比

本次样机试制过程中，我们还购买了三台西门子公司 1LA9 系列样机进行测试，测试结果见表 19。从表 19 数据可以看出，实测值与其样本值还是有一定的差距，分析原因，我们认为可能有两个因素造成，一个原因是由于双放测试方法上可能有差异，以前也经常发生这种问题；另一方面也有可能是目前欧洲 EFF1 效率电机量还不大，样本有时候也是一种广告效应。进行测试比较，我们可以做到有一定了解。西门子公司样本上的效率值略高于 EFF1 指标。

表 11: 西门子样机测试结果

	90S-2		132M-4		180L-4	
	试验值	样本值	试验值	样本值	试验值	样本值
效率	81.69	85	87.74	90.3	92.22	93
功率因数	0.885	0.87	0.868	0.84	0.84	0.84
IST	8.23	7	8.83	7	7.41	7.3
TST	3.37	3.5	3.03	3	2.4	2.6
TM	3.87	3.5	3.85	3.6	3.14	3.4
K	34		59		54	
空载噪声	76		74.3		78.6	
负载噪声	77.7	72	76	74	80.2	76
振动	1.3		1.5		0.95	
空载电流	1.148		5.95		15.35	
空载输入	137.5		397		660.6	
满载电流	2.994	2.95	14.22	14.3	40.98	40.5
电阻	4.716		2.023		0.404	
转差率	4.729	3.67	3.28	3	2.096	2.33
铜耗	126.8		409		678.5	
铝耗	78.2		260		475.7	
铁耗	56.2		216.2		478.6	
风摩耗	65.8		120.5		102.9	
杂耗	9.2		42.7		119.3	
杂耗实测	30.1		93.5		231.9	
杂耗比例	1.6		1.1		0.97	
电压	380V	400V	380V	400V	380V	400V

## 二、主要技术成果

2004年11月,国家发改委颁布了节能中长期规划,在该规划中明确提出,到2010年,我国电动机的能效指标应从目前的87%提高到90~92%,亦即电动机的效率指标要达到EFF1效率指标要求。按照目前正在修订的GB18613,其基本思想也是贯彻国家节能中长期发展规划的要求,三到四年后,要将目前的电动机节能评价价值作为电动机能效限定值,在我国全面采用高效率电动机。本系列电动机的开发成功,亦为贯彻国家这一政策做好了技术准备。同时,从目前世界各国电动机效率水平发展情况来看,推广高效率电动机也是必然。所以YX3系列高效率三相异步电动机产品的开发是贯彻国家节能中长期规划,属于电机节能工程中重点开发的产品。该系列电动机同时达到目前欧洲eff1标准的高效率系列三相异步电动机。通过YX3系列电机的研制将使我国低压三相异步电动机达到国际先进水平,并可进一步满足国内外市场对中小型三相异步电动机在质量、性能等各方面的要求,为推动行业技术水平的提高和电机行业的振兴做出贡献。

YX3系列电机的主要技术成果体现在以下几个方面:

1. YX3系列电机是为了贯彻国家节能中长期规划,是电机节能工程中重点开发的产品,是符合国家产业政策而开发出来的国内高效率三相异步电动机系列,填补了国内在这一领域的空白。

2. YX3系列电机效率指标满足GB18613-2002《中小型三相异步电动机能效限定值及节能评价价值》的节能评价价值的要求,同时达到欧洲eff1效率标准。

3. 系列设计在风扇设计上进行了研究取得了较好的效果,全系列电机做到了高效率、低噪声,相同规格与西门子样机相比相当,全系列平均比Y3系列低4dB。

### 4. 性能

YX3系列电机设计时对力能指标的确定原则是:效率达到GB18613-2002节能评价价值的要求,其它性能指标参照Y3系列,功率因数可适当放宽、堵转电流符合IEC标准,样机试制基本按照这一思路,性能指标达到了要求。由于设计时并没有完全考虑要达到西门子的样本值水平,同时,实际测试西门子样机与它的样本值差距也比较大,但无论西门子电机的实际水平与样本值有多少差距,作为一个参照,我们还是列出主要性能指标与西门子2004年样本值的比较。从下表数据来看,各项性能指标与西门子样本值比,还略有一些差距,还值得一提的是噪声水平,本系列由于受测试条件的限制,没有全部测负载噪声,但如果按照标准加上空、负载差值来看,本系列与西门子基本相当,同时,从实测的西门子样机水平来看,实际值与样本值还是有一些差距。本系列相同规格132M-4、180L-4与西门子比较来看,水平相当,所以,本系列样机试制满足了设计任务书的要求,性能指标也达到了规定水平,与世界先进公司水平相比也基本相当。

表 12: 相同规格效率实测值与西门子样本值比较

	标准	试验	西门子	与西门子差值
2P	89.7200%	90.2133%	90.7200%	0.5067%
4P	90.8333%	90.7856%	90.8944%	0.1088%
6P	90.1786%	90.3136%	90.3571%	0.0435%
	90.2440%	90.4375%	90.6572%	0.2197%

表 13: 相同规格功率因数实测值与西门子样本值比较

	标准	试验	西门子	与西门子差值
2P	0.8767	0.8807	0.8907	0.0100
4P	0.8383	0.8396	0.8367	-0.0029
6P	0.7967	0.8017	0.7842	-0.0175
	0.8372	0.8407	0.8372	-0.0035

表 14: 相同规格堵转电流实测值与西门子样本值比较

	标准	试验	西门子	与西门子差值
2P	7.6267	7.9023	7.1467	-0.7556
4P	7.1944	7.2722	6.8337	-0.4385
6P	6.9258	6.8910	6.6771	-0.2139
	7.2490	7.3552	6.8858	-0.4693

表 15: 相同规格堵转转矩实测值与西门子样本值比较

	标准	试验	西门子	与西门子差值
2P	2.2733	2.6410	2.6933	0.0523
4P	2.2556	2.3778	2.8167	0.4389
6P	2.0667	2.1967	2.8000	0.6033
	2.1985	2.4052	2.7700	0.3648

表 16: 相同规格噪声实测值与西门子样本值比较

	空载标准	空载试验	西门子负载	与西门子差值
2P	79.3000	76.9000	80.2000	3.3000
4P	72.7000	70.7000	73.4000	2.7000
6P	72.9000	69.0000	73.0000	4.0000
	74.9667	72.2000	75.5333	3.3333

## 5. YX3 系列高效率三相异步电动机的效率特性曲线

YX3 系列高效率三相异步电动机在 60~100% 的负荷率范围内有较平坦的效率特性曲线, 因此具有良好的节能效果。YX3 系列高效率三相异步电动机典型规格的效率特性曲线如表 25 及图 1 所示。

表 17: YX3 典型规格效率特性曲线

负荷率	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
90S-2	85.12	85.61	85.78	85.71	85.47
160M1-4	91.37	91.68	91.81	91.8	91.7
280M-6	94.1	94.37	94.38	94.37	94.28

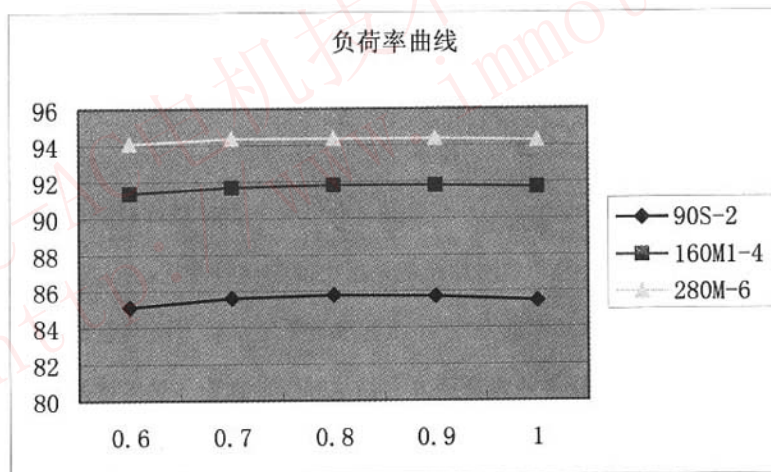


图 1: 典型规格负荷率曲线

## 三、IEC 高效电机标准发展动态

由于电动机系统消耗了许多国家工业总用电量的 2/3 左右, 在整个国家的总用电量中也占有相当大的比重, 国际社会对节约能源、保护环境、可持续发展战略等方面的考虑逐步达成共识, 各国政府都在积极开发新能源的同时, 相应制定了有关节约能源的法规

(NEMA, EPACT, CEMEP, COPANT, AS/NZS, JIS, GB, …), 新的标准还在不断的发展中, 在一个全球化的市场环境下, 因为各国标准上些微的不同和差别, 这样势必增加了电机制造商的困难。因此, 国际电工委员会 (IEC) 决定新成立一个工作项目来制定一项新的能效标准, 以协调各国能效分级。现已得到各国认同, 新制定的标准为 IEC 60034-30, 'Efficiency classes of single-speed three-phase cage induction motors', 新标准第一次工作组会议将于 2006 年 10 月 30 日在德国法兰克福召开。标准预计 2008 年制订完成。

根据统计, 0.75~200kW 范围的电机占了绝大多数, 虽然有些国家将小电机也纳入到需要限定能效标准的范围, 然而, 由于多数情况下, 小电机不是连续工作制, 因此, 它们的节能潜力不是很大。同时小电机的主要损耗为定子绕组的铜耗, 要提高效率势必要增加定子直径增加槽面积。在很多时候由于受到安装空间限制在技术上不可行, 因此, 本标准涵盖的范围为 0.75~200kW。

众所周知, 感应电机在 60Hz 时的效率比 50Hz 时高, 因此, 考虑到同一台电机能同时满足在两种频率下有相同的能效等级, 所以, 在 60Hz 时的效率指标略高于 50Hz 时的指标。

新标准将电机效率分为 A、B、C、D 四级, A 级为超高效率, B 级为高效率, C 级为改进效率, D 级为标准效率。60Hz 时的 A 级 (超高效率) 和 B 级 (高效率) 指标就直接采用目前的 NEMA 超高效 (NEMA Premium) 和高效 (EPACT) 标准的规定。

50Hz 时的 C 级 (改进效率 improved) 和 B 级 (高效率) 指标接近目前已存在的 CEMEP-EU 的 eff2 和 eff1 标准。主要是考虑到附加损耗采用不同的试验方法, 所以, 效率值略有调整。(CEMEP 附加损耗是采用输入功率的 0.5%, 新标准是采用试验方法确定, 差值见表 24, 25)。

50Hz 时的 A 级 (超高效率) 是新设计的, 它们与 B 级效率比, 效率提高 16~20%。

本标准规定效率和损耗的测试方法采用 IEC 60034-2 的损耗分析法, 附加损耗的确定可以采用 Eh-star 法或者推荐值法。这两种方法所得到的值是近似相等的。

D 级电机效率较低, 主要用于特殊用途而且不是长期连续运行的场合, 这类电机也没有额外的标志。

C 级电机的满载效率等于或高于表 18, 19 的规定值, 在名牌上标志为 "EFF C"。

B 级电机的满载效率等于或高于表 20, 21 的规定值, 在名牌上标志为 "EFF B"。

A 级电机的满载效率等于或高于表 22, 23 的规定值, 在名牌上标志为 "EFF A"。



表 18: 50Hz 时 C 级效率值

额定 kW	极数		
	2	4	6
0,75	72,0	72,0	70,0
1,1	75,4	75,4	73,5
1,5	77,7	77,7	76,0
2,2	80,3	80,3	78,5
3	81,9	81,9	80,5
4	83,5	83,5	82,5
5,5	85,0	85,0	84,0
7,5	86,3	86,3	85,5
11	87,7	87,7	87,0
15	88,8	88,8	88,0
18,5	89,4	89,4	88,7
22	89,9	89,9	89,3
30	90,8	90,8	90,3
37	91,4	91,4	90,9
45	92,0	92,0	91,5
55	92,5	92,5	92,0
75	93,1	93,1	92,7
90	93,4	93,4	93,1
110	93,6	93,6	93,5
132	93,8	93,8	93,7
160	94,0	94,0	93,9
200	94,0	94,0	93,9

表 19: 60Hz 时 C 级效率值

额定 kW	极数		
	2	4	6
0,75	74,0	77,0	72,0
1,1	78,5	80,0	75,5
1,5	80,0	81,5	77,0
2,2	81,5	82,5	78,5
3,7	84,0	85,5	84,0
5,5	85,5	87,5	85,5
7,5	87,5	87,5	86,5

11	87,5	88,5	88,5
15	88,5	89,5	89,5
18,5	89,5	90,2	90,2
22	89,5	91,0	91,0
30	90,2	91,7	91,0
37	91,7	92,4	91,7
45	91,7	93,0	91,7
55	92,4	93,0	92,4
75	93,0	93,6	93,0
90	93,0	93,6	93,6
110	93,6	94,1	93,6
150	94,1	94,5	94,1
185	94,1	94,5	94,1

表 20: 50Hz 时 B 级效率值 (高效率)

额定 kW	极数		
	2	4	6
0,75	79,0	81,4	79,0
1,1	81,1	83,0	81,0
1,5	82,5	84,2	82,5
2,2	84,1	85,6	84,0
3	85,3	86,6	85,0
4	86,4	87,5	86,0
5,5	87,5	88,5	87,0
7,5	88,5	89,4	88,0
11	89,6	90,3	89,0
15	90,6	91,1	89,9
18,5	91,2	91,6	90,5
22	91,6	92,0	91,0
30	92,3	92,6	91,8
37	92,7	93,0	92,4
45	93,1	93,3	92,8
55	93,5	93,7	93,2
75	94,1	94,2	93,8
90	94,5	94,5	94,2
110	94,7	94,7	94,5
132	94,9	94,9	94,8
160	95,1	95,1	95,0
200	95,1	95,1	95,0

表 21: 60Hz 时 B 级效率值 (高效率)

额定 kW	极数		
	2	4	6
0,75	75,5	82,5	80,0
1,1	82,5	84,0	85,5
1,5	84,0	84,0	86,5
2,2	85,5	87,5	87,5
3,7	87,5	87,5	87,5
5,5	88,5	89,5	89,5
7,5	89,5	89,5	89,5
11	90,2	91,0	90,2
15	90,2	91,0	90,2
18,5	91,0	92,4	91,7
22	91,0	92,4	91,7
30	91,7	93,0	93,0
37	92,4	93,0	93,0
45	93,0	93,6	93,6
55	93,0	94,1	93,6
75	93,6	94,5	94,1
90	94,5	94,5	94,1
110	94,5	95,0	95,0
150	95,0	95,0	95,0
185	95,4	95,0	95,0

表 22: 50Hz 时 A 级效率值 (超高效率)

额定 kW	极数		
	2	4	6
0,75	82,2	84,2	82,0
1,1	83,9	85,7	84,0
1,5	85,1	86,8	85,3
2,2	86,4	88,0	86,6
3	87,5	88,9	87,4
4	88,4	89,7	88,2
5,5	89,3	90,5	89,1
7,5	90,2	91,3	89,9
11	91,2	92,1	90,8

15	92,0	92,8	91,5
18,5	92,6	93,1	92,0
22	92,9	93,5	92,4
30	93,5	94,0	93,1
37	93,9	94,4	93,6
45	94,2	94,6	93,9
55	94,5	94,9	94,3
75	95,0	95,3	94,8
90	95,4	95,6	95,1
110	95,5	95,7	95,4
132	95,7	95,9	95,6
160	95,9	95,9	95,6
200	95,9	95,9	95,6

表 23: 60Hz 时 A 级效率值 (超高效率)

额定 kW	极数		
	2	4	6
0,75	77,0	85,5	82,5
1,1	84,0	86,5	87,5
1,5	85,5	86,5	88,5
2,2	86,5	89,5	89,5
3,7	88,5	89,5	89,5
5,5	89,5	91,7	91,0
7,5	90,2	91,7	91,0
11	91,0	92,4	91,7
15	91,0	93,0	91,7
18,5	91,7	93,6	93,0
22	91,7	93,6	93,0
30	92,4	94,1	94,1
37	93,0	94,5	94,1
45	93,6	95,0	94,5
55	93,6	95,4	94,5
75	94,1	95,4	95,0
90	95,0	95,4	95,0
110	95,0	95,8	95,8
150	95,4	96,2	95,8
185	95,8	96,2	95,8

表 24: eff1 效率水平与 IEC B 级的差值

功率	效率 (eff1)								
	3000	3000		1500	1500		1000	1000	
kW	GB18613	IEC		GB18613	IEC		GB18613	IEC	
0.75	77.5	79.0	-1.5	82.3	81.4	0.9	77.7	79.0	-1.3
1.1	82.8	81.1	1.7	83.8	83.0	0.8	79.9	81.0	-1.1
1.5	84.1	82.5	1.6	85.0	84.2	0.8	81.5	82.5	-1.0
2.2	85.6	84.1	1.5	86.4	85.6	0.8	83.4	84.0	-0.6
3	86.7	85.3	1.4	87.4	86.6	0.8	84.9	85.0	-0.1
4	87.6	86.4	1.2	88.3	87.5	0.8	86.1	86.0	0.1
5.5	88.6	87.5	1.1	89.2	88.5	0.7	87.4	87.0	0.4
7.5	89.5	88.5	1.0	90.1	89.4	0.7	89.0	88.0	1.0
11	90.5	89.6	0.9	91.0	90.3	0.7	90.0	89.0	1.0
15	91.3	90.6	0.7	91.8	91.1	0.7	91.0	89.9	1.1
18.5	91.8	91.2	0.6	92.2	91.6	0.6	91.5	90.5	1.0
22	92.2	91.6	0.6	92.6	92.0	0.6	92.0	91.0	1.0
30	92.9	92.3	0.6	93.2	92.6	0.6	92.5	91.8	0.7
37	93.3	92.7	0.6	93.6	93.0	0.6	93.0	92.4	0.6
45	93.7	93.1	0.6	93.9	93.3	0.6	93.5	92.8	0.7
55	94.0	93.5	0.5	94.2	93.7	0.5	93.8	93.2	0.6
75	94.6	94.1	0.5	94.7	94.2	0.5	94.2	93.8	0.4
90	95.0	94.5	0.5	95.0	94.5	0.5	94.5	94.2	0.3
110	95.0	94.7	0.3	95.4	94.7	0.7	95.0	94.5	0.5
132	95.4	94.9	0.5	95.4	94.9	0.5	95.0	94.8	0.2
160	95.4	95.1	0.3	95.4	95.1	0.3	95.0	95.0	0.0
200	95.4	95.1	0.3	95.4	95.1	0.3	95.0	95.0	0.0

表 25: eff2 效率水平与 IEC C 级的差值

功 率	同步转速 r/min								
	3000		3.0	1500		1.0	1000		
	GB18616	IEC		GB18616	IEC		GB18616	IEC	
0.75	75.0	72.0	3.0	73.0	72.0	1.0	69.0	70.0	-1.0
1.1	76.2	75.4	0.8	76.2	75.4	0.8	72.0	73.5	-1.5
1.5	78.5	77.7	0.8	78.5	77.7	0.8	76.0	76.0	0.0
2.2	81.0	80.3	0.7	81.0	80.3	0.7	79.0	78.5	0.5
3	82.6	81.9	0.7	82.6	81.9	0.7	81.0	80.5	0.5
4	84.2	83.5	0.7	84.2	83.5	0.7	82.0	82.5	-0.5
5.5	85.7	85.0	0.7	85.7	85.0	0.7	84.0	84.0	0.0
7.5	87.0	86.3	0.7	87.0	86.3	0.7	86.0	85.5	0.5
11	88.4	87.7	0.7	88.4	87.7	0.7	87.5	87.0	0.5
15	89.4	88.8	0.6	89.4	88.8	0.6	89.0	88.0	1.0
18.5	90.0	89.4	0.6	90.0	89.4	0.6	90.0	88.7	1.3
22	90.5	89.9	0.6	90.5	89.9	0.6	90.0	89.3	0.7
30	91.4	90.8	0.6	91.4	90.8	0.6	91.5	90.3	1.2
37	92.0	91.4	0.6	92.0	91.4	0.6	92.0	90.9	1.1
45	92.5	92.0	0.5	92.5	92.0	0.5	92.5	91.5	1.0
55	93.0	92.5	0.5	93.0	92.5	0.5	92.8	92.0	0.8
75	93.6	93.1	0.5	93.6	93.1	0.5	93.5	92.7	0.8
90	93.9	93.4	0.5	93.9	93.4	0.5	93.8	93.1	0.7
110	94.0	93.6	0.4	94.5	93.6	0.9	94.0	93.5	0.5
132	94.5	93.8	0.7	94.8	93.8	1.0	94.2	93.7	0.5
160	94.6	94.0	0.6	94.9	94.0	0.9	94.5	93.9	0.6
200	94.8	94.0	0.8	94.9	94.0	0.9	94.5	93.9	0.6

#### 四、结论

发展高效率电机是符合国家节能中长期发展规划的要求,也是目前世界各国为解决能源紧张、减少大气污染等采取的主要措施。及时开发高效率电机有利于国家中长期节能规划的落实和满足国内外市场的需要。同时 YX3 系列高效率三相异步电动机也是采用冷轧硅钢片为导磁材料,有利于行业进一步推动“以冷代热”的产业政策。其效率指标完全达到 GB18613-2002《中小型三相异步电动机能效限定值及节能评价值》中节能评价值的规定,并符合欧洲能效标准 EFF1 要求;系列电机噪声水平比基本系列 Y3 系列有较大提高,缩小了与国外先进国家的差距。因此, YX3 系列高效率三相异步电动机的主要性能指标达到了本世纪初国际同类产品的先进水平, YX3 系列高效率三相异步电动机推广应用后,将会推动行业的技术进步、扩大外贸出口,具有很好的社会和经济效益。

DC-AC电机技术论坛  
<http://www.immotor.cn>