

DIANJI YU
CHUANDONG
JIE NENG JISHU

电机与传动节能技术



科学技术文献出版社

电机与传动节能技术

中国科学技术情报研究所
国家科委成果管理办公室 编

科学技术文献出版社

1986

内 容 简 介

本书是一本反映我国近年来，在电机和电机传动节能方面所取得的新成果、新技术的专集。书中着重介绍了多种新型高效节能电机、电机节电装置、电机运行和电气传动节电技术、风机及水泵节电技术等。该专集图文并茂，内容丰富，技术性强，有较大的实用价值，其中许多是各省、市科委和国务院有关部委推荐的重要科技成果。

本书可供有关科研、设计人员，大专院校及工矿企业的科技人员参考使用。

电机与传动节能技术
中国科学技术情报研究所 编
国家科委成果管理办公室
科学技术文献出版社出版

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

※

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：26.25 字数：667千字

1986年4月北京第一版第一次印刷

印数：1—8000册

科技新书目：111—42

统一书号：·15176·660 定价：5.35元

前 言

电动机是一种重要的动力设备，广泛地用于工农业生产各部门，其用电量占我国总发电量的50%左右。在电动机能量转换的过程中，有一部分能量变为无效的损耗，因此，尽可能降低这部分损耗，提高电动机及其传动效率，对于节约用电量，提高技术经济效益，加速整个国民经济的发展具有重要意义。

近年来，国内有关科研、设计、制造和使用单位在电动机本身节能和电机传动节能方面做了大量的试验研究工作，取得了可喜的成果。为了推广交流这方面的新技术、新成果、新经验，使科学技术转化为生产力，我们遴选各省、市、自治区、直辖市科委及国务院有关部委报送的重要科技成果和中国电工技术学会有关专业委员会推荐的实用价值较大的论文，编辑了这本《电机与传动节能技术》。本专集介绍了多种新型高效专用节能电机（包括电风扇、洗衣机电机）、电机节电装置、电机运行和电气传动节电技术以及风机、水泵节电技术。文集内容丰富，文图并茂，技术性强，实用价值较大，可供有关科研、教学、生产单位，尤其是工矿企业的有关科技和管理人员参考使用。

编 者

目 录

高效率电机的研制	YX系列高效率模样电机设计工作组 (1)
高效节能三相异步电动机	杨赓文 张城生 蒙盛文 冯信华 (13)
中小型高速异步电机通风损耗的降低与节能	俞鑫昌 (21)
低噪声高效率节能异步电动机	顾 隽 黄培森 (26)
电磁螺旋压砖机的传动原理及效能分析	顾积栋 雷积寿 (33)
机床专用节能异步电动机的研究	张城生 葛友兰 蒙盛文等 (41)
葵花牌吊扇用节能电机的研究	黄永家 杨家琪 林丁生 (49)
400毫米节能风扇电机	陈永校 (56)
定子12槽台式电风扇电动机	孙翼谋 (63)
400毫米节能电风扇用新调速法	王琼琪 (70)
XD-120洗衣机电机的改进设计	周德铭 (78)
XPD-90 洗衣机电机的设计与测试	沈善圭 (82)
不对称三绕组单相电容电动机及其在节能洗衣机电机上的应用	董录凤 陈兰芳 陈文奎 王伟强 (89)
YDFJ-180-4/6型双速高效电机	俞鑫昌等 (96)
两种飞轮电机FO ₃ -50-6N和FO ₃ -50-6H在有梭织机上节电效果的探讨	王纲毅 孙佐吉 李静远 (101)
GT101型织机节电装置	吴世琪 (110)
无换向器电机变频电源及其在纺丝机电锭节能中的应用	许大中 (117)
选用电动机在节能方面所采取的几项措施	刘永甲 (121)
工业企业电网功率因数最佳运行点的探讨	王如彩 石洪勋 (126)
改善电力机车功率因数研究	铁道部株洲电力机车研究所 (135)
异步电动机节电装置	林大道 陈仲贤 (142)
YJ1型小容量三相异步电动机节电器	陈春平 (147)
提高小型三相异步电动机效率测试准确度	张增楷 (156)
同步电动机的失步保护及带载自动再整步	蒋宗道 (167)
异步电动机及其机组群在电源短暂中断时的防冲击保护及带载快速自启动	蒋宗道 (182)
磁性槽楔在发电厂厂用电动机上的应用	徐英杰 (192)
美国Wanlass电动机工作特点及其分析	陈碧秀 莫韵珠 (199)
晶闸管自动调磁单相异步发电机	吴汉光 林孝义 (207)
DZF- $1\frac{1}{4}$ 型单相纯烧沼气发电机组的研制	刘家修 (215)
风机水泵变速运行是节能的有效途径	丁绍曾 朱稚清等 (221)
风机可控硅串级调速试验研究	顾永祺 (242)
变速泵用串级调速参量控制装置的设计	吕人岗 (252)

风机类负载采用变频调速和串级调速节能效果对比·····	周明宝 翟文龙(262)
鼠笼型异步电动机变频调速节电装置·····	张兆琨 何齐兴(266)
异步电动机机组串级调速·····	葛竟存 叶顺因(274)
微型计算机控制变频调速系统及其在风机上的应用·····	王 旭 汪 林(281)
电流型逆变器感应电动机调速装置的研究及应用·····	盛祖权 周胜宗 刘立英(287)
三相零式可控硅串级调速在风机水泵上的应用·····	厉无咎 李海东 王 见 巫长江(294)
G.T.O串级调速研究·····	周德贤 王一华(298)
斩波法调速·····	黎家玲 董宝亮(309)
首钢YOTC—800液力耦合器的使用与节能·····	杨贵华(317)
纯转子激磁相位补偿机(进相机)的研制及节电效果·····	曹立友(322)
多重化电流型变频器的谐波分析及最佳参数选择·····	佟纯厚 刘世昌(326)
大型可逆轧机的最小能耗控制·····	胡中楫 郑芳经 丁慎栋(345)
直流拖动能耗最小最优控制规律与计算机控制·····	任兴权(353)
电车的节能控制·····	胡中楫 郑芳经(363)
JMT—1型铁路装卸机牵引调速系统·····	许晋良(371)
可控硅串级调速电动机在长距离输油管道上的应用 ·····	张世学 张昭明 张维东 朱晓敏(382)
轴流式扇风机改造和双曲线变截面扭曲风叶的研制及应用 ·····	重庆煤炭工业公司永荣矿务局(390)
高效子午加速轴流式风机的设计 and 应用·····	刘家钰(394)
CFG—1型离心式单相交流电动吹风机·····	赵若茂 姚来根 雷运安等(401)
3吨/小时热风冲天炉离心式鼓风机·····	姚贵喜(407)

高效率电机的研制

YX系列高效率模样电机设计工作组*

小型异步电动机是一种量大面广的动力设备,用电量约占全国总发电量的40%。电动机在传递能量的过程中,有一部分电能变成热能而损耗,其值为电机输入功率的6~25%,平均为13%左右。因此降低这种损耗,提高小型异步电动机的效率,对于节约电能具有相当重要的意义。目前已定型推广生产的Y系列(IP44)三相异步电动机已具有较高的效率水平,但对于长期连续运行及对电机效率有更高要求的场合,采用高效率电动机能获得更显著的节能效果。

高效率电动机就是比普通型电动机(或称基本系列电动机)提高效率的电动机,或者说比普通型电动机降低损耗的电动机。按照目前国内外发展的情况,高效率电动机一般可分为下述二类:

第一类:损耗较普通型电动机下降20~30%,成本也相应增加20~30%,功率等级、机座号及其对应关系和基本系列相同;

第二类:损耗较普通型电动机下降40~50%,成本相应增加50%以上,功率等级、机座号及其对应关系和基本系列不同。

目前一些主要的高效率电机系列,如美国西屋公司的MAC-II型系列,GE公司的Tri-Clad 700系列,法国CEM公司的ME系列和日本三菱公司的Hi-Eff系列等均属第一类。它们与普通型电机的功率等级、安装尺寸及其对应关系均相同,因此可与基本系列电机互换。第二类高效率电机主要使用于运行时间特别长、利用系数很高的专用设备上,如日本三菱公司的纺织专用高效率电机SE-E系列就属于这一类。

YX系列高效率电动机是属于第一类的高效率电机,它可与基本系列电机互换,主要配套对象为通用机械,与基本系列电机的配套范畴相同,因此使用较广。鉴于小型异步电动机基本系列—Y系列(IP44)三相异步电动机业已定型推广生产,所以高效率电机系列的功率等级、安装尺寸及其对应关系应与Y系列相同,这样不仅有利于与Y系列电机互换,同时也便于用户选用与安装。

关于高效率电机系列的设计原则以及系列安排详见参考资料〔1〕、〔2〕、〔3〕。根据设计原则规定,高效率电机系列的电机总损耗应比Y系列下降20%以上,效率平均提高3%左右。对于一个系列设计的产品,由于功率与极数不同,不同规格电机的定子铜耗、转子铝耗、铁耗、风摩耗以及杂散耗这五部分损耗各占总损耗的比例也不尽相同,因此在设法降低每个规格电机的总损耗时,应根据上述五部分损耗的分配比例,找出主要矛盾,采取相应措施妥善解决。为了发展高效率电机系列并为此提供必要的基础,YX系列高效率电机模样电机设计工作组围绕着降低电机的损耗开展了磁性材料、槽配合、绕组型式、风扇参数、冲片退火以及转子槽

* 设计工作组以机械部上海电器科学研究所为组长,参加单位有北京电机总厂、博山电机厂、大连电机厂、河北电机厂、人民电机厂、五一电机厂、南通电机厂、抚州电机厂、无锡县电机厂、厦门电机厂、襄樊电机厂等。

绝缘等试验研究工作，并进行了高效率模样电机的设计和试制工作，取得了一定的成果，现简述如下：

一、降低电机损耗的试验研究

(一) 高导磁、低损耗导磁材料的试验验证

为了有效地降低电机的铁耗，除了适当增加电机铁心材料外，采用性能良好、价格相宜的导磁材料无疑是一种有效措施。在分析目前国内较D23牌号硅钢片性能更好的导磁材料的基础上，综合考虑了导磁材料的磁密与比铁损的性能以及价格，采用W18G（0.5毫米）和D32（0.35毫米）的导磁材料是比较适宜的，其性能指标见表1。

表1 W18G和D32两种导磁材料的性能指标

牌 号	厚度（毫米）	$P_{10/50}$ （瓦/公斤）	B_{25} （万高斯）
W18G	0.5	1.9	1.65
D32	0.35	1.4	1.5

表2列出了W18G和D32导磁材料性能的实测值，其值基本上满足了材料的性能标准。

表2 W18G和D32导磁材料的性能实测值

牌 号	厚 度 （毫米）	$P_{10/50}$ （瓦/公斤）	$P_{15/50}$ （瓦/公斤）	B_{25} （万高斯）	备 注
W18G	0.5	2.0	4.4	1.645	未退火
D32	0.35	1.32	2.97	1.545	未退火

这两种导磁材料的性能各有所长，对于小机座号电机，定、转子铜耗之和占电机总损耗的60~70%左右，铁耗所占的比例相对减少，因此拟采用W18G导磁材料。由于这种材料的饱和磁密较高（比D23硅钢片提高70%左右），因此可减少激磁电流和有利于适当增加定、转子绕组用料，以期较大幅度地减少定、转子绕组损耗。对于大机座号电机，铁耗占电机总损耗的比例相对较大（约占20%左右），因此应采用D32导磁材料。由于D32材料的 $P_{10/50}$ 比D23可下降36.5%，这对于降低电机铁耗是极为有利的，用它可提高电机的效率。

1. D32与W18G材料的对比试验

在本次高效率模样电机试制中，在定、转子冲片内外径槽配合以及气隙长度相同的条件下，根据资料〔3〕列出的电机各部分磁密控制要求，对5.5千瓦4极和55千瓦4极这两种规格电机，分别进行了W18G和D32导磁材料的设计与试制。试验结果表明，对于5.5千瓦4极电机，采用D32方案比采用W18G方案的定子铜耗增加18%左右，而铁耗降低11%左右；D32方案比W18G方案效率实测值低1%左右，因此小功率电机采用饱和磁密较高的W18G材料对提高电机的效率是有效的。对于55千瓦4极这一规格的电机，二种材料对比试验结果恰恰相反。为达到相同的效率指标，对于55千瓦4极电机，采用W18G方案与D32方案相比，铁心长度增加3.85%，用铜增加12.3%，且要对铁心进行退火处理。通过上述二个规格的导磁材料的对比试验说明，在小机座号采用导磁性能较好的W18G硅钢片和在大机座号采用比铁

损较低的D32硅钢片基本上是合适的。

2. D25与D28材料的应用情况

考虑到厚度为0.5毫米的W18G及厚度为0.35毫米的D32导磁材料的供货及价格问题,在55千瓦4极与15千瓦4极高效率模样电机上,分别对近年上海硅钢片厂新生产的D25导磁材料进行了应用试验,表3列出了D25和D28导磁材料的性能实测值。

表3 D25与D28导磁材料的性能实测值

导磁材料	厚度 (毫米)	$P_{10/50}$ (瓦/公斤)	$P_{15/50}$ (瓦/公斤)	B_{25} (万高斯)	轧制方式
D25	0.5	1.9	4.16	1.54	热轧
D28	0.35	1.41	3.08	1.569	热轧

试验结果表明,由于D28与D25两种导磁材料的饱和磁密比W18G材料约低6%,功率因数下降约0.015,因此,用D28代替D32导磁材料,以及在功率因数有余量的情况下用D25代替W18G导磁材料,均获得与D32(0.35毫米)和W18G(0.5毫米)导磁材料基本相当的效率水平,而电机的导磁材料费用将分别降低18%和2%左右。

(二) 槽配合试验验证

三相鼠笼型异步电动机的杂散损耗在电机的总损耗中占有相当大的比例,在一般的斜槽鼠笼型铸铝转子电动机中,杂散损耗能达到输入功率的3~5%。试验证明,定、转子槽数的选择对杂散损耗影响很大。Y系列(IP44)三相异步电动机由于采用了少槽—近槽配合,杂散损耗平均保持在额定功率的2%左右。对于高效率电机要求进一步降低杂散损耗,借以提高电机的效率,因此在高效率电机试制中,我们就不同的槽数,槽配合和槽斜度对杂散损耗的影响进行了试验验证,全部样机的负载杂散损耗均用反转法测定。

1. 定子槽数一定,改变转子槽数的试验

我们在2.2千瓦4极和5.5千瓦4极两个规格的榜样电机上进行了对比试验,试验结果列于表4。

由表4可知,当定子槽数($Q_1 = 36$)不变时,在转子槽数为28、32、44槽三种电机中,

表4 定子槽数一定,改变转子槽数的试验结果

功率 (千瓦)	极数	定子槽数 Q_1	转子槽数 Q_2	Q_2/Q_1	P_z^* (%)	备注
2.2	4	36	28	0.778	116.3	普通相带绕组
			32	0.889	100	
			44	1.222	233	
5.5	4	36	28	0.778	118.9	正弦绕组
			32	0.889	100	
			33	0.917	100	
			44	1.222	246.7	

* 以 $Q_2 = 32$ 槽转子的负载杂散损耗为基准(100%)所得的相对值

转子为32槽的电机，其杂耗最小；44槽的电机，其杂耗最大。当以转子为32槽的电机杂耗为基准值时，则转子28槽电机的杂耗平均增加17.5%；44槽电机的杂耗平均增加140%。由此可见，定、转子槽数接近，这时齿谐波在铁心齿部所产生的磁通较少，从而使得构成杂耗的主要成份脉振损耗和转子高频电流损耗减小。反之，当定、转子槽数差值增大时，杂耗将增大，且转子槽数大于定子槽数的电机，其杂耗比转子槽数小于定子槽数的电机大。

2. 定、转子槽数比一定，增加定、转子槽数的试验

基本上保持定、转子槽数比，同时增加定、转子槽数的试验结果列于表5。

表5 定、转子槽数比一定，增加定、转子槽数的试验结果

功率(千瓦)	极数	Q_1	Q_2	Q_2/Q_1	$P_z^*(\%)$	定子绕组型式
0.55	4	24	22	0.917	100	普通
		36	28	0.778	58.9	
0.75	2	18	16	0.889	100	
		24	19	0.792	93.9	
5.5	2	30	26	0.867	100	
		36	28	0.778	86.9	
18.5	6	54	44	0.814	100	
		72	58	0.806	72.1	
55	4	48	44	0.917	100	正弦
		72	58	0.806	49.7	

* 表中每一规格以定、转子槽数少的电机的杂耗为基准(100%)

由表5数据表明，对于0.55千瓦4极电机，定、转子槽数由24/22增至36/28时，杂耗减少41%；对于5.5千瓦2极电机，槽数由30/26增至36/28时，杂耗减少13%；对于18.5千瓦6极电机，槽数由54/44增至72/58时，杂散减少28%；对于55千瓦4极电机，槽数由48/44增至72/58时，杂耗减少50%。由此可见，定、转子槽数均增加时，杂耗有不同程度的下降，这主要是由于磁势齿谐波的幅值减小所致。

3. 斜槽和直槽转子的对比试验

在模样电机试制时，对斜槽和直槽转子的电机杂耗进行了对比试验，试验结果列于表6。

表6 斜槽和直槽转子的电机杂耗对比

功率 (千瓦)	极数	Q_1/Q_2	$P_z^*(\%)$	
			斜槽	直槽
5.5	4	36/44	160	100

* 定子绕组为普通绕组

由表6可见，在 $Q_1/Q_2 = 36/44$ 的情况下，斜槽的杂耗比直槽大60%，这是因为转子斜

槽时齿谐波磁场既在转子鼠笼中产生谐波电流损耗,又在转子导条之间经过迭片铁心而产生横向电流损耗。由于在一般电机中,齿谐波产生的损耗较大,所以当转子斜一个定子齿距时,齿谐波在整个导条长度上所感应的合成电势为零,从而使斜槽鼠笼中的谐波电流损耗比直槽时大为减小。横向电流则相反,在斜槽时,由于槽向回路电势比直槽时大,从而使这部分损耗比直槽时大。对于一般转子导条不绝缘的铸铝转子,横向电流损耗能达到高频杂耗的50%左右,所以斜槽转子的杂散最大。应当指出,横向电流损耗与导条和铁心间的接触电阻关系极大,当接触电阻很大时,横向电流损耗将减小,因而杂耗也随之减小。

通过上述对比试验及分析表明,采用少槽—近槽配合,电机杂散损耗相对减小,但它往往对噪声和起动性能带来一定影响。适当增加定、转子槽数,不仅削弱相带谐波,而且还削弱齿谐波,因此有助于降低杂散损耗(一般降低20%左右)。

(三) 正弦绕组试验验证

鼠笼型异步电动机的定子绕组与电机的性能有着非常密切的关系,因此,提高定子绕组的基波分布系数和削弱其所产生的磁势谐波,一直是人们所关心的问题。目前除传统的单层与双层绕组外,还有单双层绕组、散布绕组和正弦绕组等三种型式。单双层绕组实际上是普通的双层绕组,它在二极电机中使用时,由于可在较短的实际节距上获得大于 $2/3\pi$ 的有效节距,其基波系数有较大的提高,从而有助于改善电机的性能。旨在削弱定子绕组所产生的谐波磁势的散布绕组,可有效地削弱某些次数的低次相带谐波,但其基波的分布系数也有所降低。正弦绕组不仅能有效地削弱较多次数的相带谐波,而且能使其基波分布系数有所提高,详见参考文献〔4〕。因此与单双层绕组或散布绕组相比,正弦绕组具有提高基波分布系数和削弱磁势谐波的优点,但绕组结构相对比较复杂,这就给绕组下线和接线带来一定的困难。本次高效率模样电机试制时,在H132及其以上机座内进行了正弦绕组的试验验证,以观察和分析在定转子铁心不变动的情况下,正弦绕组对提高电机性能(主要指效率)的效果。

普通 60° 相带三相绕组的磁势中,除了其主要成份——基波以外,还有一系列的奇次谐波,这些谐波可以分为相带谐波和齿谐波。齿谐波系由齿槽引起的,它具有与基波同样的绕组系数,因此只能采用斜槽使它削弱。相带谐波可以通过选用适当的绕组节距和增加每极每相槽数予以削弱。目前所采用的正弦绕组虽不能真正地使槽电流沿气隙圆周按正弦分布,所获得的磁势曲线也不是理想的正弦曲线,但它与普通的 60° 相带绕组相比,磁势曲线已有较好的改善,相带谐波受到较大的削弱。

正弦绕组有“ Δ —Y”串联和“ Δ —Y”并联两种。由于在“ Δ —Y”并联正弦绕组中将出现环流,影响电机的性能,因此,在本次高效率模样电机试制中,均采用“ Δ —Y”串联正弦绕组。

1. 对比试验的规格及谐波分析

表7中列出了正弦绕组和普通 60° 相带绕组对比试验的规格。

为了便于各绕组方案之间的比较,采用 v 次谐波幅值 F_{mv} 与基波幅值 F_{m1} 之比来表示 v 次谐波的大小,即:

$$\frac{F_{mv}}{F_{m1}} = \frac{1}{V} \cdot \frac{K_{apv}}{K_{ap1}}$$

式中: K_{ap1} 为基波绕组系数。

表7 正弦绕组和普通60°相带绕组的规格

功率 (千瓦)	极数	每极每相 槽数	绕组型式	
			普通60°相带	正弦绕组
5.5	2	6	单层	双层
4	6	2	单层	单层
11	4	4	单层	单层、双层
18.5	4	4	双层	双层
18.5	6	4	双层	双层
55	2	6	双层	双层
55	4	4	双层	双层
75	4	5	双层	双层

当每极每相 q 为偶数 ($q_{\Delta} = q_{\lambda}$) 时, v 次谐波的绕组系数 K_{av} 可按式计算:

$$K_{av} = \frac{\sin \frac{q}{2} \cdot \frac{\alpha P}{2}}{\frac{q}{2} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \sin \left(v \cdot \frac{y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2} \right)$$

式中: α 为槽角度 (以电角度计);

y 为节距 (以槽数计);

τ 为极数 (以槽数计)。

当每极每相 q 为奇数时, 为使空间磁势沿气隙圆周按正弦分布, λ 部分绕组及 Δ 部分绕组的每槽导体数应按一定比例排列。此时, 其 v 次谐波的绕组系数可采用槽电势向量图或其他方法计算。这种绕组排列的每槽导体数不同, 绕组结构复杂。为了简化正弦绕组的结构, 采用 $q_{\Delta} = (q+1)/2$ 和 $q_{\lambda} = (q-1)/2$ 的绕组型式。 Δ 部分绕组每槽导体数等于 λ 部分绕组每槽导数的 $\sqrt{3}$ 倍, 这样 λ 部分绕组与 Δ 部分绕组的槽利用率相同, 那么其 v 次谐波的绕组系数 K_{av} 为:

$$K_{av} = \frac{\frac{\sin q_{\Delta} \cdot \frac{v\alpha}{2}}{\sin \frac{q_{\Delta}\alpha}{2}} + (-1)^K \frac{\sin q_{\lambda} \cdot \frac{v\alpha}{2}}{\sin \frac{q_{\lambda}\alpha}{2}}}{q_{\Delta} + q_{\lambda}} \sin \left(v \cdot \frac{y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2} \right)$$

对于 $q_{\lambda} = (q+1)/2$ 和 $q_{\Delta} = (q-1)/2$ 的绕组, 仅将 q_{Δ} 作为 q_{λ} , q_{λ} 作为 q_{Δ} 代入上式, 同样可以进行计算。

根据上述公式对正弦绕组方案进行谐波计算, 其结果 ($\frac{F_{mv}}{F_1} \%$) 见表8。

表8数据表明, 两种绕组在节距相同时, 11与13次相带谐波基本相同。当 $q \geq 4$ 时, 普通60°相带绕组17与19次相带谐波幅值仅占基波的1%左右; 当普通双层绕组节距选取5/6时, 5次与7次谐波幅值也较小, 仅占基波的1%左右。对于 q 为偶数的正弦绕组, 其5、7与17、

表 8 正弦绕组方案谐波幅值

每极每相 槽数 (q)	极数	绕组型式	节 距	谐 波 次 数					
				5	7	11	13	17	19
6	2	正弦(双层) 普通单层	1~14	0	0	0.093	0.667	0	0
				4.126	2.17	0.967	0.74	0.515	0.461
4	4	正弦(单层)		0	0	1.197	1.013	0	0
		普通单层		4.29	2.35	1.2	1.01	0.97	1.13
		正弦(双层)	1~12	0	0	0.157	0.133	0	0
		普通双层	1~11	1.15	0.63	0.12	1.01	0.59	0.9
5	4	正弦(双层)	1~15	0.9438	0.598	0.357	0.1337	0.123	0.207
		普通双层	1~14	3.645	0.24	0.71	0.77	0.55	0.41
2	6	正弦(单层)		0	0	9.09*	7.69*	0	0
		普通单层		5.36	3.83	9.09*	7.69*	1.58	1.41
2	6	正弦(双层)	1~12	0	0	0.157	0.133	0	0
		普通双层	1~12	3.43	1.44	0.16	0.13	0.59	0.9

*为齿谐波幅值

19次相带谐波基本上完全消除,但 q 为奇数时,正弦绕组按 $q\Delta = (q+1)/2$ 和 $q\lambda = (q-1)/2$ 排列,且 λ 部分绕组与 Δ 部分绕组的每槽导体数之比为 $\sqrt{3}$ 时,5、7、17与19次相带谐波虽不能完全消除,但与节距相同的双层绕组相比,它们的谐波幅值仍有较大的削弱。例如,对于 $q=5$ 、 $\gamma=1\sim 15$ 的4极电机,双层绕组的5次谐波幅值为3.645,而正弦绕组仅为0.9438。与双层绕组相比,5次谐波幅值降低了74%;即使与 $\gamma=13$ 的双层绕组相比,也削弱了55%左右。

通过上述分析计算表明,正弦绕组含有的谐波相对较小,有助于降低电机杂散损耗和提高电机效率。

2. 试验结果及分析

为了较好地获得仅变动定子绕组就能改变电机性能的效果,在设计上述8个规格电机时,在导磁材料和定、转子铁心尺寸相同的条件下,对正弦绕组和普通 60° 相带绕组进行了设计,并使二种绕组型式的电机各部分磁密水平和用铜量基本相同,且绕组对比试验的同一规格安排于同一工厂试制,以尽量排除工艺的影响。表9列出了正弦绕组与普通 60° 相带绕组每一规格的实测效率提高值 $\Delta\eta$ (计及两种绕组效率设计值稍有差异这一因素)及杂散损耗下降的比值 ΔP_z 。

表9数据表明,仅采取正弦绕组这一单项措施可使效率平均提高0.494%;2极、4极和6极电机的杂散损耗平均下降30%左右。

由此可见,正弦绕组可使电机杂散损耗有效地降低30%左右,电机效率提高0.5%左右。同时为了简化工艺,当每极每相槽数 q 为奇数时,采用 $q\Delta = (q+1)/2$ 和 $q\lambda = (q-1)/2$ 排列的正弦绕组,且当 Δ 部分和 λ 部分绕组每槽导体数之比为 $\sqrt{3}$ 时,在定子绕组磁势中,虽 $v=6k\pm 1$ 次 ($k=1, 3, 5, \dots$) 的相带谐波并不能完全消除,但仍可获得满意的结果,这对批量生产具有较好的现实意义。

但是由于正弦绕组结构相对较复杂,从而增加了绕组下线和接头的工时。表10列出了55

表9 正弦绕组比普通60°相带绕组的效率提高值和杂散损耗下降值

功率 (千瓦)	极数	每极每相槽数	$\Delta\eta$ (%)	ΔP_z (%)
5.5	2	6	0.169	34.33
15	2	6	0.32	28.19
11	4	4	0.46	32.95
18.5	4	4	0.325	20.0
55	4	4	0.779	38.33
75	4	5		28.97
4	6	2	0.975	44.44
18.5	6	4	0.427	11.9

千瓦、4极同一规格的Y系列电机与高效率模样电机的工时比较。

表中数据表明，正弦绕组的绕线工时增加45%左右；嵌线工时增加20%；接线工时增加50%；其总工时约增加了26%。当然在操作技术进一步熟练后，所用的工时会有所降低。

表10 55千瓦4极电机的工时比较

电机	绕线工时 (分)	嵌线工时 (分)	接线工时 (分)	总工时 (分)	总工时增加 (%)
高效率模样电机	130	960	180	1270	25.7
Y系列电机	90	800	120	1010	

(四) 风扇结构试验验证

风扇结构与参数对电机性能，特别是对电机的温升和效率有直接关系。在全封闭自扇冷式异步电机中，大功率2极和4极电机的风摩耗占电机总损耗的比例较大（一般为20%左右），因此，在保证电机的温升前提下，尽量合理选择风扇的结构与参数，降低风扇的风耗，以此来提高电机的效率，这对高效率电机尤为重要。电机的风扇型式一般有双向离心式、单向轴流式、单向离心式（即单向后倾式）以及台扇式等四种。为了验证各种风扇结构对电机效率的影响，必须在保证电机相同温升的条件下，比较风耗以及电机效率的变化。为此，进行了风扇型式的对比试验验证。

1. 风扇结构型式对电机效率的影响

在YX250M-2和YX250M-4型55千瓦电机上进行了双向离心式、单向离心式、单向轴流式以及台扇式等四种类型风扇对比试验。这四种类型风扇各自配以合适的风罩，在同一台电机上进行测试。由于对比试验在同一台电机上进行，其外风阻可基本上认为相同，由此可认为风量相同时，电机的温升基本相同。表11列出了在YX250M-2型55千瓦2极电机上，四种类型风扇在风量相同时，电机效率的实测数据。

表中数据表明，在电机温升相同的条件下，与双向离心式风扇比较，轴流式风扇的功耗降低71.36%；台扇式风扇降低65.26%；单向离心式风扇降低16.2%。这四种风扇中，以轴

流式风扇的功耗为最小，台扇式次之，单向离心式居第三位，双向离心式风扇功耗最大。但

表11 电机风扇结构对电机效率的影响实测数据

风 扇 类 型	风扇功耗 (%)	机械耗 (%)	$\Delta\eta$ (%)
双向离心式*	100	100	0
单向离心式	83.8	92.86	0.14
台扇式	34.74	71.22	0.55
单向轴流式	28.64	64.39	0.596

*以双向离心式风扇的测试数据为基值(100%)

是电机的机械耗包括风扇的风耗以及轴承的摩擦损耗等，对于高效率电机，由于电机的热负荷相对较低，所需的风扇风量就相对较小。对于大功率电机，滚柱轴承的摩擦损耗相对较大，从而使配以这四种类型的风扇电机的机械损耗的变化范围缩小，并没有象风扇功耗的变化那么大。如表11所示，与双向离心式风扇电机相比较，轴流式风扇电机的机械耗仅下降35.61%；台扇式风扇电机下降28.8%；单向离心式风扇电机下降7.1%。对电机效率的影响为：轴流式风扇比双向离心式风扇提高0.596%，台扇式风扇比双向离心式风扇提高0.55%，单向离心式风扇比双向离心式风扇提高0.14%。四种类型风扇对YX250M-4 55千瓦4极电机效率的影响与YX250M-2这一规格的电机基本相同。

2. 风扇直径对风扇功耗的影响

在YX250M-2型55千瓦2极电机上对双向离心式风扇与轴流式风扇进行了不同风扇直径的对比试验。试验结果表明，轴流式风扇的风量与功耗随风扇外径的缩小而减小，反之亦然。

对于双向离心式风扇，当外径缩小13%左右时，风扇功耗减小40%，电机温升上升1.5k；对于轴流式风扇，当外径下降8%左右时，风扇功耗下降60%，电机温升上升3k。

通过本次风扇结构及参数的对比试验表明，单向轴流式风扇具有效率高，功耗低的优点，但由于在一个系列产品中每一规格电机的机械耗占总损耗的比例不尽相同，小功率电机的机械耗所占的比例相对较小，因此不宜采用单向轴流式风扇。对于大功率电机，例如H200及H200以上机座的2极电机，由于机械耗占总损耗的比例相对较大，采用轴流式风扇对提高电机效率有一定效果。但是必须指出，这种轴流式风扇只能单方向旋转，用户选用时必须予以注意。

(五) 冲片退火与转子槽绝缘工艺试验验证

降低电动机损耗，提高电机效率不仅与设计选材有关，而且与制造时选择的工艺参数和采取的工艺措施有关。选择合理的工艺参数与工艺措施是降低损耗，提高电动机效率的重要途径之一。

根据YX系列高效率模样电机试制任务书的规定，试制时的一般工艺仍按Y系列(IP44)所制定的工艺方法和要求进行。为了进一步从工艺上降低铁耗和杂散损耗，分别进行了定子冲片退火及转子冲片槽绝缘的工艺试验验证。

1. 冲片退火处理

小型异步电动机的铁耗占电动机总损耗的25~30%，在额定电压下，铁耗是一个不随电

机负载变化的近似恒定值，故降低铁耗具有重要意义。

电机钢片经冲剪加工后在切口处由于塑性变形而引起的残余应力，使钢片晶粒受到不同程度的破坏，这种破坏的区域分布在距切口边缘0.5—3毫米处，甚至更远一些。从而使钢片的矫顽力增加，磁感下降，引起电机铁耗中磁滞损耗增加。为了消除冲剪加工后的应力，恢复和改善磁性能，冲片应在高于硅钢的再结晶温度（即720—780℃）下进行退火处理。

本次对0.55千瓦4极、2.2千瓦4极、5.5千瓦4极以及30千瓦4极高效率模样电机进行了定子冲片退火工艺验证，且将硅钢条料（30×280毫米）与冲片同炉进行退火，其试验结果列于表12和13。

从表12、13数据可见，条料经退火处理可降低比铁耗4~14%左右，定子冲片经退火处理可降低电机空载铁耗10~20%，平均降低铁耗14.5%。

表12 30×280毫米条料退火对比试验值

序号	材料	比铁损(P10/50)瓦/公斤			比铁损(P15/50)瓦/公斤			备 注
		退火前	退火后	下降率%	退火前	退火后	下降率%	
1*	D32	1.174	1.061	10	2.74	2.63	4	真空退火，退火规范同冲片
2*	D32	1.35	1.16	14	3.085	2.84	7.7	真空退火
1*	D28	1.11	1.04	6.3	2.71	2.51	7.3	真空退火
2*	D28	1.275	1.092	14	2.91	2.639	10	真空退火
	W18G	1.70	1.575	8.5	3.92	3.49	11	真空退火
1*	W18G	1.94	1.86	4.1	4.23	4.0	5.4	真空退火
2*	W18G	1.30	1.15	11.50	2.90	2.77	4.5	真空退火
	D25	1.78	1.64	7.80	4.18	3.92	6.2	保护气氛
	W18G	1.83	1.64	10	4.07	3.63	10	保护气氛

表13 定子冲片对比试验值

功率(千瓦) 极 数	铁心材料	空载铁耗(瓦)			备 注
		未退火	退 火	下降%	
0.55/4P	W18G	57	51	10.52	真空退火
2.2/4P	W18G	76.25	66.75	12.45	真空退火
30/4P	D32	218	172.5	20.80	真空退火
55/4P	W18G	827.5	598	27.7	保护气氛

2. 铸铝转子槽绝缘处理

在斜槽的铸铝转子中，由导条之间的横向电流所引起的损耗和铁心之间的接触电阻大小有关，接触电阻愈大，横向电流损耗愈小。因此，进行铸铝转子槽绝缘处理可以稳定和降低异步电动机横向电流损耗，从而降低转子的杂散耗。

转子铸铝的方法，直接影响接触电阻的大小。采用离心铸铝法时，铁心需经500℃左右

预热，其槽部受到一定程度的氧化，故接触电阻较压力铸铝高，但由于压铸的劳动生产率高，所以目前电机厂广泛地采用压力铸铝法。

为了提高接触电阻值以降低杂散损耗，曾经研究过多种槽绝缘方法，如在转子冲片槽部涂高温涂料，对转子冲片进行磷化处理、硼砂处理、氧化处理以及加热急冷处理(脱壳)等，力求提高铸铝转子导条与铁心间的接触电阻，以减少横向电流所引起的杂散损耗。

本高效率模样电机试制时，对转子冲片采取了浸渍(浇灌)磷酸盐溶液、低温普通氧化及通蒸汽氧化膜处理三种槽绝缘方法。经试验验证和实际测量表明，经磷酸处理后的接触电阻较未经处理的接触电阻虽增加了2.7~6倍，但杂散损耗并未得到改善，这可能与浸渍磷酸盐溶液之前冲片油漆未经去除有关。

对30千瓦4极电机转子进行普通氧化和普通氧化加磷酸盐处理对比试验；对11千瓦4极电机进行通水蒸气氧化膜处理与不经处理的对比试验，其结果列于表14。

表14 高效率模样电机转子槽绝缘验证值

功率/极数	槽绝缘方法	杂散损耗(瓦)	下降百分数
11千瓦/4极	转子不处理	196.5	8.4%
	转子氧化膜处理	180	
30千瓦/4极	转子普通氧化处理	396.50	20.9%
	普通氧化加磷化处理	313.50	

由表14数据可见，对转子冲片进行槽绝缘处理，对控制和降低杂散损耗有一定的作用。但其工艺尚不够稳定，往往影响降低杂散耗的效果。

二、高效率模样电机试制结果与分析

高效率模样电机设计工作组按照 YX 系列三相高效率异步电动机模样电机设计任务书以及“试验验证大纲”的要求，试制了四个规格的电机电，取得了较好的结果。表15列出了模样电机的效率试验值。

表15 高效率模样电机的效率

功率 (千瓦)	极数	效率 η (%)			占容差范围 (%)
		试验值	试验值平均值	标准值*	
0.75	2	83.8~84.5	84.15	82	
0.55	4	78.35~79.31	78.83	79	5.397
2.2	4	85.61~86.56	86.085	86.5	3.074
5.5	2	88.52~89.09	88.805	88.5	
5.5	4	89.8~90.7	90.27	90.2	
4	6	87.93~88.16	88.045	88	
11	2	91.32~91.67	91.495	90.2	
15	2	91.05~91.35	91.198	91.5	23.7
11	4	90.61~91.67	91.268	91.3	