

# 符合 IEC 高效 (IE2)、超高效 (IE3) 效率等级的电动机降低损耗措施的研究\*

张 凤, 顾德军, 葛荣长, 吴艳红  
(上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063)

**摘 要:** 介绍了最新发布的 IEC60034-30“单速, 三相笼型感应电动机的能效分级 (IE 代码)”中电动机的效率水平和高效、超高效电动机的新的效率测试方法, 详细介绍了在新的效率测试方法下电动机降低各类损耗应采取的措施。

**关键词:** 高效; 超高效; 电机

**中图分类号:** TM301.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2009)10-0019-05

## Research for Reducing the Losses of High Efficiency (IE2) Electric Motors and Premium Efficiency (IE3) Electric Motors

ZHANG Feng, GU De-jun, GE Rong-chang, WU Yan-hong

(Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

**Abstract:** New issue of IEC60034-30 “Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code)” prescribe the efficiency level of the electric motors. The new methods of determining losses and efficiency from tests, and particularly describing measure for reducing the losses of electric motors with the new methods for determining losses and efficiency from tests are described.

**Key words:** high efficiency; premium efficiency; motor

## 0 引 言

国际电工委员会 (IEC) 最新发布的 IEC60034-30“单速, 三相笼型感应电动机的能效分级 (IE 代码)”标准的适用范围为: 额定电压 1 000 V 及以下, 输出功率 0.75 ~ 375 kW, 极数为 2、4、6 极, S1 连续工作制或 S3 断续工作制 (负载持续率为 80% 及以上), 规定将电动机能效分为 IE1、IE2、IE3、IE4 四个等级, 并分 50 Hz 和 60 Hz 两套体系, 分别用于电源频率为 50 Hz 和 60 Hz 的国家和地区。其中: IE1 为标准效率, IE2 为高效率, IE3 为超高效率, IE4 为超超高效率。

IEC60034-30 标准规定: 效率的测试方法要参照 IEC60034-2-1 (2007 版), 对于 IE2 及以上等级效率指标的电动机, 必须采用低不确定度的测试方法, 即美国的 IEEE112B 法。中国现行电动

机产品的性能测试方法中其杂散损耗采用 0.5% 估算或反转法测量, 这两种方法现已定为高不确定度的试验方法, 不符合 IEC 规定的高效、超高效电动机的效率测试方法要求。

为促进我国节能工作的开展, 与国际能效标准同步, 国家科技部 2008 年下达了科技支撑计划“高效、超高效电动机设计制造技术及测试技术研究”任务, 由上海电器科学研究所 (集团) 有限公司主持并组织行业有关骨干企业联合研制开发符合新的 IEC 能效标准的高效 (IE2)、超高效 (IE3) 电动机。本次研发的高效、超高效电动机采用低不确定度的测试方法——IEEE112B 法。

## 1 降低电动机损耗的措施

根据 IEC60034-30 标准的规定, 高效电动机比标准效率电动机平均效率提高接近 3%, 超高

\*上海市科委“电机系统节能工程技术研究中心”项目 (07d222102)

效电动机比标准效率电动机平均效率提高接近 5%, 效率提高的幅度很大。众所周知, 电动机的损耗主要由定子铜耗、转子铜耗、铁耗、机械损耗和杂散损耗组成, 高效、超高效电动机的开发, 必须从降低这五大损耗着手, 采取多种措施, 挖掘潜力, 降低损耗, 提高电动机的效率。

(1) 增加有效材料, 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效率的变化可近似表示为:

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

式中:  $\eta$ ——现电动机的效率;

$a$ ——电动机的长度比例系数;

$\eta_0$ ——原始电动机的效率。

从式 (1) 可见, 效率与有效材料长度的线性增长成反比。所以在效率相对较低的小功率电动机中, 损耗所占额定功率的比例大, 有效材料的增加能使效率值有较大提高, 而在效率相对较高的大功率电动机中, 损耗所占额定功率的比例小, 增加有效材料后效率值提高的幅度就不如小功率电动机那么明显。

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。在同样机座范围内, 美国电动机一般采用较大外径的定子冲片, 而我国现行的 Y、Y2、Y3 等系列电动机则出于考虑标准效率与合理的性能匹配、性价比及防爆电动机等结构派生的需要, 采用了现行外径的定子冲片。对于高效电动机, 考虑到效率水平和模具通用等因素, 三圆尺寸与 YX3 系列电动机相同。对于超高效电动机, 由于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, 为此部分机座选择了放大冲片外径的方案。

在有效材料的使用方面, 根据不同的效率指标, 高效、超高效电动机采取了不同的方案: 对于高效电动机, 大部分规格 IE2 的效率指标值与原 GB18613-2006 中的 2 级标准有所下降, 这主要是两种不同的效率测试方法对效率的影响不同, 根据试算, 部分规格电动机减少了有效材料的用量。对于超高效电动机, 由于效率指标提高较大, 为降低绕组损耗和铁心损耗, 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加了铁心长度, 部分机座放大了冲片外径, 从而相应增加了有效材料用量。

(2) 采用相对较高牌号的磁性材料, 降低铁耗。铁心材料的电磁性能对电动机的效率及其他性能影响较大, 同时铁心材料费用又是构成电动机成本的主要部分之一, 因此选用合适的磁性材料是设计和制造高效、超高效电动机的关键。采用何种牌号的冷轧硅钢片, 需要对电动机技术性能和用料水平及造价等综合研究后才能确定。为此, 对高效、超高效电动机进行了分析。

根据研制 YX3 系列的经验, 高效电动机为降低铁心材料的单位损耗值, 选用 P15/50 较低的材料将有助于电动机铁耗的下降。本系列设计时选择冷轧硅钢片 DW470 为导磁材料, 即 B50 1.67T, P15/50 4.5 W/kg, 可以满足性能要求。

结合分析超高效电动机的部分计算方案发现, 由于效率提高较大, 铁耗所占总损耗的比例相对较大, 部分规格电动机损耗分布情况见表 1。

表 1 部分规格电动机各种损耗的分布情况

规格	铜耗 / %	铝耗 / %	铁耗 / %	风磨耗 / %
H160-4P	31.76	21.57	28.05	6.99
H180-2P	24.60	15.37	25.00	19.46
H315-6P	30.42	16.63	25.69	13.44

从表 1 可以看出, 由于铁耗所占比例较大, 对于这次开发的超高效率电动机, 效率平均值比现有的标准效率电动机平均效率高接近 5%, 必须大幅降低铁耗。由于受到轴向尺寸和中心高的限制, 单纯的增加有效材料达不到大幅降低铁耗的目的, 因此必须选用更低损耗的冷轧硅钢片, 这对中、大功率规格的电动机尤为重要。

超高效电动机在试算中选用 2 种牌号的硅钢片进行对比, 冷轧硅钢片牌号为: 50WW470: B50 1.67(T), P15/50 3.57 W/kg; 50WW350: B50 1.67(T), P15/50 2.91 W/kg。

表 2 是试算的部分规格电机在电磁方案不变的情况下, 采用不同牌号冷轧硅钢片电动机损耗分布情况。

通过表 2 可以看出, 对于大功率电机采用损耗低的冷轧硅钢片, 铁耗下降明显, 如 200kW-2, 铁耗下降 306.8 W, 效率上升 0.17, 对于小功率电机采

用损耗低的冷扎硅钢片,铁耗下降较少,如 11 kW-6,铁耗下降 43.3 W,效率上升了 0.36%。因此,大规格电动机的电磁方案设计中,即使采用了低铁损的 WW470 硅钢片,一部分规格的铁损耗也超过了定子铜耗,成为电动机的最大损耗,将会导致有效材

料的使用量不断增加,而效率却上升缓慢。

为对比采用不同牌号冷扎硅钢片有效材料的使用情况,在效率不变、其他性能相近的情况下,进行了不同电磁方案的试算对比,表 3 为采用不同牌号冷扎硅钢片电动机有效材料使用情况。

表 2 采用不同牌号冷扎硅钢片电动机损耗的分布情况

规格	硅钢片牌号	效率 / %		定子铜耗计算值 / W	转子铝耗计算值 / W	铁耗计算值 / W
		标准值	计算值			
H315-2 200 kW	WW470	95.80	95.74	1 389.10	1 388.2	1 814.4
	WW350	95.80	95.91	1 384.20	1 383.2	1 453.6
H280-4 75 kW	WW470	95.00	95.00	975.60	539.8	996.7
	WW350	95.00	95.25	970.80	536.9	798.2
H280-6 55 kW	WW470	94.10	94.12	1 302.20	610.2	681.0
	WW350	94.10	94.36	1 296.20	607.0	545.3
H180-4 18.5 kW	WW470	92.60	92.69	541.17	318.3	258.1
	WW350	92.60	92.95	538.40	316.5	206.7
H160-6 11 kW	WW470	90.30	90.63	413.50	253.5	217.1
	WW350	90.30	90.99	410.96	251.5	173.8

表 3 采用不同牌号冷扎硅钢片电动机有效材料使用情况

规格	硅钢片牌号	效率 / %		铜重计算值 / W	铝重计算值 / W	铁重计算值 / W
		标准值	计算值			
H315-2 200 kW	WW470	95.8	95.91	141.170	26.891	1 393.10
	WW350	95.8	95.91	118.600	21.879	980.76
H280-4 75 kW	WW470	95.0	95.25	74.408	22.682	616.41
	WW350	95.0	95.25	65.078	18.257	457.91
H280-6 55 kW	WW470	94.1	94.36	42.373	17.701	469.25
	WW350	94.1	94.36	39.321	16.018	401.13
H180-4 18.5 kW	WW470	92.6	92.95	19.692	5.737	154.79
	WW350	92.6	92.95	18.388	5.264	137.59
H160-6 11 kW	WW470	90.3	90.99	12.274	3.771	133.74
	WW350	90.3	90.99	11.140	3.360	114.24

通过表 3 可以看出,大规格电动机的电磁方案设计中,采用不同牌号的冷扎硅钢片,材料的用量相差很大,如 200 kW-2,效率不变的情况下,采用 WW350 冷扎硅钢片后,铜下降 22.57 kg,铝下降 4.994 kg,铁下降 412.34 kg。在小规格电动机的电磁方案设计中,采用不同牌号的冷扎硅钢片,材料的用量相差较小,如 11 kW-6,效率不变的情况下,采用 WW350 冷扎硅钢片后,铜下降 1.134

kg,铝下降 0.411 kg,铁下降 19.5 kg,有效材料减少的不明显。

通过样机试算结果对比,在满足性能要求的同时,综合分析电动机的性价比,暂时确定超高效电动机冷扎硅钢片牌号为: H80 ~ H180 选用 50WW470, H200 ~ H355 选用 50WW350,不排除大功率电机采用更高牌号的冷扎硅钢片的可能性。通过系列电机试算表明,该方案在满足电动机性

能、温升及节材等方面有较好的效果,是可行的。

(3) 合理控制电动机温升。

本次高效、超高效电动机的测试方法采用被 IEC 定义为低不确定度的试验方法——IEEE112B 法, IEEE112B 法规定杂散损耗采用实测,可以真实反映电动机制造和设计的水平,同时把温升引入到定、转子损耗的计算中,充分考虑了温升对效率的影响。

这与现有产品采用的测试方法有很大的区别,目前电动机主要采用 GB/T1032-2005“三相异步电动机试验方法”中的 E 法进行检测,其对定、转子损耗采用规定基准温度 130(B)级 95、155(F)级 115 的测试方法。

IEEE112B 法对定、转子损耗和杂散损耗的规定如下。

定子绕组  $I^2R$  损耗:

$$P_{cu1} = 1.5 I_1^2 R_s \quad (2)$$

$$R_s = R_N \frac{K_1 + N - a + 25}{K_1 + N} \quad (3)$$

式中:  $I_1$ ——负载试验测得的线电流的平均值, A;

$R_s$ ——折算到规定温度时的绕组端电阻;

$R_N$ ——额定负载热试验后测得的端电阻平均值;

$K_1$ ——导体材料在 0 时电阻温度系数的倒数;

$N$ ——额定负载热试验测得的绕组最高温度, ;

$a$ ——热试验环境温度, 。

转子铜耗的计算公式为:

$$P_{cu2} = (P_1 - P_{cu1} - P_{Fe}) S_s \quad (4)$$

$$S_s = S \frac{K_1 + N - a + 25}{K_1 + t} \quad (5)$$

式中:  $P_1$ ——输入功率, W;

$P_{cu1}$ ——规定温度下定子绕组  $I^2R$  损耗, W;

$P_{Fe}$ ——铁耗, W;

$S_s$ ——规定温度下的转差率;

$S$ ——负载试验时的转差率;

$K_1$ ——导体材料在 0 时电阻温度系数的倒数;

$N$ ——额定负载热试验测得的绕组最高温度, ;

$a$ ——热试验环境温度, ;

$t$ ——试验时各负载点的定子绕组温度, 。

通过式 (2) ~ (5) 可看出, 定、转子铜耗与电动机温升成正比, 随着温升的升高, 损耗增加, 效率降低, 同理, 随着温升的降低损耗减小, 效率增大。

试验方法对高效、超高效电动机设计的影响。通过以上分析可以看出, 根据目前的测试方法, 在其他性能指标合格的情况下, 对于温升不高的电动机, 可以通过减小风扇, 降低机械损耗, 提高电动机的温升, 减小温升裕度。由于定、转子损耗均换算到电阻基准温度 130(B)级 95、155(F)级 115 时进行, 与电动机的实际温升无关, 这样不但可以提高电动机的效率, 还可以降低通风噪声。

如果采用 IEEE112B 法, 设计时必须考虑到电动机的温升对效率的影响, 尽量做到温升与风量的合理匹配, 使定转子损耗与机械损耗的关系达到最佳, 不能单纯采用降低机械损耗的方法来提高电动机效率。

因此, 对于电机设计来说, 尤其是小功率的电动机, 由于温升较低, 可以采用低的电阻基准温度进行计算, 贴近试验值, 对于大功率电动机, 则必须控制温升不能太高, 否则会导致效率大幅下降。

试验验证。针对 IEEE112B 法的特点, 试制了 4 台模样电机, 进行温升对效率, 定、转子铜耗影响的对比试验, 采取更换外风扇来改变电动机风量的方法, 以改变电动机的温升, 采用 IEEE112B 法进行试验, 实测数据见表 4。

表 4 温升对比试验数据

型号	试验条件	效率 %	定子铜耗 /W	转子铝耗 /W	机械损耗 /W	温升 /K
90S-2	无外风扇	85.54	80.43	61.29	12.31	56.5
1.5 kW	有外风扇	86.69	70.22	55.16	14.8	37.9
90S-6	无外风扇	77.25	101.22	64.50	3.14	61.9
0.75 kW	有外风扇	78.16	94.37	57.70	3.47	44.3
112M-6	原外风扇	83.32	200.21	87.72	15.76	57.6
2.2 kW	增大外风扇	83.53	191.38	85.26	24.66	46.1
132M-4	原外风扇	87.44	356.36	222.77	30.31	72.0
7.5 kW	增大外风扇	87.88	332.13	214.98	53.97	58.1

通过表 4 可以看出, 随着风量增大, 电动机温升降低, 定、转子损耗随之降低, 定、转子损耗降低

幅度大于机械损耗增加的幅度,效率基本上是提高的。由于温升受使用材料的多少和机械损耗的影响,在材料不变的情况下,通过增大冷却风量降低温升,随着温升的下降,定、转子铜耗下降,机械损耗上升,如果定、转子铜耗下降大于机械损耗上升,效率就会提高,反之,效率就会下降。因此电动机材料用量、温升与机械损耗合理匹配的研究,对提高高效、超高效电动机的效率是十分关键的。

(4) 降低杂散损耗的措施。杂散损耗是指由气隙磁场高次谐波所产生的负载杂散损耗,高效、超高效电动机采用低不确定度的测试方法——IEEE112B法,实测杂散损耗,不同于现行电动机产品以输入功率的 0.5% 估算杂散损耗的方法,这就要求电动机生产厂家更加重视电动机设计与制造质量,同时寻求更多的降低杂散损耗的措施。

改变槽配合,降低杂散损耗。负载杂散损耗主要由表面损耗、横向电流损耗、脉振损耗、高频损耗、漏磁通损耗等组成,对不同功率的低压三相异步电动机负载杂散损耗的试验分析表明:表面损耗、脉振损耗和横向电流损耗对负载杂散损耗有主要影响。

当谐波磁场对铁心表面发生相对运动时,就在铁心钢片的表面层附近产生涡流损耗和磁滞损耗,因此称为表面损耗,其中主要是涡流损耗。这部分损耗与谐波磁场的幅值和频率有关,幅值和

频率受槽数多少影响,因此这部分损耗与定、转子槽数有关,即:

$$P_B \propto 1/Q^m, m = 1 \sim 1.5 \quad (6)$$

式中:  $Q$ ——定、转子槽数。

在异步电动机中,当气隙谐波磁场与相对部分的齿部发生相对位移时,齿部磁密的大小要发生周期性的脉动。当转子齿与定子谐波磁场发生相对运动时,转子齿体中的磁通就在此最大值与零之间脉动,因而产生涡流及磁滞损耗,称为齿部脉振损耗。同理,转子谐波磁通在定子齿体中产生齿部脉振损耗。脉动幅值取决于谐波的波长与对应的齿节距的比例,这一比例与定、转子槽数的相对值,即槽配合有关,齿部脉振损耗随槽配合变化的近似关系有:

$$P_{\text{齿}} \propto \left( \frac{Q_1}{Q_2} \sin \frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 \quad (7)$$

式中:  $Q_1$ ——定子槽数;

$Q_2$ ——转子槽数。

由式(6)、(7)可知,表面损耗随槽数的增加和近槽配合而减小。

本次试制了两个规格共 8 台模样电机,同一规格的榜样电机采用不同槽配合,并按 112B 法测试杂散损耗值,具体规格和试验数据见表 5。

表 5 不同槽配合的杂散损耗实测值对比

编号	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>
规格	160M-4 11 kW	160M-4 11 kW	160M-4 11 kW	160M-4 11 kW	160L-6 11 kW	160L-6 11 kW	160L-6 11 kW	160L-6 11 kW
槽配合	36/28	36/28	48/38	48/38	36/28	36/28	54/44	54/44
槽数比	1.286	1.286	1.263	1.263	1.286	1.286	1.227	1.227
杂散损耗 /W	134.1	139.7	129.7	104.9	258.9	254.6	104.7	108.5

表 5 表明:同一规格的电动机采用增加槽数和近槽配合以后,杂散损耗有所下降,160L-6 杂散损耗下降了 58%,160M-4 杂散损耗下降了 14%。由于影响杂散损耗的因素很多,导致样机杂散损耗下降幅度不同。总的来说,通过多槽、近槽配合,可以达到改善气隙磁场波形,有效地减少电动机的表面损耗和脉振损耗的作用。

增大电动机的气隙,降低杂散损耗。电动机的表面损耗也与谐波磁场的幅值和频率有关,适当地增大气隙长度,可以有效地削弱谐波磁场

的幅值,降低表面损耗。这部分损耗与气隙的关系为:

$$P_B \propto k/l^{1.5} \quad (8)$$

式中:  $k$ ——分别为系数和气隙长度。

由式(8)可知,适当增大电动机的气隙,减小定、转子谐波磁通的幅值,可以有效地减少杂散损耗。本次试制了两个规格的榜样电机,同一规格的榜样采用不同气隙值,并按 112B 法测试杂散损耗值,具体试验数据见表 6。

(下转第 45 页)

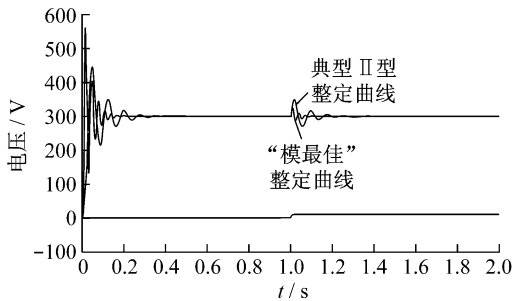


图 6 两种电压调节器设计方案阶跃响应曲线  
数分子中有一比例微分项,它使相角裕量减小,增大了超调量。因此可在系统前加一个给定滤波器,以抵消闭环传递函数分子中的微分项,减小超调量。加入给定滤波器前后系统的响应曲线见图 7。

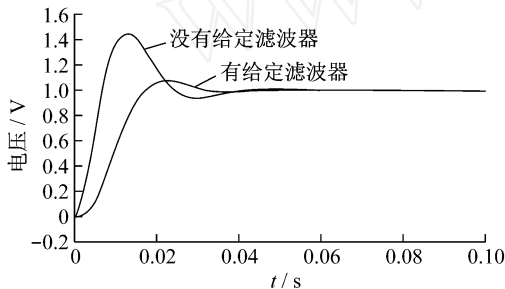


图 7 加入给定滤波器前、后的系统响应曲线

(上接第 23 页)

表 6 气隙对比试验数据

型号	试验条件	气隙 /mm	效率 /%	功率因数	杂散损耗 /W
160M-4 11 kW 380 V	原气隙	0.50	91.20	0.857	104.9
160M-4 11 kW 380 V	增大气隙	0.55	91.31	0.84	100.7
160L-6 11 kW 380 V	原气隙	0.40	90.20	0.800	108.5
160L-6 11 kW 380 V	增大气隙	0.45	90.46	0.790	102.3

表 6 数据表明:放大气隙后,杂散损耗有所下降,效率有所上升,其中 160M-4 效率上升了 0.11%,160L-6 效率上升了 0.26%。这主要是放大气隙可以使定、转子谐波磁通幅值减小,杂散损耗下降。但放大气隙使电动机的激磁电流增大,进而使功率因数下降,这需要综合考虑效率与功率因数之间的关系。采用冲出气隙工艺可以减小转子表面高频损耗,降低杂散损耗,但这对工艺要求比较严格,目前该方案的可行性还需要深入研究。

## 2 结 语

在高效、超高效电机的前期研制过程中,联合

## 4 结 语

通过仿真试验可知,三相电压型 PWM 整流器电压内环采用典型 II 型系统调节方式进行的调节器参数整定对系统电流具有较快的跟踪能力,而电压外环通过“模最佳”整定法得到的系统响应不仅能够满足系统设计要求,而且比采用典型 II 型系统整定法得到的调节系统具有更良好的抗扰动性能,动态响应速度也得到了明显改善。

### 【参考文献】

- [1] Ye Y, Kazerani M, Quintana V H. A novel modeling and method for three-phase PWM converters[J]. PESC 2001 IEEE 32 Annual, 2001 (1): 102-107.
- [2] 李友善. 自动控制原理 [M]. 北京:国防工业出版社, 1980.
- [3] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [4] 魏泽国. 可控硅串级调速的原理及应用 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1985.

收稿日期: 2008-05-29

设计工作组进行了模样电机的试制和多项关键技术的研究,整理了很多有价值的数据和资料,为联合开发系列产品打下了良好基础,在系列电机的研发过程中,通过对电动机各种损耗降低措施的综合运用,在设计中可大幅降低电动机的各种损耗,有效提高电动机的效率,也有利于相对减少有效材料的使用,降低成本,提高产品的性价比。

### 【参考文献】

- [1] IEC60034-30, 单速, 三相笼型感应电动机的能效分级 [S]. 2009.

收稿日期: 2009-08-26