

IE5 能效等级三相异步电动机系列产品开发

王鸿鹄^{1*}, 郑昭春², 李光耀¹

(1. 上海电器科学研究院, 上海 200063;

2. 北京国科军友工程咨询有限公司, 北京 100086)

Development of IE5 Energy Efficiency Grade Three-Phase Asynchronous Motor Series Products

WANG Honghu^{1*}, ZHENG Zhaochun², LI Guangyao¹

(1. Shanghai Research Institute of Electrical Apparatus, Shanghai 200063, China;

2. Beijing Guoke Junyou Engineering Consulting Co., Ltd, Beijing 100086, China)

Abstract: [Objective] The IE5 energy efficiency class is currently the highest global standard for low-voltage three-phase asynchronous motors, corresponding to the 1st energy efficiency level in the national standard GB/T 18613—2020. In response to the lack of unified design for IE5 energy efficiency series motors in China, the Shanghai Electrical Apparatus Research Institute has organized the development of the YE5 series (IP55) three-phase asynchronous motor to promote the advancement of 1st energy efficiency motors. The IE5 energy efficiency is the highest global standard, equivalent to the 1st energy efficiency level in GB/T 18613—2020. [Methods] A working group was formed by uniting leading manufacturers and upstream/downstream enterprises. Based on the joint design of IE2 efficiency motors, energy-saving technologies such as unequal-slot design, stamped air-gap process, and low-pressure aluminum die-casting were comprehensively applied, significantly reducing additional motor losses and thereby improving motor efficiency. [Results] The complete product series of low-voltage three-phase asynchronous motors was developed through breakthroughs and applications of key technologies. Prototype testing of 30 units across 16 specifications demonstrated that all motor efficiencies met the IE5 efficiency limits specified in GB/T 18613—2020, confirming the design's validity. [Conclusion] This project achieves the first unified industry design for a series of 1st energy efficiency low-voltage three-phase asynchronous motors in China, filling a product gap and providing crucial practical support for the energy efficiency upgrade of the motor industry.

Key words: IE5; three phase asynchronous motor; YE5 series; GB/T 18613—2020; energy-saving

摘要:【目的】IE5 能效等级是目前全球统一的低压三相交流异步电动机最高能效等级,对应国家标准 GB/T 18613—2020 中的 1 级能效。针对国内 IE5 能效等级系列三相异步电动机缺乏统一设计的现状,为推进 1 级能效电机的发展,上海电器科学研究院组织完成了 YE5 系列(IP55)三相异步电动机产品开发。IE5 能效为全球最高等级,对应国标 GB/T 18613—2020 中的 1 级能效。【方法】联合行业骨干生产企业及上下游企业组成工作组,在 2 级能效电机联合设计基础上,综合应用降耗技术,如大小槽设计、冲剪气隙工艺及低压铸铝等,显著降低电机附加损耗,从而提升电机效率。【结果】通过关键技术的攻关与应用,完成了低压三相交流异步电动机全系列产品设计。16 个规格 30 台样机的试制与测试表明,电机效率均达到 GB/T 18613—2020 中 1 级能效限值要求,验证了设计的有效性。【结论】本项目实现了国内首个 1 级能效低压三相异步电动机系列化行业统一设计,填补了产品空白,为电机行业能效升级提供了重要实践支撑。

关键词: IE5; 三相异步电动机; YE5 系列; GB/T 18613—2020; 降耗

0 引言

自 2008 年国际电工委员会 IEC 首次发布交流三相异步电动机的能效分级标准以来,国际国内标准也在同步更新,推动电机效率不断提升。

(1)2008 年,IEC 发布了 IEC 60034-30^[1],首次将单速三相笼型感应电动机能效统一划分 IE1(标准效率)、IE2(高效率)及 IE3(超高效率)3 个等级。

(2)2014 年,IEC 修订发布了 IEC 60034-30-1:2014^[2],新增 IE4 能效等级,并提出了 IE5 能效

的概念,但并未给出IE5的效率值。标准将能效等级扩展为IE1至IE5,并给出不同类型电机的能效潜力。对于三相异步电动机,IE1~IE3为“是”,IE4为“困难”,IE5为“否”。

(3) 2016年,IEC发布了IEC 60034-30-2:2016^[3],为交流调速电机提供能效计算依据,并首次给出IE5效率的基准值。

(4) 2025年,基于全球特别是我国IE5全系列产品的开发成果,IEC修订了IEC 60034-30-1:2014,正式增加IE5能效等级(沿用2016年基准值),并调整电机的能效潜力评估:IE4为“是,困难”,IE5为“非常困难”^[4]。

我国中小型低压三相异步电动机能效标准也在不断更新,GB/T 18613—2020《电动机能效限定值及能效等级》^[5]已经与IEC最新标准接轨:3级能效对应IE3,2级能效对应IE4,1级能效对应IE5,如表1所示。

表1 IEC和GB能效等级与产品对应关系

Tab.1 Correspondence between IEC and GB energy efficiency grades and products

IEC 60034-30-1:2025 ^[4]	GB/T 18613—2006	GB/T 18613—2012	GB/T 18613—2020	对应产品
IE5	/	/	1级	YE5
IE4	/	1级	2级	YE4
IE3	1级	2级	3级	YE3
IE2	2级	3级	/	/
IE1	3级	/	/	/

自上世纪八十年代起,上海电器科学研究所作为行业归口单位,持续组织并主导行业联合设计,先后推动开发了Y、Y2、Y3、YX3、YE2、YE3和YE4系列共七代三相异步电动机产品,为我国该类型电机的生产制造与推广应用做出了重要贡献。随着国际上IE5能效等级的推出,研究院积极与国际标准接轨,紧密跟随国家能效政策导向,响应行业与市场需求,着力开展新一代IE5能效电机系列产品的研发工作。

1 关键技术研究与应用

自IEC能效分级标准发布以来,国内先后开发了IE2、IE3、IE4效率系列产品,通过低损耗硅钢片、增大冲片外径、加长铁心、低损耗风扇和轴

承等成熟技术实现。然而,IE5效率需在IE4效率基础上,降低20%损耗,且效率提升0.4~3.6个百分点,传统的设计和工艺技术已无法满足,必须研究开发新结构和新工艺。

1.1 开展正弦不等匝绕组和大小槽配合技术研究

正弦不等匝绕组通过降低电机气隙磁场谐波含量,能有效减少磁密高次谐波引起的附加损耗,从而提升电机效率。然而,传统正弦不等匝绕组也存在槽满率分布不均衡的问题,影响硅钢片的利用效率与绕组的散热性能。因此,在IE4及以下能效等级的电机中,该绕组仅应用于部分规格,且往往为平衡槽满率而牺牲了其抑制谐波的部分效果,导致绕组优势未能充分发挥。

本次联合设计通过引入大小槽结构,有效解决了槽满率均衡问题,充分发挥了绕组在降低谐波损耗方面的潜力。为验证该设计的实际效果,项目试制了不等匝绕组与普通叠绕组的对比样机,并开展了对比试验,相关测试数据如表2所示。

表2 普通绕组和不等匝绕组附加损耗对比

Tab.2 Comparison of additional losses between conventional windings and unequal-turn windings

规格	效率/%	附加损耗/W	绕组方式
200L2-2 37kW	94.32	470	双层叠绕(样机1)
	94.59	379	双层叠绕(样机2)
	94.83	286	不等匝(样机1)
	95.34	231	不等匝(样机2)
200L-4 30kW	95.45	230.6	双层叠绕(样机1)
	95.3	267.3	双层叠绕(样机2)
	95.27	154.6	不等匝(样机1)
	95.4	161.8	不等匝(样机2)
280S-4 75kW	96.37	481.9	双层叠绕(样机1)
	96.64	344.7	双层叠绕(样机2)
	96.72	333.8	不等匝(样机1)
	96.68	271.1	不等匝(样机2)

由表2可知,三个规格的不等匝绕组的附加损耗分别降低39.1%、36.5%和26.8%,效果显著。

为了解决不等匝绕组因各线圈匝数不同而导致的槽满率不均及硅钢片利用率偏低的问题,工作组依据匝数配比特点,设计了适配大小槽的冲

片结构,具体方案如图 1 所示。

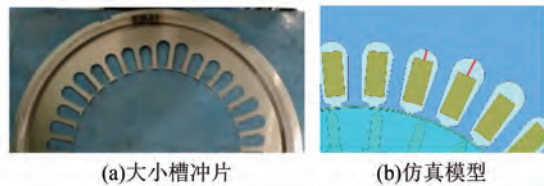


图 1 定子冲片大小槽设计

Fig. 1 Stator core design with different slot sizes

仿真分析表明,大小槽设计能够提升效率 0.02~0.05 个百分点,具有一定的降耗效果。此外,相同机座号和极数下,不同功率的不等匝绕组匝数比相近,因此一套大小槽冲片可适配多种不等匝绕组方案。

1.2 开展冲剪气隙工艺和闭口槽的研究

异步电机转子表面加工过程中,会导致转子叠片之间粘连,从而产生片间电流,增加电机损耗。采用直接冲剪气隙工艺可从源头削减片间电流,但因其工艺复杂,未在 IE4 及以下能效电机中应用。为实现 IE5 能效,工艺升级已成为关键路径。

为验证冲剪气隙工艺效果,共试制了 4 台 H100L1-4 规格样机,其中两台采用冲剪工艺,另两台沿用传统车削工艺,具体测试结果如表 3 所示。由表 3 可知,采用冲剪气隙工艺样机的附加损耗显著降低,证明该工艺在抑制附加损耗方面具有明显优势。

表 3 冲剪气隙工艺样机测试结果

Tab. 3 Test results of prototypes with stamped air gap technology

加工工艺	附加损耗/W
冲剪气隙工艺样机	18.9
	17.1
加工转子表面样机	38.6
	42.4

异步电机中,转子半闭口槽在铸铝过程中会导致铝液流入转子表面,而冲剪气隙工艺不能加工转子表面,因此无法处理残留铝液,故采用冲剪气隙工艺必须搭配转子闭口槽设计。

为了验证闭口槽结构能够有效降低气隙磁密谐波含量,工作组通过电磁场有限元计算分析,得到了半闭口槽和闭口槽的径向磁密分布,电机槽

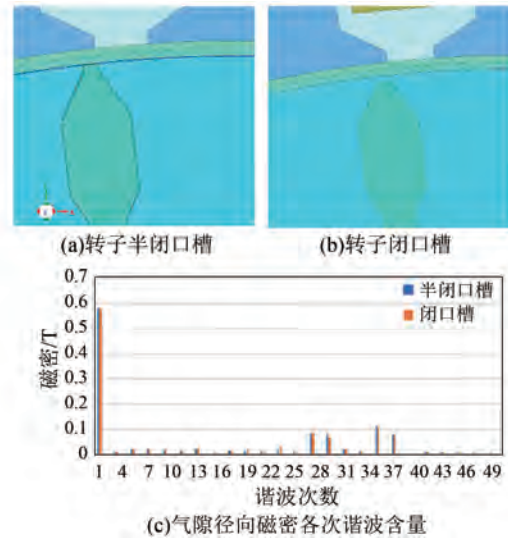


图 2 半闭口槽和闭口槽对比

Fig. 2 Comparison between semi-closed slot and closed slot

口结构和气隙径向磁密各次谐波含量如图 2(c) 所示。

由图 2 可知,前 50 次谐波中,半闭口槽波形畸变率为 33.5%,闭口槽为 32.0%,表明闭口槽在降低气隙磁密谐波方面具有优势。

YE5 电机广泛采用闭口槽设计。由于不同硅钢片的厚度和硬度存在差异,其桥拱冲剪难度不一,因此桥拱厚度通常控制在 0.2~0.5 mm,以兼顾性能与工艺可行性。

1.3 转子铸铝和脱壳工艺的研究

铸铝品质是影响电机效率的重要因素,主要体现在以下方面:(1)转子导条的注满率:低注满率不仅增加了转子铝耗,而且可能造成转子相电阻不平衡,带来额外的附加损耗;(2)铸铝时的充型压力:低充型压力能够降低铸铝转子的片间夹铝,配合脱壳工艺效果更加明显,增大转子导条和铁心的接触电阻能够减少横向电流,降低附加损耗。

以 H225M-4 样机为研究对象,对比了普通压力铸铝与低压铸铝加脱壳工艺的效果,测试结果如表 4 所示。

由表 4 可知,低压铸铝结合脱壳工艺可有效降低电机附加损耗。尽管该工艺在传统电机中因生产效率限制应用较少,但对于 IE5 等高效电机,其提升铸铝品质的优势使其成为关键降耗工艺。本次联合设计采用该工艺,并配合其他降耗

措施,大幅降低了电机的损耗,并在此基础上完成了YE5系列(IP55)三相异步电动机产品的开发。通过16个典型规格、30台电机的试制与优化,所有产品均达到IE5能效限值。

表4 低压铸铝和普通压力铸铝样机测试结果

Tab. 4 Test results of low-pressure die-casting aluminum and ordinary pressure die-casting aluminum prototypes

效率/%	附加损耗/W	铸铝工艺
94.20	345.0	低压铸铝、脱壳
93.90	363.1	压力铸铝

2 主要技术指标

开发的YE5系列(IP55)三相异步电动机主要技术指标如下:能效等级为GB 18613—2020中的1级能效(IE5能效),机座号覆盖H80~H355,其中H80~H112采用铸铜转子,H132~H355采用铸铝转子。极数范围为2、4、6、8极,功率覆盖0.55~315 kW,交流电压为380 V,频率为50 Hz,防护等级为IP55,采用IC411冷却。安装尺寸与YE3、YE4系列三相异步电动机相同,外形尺寸在YE4基础上增加了15%,小规格加长幅度较大。电机总长限值如表5所示。

表5 YE4、YE5系列电机长度限值对比

Tab. 5 Comparison of length limits for YE4 and YE5 series motors

机座号	YE4 总长限值/mm	YE5 总长限值/mm	加长百分比/%
80M	305	390	28
90L	390	470	20
100L	435	508	16
112M	440	530	20
132M	550	635	15
160L	760	835	10
180L	800	885	10
200L	860	860	-
225M	860	1 010	17
280M	1 040	1 140	9
315L	1 320	1 420	7
355L	1 530	1 640	7

起动性能:YE5系列电机在满足GB/T 21210—2016标准的前提下,适当增加了起动电流倍数、降低了起动转矩倍数。

根据GB/T 21210—2016标准对NE高能效设计电机的堵转功率的规定,放宽起动电流倍数时会产生如下影响:电机起动电流倍数标准值提高,额定电流值相应降低,从而提升功率因数标准值。为平衡功率因数和起动电流对设备的影响,设计中对2极电机部分规格的起动电流倍数和功率因数标准值进行协同调整,如表6所示。

表6 起动电流倍数和功率因数调整对比

Tab. 6 Comparison of starting current multiples and power factor adjustments

规格	起动电流倍数		功率因数	
	YE4	YE5	YE4	YE5
H80M1-2	8.5	10.0	0.83	0.82
H90L-2	9.0	9.5	0.86	0.86
H112M-2	9.5	10.0	0.88	0.88
H160M2-2	9.5	9.7	0.89	0.88
H200L2-2	9.0	9.1	0.89	0.88
H250M-2	9.0	9.1	0.89	0.88

3 样机试制与测试

试制16个规格30台YE5样机,所有样机的温升、功率因数和起动性能均符合标准要求,其他性能指标也均达到设计预期。效率测试数据如表7所示,其中,“1”表示效率合格,“2”表示效率在限制范围内。

由表7可知,6个规格的效率达到标准值,7个规格的效率在限值范围内,剩余3个规格经过优化后也满足了限值要求。这一结果验证了联合设计的合理性。

4 成本分析

综合考虑铜、铁、铝等主要材料成本,以及机座、端盖、轴承盖、轴承、接线盒、风扇和风罩等结构件成本,选取大、中、小3个典型规格,对YE5系列电机和YE4系列电机进行对比。结果显示,YE5系列整机材料成本增加34~39%,如表8所示。

表 7 样机效率测试数据

Tab. 7 Efficiency test data of the prototypes

规格	效率标准值/ 限值(%)	样机效率 实测/%	效率达 成情况
YE5-132S1-2	92.6/91.49	93.52	1
		94.42	1
		94.04	1
YE5-132S-4	93.4/92.41	94.25	1
		92.59	优化后 2
YE5-132M-4	94/93.1	94.48	2
		94.52	2
		94.48	2
YE5-160L-2	94.9/94.14	94.57	2
		94.39	2
		94.33	2
		94.95	1
YE5-160M-4	94.6/93.79	94.95	1
YE5-160L-4	95.1/94.36	94.53	2
YE5-180M-4	95.3/94.6	94.93	2
		94.55	1
YE5-180L-6	94.3/93.44	94.93	1
		95.14	2
YE5-200L1-2	95.5/94.82	95.01	2
		94.67	优化后 2
YE5-200L2-2	95.8/95.17	95.76	2
		95.37	2
YE5-225M-4	96.3/95.74	95.21	优化后 2
		95.33	1
YE5-225M-6	95.3/94.6	95.02	2
		95.9	2
YE5-250M-2	96.2/95.63	95.74	2
		95.18	2
YE5-250M-6	95.6/94.94	96.35	优化后 2
		96.37	优化后 2
YE5-280M-4	96.9/96.44	96.99	1

5 结语

2022 年 2 月至 2025 年 3 月,上海电器科学研究所联合国内 20 余家电机生产骨干企业、零部件和原材料生产企业,共同成立了 IE5 效率(1 级能效)YE5 系列(IP55)三相异步电动机联合开发工作组。通过对关键技术的攻关,完成了全系列产

品的电磁和结构设计,并试制 16 个规格 30 台电机,经优化测试后均满足 IE5 能效标准,同时制订了《YE5 系列(IP55)三相异步电动机技术规范(机座号 80~450)》。

表 8 YE4 和 YE5 电机典型规格成本对比

Tab. 8 Comparison of typical specifications and costs of YE4 and YE5 motors

规格	铜重/kg	铝重/kg	铁重/kg	结构 件/元	成本增 加/%
YE5-132M-4	18.69	4.67	94.06	411.42	34%
YE4-132M-4	13.14	2.89	75.70		
YE5-200L1-2	38.68	7.74	234.09	1 194.77	35%
YE4-200L1-2	24.47	5.96	196.64		
YE5-315S-6	85.56	36.79	909.45	3 776.71	39%
YE4-315S-6	66.14	23.69	589.08		

注:表中成本按铜 75 元/kg、铝 18 元/kg、铁 10 元/kg 单价计算,实际成本将随材料价格波动进行相应调整。

YE5 系列产品填补了国内 1 级能效三相异步电动机系列产品的空白,对完善电机节能体系、推动超高效率电机产业化具有重要意义。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

王鸿鹄、李光耀进行了关键技术研究、系列产品方案设计、论文撰写,李光耀进行了样机试制与测试的统筹与管理,王鸿鹄、郑昭春和李光耀参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The key technology research, series product design, and paper writing were conducted by Wang Honghu and Li Guangyao. The coordination and management of prototype trial production and testing were carried out by Li Guangyao. The review and revision of the paper were participated in by Wang Honghu, Zheng Zhaochun, and Li Guangyao. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参 考 文 献

- [1] IEC 60034-30. Rotating electrical machines-Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code) [S]. Geneva: IEC, 2008.
- [2] IEC 60034-30-1:2014. Rotating electrical machines-Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code) [S]. Geneva: IEC, 2014.
- [3] IEC 60034-30-2:2016. Rotating electrical machines-Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code) [S]. Geneva: IEC, 2016.
- [4] IEC 60034-30-1:2025. Rotating electrical machines-Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code) [S]. Geneva: IEC, 2025.
- [5] GB/T 18613—2020. 电动机能效限定值及能效等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

GB/T 18613—2020. Minimum allowable values of energy efficiency and values of efficiency grades for motors [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

收稿日期:2025-09-28

收到修改稿日期:2025-12-22

作者简介:

王鸿鹄(1981—),男,硕士,高级工程师,研究方向为异步电机、永磁电机及特种电机产品的开发, wanghonghu1981@163.com;

* 通信作者:王鸿鹄(1981—),男,硕士,高级工程师,研究方向为异步电机、永磁电机及特种电机产品的开发, wanghonghu1981@163.com。