

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

徐崇巍, 潘文文.
IE5能效等级中小型三相异步电动机效率
测试方法对比分析.
电机与控制应用, 2022, 49(3): 109.

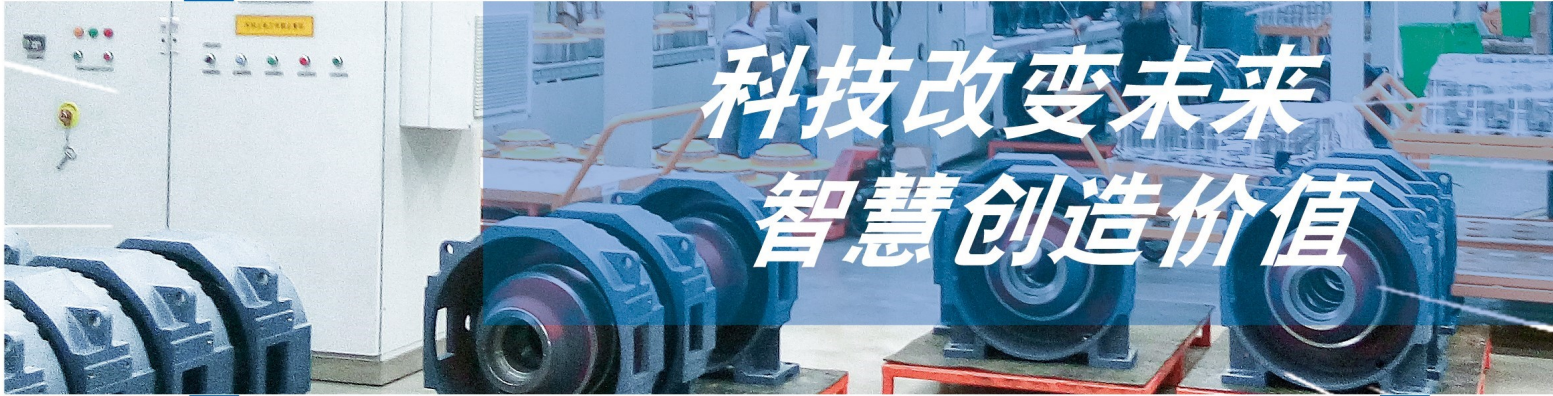


SEARI
上电科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



科技改变未来
智慧创造价值

· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

IE5 能效等级中小型三相异步电动机效率 测试方法对比分析*

徐崇巍, 潘文文

[上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063]

摘要: 以 IE5 能效等级为目标, 利用铸铜转子技术、低压不等匝绕组技术、低损耗硅钢材料等技术进行设计, 已经研制出三相异步电动机测试样机。为准确测量三相异步电动机现场运行效率, 主要依据 GB/T 1032—2012《三相异步电动机试验方法》, 采用 A 法、B 法和 E1 法对样机进行能效测试比对, 研究并分析 3 种测试方法的差异。测试的 3 个系列 IE5 能效等级样机中, B 法计算效率均能达到 GB 18613—2020《电动机能效限定值及能效等级》中 1 级能效的要求。

关键词: 三相异步电动机; 效率; IE5

中图分类号: TM306 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)03-0109-05

doi: 10.12177/emca.2021.196

Comparative Analysis of Efficiency Test Methods for Small and Medium Sized Three-Phase Asynchronous Motors with IE5 Energy Efficiency Grade*

XU Chongwei, PAN Wenwen

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

Abstract: Three-phase asynchronous motor test prototypes with IE5 energy efficiency grade have been designed and developed by using cast copper rotor technology, low-voltage unequal turn winding technology, low loss silicon steel material and other technologies. In order to accurately measure the field operation efficiency of three-phase asynchronous motors, the energy efficiency comparison test of the developed prototypes is carried out by using methods A, B and E1 according to the national standard GB/T 1032—2012 *Test procedures for three-phase induction motors*, and the differences among the three test methods are studied and analyzed. For the three series of IE5 energy efficiency grade prototypes tested, the calculation efficiency of method B can meet the requirements of grade-1 energy efficiency in GB 18613—2020 *Minimum allowable values of energy efficiency and values of efficiency grades for motors*.

Key words: three-phase asynchronous motor; efficiency; IE5

0 引言

我国电动机能效标准 GB 18613—2020^[1]已于 2021 年 6 月正式实施。标准规定的 1 级能效相当于国际电工委员会(IEC)标准的 IE5 效率, 较 IE3 能效电动机又提升了 3% 左右的效率, 并规定了效率测试方法采用 GB/T 1032—2012《三相

异步电动机试验方法》中的 B 法(损耗分析法)^[2]。在实际运行中, 大部分电动机容量选择比系统需求大, 使得电动机经常运行在轻载状态, 出现“大马拉小车”的现象, 造成能源浪费, 而且, 生产机械大部分时间是变负载运行, 其平均输出功率与最高输出功率之比一般为 0.3~0.4, 有的还更低, 运行点常常偏离额定工作点。因此, 准确

收稿日期: 2021-09-08; 收到修改稿日期: 2022-01-26

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0192300)

作者简介: 徐崇巍(1992—), 男, 研究方向为电气工程与自动化。

测量三相异步电动机现场运行效率显得尤为重要。

以 IE5 能效等级为目标,研究人员利用铸铜转子技术^[3]、低压不等匝绕组技术^[4]、低损耗硅钢材料技术^[5]等技术进行设计,已经研制出三相异步电动机测试样机^[6]。为进一步探讨不同的测试方法(A 法、B 法和 E1 法)对电动机效率测试结果的影响,本文对 3 种规格的 IE5 能效等级电动机样机在不同测试方法下开展效率测试,进行了对比分析。

1 试验方法介绍

低压中小型三相异步电动机采用 GB/T 1032—2012《三相异步电动机试验方法》中“试验准备”“热试验”“负载特性试验”及“空载试验”等内容规定的试验方法进行低压电动机能效的测试,并根据“效率的确定”中的计算方法,最终计算得到电动机的效率^[7]。本文主要针对 A 法、B 法和 E1 法之间的差异进行分析。

(1) A 法,即输入输出法。该方法由测得的输出功率与输入功率之比获得电机的效率。效率值与测试时的冷却介质温度值直接有关。为提高测试结果的准确性和便于分析比较,需用修正到基准冷却介质温度(25 ℃)的输出功率和输入功率计算电机的效率。

在该方法下,无需进行损耗分离,由记录的输入功率、输出功率、绕组温度及环境温度进行折算,并进行转矩修正,最终计算出电机效率^[8]。

(2) B 法,即输入功率和输出功率的损耗分析法。该方法要求将损耗修正至各负载点绕组温度,并对剩余损耗进行线性回归分析,要求计算后相关系数 ≥ 0.95 方可认为结果有效。

(3) E1 法为输入功率的损耗分析法。与 B 法不同的是,在进行负载特性试验时,E1 法无需测量转矩、转速等输出信息,其杂散损耗按 GB/T 1032—2012 中的推荐值法确定。A 法、B 法和 E1 法需要测试的参数如表 1 所示。

由表 1 可见,A 法与 B 法需要测试的参数差异主要体现在空载试验部分,E1 法则在负载特性试验中无需记录转速、转矩相关数据,增加了计算过程中的不确定度。

表 1 A 法、B 法和 E1 法需要测试的参数

试验内容	测试参数	A 法	B 法	E1 法	
冷态绝缘电阻测试	冷态绝缘电阻	√	√	√	
	电压	√	√	√	
	电流	√	√	√	
	输入功率	√	√	√	
	热试验	转速	√	√	√
		转矩	√	√	√
		绕组温度	√	√	√
环境温度		√	√	√	
其他温度	√	√	√		
空载试验	电压	×	√	√	
	电流	×	√	√	
	输入功率	×	√	√	
	绕组温度	×	√	√	
负载特性试验	电压	√	√	√	
	电流	√	√	√	
	输入功率	√	√	√	
	转速	√	√	×	
	转矩	√	√	×	
绕组温度	√	√	√		
负载转矩修正		√	√	×	

2 试验准备

2.1 试验电源准备

三相异步电动机的性能不仅与电源电压和频率相关,还与电压波形和电压系统的对称性及频率的偏差和稳定性有关。对于试验电源的要求如下:

(1) 电压波形,试验电压的谐波电压因数(HVF)应符合 GB/T 1032—2012 中“端电压波形”的要求。

(2) 三相电压系统对称性,三相电压系统的负序分量应小于正序分量的 0.5%,且零序分量的影响应予以消除。

(3) 频率,试验过程中频率的波动量应在额定频率的 $\pm 0.3\%$ 范围内。

2.2 试验设备准备

试验设备包括直流双臂电桥、功率分析仪、电流互感器、温度传感器、转矩转速传感器等。设备的精度等级直接影响试验的数据准确性,应在满足 GB/T 1032—2012 中“测量仪器与测量要求”规定的前提下,尽可能使用精度等级更高的设备。试验设备精度等级要求如表 2 所示。

表 2 试验设备精度等级要求

设备名称	A 法	B 法	E1 法
直流双臂电桥	0.2 级	0.2 级	0.2 级
功率分析仪	0.5 级	0.2 级	0.5 级
功率分析仪(频率)	0.1 级	0.1 级	0.1 级
电流互感器	0.2 级	0.2 级	0.2 级
温度传感器 ⁽¹⁾	±1 ℃	±1 ℃	±1 ℃
转矩传感器	0.5 级	0.2 级	0.5 级
	±0.1% 或	±0.1% 或	±0.1% 或
转速传感器 ⁽²⁾	1 r/min, 取	1 r/min, 取	1 r/min, 取
	两者最小值	两者最小值	两者最小值

注:(1) 中小型三相异步电动机一般绝缘等级为 F 级, 允许最高工作温度为 155 ℃, 选用量程为 0~200 ℃ 的热电偶, 折算精度等级为 0.5 级。(2) 中小型三相异步电动机一般最高同步转速为 3 000 r/min, 根据 ±0.1% 计算, 最高允许误差为 3 r/min, 取其 与 1 r/min 中 最小值, 为最高允许误差, 即 1 r/min, 折算精度等级为 0.33 级。

3 测试结果及分析

本文选用 3 种规格的试制样机, 分别为 YE5-100L1-4 (2.2 kW)、YE5-112M-4 (4 kW) 和 YE5-280S-8SH (37 kW), 每个规格各有 2 台样机进行测试。

3.1 测试结果汇总

通过对 3 种规格的 IE5 电动机测试, 整理出 A 法、B 法和 E1 法测试结果, 具体数据如表 3~表 5 所示。

3.2 测试结果分析

3.2.1 各方法所得效率分析

采用 A 法、B 法和 E1 法测试, 计算得到的效率结果如图 1 所示。

表 3 2.2 kW 四极电动机测试结果汇总

测试方法	样机编号	效率/%	功率因数	电流/A	铁耗/W	机械耗/W	定子损耗/W	转子损耗/W	杂散损耗/W	转差率/%	转速/(r·min ⁻¹)
A 法	1 号	90.01	0.809	4.584	47.0	17.6	-	-	-	1.320	1 480.2
	2 号	90.82	0.803	4.583	41.6	10.4	-	-	-	1.319	1 480.2
B 法	1 号	91.43	0.809	4.518	47.1	17.6	79.3	29.9	32.3	1.313	1 480.2
	2 号	91.94	0.804	4.523	41.6	10.4	79.1	29.9	31.8	1.317	1 480.2
E1 法	1 号	90.44	0.811	4.556	296.1	17.6	80.7	30.6	56.6	1.329	1 480.2
	2 号	90.94	0.806	4.561	276.7	10.4	80.4	30.6	56.3	1.333	1 480.2

表 4 4 kW 四极电动机测试结果汇总

测试方法	样机编号	效率/%	功率因数	电流/A	铁耗/W	机械耗/W	定子损耗/W	转子损耗/W	杂散损耗/W	转差率/%	转速/(r·min ⁻¹)
A 法	3 号	91.66	0.786	8.433	66.8	18.4	-	-	-	1.359	1479.6
	4 号	91.40	0.794	8.373	74.9	28.3	-	-	-	1.246	1481.3
B 法	3 号	92.58	0.787	8.340	66.8	18.4	134.5	56.2	44.9	1.364	1479.5
	4 号	92.25	0.796	8.282	74.9	28.3	124.3	52.7	55.9	1.274	1480.9
E1 法	3 号	91.27	0.790	8.429	66.9	18.4	137.4	57.9	102.0	1.386	1479.2
	4 号	91.20	0.798	0.835	75.1	28.3	126.5	54.0	102.1	1.290	1480.7

表 5 37 kW 八极电动机测试结果汇总

测试方法	样机编号	效率/%	功率因数	电流/A	铁耗/W	机械耗/W	定子损耗/W	转子损耗/W	杂散损耗/W	转差率/%	转速/(r·min ⁻¹)
A 法	5 号	95.46	0.789	74.60	334.8	108.4	-	-	-	0.902	743.2
	6 号	95.64	0.780	75.36	358.6	102.6	-	-	-	0.836	743.7
B 法	5 号	95.90	0.790	74.24	334.8	108.4	707.8	342.4	90.4	0.912	743.2
	6 号	95.56	0.781	75.31	358.6	102.6	716.4	316.6	225.7	0.841	743.7
E1 法	5 号	94.40	0.792	75.21	332.7	108.4	726.2	353.5	674.1	0.927	743.0
	6 号	94.41	0.783	76.04	359.4	102.6	730.3	324.6	673.9	0.852	743.6

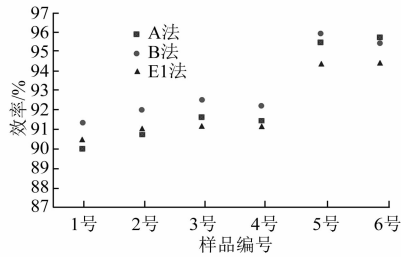


图1 采用A法、B法和E1法测得的效率结果

由图1可见,采用B法,各台IE5试制样机的计算效率均能达到GB 18613—2020《电动机能效限定值及能效等级》中1级能效的要求。

通过对比分析可知,采用B法所得的计算效率要高于其他两种方法的计算效率:以B法计算效率为基准,对于2.2 kW四极电动机,B法计算效率相较于其他方法高了1.08%~1.55%;其他两个规格的IE5试制样机测试结果类似,B法计算效率较其他方法高了0.46%~1.56%。

3.2.2 各方法参数分析

A法无需计算各项损耗,因此无法就损耗将A法与其他方法进行对比。

损耗方面,B法和E1法的主要区别在于杂散损耗。B法的杂散损耗是通过线性回归计算得到的,而E1法的杂散损耗是由推荐值法计算的,以1号电动机为例,两种方法差值为24.3 W,占B法输入功率的0.82%。增加差值后,B法计算效率将与E1法基本一致。

同理,对4 kW四极电动机和37 kW八极电动机进行分析,B法与E1法之间的差异主要体现在杂散损耗。随着电动机能效等级的提升,杂散损耗逐步降低,E1法的杂散损耗不确定度被逐步放大,因此E1法不适合用于测试IE5电动机的效率。E1法适用于1 000 kW以上、B法难以测试的电动机。

根据测试数据绘制出IE5三相异步电动机杂散损耗占比曲线,并根据GB/T 1032—2012中的推荐值法绘制出推荐杂散损耗占比曲线,如图2所示。由图2可见,对于IE5三相异步电动机,考虑杂散损耗,B法计算效率比E1法高了1%以上。

直接由原始记录拟合效率曲线,发现A法在额定输出时效率与B法基本一致,在拟合输入功率曲线时,读数发生了微小的偏移,拟合后输入功

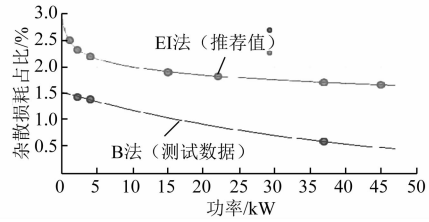


图2 三相异步电动机杂散损耗占比

率发生了明显偏移。在采用A法测试时,设备精度越高,结果偏差越小。

4 试验设备精度对最终结果的影响

根据表2试验设备精度等级要求,分别对A法、B法和E1法中设备对试验结果的影响进行分析。

4.1 试验设备精度对A法结果的影响

在A法的计算中,主要计算参数为输入功率、转矩、转速、绕组温度、冷却介质温度,涉及设备为功率分析仪、转矩传感器、转速传感器、温度传感器。以1号样机2.2 kW四极电机为例,具体精度等级、量程及允许误差如表6所示,样机相关数据情况如表7所示。

表6 A法计算中设备精度等级、量程及允许误差

设备名称	精度等级	量程	允许误差
功率分析仪	0.5级	0~5 000 W	±25 W
温度传感器	±1℃	0~200℃	±1℃
转矩传感器	0.5级	0~50 N·m	±0.25 N·m
转速传感器	±0.1%或1 r/min, 取两者最小值	0~3 000 r/min	±1 r/min

表7 A法计算中样机数据情况

项目	计算值	计算上限值	计算下限值
输入功率/W	2 440	2 465	2 415
转速/(r·min ⁻¹)	1 480.2	1 481.2	1 479.2
转矩/(N·m)	14.19	14.44	13.94
输出功率/W	2 200.00	2 239.87	2 159.39

注:计算上限值=计算值+最大允许误差;计算下限值=计算值-最大允许误差;输出功率=转速×转矩/9.549。

根据计算,效率区间为87.60%~92.75%,区间范围为5.15%。若将功率分析仪、转矩传感器和转速传感器的精度等级分别提高至0.2级、0.2级及±0.5 r/min,则效率区间为89.09%~91.22%,区间范围为2.13%,区间范围降幅58.64%。这再次证明,在采用A法测试时,设备精度越高,结果偏差越小。

4.2 试验设备精度对 B 法结果的影响

在 B 法的计算中,主要计算参数为输入功率、转矩、转速、绕组温度、冷却介质温度,涉及设备为功率分析仪、转矩传感器、转速传感器、温度传感器。以 1 号样机为例,具体精度等级、量程及允许误差如表 8 所示,样机相关数据情况如表 9 所示。

表 8 B 法计算中设备精度等级、量程及允许误差

设备名称	精度等级	量程	允许误差
功率分析仪	0.2 级	0~5 000 W	±10 W
电流互感器	0.2 级	0~10 A	±0.02 A
温度传感器	±1 ℃	0~200 ℃	±1 ℃
转矩传感器	0.2 级	0~50 N·m	±0.10 N·m
转速传感器	±0.1% 或 1 r/min, 取两者最小值	0~3 000 r/min	±1 r/min

表 9 B 法计算中样极电机数据情况

项目	计算值	计算上限值	计算下限值
电流/A	4.518	4.538	4.498
铁耗/W	47.1	47.1	47.1
机械损耗/W	17.6	17.6	17.6
定子损耗/W	79.3	80.0	78.6
转子损耗/W	29.9	28.4	31.4
杂散损耗/W	32.3	32.3	32.3
转矩/(N·m)	14.19	14.29	14.09
转速/(r·min ⁻¹)	1 480.3	1 481.3	1 479.3
输入功率/W	2 406.2	2 416.20	2 396.20
输出功率/W	2 200.00	2 216.75	2 182.78

注:铁耗、机械损耗和杂散损耗涉及其他因素影响,故在本文中不进行误差计算。

根据计算,B 法的计算效率区间为 90.34%~92.51%,区间范围为 2.17%,与本文中使用了更高精度等级设备的 A 法基本一致。但 B 法计算了多项电机损耗,可为研究者提供更多对比信息和优化方向。

4.3 试验设备精度对 E1 法计算结果的影响

由于 E1 法为 B 法的简化方法,且其设备精度要求比 B 法低,在计算效率时,其不确定度更高。

5 结 语

为了准确测量三相异步电动机现场运行效率,对 3 种规格的 IE5 能效等级电动机样机在不同测试方法下开展效率测试。通过对比分析,得出如下结论:

(1) 3 个系列 IE5 能效等级试制样机的 B 法计算效率均能达到 GB 18613—2020《电动机能效限定值及能效等级》中 1 级能效的要求。

(2) 在 IE5 能效等级中小型三相异步电动机效率测试中,B 法的结果较 E1 法的结果普遍高 1% 以上,且随着电动机能效水平的提升,E1 法测试的不确定度会被放大。

(3) 由于 A 法直接受设备精度等级的影响,其计算结果偏差较大,在本次 IE5 电动机测试中,B 法的测试结果较 A 法高 0.44%~1.55%。

(4) 在设备精度等级相同的情况下,设备精度对 A 法和 B 法计算结果的影响均较小。B 法计算了多项电机损耗,故对于研究开发者更具参考价值。

【参考文献】

- [1] 国家标准化管理委员会. 电动机能效限定值及能效等级:GB 18613—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [2] 中国电器工业协会. 三相异步电动机试验方法:GB/T 1032—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [3] 梁宝贵. 新一代铸铜转子电动机[J]. 电机技术,2009(6):37.
- [4] 杨永平. 新型不等匝分数槽绕组[J]. 电机技术,2007(2):7.
- [5] 吴建华,陈永校. 低牌号冷轧硅钢在异步电动机中的应用[J]. 中小型电机,2000,27(4):54.
- [6] 黄坚,顾卫东,杨旭,等. IE5 能效等级三相异步电动机的研制[J]. 电机与控制应用,2021,48(1):73.
- [7] 陈秋容. 三相异步电动机 B 法效率测试的应用分析[J]. 电工电气,2017(3):42.
- [8] 严蓓兰. YE4 系列超超高效率三相异步电动机效率验证的研究[J]. 电机与控制应用,2018,45(5):115.