

# IE5 能效等级三相异步电动机分析

赵志明

(苏州朗高电机有限公司 江苏 苏州 215156)

**摘要:** IE5 为国际电工委员会发布的电动机能效等级, 其对三相异步电动机性能指标提出了新的要求。本文基于 IE5 能效等级开展了三相异步电动机研制工作, 设计选择高性能冷轧硅钢片, 在分别比较不同风扇结构及不等匝绕组形式后, 对样机的性能展开评估, 并对新型三相异步电动机进行测试。测试结果显示该设备的功率因数、最大转矩等关键数据均满足 IE5 能效等级。本文还分别比较了 A 法、B 法、E1 法三种检测技术的可行性, 为更深入地评价三相异步电动机性能提供了支持, 确保该设备的性能满足 IE5 能效等级, 为市场推广提供了支持。

**关键词:** 三相异步电动机; IE5; 能效等级

## 0 引言

在 2016 年国际电工委员会发布的相关标准中详细说明了 IE5 的效率标准值, 在我国 2021 年正式实施的 GB 18613-2020《电动机能效限定值及能效等级》中也将 IE5 效率作为一级能效等级指标。GB 18613-2020 标准中的 1 级能效相当于国际电工委员会标准的 IE5 效率, 与之前的 IE3 相比, IE5 效率约提升了 3%。而从机械设备的运行现状来看, 大部分电动机容量选择明显高出设备运行的正常需求, 导致电动机长期处于轻载状态下, 这种“大马拉小车”的问题已经造成了严重的能源浪费<sup>[1]</sup>。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 0.4, 运行点常常偏离额定工作点。因此为更好地适应新规范、新技术标准的指标要求与未来行业发展要求, 需要相关人员立足于 IE5 能效等级, 深入开展三相异步电动机的研究, 做好三相异步电动机的研发与技术管理。

## 1 样机开发要求

### 1.1 样机设计技术要求

针对 IE5 效率的相关要求, 在本次三相异步电动机设计中需要从设计与工艺两个方面进行评价。在样机设计过程中, 选择物理性能满意的冷轧硅钢片, 并且为进一步降低电动机的电能损耗, 在设计过程中同时开展等匝绕组和风扇的对比试验验证等。在工艺的选择上, 参照 YE4 与 YZTE4 两个系列超高效率三相异步电动机的成功经验, 重点考虑如何提升加工工艺质量, 并尽量控制电动机运行过程中产生的空载损耗问题。

## 1.2 样机性能指标

### 1.2.1 性能指标

在本次研究中, 安排了 5 种不同类型的样机进行测试, 具体包括: 80M1-2-0.75kW (铸铜转子)、100L1-4-2.2kW (铸铜转子)、112M-4-4kW (铸铜转子)、160M-6-7.5kW、280S-8-37kW。本文测试中样机的性能指标包括效率、功率因数、起动转矩、起动电流等, 其中效率是样机性能考核中的关键指标, 本文所选择的 5 种型号样机 (共计 23 台) 的相关性能指标如表 1 所示。

表 1 5 种样机的性能指标

样机型号	效率标准值	起动电流倍数	功率因数	最大转矩倍数
80M1-2-0.75kW	86.30	8.5	0.82	2.3
112M-4-4kW	92.60	9.5	0.80	2.3
100L1-4-2.2kW	91.40	9.0	0.78	2.3
280S-8-37kW	94.40	7.9	0.78	2.0
160M-6-7.5kW	92.90	9.5	0.80	2.3

在样机性能分析过程中, 对 5 种型号的样机进行测试后, 所有样机的效率指标均满足 IE5 效率等级指标的标准。详细数据显示, 对所有已完成的样机实测值进行检测后, 发现 5 种型号的样机效率实测值均符合 IE5 的数据要求, 其中有 13 台样机的效率值高于本项目设计的标准值; 吃容差小于 50% 的有 6 台, 吃容差大于 50% 的有 4 台。

根据现场检测指标也可以发现, 部分样机的铁耗测试值偏大, 存在效率不合格的风险, 但是本次检测中证实该设备的效率依然满足 IE5 的标准值<sup>[2]</sup>。

本文对4台100L1-4-2.2kW样机进行检测,检测的结果如表2所示。

表2 100L1-4-2.2kW样机效率实测值

设备编号	效率/%	功率因数	转子铜耗/W	铁耗/W	机械损耗/W
1	90.733	86.36	91.39	48.35	25.61
2	91.243	90.42	90.42	60.19	23.39
3	91.352	91.36	80.36	55.83	24.02
4	90.869	89.43	85.22	57.02	24.43

根据表2的相关数据可以发现,在本次研究中所选择的100L1-4-2.2 kW样机中,达到项目效率指标的难度较高,提示在未来研究中需要密切关注此类型三相异步电动机的性能指标。

### 1.2.2 其他指标设定

根据其他性能指标的检测结果可以发现,本次研究所选择的23台样机的功率因数均符合标准,其中大部分设备的功率因数实测值远高于标准值,提示其性能工艺满足IE5的参数标准。

从温度变化来看,23台样机的温升变化情况均符合技术规范。

记录样机的启动转矩及最大转矩指标后,结果证实23台样机的各项指标符合技术要求。

### 1.2.3 样机材料用量对比

本文所选用的样机充分借鉴了YZTE4与YE4两个系列三相异步电动机的参数规格及外形特征。而根据具体原材料用量的对比结果也可以发现,IE5样机的铁芯材料明显高于其他系列的电动机,与YE4系列、YZTE4系列相比增加了将近19.0%。比较两种标准下的定子用铜用量后,发现IE5系列与YE4系列、YZTE4系列相比增加了近10.0%;比较转子铜耗的相关数据后,发现IE5系列与YE4系列、YZTE4系列相比增加了约16.52%。

综上,从样机材料用量的角度来看,IE5样机对原材料的需求更大,这是不容忽视的问题。

## 2 性能试验

从技术现状来看,以IE5能效等级为目标,依托铸铜转子技术、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。并且为观察三相异步电动机的运行效率差异,相关单位通常参照GB/T 1032-2012《三相异步电动机试验方法》中提出的三种方法(A法、B法与E1法)进行性能评估,

但是目前关于三种试验方法的可行性还存在一定争议。所以为满足IE5效能等级要求,选择一种更加科学的性能试验方法进行性能评估,这已经成为未来支持三相异步电动机研发、生产的重要组成部分。

### 2.1 试验方法介绍

(1) A法(输入输出法)。该试验方法的关键是检测三相异步电动机的输出功率与输入功率之间的差值,根据差异计算电动机效率。根据试验过程可知,使用A法所检测的效率值与冷却介质温度变化存在密切关系,因此为保证试验结果精准可靠,在试验前需要将温度修正至冷却介质的温度(25℃)。

(2) B法(输入功率和输出功率的损耗分析法)。该方法在试验环节需要不断修正损耗值直至各负载点绕组温度,之后对剩余损耗值作线性回归分析,若线性回归分析的结果显示试验的相关系数值 $\geq 0.95$ ,则可以认为该试验过程科学有效<sup>[3]</sup>。

(3) E1法(输入功率的损耗分析法)。该方法与B法不同的是,负载试验时不需要测量转速、转矩等输出信息,按照GB/T 1032-2012中的推荐值法确定杂散损耗值即可。

### 2.2 试验准备

#### 2.2.1 试验电源准备

在三相异步电动机性能评估中,电源电压是影响试验结果的重要因素,因此为消除电源电压值对结果的影响,所使用的电源电压应满足以下要求:(1)电压波形设置。试验电压中的谐波电压值应满足现行规定中关于“端电压波形”的数据要求。(2)三相电压系统对称性问题不容忽视。为满足试验要求,本次三相电压系统负序分量应小于正序分量值的0.5%,并且在试验环节还需要尽可能地消除零序分量等因素对最终测试结果的影响。(3)电源频率问题。在试验环节装置的频率波动应控制在额定值频率范围内,最大波动值应小于等于0.3%。

#### 2.2.2 试验设备准备

本次试验的设备主要包括功率分析仪、直流双臂电桥等,各项设备均应该满足相关规定中关于“测量仪器与测量要求”的数据要求,详细指标可参照表3。

### 2.3 测试结果

#### 2.3.1 效率测试结果

通过对IE5三相异步电动机进行性能检测,整理出三种检测技术的现场测试结果、设备的效率值。根据测试结果可知,采用B法时本次试验中所选择的IE5样机的效率值均能满足IE5的数据要求。

表3 试验设备精度要求

设备名称	A法	B法	E1法
转矩传感器	0.5级	0.2级	0.5级
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
电流互感器	0.2级	0.2级	0.2级
转速互感器	±0.10%	±0.10%	±0.10%
温度传感器	±1.00	±1.00	±1.00

结合数据对比结果可知,采用B法展开计算后,获得的效率值要显著高于其他两种技术,原因可能是在B法计算过程中,以效率为基准。因此针对同一个三相异步电动机,采用B法计算的效率值与采用其他两种方法相比约高1.60%。相比之下,E1法与A法在效率值上的检测结果基本相同。

### 2.3.2 各方法的参数分析

根据本次试验内容发现,A法难以计算不同三相异步电动机的损耗值,因此在数据处理中无法针对损耗与其他两种方法进行比较。而在比较B法与E1法的相关数据后可以发现,两种方法的主要区别集中在杂散损耗上,B法关于杂散损耗值的计算主要是通过线性回归的方法获得,而E1法的杂散损耗则是经过推荐法计算获得<sup>[4]</sup>。以本次研究结果可以发现,在三相异步电动机中B法与E1法这两种性能检测方法的差值约为20W,而在增加材质之后,B法的计算结果与E1法基本相同。同时需要注意的是,随着电动机能效等级标准的提升,会导致其杂散损耗值明显下降,这一现象会导致E1法无法有效识别杂散损耗值,因此可以认为,E1法不适用于常规的IE5能效等级三相异步电动机测试,但是该技术可以用于某些B法难以测量或者功率超过1000kW的电动机。

同时根据本次试验结果发现,IE5三相异步电动机杂散损耗占比曲线存在差异,在考虑到杂散损耗的情况下,B法计算效率比E1法高了1%以上,这是性能测试中不容忽视的问题。

## 2.4 设备精度对最终结果的影响

根据三相异步电动机精度的相关要求,本文对三种方法进行试验。

### 2.4.1 试验设备精度对A法结果的影响

根据A法的计算结果,在试验过程中需考虑输入功率、转速、转矩、绕组温度及冷却介质温度等相关数据。根据上述数据展开计算后,发现A法的效率区间集中在88.03%~92.81%,之后在常规检验方法的基础上调整数据,其中将功率分析仪的精度提升至0.2

级,将转矩传感器的精度提升0.2级,将转速传感器精度提升0.5r/min,再次试验后发现效率区间为89.0%~91.3%,区间范围降幅明显。根据这一试验结果可以认为,在三相异步电动机性能测试中,使用A法时,设备精度越高则出现结果偏差的概率越小。

### 2.4.2 试验设备精度对B法结果的影响

在B法数据计算中,输入的参数与A法相同,之后选择样机进行试验,本次试验结果发现B法的计算效率区间约为90.28%~92.61%,与A法调整后的数据基本相同。但是二者相比,B法在数据计算中增加了机电损耗的内容(见表4),可以为工作人员提供更多的数据对比资料。

表4 B法机电数据情况

评估项目	计算值	上限值	下限值
电流/A	4.523	4.530	4.497
铁耗/W	47.10	47.10	47.10
定子损耗/W	79.12	80.00	78.50
转矩/Nm	14.20	14.28	14.11
转速/(r/min)	1480.23	1481.30	1479.82

从表4的数据中可发现,B法中电动机的各项数据均在设计的区间中,提示该方法科学有效。

### 2.4.3 设备精度对E1法的影响

从技术内容上来看,因为E1法为B法的简化算法,并且对设备精度要求更低,因此在数据计算中可能出现更高的不确定度,因此不做考虑。

## 2.5 性能测试方法评价

根据本文对三种检测方法的研究可以发现B法的计算效率值能够满足《电动机能效限定值及能效等级》的相关要求,对于未来评估三相异步电动机性能的意义重大。而相比之下,E1法的弊端明显,随着IE5效能的推广,其不确定度会被放大,导致计算结果失真。最后A法的计算结果受到设备精度等级的影响,这是不容忽视的问题<sup>[5]</sup>。因此为了确保三相异步电动机可以顺应IE5能效等级的要求,相关人员可以采用B法进行性能评价,这对于识别设备性能缺陷具有重要意义,也可以为指导未来三相异步电动机生产提供必要的资料支持,使此类设备满足IE5能效等级的规范要求。

## 3 结语

为了更好地分析IE5能效等级下三相异步电动机的相关指标,本文通过性能试验等方法进行了综合分析,

(下转第26页)

测量技术体系,对分段建造实行过程精度控制,减少和避免了由于分段精度超差带来的大量返修工作,节约大量人力、物力、财力,降低了船舶生产建造过程中的相关成本,有效提升了船体精度测量的效率和质量,保证船舶的生产效率和制造水平,为船舶建造全过程的精度管理奠定基础。

#### 参考文献:

- [1] 刘黎明,梁国俐,刘玉君,等.基于人工神经网络的船舶高强钢焊接变形分析预测[J].焊接学报,2002(01):27-29+33.
- [2] 王娜娜,甄希金.船舶智能制造技术现状及发展趋势[J].船舶工程,2019,41(09):6-9.
- [3] 岳颖,李丛,张勇,等.全站仪测量系统在船舶建造中的应用[J].测绘科学技术学报,2020,37(03):258-263.
- [4] 徐东,张盈彬,柳存根,等.基于工业摄影装置的船体结构焊接变形测量技术研究[J].造船技术,2014(03):42-46.
- [5] 朱志洁,赵耀,王中,等.船体外板点位信息全站测量方法研究[J].计算机工程,2015,41(10):286-289+294.
- [6] 朱帅臣,刁俊通.大型船舶平直板零件尺寸柔性测

量方法[J].应用激光,2021,41(05):1070-1076.

[7] 谢荣,方露,杜训柏,等.基于全站仪的海洋钢结构物三维精度检测分析方法及应用[J].船舶工程,2014,36(03):112-114+127.

[8] 韦韩.利用视觉技术在线检测船体变形缺陷方法[J].舰船科学技术,2021,43(10):10-12.

[9] 赵芳,张骁,赵建军,等.基于无线光通信的舰船三维变形测量方法[J].中国激光,2018,45(04):216-224.

[10] 黄若波,张杰.基于全站仪和船舶3D设计系统的三维精度测量技术研究[J].造船技术,2011(04):14-16.

[11] 刘俊.船舶总组与搭载精度控制研究[J].广东造船,2011,30(03):63-66.

[12] 王智,邵成立,于宗伟.全站仪二次开发技术在工业测量中的应用研究[J].测绘通报,2012(S1):175-177+201.

[13] 彭茂清,程远龙,周海生.全站仪及精度管理软件在船体建造中的应用[J].广东造船,2017,36(02):71-74.

**作者简介:**杜忠民(1978.05-),男,汉族,湖北武汉人,本科,工程师,研究方向:船舶建造工艺;彭博军(1993.12-),男,汉族,湖北武汉人,研究生,助理工程师,研究方向:船舶建造工艺。

(上接第22页)

分析结果证实,在IE5效能等级下不同类型三相异步电动机在性能上的差异性,通过选择不同样本完成了本次调试,这也为三相异步电动机的质量评估及性能判断等工作提供了必要的借鉴与支持。同时本文对三种常见性能测试方法进行了研究,通过数据证实三种方法在IE5能效等级三相异步电动机性能评估中的作用,可以为相关人员正确评价三相异步电动机的性能参数提供支持,具有可行性。

#### 参考文献:

- [1] 黄和平,翁晓伟,李剑科,等.浅谈三相异步电动机能效标准及产品改进[J].计量与测试技术,2022,49(08):5-8.

[2] 郑伟卫.基于PLC控制的三相异步电动机变频调速系统设计[J].能源与环保,2022,44(07):260-264.

[3] 张俊,赵云峰,章力天,等.三相异步电动机在不同负载率时的效率探究分析[J].科技与创新,2022(03):124-126.

[4] 张雪雪,刘宝芳,牛建建,等.轨道交通辅助专用三相异步电动机主要检测项目分析[J].防爆电机,2022,57(01):51-54.

[5] 张飞,陈全文,孙昕.辊道用YGP160-49kW三相异步电动机改造分析[J].电机技术,2021(06):43-45.

**作者简介:**赵志明(1989.12-),男,汉族,河北邢台人,本科,工程师,研究方向:电机设计生产制造。