

YX400-4 6 kV 1 级能效高压箱式电机研制

王文涛, 安震东
(兰州电机股份有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 介绍 YX400-4 6 kV 1 级能效高压箱式电机研制过程。主要通过电磁优化、减薄绝缘设计、结构改进特别是通风结构改进等有效措施,使电机的效率提升至国家 1 级能效水平。研制结果验证了上述措施的有效性。电机的效率超过目前国家对一般高效电机的 2 级能效要求,在节能减排、绿色环保方面更具有突出表现。

关键词: 高压电机; 高效; 1 级能效; 节能减排

中图分类号: TM 302 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)05-0066-06

doi: 10.12177/emca.2021.024

Development of YX400-4 6 kV Level 1 Energy Efficiency High-Voltage Box Motor

WANG Wentao, AN Zhendong
(Lanzhou Electric Corporation, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The development process of YX400-4 6 kV level 1 energy efficiency high-voltage box motor is introduced. The energy efficiency grade of the motor is promoted to National level 1 by the electromagnetic optimization, the thickness reduction of insulation, and the structural improvement especially that of the ventilation structure. Development results verify the effectiveness of the above measures. Higher efficiency of motor, which has surpassed the energy efficiency grade of National level 2, is achieved. It has outstanding performance in energy saving, pollution reduction and environmental protection.

Key words: high-voltage motor; high efficiency; level 1 energy efficiency; energy saving and pollution reduction

0 引言

近年来,中国越来越重视环境保护,多次提出减排减碳目标。工业节能在其中具有非常重要的意义。工业领域内电机是用电最大的耗电设备,据统计,2020 年国内电机保有量约 40 亿千瓦,总耗电量 4.8 万亿千瓦时,占全社会总用电量的 64%,占工业用电的 75%^[1],因此提高电机效率当属工业节能的关键环节。

高效电机一般指符合相关国家标准中 2 级能效等级的电机。国内自 2006 年开始高效电机的研制工作,目前各大企业均有满足此能效等级要求的

高压电机产品。当前国内电机市场中高效电机占比已比 2013 年约提高了 20 个百分点^[2],但随着行业的发展和节能要求的提高,电机效率要求不断提升。低压电机能效标准 GB 18613—2020《电动机能效限定值及能效等级》^[3]于 2020 年 5 月 29 日颁布,并将于 2021 年 6 月 1 日实施,新标准中提高了能效等级限定值。新标准颁布后多家单位和企业参与了 IE5(1 级能效)样机研制工作,据悉现已完成了 5 个规格 19 台样机试制,效率实测值均已达到 IE5 能效等级^[4]。在高压电机能效提升方面,国内部分具有前瞻性的企业正在加强技术研究,希望进一步提升效率。兰州电机股份有限公司(简称

收稿日期: 2021-03-03; 收到修改稿日期: 2021-04-02

作者简介: 王文涛(1979—),男,工程师,研究方向为电机设计。

安震东(1982—),男,工程师,研究方向为电机技术。

“兰州电机”) 在 2 级能效电机的基础上进行了尝试性工作,开展 1 级能效电机的试制研发。本文介绍兰州电机结合企业实际状况研制 YX400-4 710 kW 6 kV 1 级能效电机的情況。

1 总体设计

电机的研制以 JB/T 12728—2016《Y、YX 系列三相异步电动机技术条件及能效分级》(机座号 355~630) 为基础技术条件,GB 30254—2013《高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级》中 1 级能效为目标,综合考虑成本和性能,兼顾设计方案的延续性和后续生产的通用性,在兰州电机原 2 级能效电机的基础上开展。方案设计中,根据功率平衡方程和效率计算式,提高电机效率的主要方法就是合理地降低各种损耗^[5-6]。

电机效率 η 定义为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$
 (1)

式中: P_1 为输入功率; P_2 为输出功率。

输入功率等于输出功率与损耗之和,即

$$\begin{cases} P_1 = P_2 + \Sigma P \\ \Sigma P = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_m + P_{ad} \end{cases}$$
 (2)

式中: ΣP 为总损耗; P_{Cu1} 为定子铜损; P_{Cu2} 为转子铜损; P_{Fe} 为铁损; P_m 为风摩损耗; P_{ad} 为附加损耗。

电机总体结构如图 1 所示。采用方箱式机座带冷却顶罩,内部双风扇双循环风路,顶罩两端进风中间两侧出风,滚动轴承,吊入式铁心。

2 电磁方案设计

电磁方案以提高效率为主要目标,力争电机

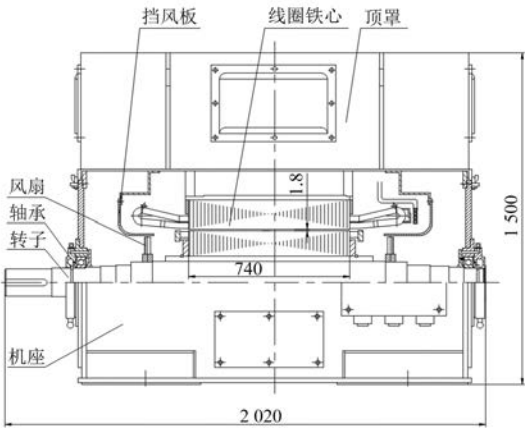


图 1 电机总体结构(mm)

各项参数合理。应用兰州电机的路算法计算机程序和 EasiMotor 仿真辅助计算,经多次优化,确定了电磁方案。方案主要特点如下。

- (1) 利用原三圆尺寸,以减小新增模具费用。
- (2) 定、转子冲片采用低损耗硅钢片 50W310。
- (3) 定子线圈采用减薄绝缘结构,增大线规相对面积,减小电密,降低热负荷。
- (4) 采用高强度磁性槽楔,降低附加铁耗,改善电机参数^[7]。
- (5) 改变槽楔形状,防止磁性槽楔脱落。
- (6) 采用铜条转子结构,改变转子槽形。增大转子导体宽高比,增强电机起动性能。

运用 EasiMotor 磁路法计算并基于计算结果开展负载运行仿真,辅助优化电磁方案。优化后电机主要输出参数与原 2 级能效电机设计输出参数对比及研制电机主要参数目标值如表 1 和表 2 所示。仿真磁场磁密分布图、效率曲线、转矩曲线等结果如图 2~图 6 所示。

表 1 研制电机和 2 级能效电机主要参数

参数名称	2 级能效电机设计值	研制电机设计值	参数名称	2 级能效电机设计值	研制电机设计值
气隙磁密/T	7 917	8 062	定子铜耗/kW	10.21	8.25
定子齿磁密/T	14 970	15 310	转子铜耗/kW	4.36	4.11
转子齿磁密/T	16 482	15 465	铁耗/kW	7.28	7.24
定子轭磁密/T	15 951	15 842	风摩损耗/kW	4.31	2.15
转子轭磁密/T	17 280	17 219	附加损耗/kW	7.63	7.63
额定电流/A	82.55	81.73	效率/%	95.46	96.12
定子电流密度/(A·mm ⁻²)	4.8	3.98	功率因数	0.867	0.87
线负荷/(A·cm ⁻¹)	527	526	堵转电流倍数	6.14	6.26
热负荷/(A ² ·mm ⁻² ·cm ⁻¹)	2 529	2 093	堵转转矩倍数	0.78	0.91
转速/(r·min ⁻¹)	1 491	1 490	最大转矩倍数	2.54	2.54

表 2 研制设计值与目标值^[8-9]

参数名称	效率/%	功率因数	堵转电流倍数	堵转转矩倍数	最大转矩倍数	热负荷/(A ² ·mm ⁻² ·cm ⁻¹)	温升/K
设计值	96.12	0.87	6.26	0.91	2.54	2 093	67
目标值	96.20	0.87	6.50	0.80	1.80	2 400	80

注：(1) 目标值为 JB/T 12728—2016 标准中要求值；(2) 热负荷的目标值为经验值。

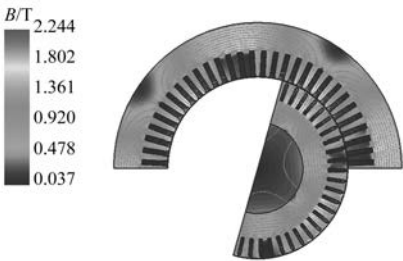


图 2 磁场中磁密分布云图

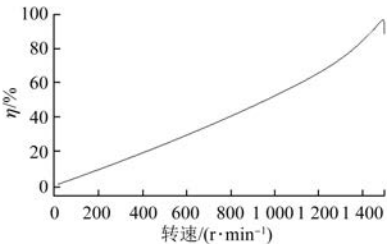
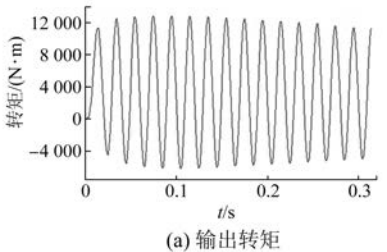
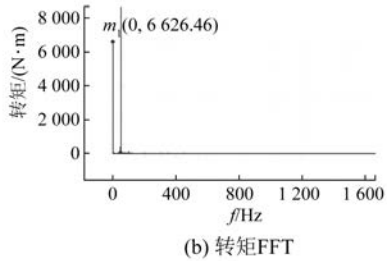


图 3 效率-转速曲线



(a) 输出转矩

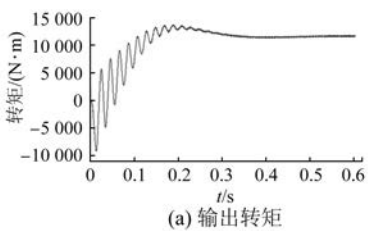


(b) 转矩FFT

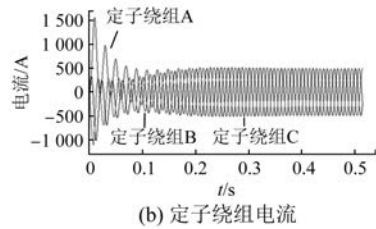
图 4 堵转转矩

由图 4~图 6 可知:电机堵转转矩为 3 313 N·m,堵转转矩倍数为 0.73;最大转矩为 11 665 N·m,最大转矩倍数为 2.57;堵转电流为 518 A,堵转电流倍数为 6.27。

运用 EasiMotor 开展负载运行仿真得到的主



(a) 输出转矩



(b) 定子绕组电流

图 5 最大转矩

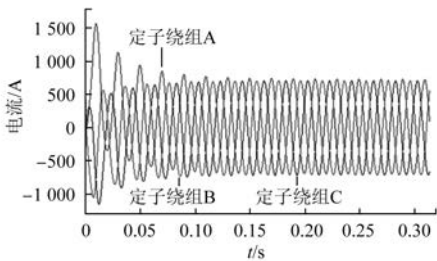


图 6 堵转电流曲线

要参数如表 3 所示。对比可知,仿真结果参数基本与设计值接近,在容差范围内且偏离不大,因而确定此电磁方案可行。

表 3 EasiMotor 负载运行仿真主要参数结果

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子铁耗/W	3 020	转子铁耗/W	1 000
定子铜耗/W	8 573	转子铜耗/W	4 807
风摩损耗/W	2 150	杂散损耗/W	7 630
效率/%	96.3	功率因数	0.86
输出转矩/(N·m)	4 546	输出转速/(r·min ⁻¹)	1 491.4
输出功率/W	710 000	输入功率/W	737 180
线电压/V	6 000	电流/A	82.52

3 结构设计

3.1 定子铁心

定子铁心采用低损耗 50W310 硅钢片叠压制成。冲片加工时要求定向裁剪、毛刺小于 0.03 mm;叠压时按一定的片数和角度交错叠压,叠压系数 0.98,有效提高铁心利用率。铁心叠压质量是此电机的一大关键。按铁心长每 50 mm 一段设一径向通风沟,通风沟宽 10 mm,两端利用压圈和分布在铁心外圆的 8 根筋交错焊接固定。与原 2 级能效电机相比,筋与定子压圈有很大改变。为减小线圈端部伸出铁心长度、降低定子损耗,压圈设计成薄压圈,齿向内倾斜一定角度。两端压圈并不完全一样,一端外径与定子冲片相同,一端在此外径上 8 根筋的位置高出一凸台,外径与加工后筋相同。这样,压圈在筋与筋之间形成通风道。8 根筋在铁心外圆上均匀分布,一端与压圈内侧面平齐焊接,另一端略长于铁心压在另一压圈上焊接。铁心叠压焊接完成后在筋两端加工与机座配合的外圆止口,如图 7 所示。筋上做标志,铁心落入机座时按标志位置与机座连接。



图 7 定子铁心实物

3.2 线圈

定子线圈铜线采用 FYYB 高强度云母导线,端部伸出铁心 40 mm,端部线圈间隙 5 mm,以利于端部散热。下线完成连同铁心整体进行真空浸漆(VPI)。线圈绝缘经多次反复试验,确定了新型减薄绝缘结构:选取高性价比的薄膜补强少胶云母带 S5446-1P 和高纯度环氧浸渍树脂 T1169 材料,实现减薄绝缘的目的。新的绝缘结构使线圈绝缘厚度由单边 1.4 mm 减薄到 1.1 mm,如图 8 所示。

减薄绝缘对于电机设计有以下优点:(1)导线面积相对增大,故电流密度减小,热负荷减小,

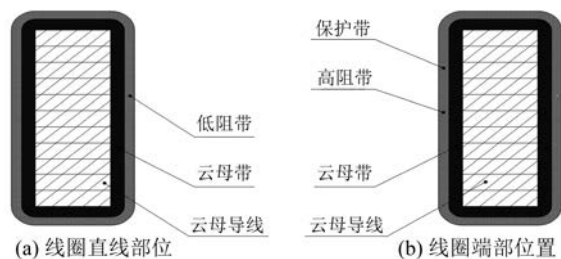


图 8 绝缘结构示意图

有利于降低电机温升;(2)导线面积相对增大,提升了有效材料的利用率,从而提高电机效率;(3)绝缘厚度的减薄有利于散热,降低绝缘老化,延长电机寿命。

3.3 机座

机座为钢板焊接方箱式结构,由前后端板、两边侧板、中间两环板、底板和底脚板构成。设计上增大了两侧板的间距,减小板厚,在铁心两环板间设有方钢加强筋,端板上端盖配合孔尺寸减小,以增强机座整体的强度。机座考虑了通用性,内部带有加热器。

3.4 转子

转子为铜条转子,焊筋轴结构,带有内风扇。

转子铁心使用与定子铁心相同的硅钢片,要求相同的加工精度和叠压方式,具有与定子铁心同样数目和宽度的通风沟并与之对正。轴上 4 根筋均布,与铁心配合形成 4 条通风道。为了获得更大的通风面积,筋板截面积设计为 T 字形,并改变筋板端头形状以更利于通风顺畅。转子铜条采用 7.1 mm×40 mm 紫铜条,降低了铜条的电阻率,加大铜条高度,以期在集肤效应作用下改善起动性能。

电机内风扇一般选用离心式风扇和轴流式旋桨风扇。离心式风扇风压大但效率低;轴流式旋桨风扇能获得足够的风量,效率高,但只能单向旋转,一般适合高速电机^[10]。对采用离心式风扇和轴流式旋桨风扇的相同 4 极电机进行了对比试验,设计数据和试验数据如表 4 所示。数据表明选用旋桨风扇对电机的效率和温升有明显的改善,故选用轴流式旋桨风扇。

对轴流式旋桨风扇进行了流体仿真。仿真模型如图 9 所示,位置速度云图如图 10 所示。仿真结果表明,轴流式旋桨风扇在提升冷却效率和减少冷却消耗功率方面均有良好表现^[11]。

表 4 离心风扇与旋桨风扇试验数据

风扇类型	铁心长/mm	设计效率/%	试验效率/%	功率因数	热负荷/(A ² ·mm ⁻² ·cm ⁻¹)	设计温升/K	试验温升/K
离心式	650	94.73	94.82	0.875	1 831	47.6	68
旋桨	650	95.12	95.17	0.874	1 819	47.4	35

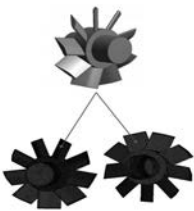


图 9 轴流式旋桨风扇仿真模型

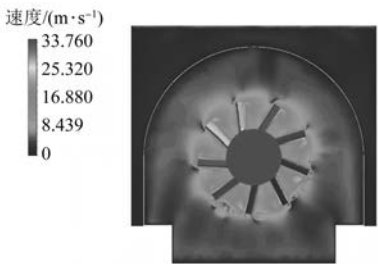


图 10 轴流式旋桨风扇位置速度云图

3.5 轴承

轴承采用滚动轴承。双球轴承结构,驱动端定位,非驱动端浮动。浮动端装有弹簧给定初始预紧力。详细的轴承计算不再赘述。选用 SKF 滚动轴承,驱动端型号为 6226C3,非驱动端型号为 6224C3。带轴承室的一体式端盖,减小了端盖外圆,从而可以增强机座的强度。

3.6 风路优化

电机冷却方式为 IC01,采用双风扇的内部双风路循环。电机顶部为冷却罩,外部风从两端进入经内部循环带走热量,再从冷却罩中部两侧流出完成热交换。内部风路循环方式与常规电机相比没有变化,只是改进了风路。改变原定定子铁心与机座连接配合方式,由原来的环对环改变为筋对环,增强了铁心表面的散热能力。根据电机内部热交换的相关理论^[12],减小了内风路风阻,有利于电机的整体散热。电机风路循环图如图 11 所示。

运用 ANSYS 进行电机风冷流体动力学仿真分析。电机整体和内部的仿真分析模型及流体边界设置如图 12 所示。仿真温度云图如图 13

所示。

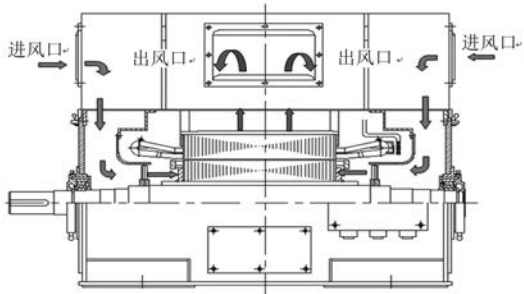


图 11 电机风路循环图

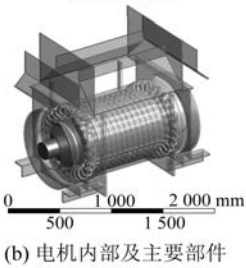
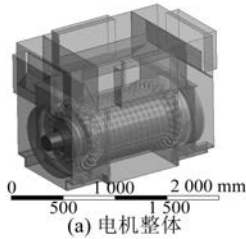


图 12 电机风冷流体动力学仿真分析模型及流体边界设置

分析温度云图可知,电机内温度分布基本均匀,优于普通电机温升 B 级考核要求。

4 研制结果

电机制造完成并进行型式试验。试验数据如表 5 所示。由表 5 可知,该电机的各项主要参数基本满足设计值和预期目标值,堵转电流倍数超标但仍在容差范围内。

对比 2 级能效标准,该电机在节能环保方面效果更加显著。按每年 8 000 h 额定运行状态计算,每年节约用电量约 54 418 kW·h。以每度电 0.8 元计算,可节约电费约 43 534 元。

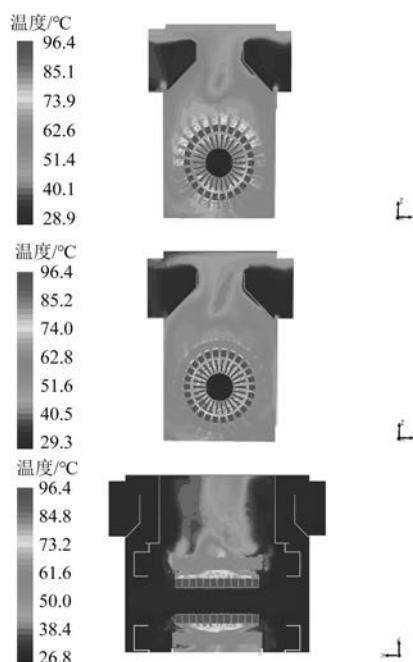


图 13 不同界面温度云图

表 5 型式试验主要数据

参数名称	效率/%	功率因数	堵转电流倍数	堵转转矩倍数	最大转矩倍数	温升/K
设计值	96.12	0.870	6.26	0.91	2.54	67
目标值	96.20	0.870	6.50	0.80	1.80	80
试验值	96.28	0.906	6.81	1.35	3.17	47

按照国家统计局数据,每度电需使用 0.404 kg 标准煤,每吨标准煤 CO_2 排放量为 2.62 t,则每年可减少 CO_2 排放量约 57.6 t。

由此可见,无论是在经济方面,还是在节能减排、绿色环保方面,1 级能效电机均有突出表现。

5 结 语

完成了 YX400-4 710 kW 6 kV 1 级能效三相异步电动机的研制。型式试验结果表明主要性能指标达到了预期目标,证明了电动机研制方向的正确性和研制方法的有效性。通过此次研制过程,探索出一些新的思路和方法,希望能进一步推广研究,为其他结构形式电机的效率提升提供参

考。通过进一步优化控制,有望继续改进和提升能效。电动机能效的提升将为可持续发展的绿色环保节能目标做出贡献。

【参考文献】

- [1] 高效电机领跑者. 电机能效新标即将实施,能效提升潜力巨大 [EB/OL]. <https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404616521271083339>. 2020-03-19 [2021-03-01].
- [2] 工业和信息化部节能与综合利用司.“节能服务企业”暨高效电机技术交流会在线举办 [EB/OL]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/xydt/art/2020/art_b907e44acad7473bb6129eeec2e10f90.html. 2020-07-02 [2021-03-01].
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 阎治安, 苏少平, 崔新艺. 电机学 [M]. 3 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2016.
- [6] 赵霞. 高效异步电动机节能降耗措施的分析研究 [J]. 上海大中型电机, 2017(3): 27.
- [7] 李军丽, 胡春雷. 磁性槽楔在电机节能技术中的应用 [J]. 中小型电机, 2005(2): 57.
- [8] 国家发展和改革委员会资源节约与环境保护司, 工业和信息化部节能与综合利用司. 高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级: GB 30254—2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [9] 中国机械工业联合会. Y、YX 系列高压三相异步电动机技术条件及能效分级 (机座号 355~630): JB/T 12728—2016 [S]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [10] 陈世坤. 电机设计 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [11] 晋社民, 郭瑞, 杨瑞, 等. 大型感应交流电机内冷却扇改型优化分析 [J]. 机械设计与制造, 2020 (7): 179.
- [12] 魏永田, 孟大伟, 温嘉斌. 电机内热交换 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.