

叶片结构参数对电机外冷却风扇性能的影响及改进设计

朱路飞¹, 邢改兰¹, 郑龙平², 黄坚², 周邵萍¹

(1. 华东理工大学 承压系统与安全教育部重点实验室, 上海 200237;

2. 上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063)

摘要: 采用计算流体动力学的方法对 YX3 小型电机外冷却系统进行了数值计算。分析了冷却风扇的叶片数、叶片外径和叶片宽度对电机风扇通风性能的影响, 并从降低风扇输入功率的角度对风扇进行改进设计和样机试验验证。结果表明, 装有改进风扇的电机机械损耗下降了 39.1%, 温升基本不变, 电机效率提高了 0.6%。

关键词: 叶片结构参数; 电机冷却; 风扇性能; 数值计算; 改进设计

中图分类号: TM 303 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)06-0046-05

Influence of Blade Structure Parameters on Performance of Motor Cooling Fan and Its Improvement

ZHU Lufei¹, XING Gailan¹, ZHENG Longping², HUANG Jian², ZHOU Shaoping¹

(1. Key Laboratory of Safety Science of Pressurized System, Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: The numerical calculation of YX3 small motor external cooling system was carried out by using computational fluid dynamics method. The influence of blade main structure parameters on the ventilation performance of external cooling fan of small motor was analyzed. From the perspective of reducing the input power of the fan, the fan structure was improved and experimentally verified. The result showed that mechanical loss of the motor with improved fan was reduced by 39.1%, the temperature didn't change basically and the efficiency was increased by 0.6%.

Key words: blade structure parameters; motor cooling; fan performance; numerical calculation; improved design

0 引言

小型三相异步电动机因其结构简单而被广泛应用于日常生产生活中。随着小型电机电磁负荷的提高, 其单位重量的功率也不断增加, 电机的散热问题已成为研究的重点^[1-3]。电机温度过高会使其绝缘性能和机械强度降低, 大大缩短电机寿命, 严重时甚至会烧坏电机。小型电机通风冷却一般采用风扇强迫空气流动将电机所产生的热量带走, 从而达到电机散热的目的。

为了提高电机外冷却系统的散热性能, 许多学者运用数值计算的方法对冷却风扇通风性能进行了研究。Chang Chih-Chung 等^[4]通过试验和数值模拟相结合的方法研究了外冷却风扇的特性曲线; 温嘉斌等^[5]对由风扇和风罩组成的电机冷却流场进行了计算, 得到了风扇的外特性曲线, 研究了风扇叶片在不同偏转角下对风扇冷却能力的影响; 江荧^[6]对电机外冷却系统中风扇进行了分析和改进设计, 但没有深入研究叶片结构对风扇通风性能的影响; Joseph K. Woodard 等^[7]对外冷却

作者简介: 朱路飞(1990—), 硕士研究生, 研究方向为小型电机外冷却系统的数值计算。

系统中风扇外径和宽度进行优化,提高了风扇通风性能。然而在电机整个外通风冷却系统中,研究叶片结构参数对径向离心式风扇通风性能的影响却很少。

本文应用 Ansys-Fluent 软件对 YX3 型电机整个外冷却系统流场进行数值计算,研究不同叶片数、叶片外径和叶片宽度对风扇通风性能的影响,并对原有风扇进行改进设计,从而为电机外通风冷却风扇结构优化提供参考。

1 数值模拟

1.1 电机外冷却系统的物理模型

YX3 型自扇冷式异步电机结构如图 1 所示。其额定功率为 7.5 kW,额定电压为 380 V,工作频率为 50 Hz,额定转速为 2 920 r/min。该电机采用表面自冷式轴向外通风冷却系统。电机通风冷却示意如图 2 所示。空气经通风孔流入风罩,在风扇的作用下沿轴向流出风罩,经机壳散热片换热带走热量,加快电机冷却。该外通风冷却回路由机座、外风扇和风罩组成^[8]。

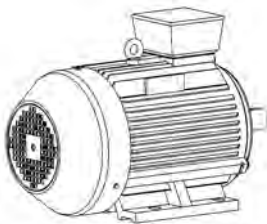


图 1 YX3 自扇冷式异步电机结构图

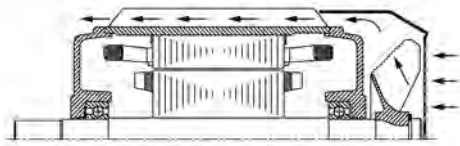


图 2 电机通风冷却示意图

由于整个电机外冷却系统结构复杂,为了真实模拟,本文对该外冷却结构建立电机外通风全流道计算模型,如图 3 所示。

为了便于定义边界条件,根据动静域的相对位置将计算域分为 4 部分:进气段、风罩、风扇和机座。其中,外冷却风扇为径向离心式风扇,风扇三维模型结构如图 4 所示,主要几何参数如表 1 所示。

由于依据传统计算方法在准确获取电机外冷

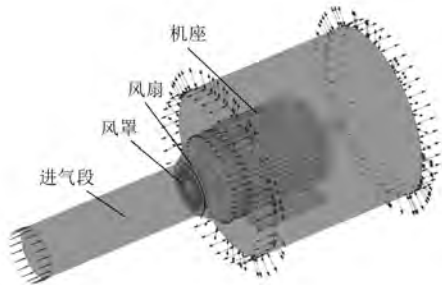


图 3 电机外冷却系统的计算模型



图 4 风扇三维模型

表 1 YX3 型风扇结构参数

叶片数 Z	叶片外径 D/mm	叶片宽度 B/mm
5	140	45

却系统的风阻和所需冷却风量存在困难,致使风扇设计指标(如流量、全压等)难以给定。为研究风扇通风性能,通过数值模拟方法对风扇通风量 Q ,输入功率 N 进行计算,并根据式(1)获得风扇的气动效率,即

$$\eta = \frac{\Delta P Q}{N} \tag{1}$$

式中: ΔP ——风扇区域出入总压差。

1.2 控制方程

在所研究的外冷却系统中流体流动是在电机稳定运行下的流动情况,即风扇工作时的通风量、输入功率、效率等不随时间而变化,其所遵循的质量守恒方程^[9]为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

式中: u, v, w —— x, y, z 方向的分量。

动量守恒方程^[9]为

$$\text{div}(\rho u \mathbf{u}) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_u \tag{3}$$

$$\operatorname{div}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) + S_v \quad (4)$$

$$\operatorname{div}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) + S_w \quad (5)$$

式中: ρ ——空气密度;

u ——速度矢量;

p ——流体微元体上的压力;

μ ——动力黏度;

S_u, S_v, S_w ——动量守恒方程的源项, 对于黏性为常数的不可压缩流体;

S_u, S_v 和 S_w ——微元体在 x, y 和 z 方向上的体力。

1.3 湍流模型与边界条件

由于外冷却系统内流体流速较大, 流体流动属于湍流流动, 所以湍流模型选用数据计算稳定、易于收敛且有很好预测能力的 $k-\varepsilon$ 模型^[9], 进口采用全压进口边界条件, 其值为一个标准大气压。在电机外包裹的空气域中, 采用一个标准大气压的静压出口边界条件。在整个外冷却系统中, 与流动空气相接触的固体壁面均为无滑移边界。

1.4 网格划分与无关性验证

考虑到计算域结构复杂, 应用 Ansys ICEM 生成鲁棒性好、适应性强的四面体网格。通过对比 3 种网格数量下风扇的通风量、输入功率和效率。网格无关性验证结果如表 2 所示。可以看出, 随着网格数的增加, 风扇 3 个性能值都有减小的趋势, 但变化都不是很大。其中网格数为 455 万和 508 万的风扇通风量、输入功率和效率相对变化分别为 0.91%、0 和 0.24%; 由于计算外特性的相对误差小于 3%, 可以确认网格的无关性。考虑到计算时间和计算精度, 取计算网格数约为 455 万。

表 2 网格无关性验证结果

网格数/万	通风量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	输入功率 P/W	效率 $\eta/\%$
398	0.053 57	15.79	16.78
455	0.052 64	15.42	16.73
508	0.052 16	15.42	16.69

2 计算结果与分析

为了解叶片结构参数对风扇通风性能的影响, 本文分别研究叶片数、叶片外径和叶片宽度对

风扇通风量 Q 、输入功率 N 和效率 η 的影响。

2.1 叶片数对风扇性能的影响

图 5、图 6 和图 7 为电机额定运行工况下, 不同叶片数对风扇通风性能的影响曲线。叶片数在 4~11 变化时, 随着叶片数的增加, 风扇 3 个性能指标均有较大幅度的增加。这是由于叶片数过少时, 叶片间距变大, 流道扩散度增大, 流道中的轴向涡流影响不断增加, 而适当增加叶片数, 可以使流道的长宽比得到提高, 减小由于涡流而产生的能量损耗, 提高风扇通风量和效率。叶片数在 11~19 变化时, 随着叶片数的增加风扇通风量缓慢减小, 输入功率有小幅度的增加, 而效率先增大后基本不变。这是由于实际风扇叶片表面存在摩擦损耗和一定的厚度, 叶片数太多会造成风扇过流面积变小, 增大空气的流动损耗。因此, 更多的叶片并不能有助于提高风扇通风量和效率。

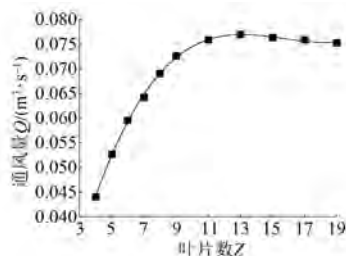


图 5 不同叶片数的通风量曲线

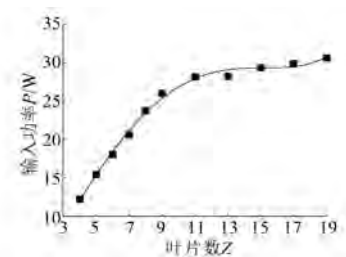


图 6 不同叶片数的输入功率曲线

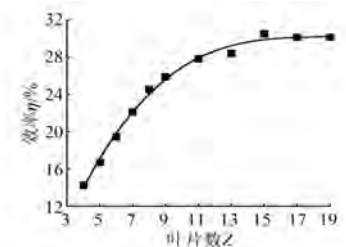


图 7 不同叶片数的效率曲线

2.2 叶片外径对风扇性能的影响

受风扇风罩尺寸的约束, 在 120~180 mm 范

围内对叶片外径进行研究。图 8、图 9、图 10 为不同叶片外径的通风量、输入功率及效率。从图 8 和图 9 中可以看出,当叶片外径从 120 mm 增加到 180 mm 时,通风量增加了 54.4%,而输入功率增加了 203.8%,叶片外径对风扇的输入功率影响较为突出。从图 10 可以看出风扇效率随叶片外径的增加整体呈缓慢增长趋势,但幅度变化不大。因此,在风扇降耗设计中,叶片外径的适当减小需要重点考虑。

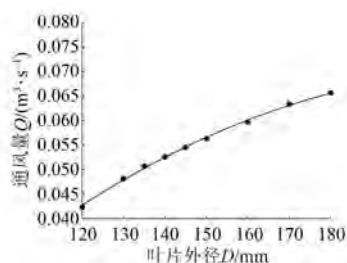


图 8 不同叶片外径的通风量曲线

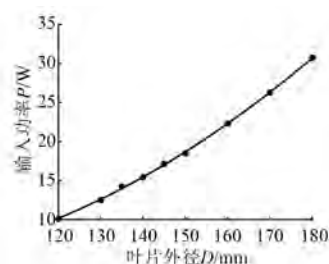


图 9 不同叶片外径的输入功率曲线

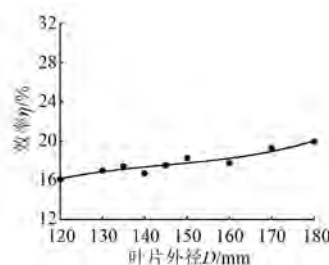


图 10 不同叶片外径的效率曲线

2.3 叶片宽度对风扇性能的影响

不同叶片宽度对风扇的通风量、输入功率和效率的影响如图 11、图 12 和图 13 所示。随着叶片宽度的增大,风扇的性能指标先增大后减小,但幅度变化不大;当叶片宽度从 55 mm 增加到 58 mm 时,通风性能略有降低,这是由于叶片与风罩通风孔轴向距离太近会产生部分回流现象。

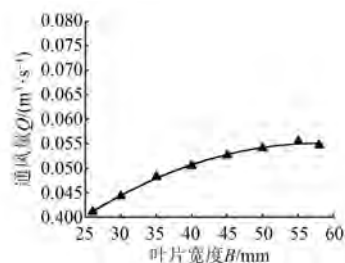


图 11 不同叶片宽度的通风量曲线

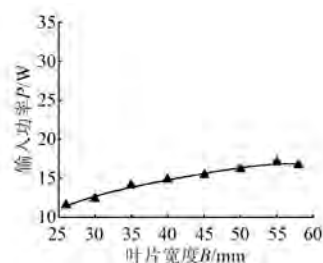


图 12 不同叶片宽度的输入功率曲线

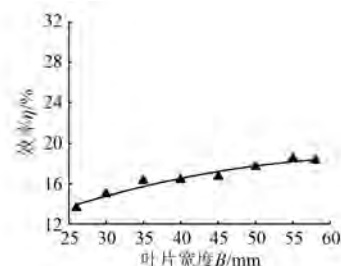


图 13 不同叶片宽度的效率曲线

3 风扇改进设计及试验验证

3.1 风扇改进设计

对于目前开发的高效、超高效小型三相异步电动机, YX3 型风扇结构的通风性能并不能完全适用^[10]。于是提出了对原风扇结构参数改进设计的要求:在保证电机所需冷却风量基本不变的前提下,降低风扇输入功率,提高整个电机效率。

基于以上叶片结构参数对风扇通风性能影响的研究可知,叶片外径对风扇输入功率影响较大。从图 8 和图 9 可以看出,当叶片外径从原 140 mm 增加到 180 mm 时,风扇输入功率升高了 99.4%,通风量升高了 24.7%;而当叶片外径减小到 120 mm 时,风扇输入功率降低了 34.4%,通风量降低了 19.4%。根据改进设计要求,为了降低风扇输入功率,首先将叶片外径减小为 120 mm,但

同时风扇通风量也有所下降,为了保持风扇通风量不变,需要调整风扇叶片数和叶片宽度。从图 5 和图 11 叶片数和叶片宽度对风扇通风量的影响来看,增加叶片数更能有效提高风扇通风量。因此,根据所需基本风量将叶片数增加至 7 个,同时保持叶片宽度不变,初步确定改进风扇结构参数。为验证初步改进的风扇是否达到改进设计要求,对其进行数值计算,其结果如表 3 所示,初步改进风扇的输入功率降低了 7.6%,通风量提高了 4.8%。

表 3 初步改进风扇与 YX3 型风扇通风性能的对比

风扇型号	通风量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	输入功率/W
YX3 型风扇	0.052 6	15.42
初步改进风扇	0.055 1	14.25

由于与电机散热所匹配的风扇通风量有一定的裕度,故将叶片宽度减小,通过数值模拟的方法反复修正叶片宽度,最终选取 26 mm 的叶宽,确定新风扇结构参数,其与原 YX3 型风扇结构参数对比如表 4 所示。

表 4 YX3 型风扇与新风扇结构参数的对比

风扇型号	叶片数	叶片外径/mm	叶片宽度/mm
YX3 型风扇	5	140	45
新风扇	7	120	26

采用数值计算方法对改进设计后的新风扇进行分析。其计算结果如表 5 所示,相比原 YX3 型风扇,新风扇输入功率降低了 14.1%,风扇通风量虽略有降低,但也在电机通风散热所需风量裕度范围内。因此,新型风扇通风性能满足改进设计要求。

表 5 YX3 型风扇与新型风扇通风性能的对比

风扇型号	通风量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	输入功率/W
YX3 型风扇	0.052 6	15.42
新风扇	0.050 8	13.24

3.2 试验验证

为进一步验证新型风扇对电机温升和机械损耗的影响情况,通过试制新型风扇样机,根据 GB/T 1032—2012《三相异步电动机试验方法》对安装此新型风扇的电机进行整机性能试验,样机现场试验如图 14 所示。高效电机首先采用 YX3 型风扇进行了试验,然后更换为新型风扇再进行试验,两次测试数据如表 6 所示。



图 14 样机现场试验

表 6 不同风扇时电机测试数据

风扇型号	效率/%	机械损耗/W	温升/K
YX3 型风扇	92.07	78.2	39.65
新型风扇	92.62	47.6	39.70

从表 6 中测试数据可知,采用新风扇的高效电机机械损耗(主要包括摩擦损耗和风扇输入功率)下降了 39.1%,温升基本不变,电机整机效率提高了 0.6%。

4 结 语

本文通过数值模拟的方法对小型电机外冷却系统进行计算,对比不同叶片结构参数对风扇通风性能的影响规律。在此基础上为满足目前开发的高效、超高效小型三相异步电动机通风需求,降低电机机械损耗,对原有风扇结构进行改进设计。样机试验结果表明,通过减小叶片外径和叶片宽度,适当增加叶片数,保证风扇通风量在电机通风散热所需风量裕度范围内,可以有效降低电机机械损耗,提高电机效率。

【参 考 文 献】

[1] HU T, LI Y, TANG R Y. Calculation of 3D fluid flow field and thermal field of air-cooled medium motor [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014 (513/517): 3468-3471.

[2] MOON S H, YUN J H, KIM W G, et al. Thermal-flow analysis and cooling performance enhancement of a totally enclosed fan-cooled motor[C] // International Conference on Electrical Machines and Systems IEEE, 2013: 2028-2030.

[3] WANG Y, FAN C, YANG L, et al. Three-dimensional temperature field simulation for the rotor of an asynchronous motor [J]. European Journal of Physics, 2010, 31(4) : 701-715.

(下 转 第 61 页)

涡流损耗之间的关系,得出当永磁体轴向或周向尺寸为 2 倍透入深度时永磁体涡流损耗最大的结论,并通过仿真验证了解析式的正确性。

建立了 48 槽 8 极的 PMSM 3D 模型,对不同分块数永磁体涡流损耗进行仿真分析。仿真结果表明,在永磁体轴向或周向长度确定的情况下,正弦波供电时涡流损耗随着分块数的增加而逐渐减小;逆变器供电时涡流损耗与分块数并非正相关,当每块永磁体尺寸大于 2 倍透入深度时,涡流损耗随分块数的增加逐渐增大;当每块永磁体尺寸小于 2 倍透入深度时,涡流损耗随分块数的增加逐渐减小。因此在实际电机设计中,应根据供电方式合理选择永磁体的轴向和周向拼块数,使每块永磁体的尺寸远离 2 倍透入深度,以抑制永磁体涡流损耗。

【参考文献】

- [1] 朱卫光,张承宁,董玉刚.大功率永磁同步电机转子永磁体损耗研究[J].电机与控制学报,2014,18(1): 33-37.
- [2] 宋进金,赵静,李晓贝.高速永磁电机的永磁体和护套涡流损耗分析[J].智能电网,2015(4): 313-317.
- [3] YAMAZAKI K, ABE A. Loss investigation of interior permanent-magnet motors considering carrier harmonics and magnet eddy currents [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45 (2): 659-665.
- [4] 陈丽香,王雪斌,李敏.永磁体涡流损耗的分析[J].微电机,2015,48(6): 13-16.
- [5] 李洪凤,韩冰,崔忠宝.永磁电机永磁体涡流损耗的研究进展[J].微特电机,2017,45(4): 87-92.
- [6] BETTAYEB A, JANNOT X, VANNIER J C. Analytical calculation of rotor magnet eddy-current losses for high speed IPMSM [C] // XIX International Conference on Electrical Machines IEEE, 2010: 1-6.
- [7] BALAMURALI A, LAI C, MOLLAEIAN A, et al. Analytical investigation into magnet eddy current losses in interior permanent magnet motor using modified winding function theory accounting for pulsewidth modulation harmonics [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 27 (3): 39-41.
- [8] 李洪凤,沈彦波.永磁球形电动机永磁体涡流损耗分析[J].电工技术学报,2015,30(12): 267-275.
- [9] 陈萍,唐任远,佟文明,等.高功率密度永磁同步电机永磁体涡流损耗分布规律及其影响[J].电工技术学报,2015,30(6): 1-9.
- [10] WILLS D A, KAMPER M J. Reducing PM eddy current rotor losses by partial magnet and rotor yoke segmentation [C] // XIX International Conference on Electrical Machines IEEE, 2010: 1-6.
- [11] WANG J, ATALLAH K, CHIN R, et al. Rotor eddy-current loss in permanent-magnet brushless AC machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46 (7): 2701-2707.
- [12] 何彪.逆变器供电变频永磁同步电机损耗和温度场的理论与计算 [D]. 上海: 上海大学, 2016.

收稿日期: 2017 - 11 - 15

(上接第 50 页)

- [4] CHANG C C, KUO S C, HUANG C K, et al. The investigation of motor cooling performance [J]. Proceedings of World Academy of Science Engineering & Technology, 2009 (40): 230-236.
- [5] 温嘉斌,唐跃,何金泽,等.高压异步电机外风扇流场数值计算及优化[J].电机与控制学报,2013,17(9): 79-85.
- [6] 江荧.自扇冷式电机冷却系统的数值模拟分析及风扇设计[J].机械设计与研究,2014,30(1): 115-119.
- [7] WOODARD J K, JOHNSON G E. Optimal design of cooling fans for industrial electric motors [J]. Journal of Mechanical Design, 1986, 108 (2): 224-225.
- [8] 沈阳机电学院电机系.三相异步电动机原理、设计与试验[M].北京:科学出版社,1977.
- [9] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [10] 刘夫乾,李志强,黄坚.一种超高效率电机新型风扇结构的考虑[J].电机与控制应用,2010,37(12): 18-20.

收稿日期: 2017 - 11 - 20