

电机外风扇多结构特征下冷却性能及优化

丁树业, 张 琦

(哈尔滨理工大学 电气与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 为了分析电机不同结构下的外风扇的冷却能力并有效优化其冷却能力,以 Y2-250M 异步电机原始风扇为例,依据流体力学理论对电机外风扇进行了数值计算和分析,并对不同结构下的冷却性能进行了详细的分析。研究表明,风扇结构的改善可有效减小风扇的风磨损耗,提高电机的冷却效果,有效提升电机的运行效率,据此完成了外风扇的优化。该研究对风扇扇叶及其结构优化提供了理论依据,对电机新型通风结构设计方法的探索具有促进效果。

关键词: 异步电动机; 外风扇; 流体场; 优化设计

DOI: 10.15938/j.jhust.2018.01.012

中图分类号: TM315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2018)01-0061-09

Cooling Performance and Optimization of Asynchronous Motor's External Fan under Different Structure Characteristics

DING Shu-ye, ZHANG Qi

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to analyse the motor fan cooling capacity under different structures and to optimize its cooling capacity, a Y2-250M asynchronous motor was taken as an example. Not only was the motor external fan's fluid fields calculated and analyzed, which was based on the theory of computational fluid dynamic (CFD), but also the cooling capacity of different structures fans were analyzed in detail as well. The results showed that the improvement of fan structure can reduce fan wind friction loss, improve the cooling effect and operation efficiency of the motor in effect. We can complete the external fan optimization based on this conclusion. This study provides theoretical basis for fan blades and its structural optimization, and the exploration of design method of motor's new ventilation structure is promoted effectively as well.

Keywords: asynchronous motor; external fan; flow field; optimal design

0 引 言

随着社会的快速发展,研究和开发高效节能的电机来满足电力需求是必然趋势,而电机的温升作

为衡量电机运行性能的一个重要因素,直接关系到电机的效率、使用寿命,并成为限制其性能的重要瓶颈。对于 TEFC 电动机而言,主要是电动机端部外风扇所产生的冷却风量通过散热翅对电动机进行冷却,而风扇损耗在电机机械损耗中占有较大比例,因

收稿日期: 2016-05-10

基金项目: 黑龙江省教育厅新世纪优秀人才基金(1254-NCET006)。

作者简介: 张 琦(1988—),男,硕士研究生。

通信作者: 丁树业(1978—),男,博士,教授, E-mail: dingshuye@163.com。

此找到冷却能力强、风扇自身及电机损耗小的高效外风扇结构具有重要意义。

目前,国内外专家学者已经对电机外风扇的设计及优化进行了大量的研究^[1-9]。在风扇设计方面,文^[1]在离心式外风扇叶片设计中成功地应用了固定翼飞机机翼结构形状、轴流式风扇叶片和汽轮机叶片形状,从而设计出高效率、低噪声的新型离心式外风扇。文^[2]通过理论估算电机实际工作所需的风压和风量,给出了后倾离心式风扇的优化设计方案。文^[3]对中小型电机常用的离心式、轴流式及斗式风扇的设计,结合作者多年实践经验作了较完整的介绍。在风扇优化方面^[7-9],文^[7]以高压电动机中的径向式离心风扇与改进的后倾式离心风扇为对象,对比分析了流体动力学计算和传统计算方法的结果,证明经验公式在计算风量、风压、风效等性能参数时存在误差较大的问题,应用计算流体动力学进行风扇优化设计更具有适用性。文^[8]以一台高压异步电动机外风扇为例,对风扇叶片在不同偏转角下的风扇性能进行了比较分析,得到扇叶偏转角度的最优值。文^[9]对某汽轮发电机轴流式通风冷却风扇的原始模型进行了CFD流场数值模拟,通过改变叶片安放角和叶片扭转角,得到冷却风扇计算效率和叶片安放角及叶片扭转角之间的关系。综上所述,国内专家主要是根据电机需要的风量来设计或优化外风扇,针对外风扇自身进行流场分析及性能计算,忽略了风扇结构的改变对电机温度场及流变特性的影响。目前发表的文献中,对不同结构风扇下电机的温升及流变特性如何变化、如何影响风扇冷却能力的研究却很少,尤其是包括电机及外风扇在内的整体温度场及流体场数值研究较少,所以结合电机传热特性研究多结构外风扇的冷却性能具有一定意义及工程实际价值。

本文以55 kW异步电机Y2-250M的风扇原始结构为例,进行流体场数值计算及分析,并对不同结构风扇下电机的温升情况及流变特性进行了详细的研究,并根据电机的温升情况明确不同结构风扇的冷却效果,进而指出了最优的风扇结构方案,为TE-FC电机冷却风扇元件选择及优化奠定一定基础。

1 电机及外风扇模型与边界条件

1.1 流体场数学模型

本文仅研究电机稳态运行时电机及外风扇区域的流体流动情况,即流动属于定常流动。由于冷却

流体的雷诺数 $Re > 2300$,属于湍流运动,采用湍流模型进行求解;马赫数很小,冷却介质不可压缩。流体三维湍流流动遵循以下控制方程:

质量守恒方程为^[10]:

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u 、 v 和 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度分量。

动量守恒方程为^[10]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial z}\right) \\ \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial z}\right) \\ \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial z}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; μ 为动力粘度; p 为流体压力。

能量守恒方程为^[10]:

$$\frac{\partial(\rho uT)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vT)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wT)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\lambda_1}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\lambda_1}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\lambda_1}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (3)$$

其中: c_p 为流体比热容; T 为温度; λ_1 为流体导热系数。

1.2 电机及外风扇物理模型

如图1为电机及外风扇整体计算域模型。

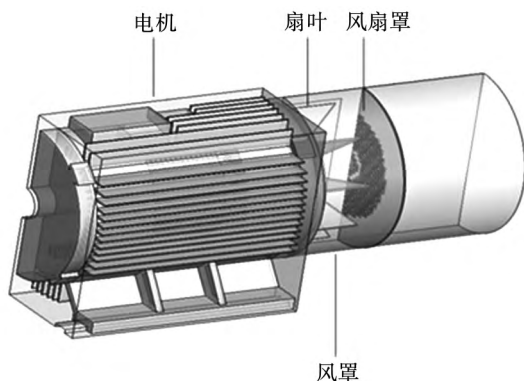


图1 电机及外风扇计算域模型

本文电机中的外风扇为径向离心式风扇,主要由叶片、后盘组成。其中后盘为平直后盘,风扇叶片数量为10个,叶片长度115 mm,高度110 mm。其物理模型如图2所示

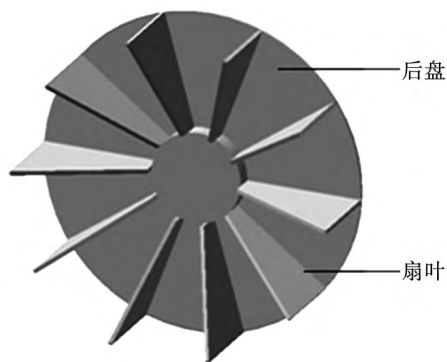


图2 外风扇物理模型

1.3 基本假设与边界条件

为合理的简化求解,本文给出的基本假设与边界条件如下:

- 1) 认为槽内所有绝缘(包括槽楔)的热性能与主绝缘相同;
- 2) 认为涡流效应对每根股线的影响相同,定子绕组铜耗取其平均值,并认为端部是直的;
- 3) 空气自由流入入口,入口采用 pressure-inlet 边界条件;
- 4) 用空气域包裹出口,空气自由流出出口,出口采用 pressure-outlet 边界条件;
- 5) 紧贴风扇及紧贴转子的流体域设为旋转流体域,设置成与电机相同的角速度 154.46 rad/s ,其他区域为静止区域,扇叶及后盘所在的壁面设置为 moving wall,速度为 0;
- 6) 电机转速为 1475 rpm ,旋转方向为顺时针。

2 电机原始外风扇结构温升及流变特性计算

2.1 电机温度场及流变特性计算

研究对象选取图1所示的计算域模型,为避免回流现象的产生,离心式风扇端部空气域进行了加长,结合电机各部分材料属性,将电机各部分热源损耗及边界条件施加到计算域的相应部分,经过有限体积元计算,得到电机在额定负载时的稳态温度场。其中电机机壳的整体温度分布如图3所示。

由图3及数值计算结果可知,机壳整体轴向温度分布中间较高,逐渐向两侧递减,原因是定子铜耗、定子铁耗及转子通过气隙传递过来的能量传递到定子铁心,而定子铁心与机壳是紧密接触的,所以机壳中部温度较高。而由于电机接线盒对风扇强制吹过空气的阻碍作用,空气冷却能力迅速下降,导致

此处的温度最高。

温度最低的地方出现在机壳端部靠近风扇侧散热翅的地方,是因为此处是外风扇吹动的空气最先经过的地方,空气温度最低,并且流动流畅,故该区域温度最低。

由于风扇端的空气经风扇作用强制吹过机壳,到达机壳传动端时温度有所升高,并且空气由风扇端到达另一端时,风量有所减弱,造成空气冷却能力下降,所以电机机壳传动端的温度比风扇端的温度高。

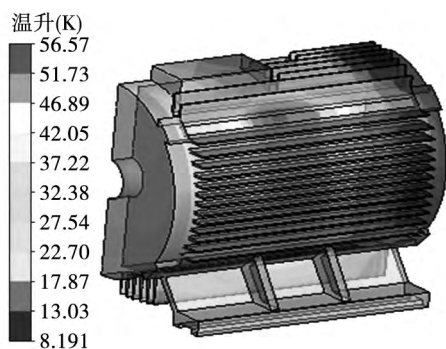


图3 电机机壳温度分布

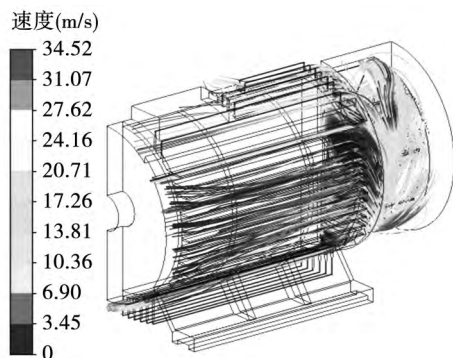


图4 电机机壳外迹线分布

经过电机机壳空气的迹线图如图4所示,迹线图起点为外风扇出口,从图中可以看出,空气经风扇作用后沿着风扇后盘与风扇罩之间的空间吹入电机机壳,一部分空气受到端盖及散热翅的阻碍作用,导致空气经过端盖后速度下降,以较低的速度吹过散热翅风沟到达另一端,而另一部分则在风扇处形成扰流。

气流速度最低的地方出现在机壳中部,这是由于气流在机壳中部相邻散热翅风沟间做横向运动,相邻散热翅对气流的阻碍作用较大,导致此处的气流速度急剧下降。

电机顶部相对于电机侧面机壳来说,风量较小,气流速度较高,是因为此处的气流不在相邻散热翅

间做横向运动,而是沿着散热翅风沟做轴向运动,散热翅对其阻碍作用最小所致。由于空气在机壳外表面沿轴向流动时,受到吊装部件、接线盒及基座筋的阻碍,这些位置附近空气流动出现绕流现象,对流换热能力差,因此机壳部分的最高温升出现在近接线盒位置。

2.2 计算结果与实验数据对比

本文中的实验利用 PT100 对定子绕组及转子结构件进行温升测定,图 5 为传感器埋设位置示意图。

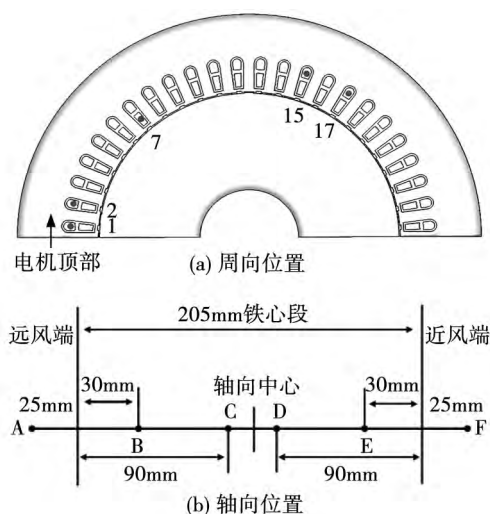


图5 传感器位置分布图

沿周向给定子绕组依次编号,靠近接线盒一侧的定子绕组编号为 1,从定子绕组远离电机端部离心式风扇的一侧的远风端开始,取轴向位置“A-F”点定子绕组截面进行分析。其中传感器埋设在 1 号槽底部,靠近远风端铁心位置 30 mm 处,即“B”位置,则用“1-B”表示;传感器位于 2 号槽槽底位置,轴向 C 点,即“2U-C”,其中 U 代表靠近槽底绕组,D 为靠近槽口绕组,其余位置可依次类推^[4]。

为验证数值计算结果的正确性,将得到的实验温升值与数值计算结果进行对比,如表 1 所示:

表1 实验温升值与数值计算结果对比

传感器编号	实验值/K	计算值/K	相对误差/%
1-B	86	89.06	3.56
2-C	83	85.31	2.78
7-A	91	97.10	6.70
7-F	92	87.84	4.52
15-E	83	84.18	1.42
17-D	85	86.55	1.82

通过比较可知:测温点当中最大及最小相对误差分别为 6.70% 和 1.42%,由此可见,计算所得数据与实测得到数据基本吻合,证明了计算的准确性。由此可见,此计算模型和计算方法是正确的,能够满足工程需要。

3 基于流热特性研究的电机外风扇结构特性优化分析

从离心式风扇的设计要点可以看出^[1],根据电机实际结构确定外风扇外径 D_2 、电机所需工作流量 q_{V_m} 及风扇额定工作时的压力 p ,则风扇内外径、扇叶宽度是唯一确定的,根据设计要点核算此原始结构风扇,各参数均在合理范围内,而通过对机壳温度分布及迹线分布的分析,可以看出在流经机壳中部及顶部的气流中高速气流所占比例不高,特别是机壳中部高速气流较少,而这两处是温升最高的部位,若能提高这两处的风速,则会进一步降低电机温升,提高风扇的冷却能力。那么尝试通过改变风扇的叶片形状或叶片入口角来提高流经机壳表面的风速,进一步降低电机温升及风磨损耗,提高外风扇的冷却能力。

3.1 叶片形状的优化

原始风扇为梯形叶片,叶片切除角度为 30° ,如图 6 所示。

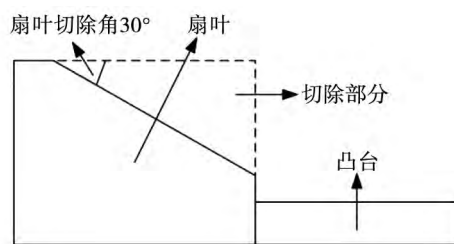


图6 原始扇叶草图

为了探究合适的风扇叶片形状,本文提出了 I、II、III 三种叶片,扇叶切除角度分别为 10° 、 20° 和 35° ,并在风罩中部做截面,分别进行数值计算,得到风罩截面的空气迹线图如图 7 所示。

对比图 7 不同形状叶片下风罩中的扰流情况,可以看出由于风扇的作用,空气在风罩内呈螺旋状运动,并且在风罩内壁处达到最高速度。各方案扇叶之间均存在扰流现象,但由于扇叶表面积的不同,导致风扇作用下的空气流动情况有所差异,因此扰流情况也有所不同。其中方案 I 风罩内扰流现象最为严重,方案 III 扰流现象最为轻微,原始风扇、方案

II 扰流情况类似,介于二者之间。可见对于梯形叶片,叶片形状同风罩内扰流情况有一定联系,增大扇叶切除角度可以减轻风罩内扰流现象。

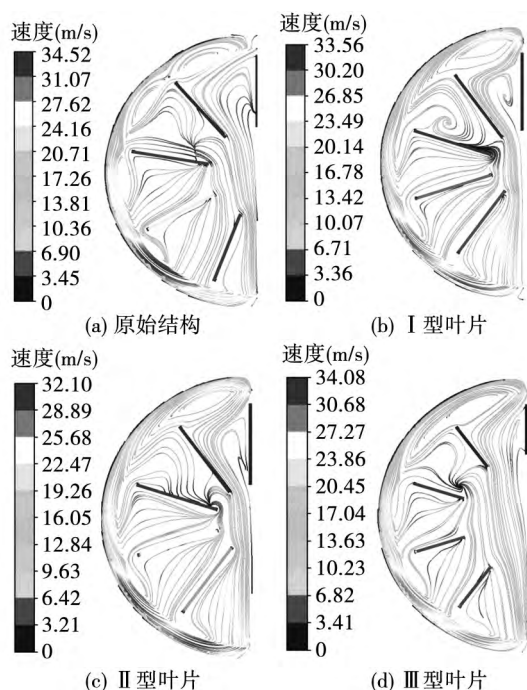


图7 不同叶片形状下扰流情况

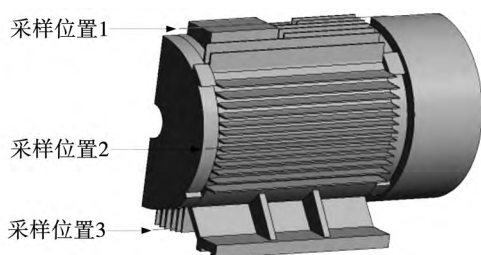


图8 机壳外采样直线

为探究更改叶片形状对流经机壳气流的风速影响,将机壳外侧设置三条采样直线,长度从风扇出口到另一侧端盖的外表面,如图8所示,其中直线1位于接线盒上方,直线2位于机壳中部上方,直线3位于机壳下部。经过数值计算,给出了三条采样位置上的风速分布特征,如图9所示。

图9为在原始结构及三种方案下的三条采样直线风速对比图,气流自风扇流出后,随着轴向长度增加,散热翅顶部附近空气流动速度有升高的趋势,但由于气流受到接线盒和基座筋的阻碍作用及在散热翅沟内的能量损失,风速均呈现为先增加后减小的趋势。机壳中部的风速总体上要高于机壳顶部及底部,这是因为同机壳顶部及底部不同,气流在机壳中部没有阻碍,气流可在机壳中部沿轴向散热翅风

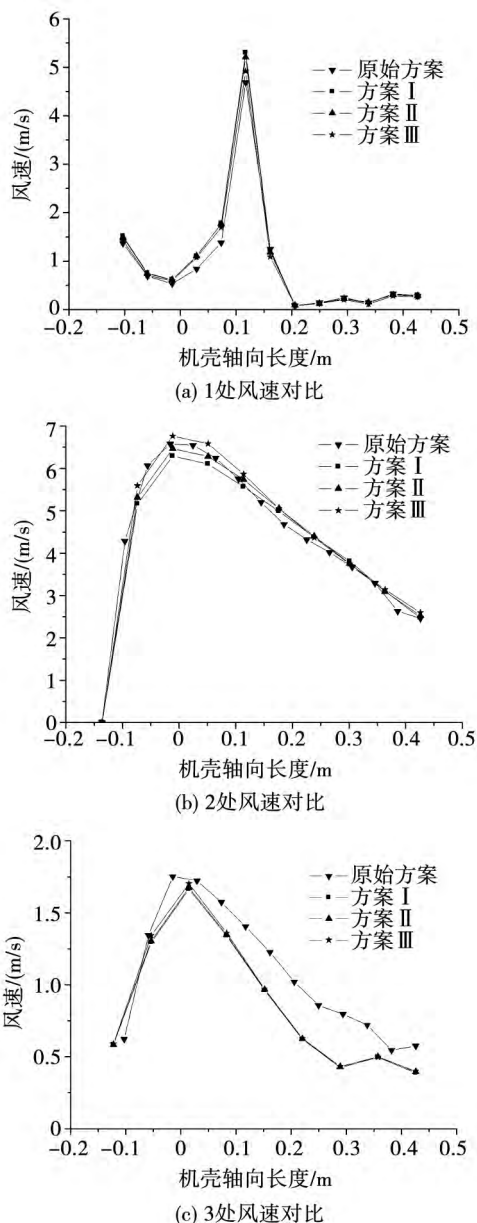


图9 不同叶片形状下风速对比图

沟径直到达另一端。

由于叶片形状不同,风扇产生的压力有所差异,因此在机壳表面同一位置的风速也因此不同。从图9(a)可以看出,三种方案经过接线盒前的风速均比原始方案大,方案I和方案II的风速分布相似,方案III风速稍低些,但方案I的风速要高于其他方案。而从图9(b)可以看出,方案III的风速最高,原始方案稍低,方案II次之,方案I风速最低。从图9(c)可以看出,三种方案风速均比原始方案低,风速情况很类似,但方案III的风速稍高些。

由图9可以得出结论,适当减小扇叶切除角可以提高流经机壳顶端的风速。

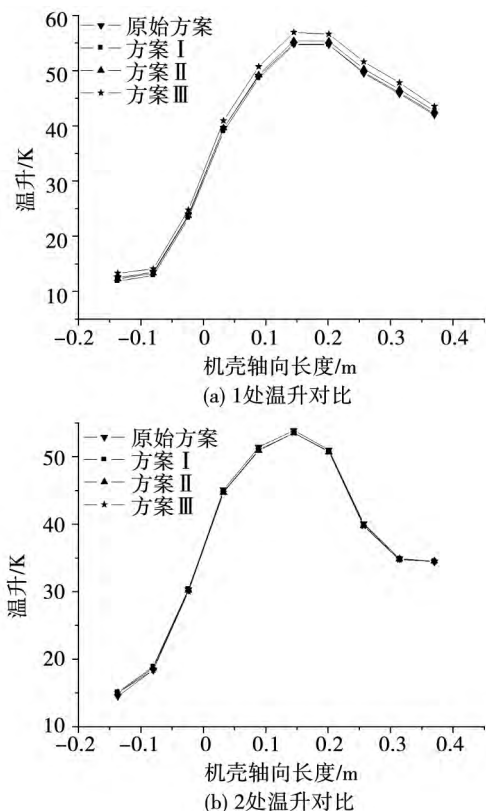


图10 不同叶片形状下温升对比图

由于在机壳周向上,较高温升出现在机壳顶端及中部,则通过比较采样直线1和2轴向温升情况来确定优化方案。图10为在原始结构及三种方案下的采样直线温度对比曲线图,可以看出机壳温升与机壳表面风速有明显的对应关系,这是因为电机运行产生的热量传递到机壳,而机壳表面风速越高,电机表面与周围空气的热交换速度越快,电机冷却效果越好,电机表面温升越小。从图10(a)可以看出,采用方案III叶片的机壳顶部温升最高,方案I的机壳顶部温升最低,其他形式叶片下的机壳顶端温升基本相同;从图10(b)可以看出,三种方案下机壳中部的温升基本一致,均略低于原始方案。可见扇叶形状的改变可较小程度降低机壳顶部及中部的温升,减少机壳轴向温升梯度,其中采用方案I叶片的机壳轴向温升梯度最小,机壳承受热应力较小,机壳表面温度分布最均匀。

不同叶片形状下电机各部分最高温度如表2所示,从表2可以看出,改变叶片形状对电机总体温升影响较小,定子部分和转子部分温升变化趋势一致,叶片形状对定子部分的温升影响比转子部分稍大,这是由于定子部分产生的热量被风扇作用的空气直接带走,而转子部分产生的热量通过热传递传递到

定子部分再通过机壳散发出去,此部分温升受外风扇的影响小。

表2 不同叶片形状下电机最高温度对比

K

电机部位	方案 I	方案 II	方案 III	原始方案
机壳	356.50	357.11	358.52	356.57
端盖	342.67	342.93	343.53	342.37
定子压板	374.13	374.56	375.56	374.13
定子绕组	396.13	396.46	397.23	395.99
定子绝缘	395.58	395.91	396.70	395.44
槽楔	386.42	386.97	387.79	386.47
定子齿	372.73	373.20	374.31	372.74
定子轭	361.87	362.44	363.78	361.91
转子压板	437.60	437.75	438.16	437.78
转子齿	451.22	451.38	451.80	451.44
转子绕组	451.23	451.40	451.81	451.46
转子轭	451.17	451.33	451.74	451.39

由于电机外风扇运行过程中产生的风磨损耗转化为散发出风罩的内能,因此在耦合能量方程的情况下,利用有限元软件后处理求出的风罩出入口的内能差即为外风扇的风磨损耗。据此求出各方案下的外风扇的风磨损耗如表3所示。

表3 不同叶片形状下外风扇风磨损耗对比

W

方案 I	方案 II	方案 III	原始方案
186.72	185.43	181.89	185.65

从表3可以看出,改变风扇叶片形状可以降低风扇的风磨损耗,其中方案III风磨损耗最低,同外风扇原始结构相比下降了2%,这是由于电机风磨损耗由转子旋转引起的转子表面与冷却气体之间的摩擦损耗以及安装在电机转轴上或由电机本身转轴驱动的风扇所需功率组成^[2],而风扇的功率与风扇工作时的压力和流量有关,叶片形状的差异导致风扇产生的压力有所不同,而改变叶片形状可以减少风扇消耗功率,从而减少风磨损耗。

3.2 叶片入口角的优化

空气进入风扇时,叶片相对速度的方向与叶片入口角相吻合时,此时对叶片冲击最小,风扇损耗最小。为探究改变叶片入口角对风扇冷却性能的影响,将叶片入口角在 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 间变化,分别对四种叶片在不同入口角下进行数值计算,如图11为III型叶片在不同入口角下的风罩截面迹线分布,I型、II型叶片的迹线分布情况与此类似。

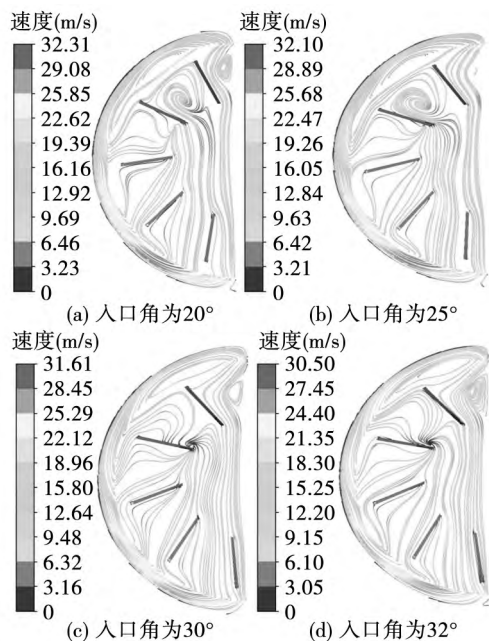


图11 III型叶片在不同入口角下的扰流情况

从图中可以看出,同种叶片在不同的入口角下风罩内扇叶间的扰流情况有较大差异,其中入口角为20度时扰流现象最为严重,入口角为30度时较为轻微,这是因为叶片入口角不同,空气在扇叶作用下形成的流体场分布也有所差异。可见适当的入口角可以减缓风罩内扰流现象。

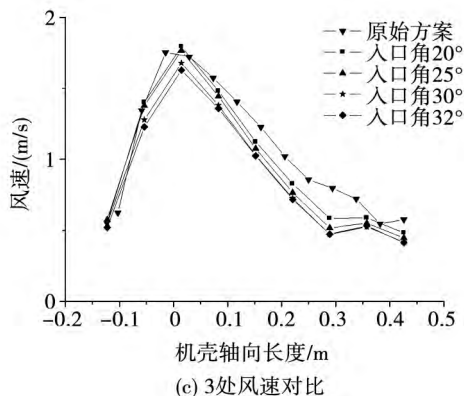
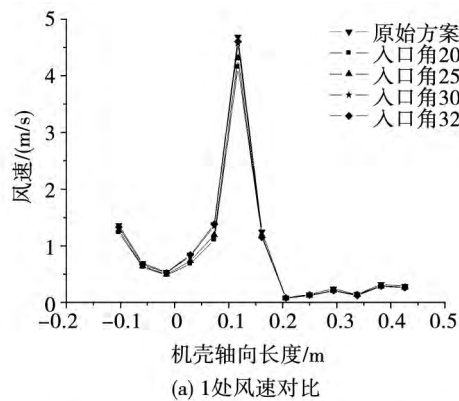
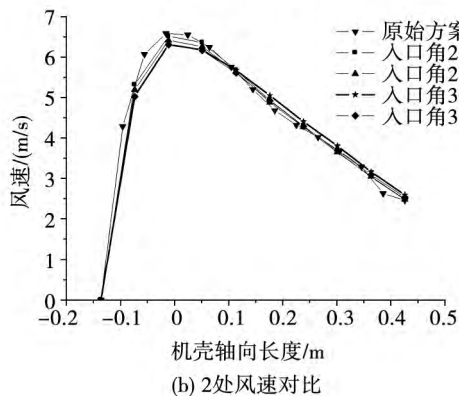


图12 不同入口角下风速对比图

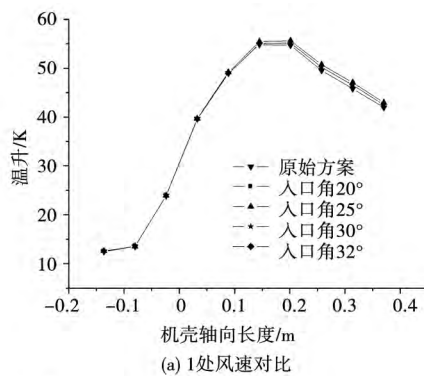
由于空气流入风扇时的角度不同,导致在风罩内相应的流体场分布有所差异,气流在流出风扇时周向位置上的速度分布也因此不同。如图12所示为不同入口角下三处采样直线的风速对比图,在从图12(a)可以看出,随着入口角的增加,机壳顶端的风速也随之缓慢增加,增量比较小,但改变叶片入口角后的风速均比原始结构小;图12(b)可以看出,改变叶片入口角并不能提高在机壳中部的风速,风速在此处的最大值随着入口角的增大而减小;而从图12(c)可以看出,机壳底部的风速情况与叶片入口角并无明显的线性关系,改变叶片入口角不能提高此处的风速。由此可见,改变扇叶入口角并不能有效提高流经机壳表面的风速。



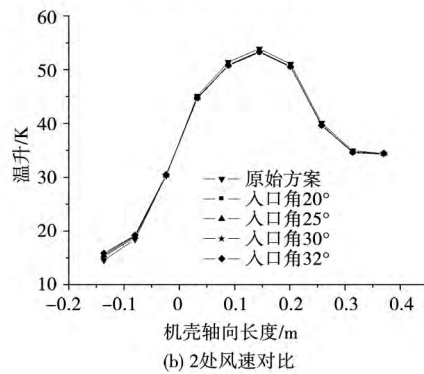
(a) 1处风速对比



(b) 2处风速对比



(a) 1处风速对比



(b) 2处风速对比

图13 不同入口角下温升对比图

从图 13 可以看出,改变叶片入口角不能降低机壳的轴向温升,这是因为改变叶片入口角不能有效提高流经机壳表面的风速,与之相对应的机壳表面也不能与周围空气有更快的热交换速率所致。从图 13(a) 可以看出,叶片入口角为 25 度时的机壳轴向温升梯度最高,20 度次之,而其他入口角时的温度梯度轴向分布基本一致,比前两种情况温升梯度小;

从图 13(b) 可以看出,原始结构风扇作用下机壳轴向温升梯度最大,其余入口角下的温升梯度均较低,其中叶片入口角为 30 度时梯度最小,入口角为 20 度的次之。由此可见,改变扇叶入口角并不能有效降低机壳表面的温升,但可以较小程度的减小机壳表面的温升梯度,温度分布更均匀。

表 4 不同叶片入口角下电机各部件最高温度对比 K

入口角	I 型叶片				II 型叶片				III 型叶片				原始方案 0°
	20°	25°	30°	32°	20°	25°	30°	32°	20°	25°	30°	32°	
机壳	355. 15	355. 23	355. 91	356. 21	355. 39	355. 55	356. 04	356. 65	356. 93	357. 38	357. 35	357. 49	356. 57
端盖	342. 04	342. 14	342. 39	342. 66	341. 97	342. 15	342. 37	342. 75	342. 71	343. 05	343. 02	343. 09	342. 37
定子压板	373. 15	373. 24	373. 78	374. 07	373. 24	373. 40	373. 81	374. 33	374. 34	374. 73	374. 73	374. 88	374. 13
定子绕组	395. 40	395. 48	395. 95	396. 24	395. 39	395. 53	395. 94	396. 40	396. 18	396. 53	396. 56	396. 73	395. 99
定子绝缘	394. 83	394. 91	395. 38	395. 67	394. 83	394. 97	395. 37	395. 84	395. 64	395. 99	396. 01	396. 18	395. 44
槽楔	386. 05	386. 11	386. 23	386. 45	385. 69	385. 80	386. 06	386. 69	386. 90	386. 92	386. 98	387. 06	386. 47
定子齿	371. 66	371. 75	372. 31	372. 60	371. 78	371. 94	372. 37	372. 91	373. 01	373. 40	373. 42	373. 54	372. 74
定子轭	360. 59	360. 69	361. 29	361. 59	360. 79	360. 96	361. 41	362. 00	362. 27	362. 68	362. 70	362. 81	361. 91
转子压板	437. 22	437. 33	437. 70	438. 03	437. 03	437. 21	437. 57	438. 00	451. 44	437. 69	437. 80	438. 01	437. 78
转子齿	450. 89	450. 99	451. 37	451. 70	450. 71	450. 87	451. 23	451. 66	451. 09	451. 34	451. 45	451. 68	451. 44
转子绕组	450. 90	451. 01	451. 38	451. 71	450. 72	450. 83	451. 24	451. 67	451. 11	451. 35	451. 46	451. 69	451. 46
转子轭	450. 84	450. 94	451. 32	451. 65	450. 65	450. 82	451. 18	451. 61	451. 04	451. 28	451. 40	451. 62	451. 39

从表 4 可以看出,更改扇叶入口角对电机各部件温升影响不大,在相同叶片入口角下改变叶片形状时电机各部分温升变化趋势不一致。

风扇叶片入口角也可以降低风扇的风磨损耗,这是由于空气进入风扇时,叶片入口角越接近叶片与空气相对速度的方向,空气对叶片冲击越小,风扇对应的风磨损耗就越小。

表 5 不同入口角下外风扇风磨损耗对比

叶片	入口角 /°	风磨损耗 /W
I 型	20	188. 09
	25	187. 97
	30	184. 60
	32	183. 09
II 型	20	189. 42
	25	188. 76
	30	185. 87
	32	182. 90
III 型	20	187. 21
	25	186. 12
	30	184. 95
	32	182. 95

通过表 5 可以看出,三种叶片下的风磨损耗均随着入口角的增加而降低,对于同种叶片而言,改变

4 结 论

本文通过对 TEFC 电机不同结构特征风扇条件下的电机内流体场及温度场性能的分析研究,综合考虑了风扇的出风能力及产生损耗,明确了电机风扇设置的最优方案,具体得到如下结论:

- 1) 减小扇叶面积或者采用合适的叶片入口角可以减轻风罩内的扰流现象,提高风扇的利用效率,更充分的发挥风扇的冷却能力;
- 2) 改变扇叶切除角对电机总体温升影响较小,但会大幅减小风磨损耗,适当减少扇叶切除角可提高机壳顶部风速;
- 3) 单独改变扇叶入口角并不能有效提高流经机壳表面的风速,对降低电机各部件温升及风磨损耗作用很小;

4) 调整扇叶切除角或叶片入口角均可以降低电机轴向温升梯度,叶片入口角为 30 度时轴向温升梯度最小,温度分布最均匀。

参考文献:

- [1] 李贤明,刘文超,张永义. 大功率高速电动机高效低噪声离心风扇的研究与设计 [J]. 防爆电机,2005,40(1):9-12.
- [2] 汪书苹,赵争鸣,冯垚径. YKK355-630 系列高压三相异步电动机高效风扇设计 [J]. 清华大学学报: 自然科学版,2009,49(1):9-12.
- [3] 魏书慈,李士菊. 浅谈中小型电机风扇的设计 [J]. 电机技术,1996(2):29-35.
- [4] 罗次申. 动力机械测试技术 [M]. 上海: 上海交通大学出版社,2001.
- [5] 王成. 电机冷却风扇出口流量分配研究 [D]. 上海: 上海交通大学,2008.
- [6] 刘立峰. 大型电机冷却风扇的实验测量与模拟计算 [D]. 上海: 上海交通大学,2007.
- [7] 李光宇,袁立强,赵争鸣,等. 基于计算流体动力学的高效交流电机风扇优化 [J]. 电工电能新技术,2014,33(11):24-25.
- [8] 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):79-86.
- [9] 刘全忠,宫汝志,王洪杰,等. 汽轮发电机冷却风扇的数值模拟及优化 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,42(3):442-445.
- [10] 王海涛. 不同驱动条件下感应电机通风与传热分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学,2014.
- [11] 陈世坤. 电机设计 [M]. 北京: 机械工业出版社,1997.
- [12] 丁树业,孙兆琼,徐殿国,等. 3MW 双馈风力发电机传热特性数值研究 [J]. 中国电机工程学报,2012,32(3):137-143.
- [13] 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.
- [14] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却 [M]. 北京: 科学出版社,1992.
- [15] 王福军. 计算流体动力学分析 - CFD 软件管理及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社,2004.
- [16] POTTER Wiggert. Mechanics of Fluids [M]. 北京: 机械工业出版社,2003.
- [17] STATON D A, CAVAGNINO A. Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008,55(10):3509-3516.
- [18] TRAXLER-SAMEK G, ZICKERMANN R, SCHWERY A. Cooling Airflow, Losses, and Temperatures in Large Air-cooled Synchronous Machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(1):172-180.
- [19] LIU Y J, LEE Y, JUNG H K, et al. 3D Thermal Stress Analysis of the Rotor of an Induction Motor [J]. IEEE Transactions on Magnetic,2000,36(1/4):1394-1397.
- [20] XYPTERAS J, HATZIATHANASSIOU V. Thermal Analysis of an Electrical Machine Taking into account the Iron Losses and the Deep-bar Effect [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion,1999,14(4):996-1003.
- [21] SUHAS V Patankar. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow [M]. Minnesota University Minneapolis Department of Mechanical Engineering,2009:130-156.
- [22] HUANG Y, SRINATH V E. Detailed Heat Transfer Distributions in Two-pass Square Channels with Rib Tabulators and Bleed Holes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1998,41(23):3781-3791.

(编辑: 关毅)