

家用高压清洗机风冷串激电机流场分析及流固耦合传热研究

李郁松¹, 邢改兰¹, 黄建平², 周邵萍¹

(1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237;

2. 浙江亿力机电股份有限公司, 浙江 嘉兴 314100)

摘要: 针对家用高压清洗机风冷串激电机定子绕组温升过高的问题, 以一台 HC8840F 单相风冷串激电机为研究对象, 建立电机全域三维流固耦合传热模型。在此基础上, 使用流固耦合传热计算方法模拟获得串激电机内部流场及温度场, 并搭建试验平台, 通过不同工况下样机定子绕组的温升试验验证串激电机三维流固耦合传热模型的合理性。在模型验证的基础上, 分析了风冷系统流场和温度场的分布规律, 为结构优化设计指导方向。此外, 从降耗设计的角度出发, 研究了风冷系统中后端离心风轮对电机内流场与温度场的影响。仿真结果表明, 内部导风轮的设置改善了气流流动, 能使定子绕组平均温升降低了 3.3 °C。

关键词: 串激电机; 流固耦合; 温度场; 风冷系统

中图分类号: TM344.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)03-0100-08

doi: 10.12177/emca.2023.007

Research on Flow Field Analysis and Fluid-Solid Coupling Heat Transfer in Air-Cooled Universal Motor Used in Household High Pressure Washer

LI Yusong¹, XING Gailan¹, HUANG Jianping², ZHOU Shaoping¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Zhejiang Yili Machinery and Electric Co., Ltd., Jiaxing 314100, China)

Abstract: The air-cooled universal motor used in the household high pressure washer has a problem of overheating in the stator winding. A three-dimensional fluid-solid coupling heat transfer model of the motor is built using an example of an HC8840F air-cooled single-phase series motor. On this foundation, the internal flow field and the temperature field of the series motor are simulated using the fluid-solid coupling heat transfer calculation method. To confirm the validity of the three-dimensional fluid-solid coupling heat transfer model of the universal motor, the stator winding of the motor is subjected to temperature rise test under various working conditions. On this basis, the guidelines for the design of structural optimization are provided. From the perspective of consumption reduction design, the impact of rear fan on the internal flow field and the temperature field of the motor is analysed. The findings demonstrate that the internal fan alters the airflow and make the average temperature of the stator winding decrease by 3.3 °C.

Key words: universal motor; fluid-solid coupling; temperature field; air cooling system

收稿日期: 2022-12-07; 收到修改稿日期: 2023-01-05

作者简介: 李郁松(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为流体机械数值分析与优化。

周邵萍(1966—), 女, 博士, 教授, 研究方向为流体机械及工程状态监测与故障诊断。

0 引言

单相风冷串激电机因其直交流两用、起动转矩大、转速高与体积小等优点,广泛用于清洗机、电动工具、小型家电、小型机床等领域^[1]。然而,因其工作时的高电流、高转速,使得串激电机易发热,其设计制造过程的难度增加,过高的温升会加速定子绕组绝缘层的老化,影响电机的工作性能。因此,如何准确获得电机内部流场与温度场并研究其分布规律成为串激电机设计中的重要任务。

近年来,国内外已经有诸多学者对电机的流场与温度场展开研究^[2-6]。关于温度场的研究方法主要分为集总参数分析法、等效热网络法、有限体积法^[7],针对永磁同步电机已经有较为成熟的损耗估计公式与温度场计算先例,通过流固耦合传热理论估算电机的温度场分布被证实是可行的^[8-11]。文献[12-13]通过对电机散热系统进行数值仿真研究以探索电机通风散热规律,但是针对不同类型的电机通常不具有可拓展性,而针对串激电机的研究多集中于电路控制与电磁特性^[14-18],对串激电机中流场与温度场分布的报道则较少。

本文以一台家用高压清洗机的串激电机为例,建立包括电机内部各发热部件的电机全域三维流固耦合传热模型并进行模拟计算。搭建串激电机绕组温升试验测试平台,测试不同工况电流下定子绕组的温升值,验证数学物理模型与流固耦合传热研究串激电机内流场与温度场方法的合理性。在此基础上对串激电机内流场运动与温度分布规律进行研究。另外,从电机降耗设计角度出发,探究内部离心导风轮的设置对电机内流场与温度场的影响。

1 计算模型与试验验证

1.1 电机基本参数与物理模型

本文研究对象是家用高压清洗机中型号为HC8840F的单相风冷串激电机,由风罩、上下支架、定转子绕组、铁心、碳刷以及风扇、导风轮等部件组成。风冷系统为前端轴流风扇与后端离心导风轮的双旋转机械设计,转子绕组为绕线式结构,铁心由硅钢片叠压而成,电机参数如表1所示。

表1 电机参数

参数名称	参数值
额定频率/Hz	50
额定电压/V	220~240
转子槽数	22
定子绕组线径/mm	0.85
定子绕组匝数/T	120
定子绕组线径/mm	0.42
定子绕组匝数/T	18
气隙长度/mm	40
绝缘等级	F

电机的三维结构模型如图1所示。根据电机冷却结构,建立外部包裹空气域的电机三维求解计算域模型,并将电机计算域分别对旋转区域和静止流域进行网格划分。电机风冷系统流体求解域如图2所示,进气端流域延长为风扇直径的10倍以防止进口回流。在网格离散过程中,对前后骨架、定转子绕组铁心、轴流风扇与离心风轮进行局部尺寸控制。流域采用四面体网格划分,流固耦合传热面划分边界层网格以提高计算精度,轴流风扇动域采用Wrap包面网格,总体网格离散细节如图3所示。

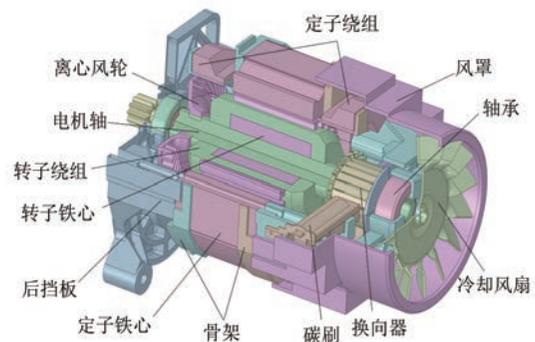


图1 串激电机结构示意图

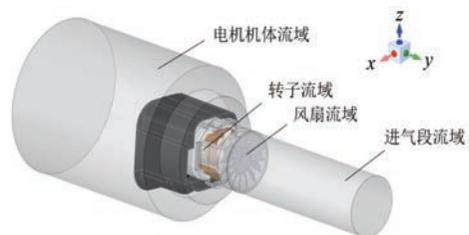


图2 串激电机三维流固耦合求解模型

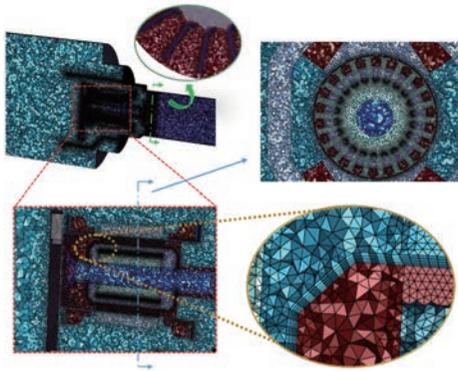


图3 求解域网格离散

1.2 数学模型

电机内流场空气流动遵循质量守恒定律、动量守恒定律以及能量守恒定律。当空气处于稳态且不可压缩时,质量守恒方程为

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

式中: \mathbf{V} 为速度矢量; ρ 为流体密度。

运动方程是对流体动量守恒定律的描述。其在笛卡尔坐标系中的表达式为

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho f_x \\ \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho f_y \\ \nabla \cdot (\rho w \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{cases} \quad (2)$$

式中: τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 、 τ_{zy} 、 τ_{zz} 为黏性力在坐标系中各方向上的分量; p 为流体微元上的压强; f_x 、 f_y 、 f_z 分别为单位质量力在 x 、 y 、 z 三个方向上的分量。

使用流固热耦合传热方法,电机内部发热部件的热传导、冷空气与内部部件间的热对流可以用导热控制方程与能量守恒定律描述,其具体表达式为

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} T) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_p} \text{grad} T \right) + S_T \quad (3) \\ \left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= -q_v \\ \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s &= -\alpha (T - T_f) \end{aligned} \right. \quad (4) \end{cases}$$

式中: C_p 为比热容; k 为流体传热系数; S_T 为黏性

耗散项; λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的导热系数; q_v 为热源损耗密度; α 为对流换热系数; T 为固体温度; T_f 为对流换热面 s 外界空气的温度,对流换热面 s 为固体与冷空气的耦合边界。

1.3 基本假设及边界条件

串激电机内流场雷诺数超过2 300,因此求解的数学模型采用湍流模型。从简化计算模型与确保符合实际物理过程的角度出发做如下基本假设:

(1) 在流体流动稳定时,对电机外风路流场进行求解,所以不考虑时间对求解方程的影响;

(2) 电机内流速的马赫数较小,则空气视为不可压缩流体($Ma < 0.3$);

(3) 由于流体流速较快,忽略流体域内流体的浮力和重力的影响;

(4) 定子、转子绕组导线排列紧密,忽略股线间绝缘与集肤效应,用相同体积的铜、铝块等效;

(5) 电机热源生热均匀,材料导热率为常数,忽略其随温度升高而发生的变化。

本文采用基于压力基的隐式求解器,采用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型与Scalable壁面函数,使用SIMPLEC算法二阶迎风格式,对电机流场的进口与出风口分别采用压力入口与压力出口的边界条件,初值设置为1个标准大气压,环境温度为300 K。对旋转动区域使用多重参考系(MRF)模型进行计算,动静区域之间设置Interface交界面。

1.4 网格无关性验证

针对计算模型采用不同网格划分尺寸,得到不同网格数量的模型。在234、244、254 V三个工况下对不同输入功率以及风扇转速的模型进行计算,图4为不同工况下定子绕组温升值随网格数量的变化示意图。计算值在网格数量达到 1.25×10^7 后没有发生明显变化,考虑计算资源的占用与效率问题,选用全局网格尺寸控制在1.5 mm、网格数量为 1.25×10^7 的划分方式对模型进行离散。

1.5 试验验证

使用确定的网格尺寸对电机进行网格离散,并计算206~254 V五种工况下电机定子绕组温升值。搭建试验平台如图5所示,测试串激电机在上述五组工况下的风扇转速与绕组阻值。测量采用Dm6234p电阻测量仪、PF120电参数测量仪、QJ83-1数字直流电桥等试验设备,使用电阻法测量定子绕组温升值。四个测温点分别置于

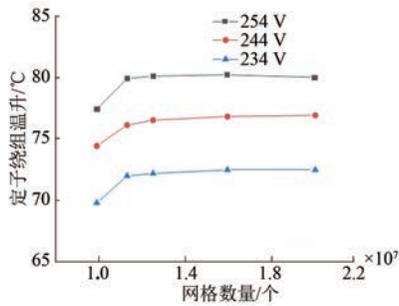


图4 网格无关性验证

上下定子绕组的前后端部,测量电机稳定工况运行时的热态电阻阻值。测得定子绕组端部各测点的冷热态阻值,由电阻法换算得到绕组平均温升值,五组工况下定子绕组温升的仿真与实测值对比如下图6所示。其中最大相对误差为4.91%,最小误差为电机在254 V工况下达到0.72%,五组工况平均误差为2.63%,证明绕组温升测试结果与仿真计算结果吻合度较好,验证了串激电机流固耦合传热计算模型的合理性。



图5 串激电机温升测试

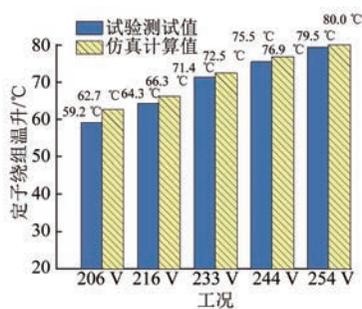


图6 不同工况下定子绕组温度仿真与实测值对比

2 流场计算结果分析

为研究串激电机工作时内部流场的流动规律以探究串激电机的发热问题,需要对电机内流场进行分析。以电机在234 V工况下工作的内流场为例,电机转速为17 500 r/min,整体串激电机风

冷系统流场三维流迹图如图7所示。空气经外风罩进入到轴流风扇表面,空气沿径向运动时会受到风罩机壳壁面的阻碍,产生沿轴向的空气流动,分别形成有效流量和涡流损失。冷空气在风扇的驱使下流经转子与定子表面,与发热部件进行热交换,热空气受到后部导风轮的离心作用,沿着风罩排出电机。

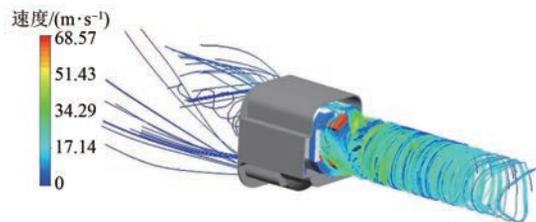


图7 整机表面空气流迹图

2.1 风扇部分流场

图8为风扇中间剖面上的速度流线图,可以观察到在风扇前端产生了较多涡流,在两片扇叶中间甚至存在多个旋涡,在涡流存在区,空气流速相应较低,流体能量损耗增大。图9为风扇中截面湍流动能云图,湍流动能是湍流模型中评估湍流强度的有效指标。图9中叶片扭转角处出现部分带状湍流动能集中,这是因为靠近扭转处叶片的曲率增大,流体流经此处易发生转捩,且风扇边缘会有二次流产生,湍流动能较大的位置易引起涡流噪声。此外,图9中3点钟与9点钟方向叶片尖端靠近风罩处也产生了较大的湍流动能集中,这是由于此处风扇后端为碳刷支架,对气流形成阻挡,气流在此处回流所造成。可见,此串激电机的风扇结构设计不尽合理,还存在改进的空间。过多的涡流损失将导致风扇的效率降低,使得冷却性能下降,引起电机绕组温升过高。

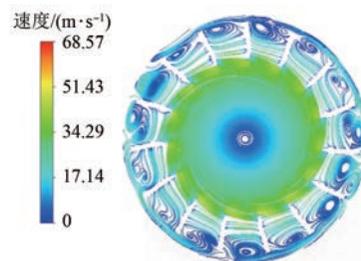


图8 风扇中截面速度流线图(Y=-120 mm)

2.2 电机内流场

图10为电机内流域在XY面与YZ面两个沿

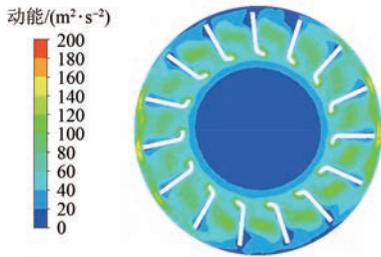


图9 风扇中截面湍流动能云图($Y=-120\text{ mm}$)

轴向相互垂直平面的速度矢量图。在YZ子午截面上,空气经过冷却风扇做功从上下两个方向流经定子绕组前端表面以冷却定子绕组,部分空气在行进过程中受到骨架挡板的阻挡产生回流,并经过电刷支架间隙回流至风扇处。空气在进入电机内部后由于上下骨架挡板的阻挡,使得截面突然收缩产生高速气流,最高速度达到 55.45 m/s 。冷气流分别从内部转子区域和定子铁心通风沟处流过,在定子绕组后端部位形成部分回流冷却绕组。在XY子午面上,空气经过风扇后沿两侧流过转子绕组,最高速度达 41.43 m/s ,在冷却发热的转子绕组后由离心风轮排出至电机外部。

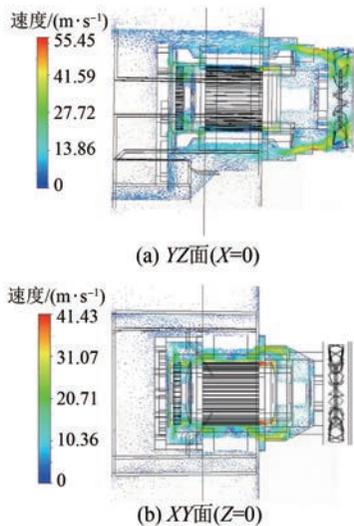


图10 电机内流场速度矢量图

沿轴向截取 $Y=-42\text{ mm}$ 处截面旨在分析电机内部流场,串激电机内部流场XZ面速度分布云图如图11所示。空气由轴流风扇吸入后,一部分由转子流域吸入,冷却转子与定子内部;另一部分流经定子绕组表面,并从上下端的定子铁心通风槽流到电机后端。经过计算可以得到,通过电机内部转子附近流域的冷却空气流量占总流入空

气流量的73.7%,而流经上下部定子铁心表面的冷却空气流量占总流入空气流量的26.3%。转子的旋转作用使周围空气流速较高,最高可达 37.4 m/s ,且前端靠近风扇处速度较高,气流沿定子中部空隙流至电机后部,流场沿轴向大致成中心对称分布。

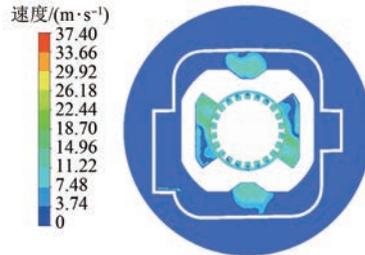


图11 电机内流场速度云图($Y=-42\text{ mm}$)

电机内流场风速监测线 $L_1 \sim L_5$ 示意图如图12所示,为更直观表现电机内部各部位的气流流动规律,考虑到串激电机内流场具有一定中心对称性,在定子铁心内部转子流域取沿轴向监测直线 L_1, L_2, L_5 ,定子铁心上下端通风槽部位取直线 L_3, L_4 ,Y轴轴向范围为 $-70 \sim -10\text{ mm}$,监测五条直线上的风速分布,电机内流场 $L_1 \sim L_5$ 处风速随轴向距离变化曲线如图13所示。

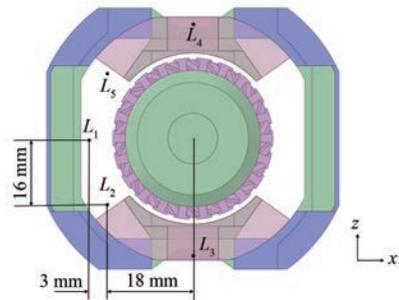


图12 电机内流场风速监测线 $L_1 \sim L_5$ 示意图

由于转子为顺时针旋转,与图11速度云图呈现的结果一致,监测线 L_2 上的速度比 L_5 处更低,气流在 L_5 上的流速最快可达到 17.2 m/s ,分析可得上端定子绕组左侧冷却效果比右侧好,下端定子绕组右侧冷却效果更好。 L_3, L_4 均在 $Y=-17.5\text{ mm}$ 处速度产生突变,原因是该部分定子绕组与挡板骨架间存在通风孔,转子流域气体经过该孔排出,与流经铁心表面气流合流使风速激增,而后流至定子绕组后端使风速降低。 L_1 处风速呈现陡峭变化,原因是由轴流风扇顺时针转动吸

入的气流与转子流域的顺时针气流汇合形成前进上升流,在合流处产生较高流速。

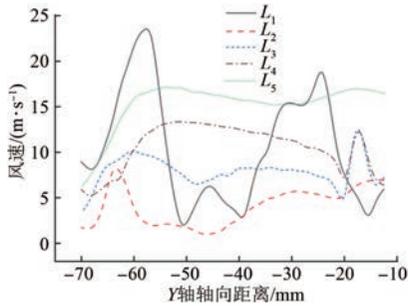


图 13 电机内流场 $L_1 \sim L_5$ 处风速曲线

3 温度场计算结果分析

在流场计算的基础上,对模型进行流场与温度场的耦合求解。依照电机结构参数,在 Ansoft 仿真软件中建立电机的二维计算模型。通过仿真计算,得到电机在 234 V 负载下的定转子铁心、铜铝绕组的损耗功率,并根据建模体积转化为生热率,将各种损耗以热生成率的形式均匀加载到电机的各个部件之中,具体数值如下表 2 所示,电机主要材料属性如表 3 所示,其中定转子铁心由矽钢片叠压而成,为各向异性材料,在笛卡尔坐标系中 X、Z 轴方向的热导率为 $42.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, Y 轴方向的热导率为 $0.57 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

表 2 电机内部发热部件损耗以及热源损耗密度

热源部件	体积/ ($\times 10^{-5} \text{ m}^3$)	损耗功率/ W	损耗密度/ ($\times 10^5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$)
转子绕组	2.833	95.53	33.71
转子铁心	3.803	81.16	21.37
定子绕组	4.378	132.17	30.19
定子铁心	8.984	133.56	14.87

表 3 电机内部分材料物性表

热源部件	材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
转子绕组	铜	8 900	504.0	387.6
转子铁心	矽钢片	7 650	502.4	42.5/0.57
定子绕组	铝	2 719	871.0	202.4
定子铁心	矽钢片	7 650	502.4	42.5/0.57
轴	45 钢	7 850	450.0	50.0
骨架	塑料	1 500	1 200.0	0.32

定子绕组与铁心的温度场分布如图 14 所示,绕组最高温度可达 $105.8 \text{ }^\circ\text{C}$,平均温度为 $99.39 \text{ }^\circ\text{C}$ 。定子绕组前端与风扇较近,自扇冷侧附近空气流速高,冷却效果好,后端风量较小,导热效果较差,温度上升快。定子铁心前端不受支架覆盖的部位受循环冷空气影响冷却效果较好,上下部通风槽部分存在气流通过,能够与发热的铁心进行热交换,散热效果佳。矽钢片轴向热导率较低所带来的轴向温度分层现象较为明显,后端较少有气流流过,导致温升较高。

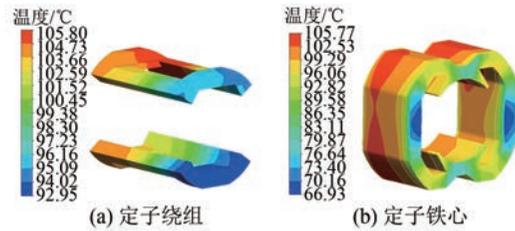


图 14 定子绕组铁心温度场分布

图 15 为转子绕组与铁心部分的温度场分布,转子因其自身的高速旋转,对流换热效果较好。转子绕组最高温度为 $88.72 \text{ }^\circ\text{C}$,高温区域集中在后端风轮处。铁心部分同样由于矽钢片的各向异性,轴向温度出现分层现象。铁心轭部与转子绕组、电机轴紧密接触导致传热较差,而铁心齿部、靴部与冷却空气充分接触,冷却效果较好。而铁心上下端由于气隙狭小冷却空气较少,整体温度比左右两端高。因此,温度场计算结果显示定子绕组的平均温升在串激电机发热部件中最为严重,在进行串激电机设计时需要重点关注定子绕组的温升状况。

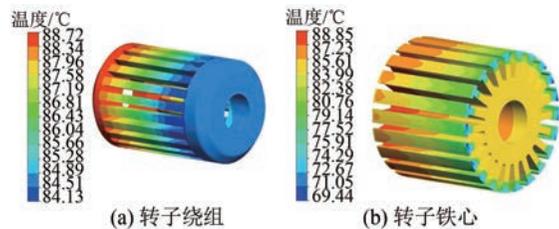


图 15 转子绕组铁心温度场分布

4 导风轮设置的影响分析

导风轮的设置可以改变风冷电机内部流场,但是作为旋转部件会带来电机输入功率的升高,双风扇系统风路是否配合也对整机通风散热效率

起到关键性作用。从电机降耗设计的角度出发,为了探讨电机内部设置离心导风轮的必要性,将设置与去除导风轮的电机模型在相同边界条件下进行数值计算,即模拟风冷系统整体工作与轴流风扇单独工作时的流-温场分布。图 16 所示沿轴向选取四条定子绕组温升监测线 $L_1 \sim L_4$, 监测绕组温升在该条线上的温度值可以对定子绕组详细温度分布规律进行表征与比较。

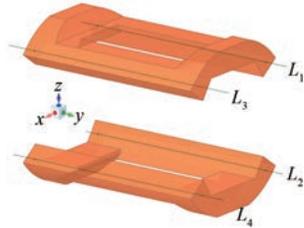


图 16 定子绕组温升监测位置 $L_1 \sim L_4$ 示意图

图 17 给出温度从风扇侧到导风轮侧沿轴向距离的变化规律,图 17 中 $L_1 \sim L_4$ 表示导风轮正常工作状态, $L_{N1} \sim L_{N4}$ 表示无导风轮的工作状态。可以看出,有无导风轮工作时定子绕组温升均是呈现前端自扇侧温度较低,后端风轮侧温度较高的状态。无导风轮时,定子绕组最大温度比导风轮存在时高出了 $5.2\text{ }^\circ\text{C}$, 平均温度上升了 $3.3\text{ }^\circ\text{C}$, 且后端靠近导风轮时曲线更为陡峭,前后温差更大,证明温度上升剧烈,绕组后端未能得到良好的冷却。

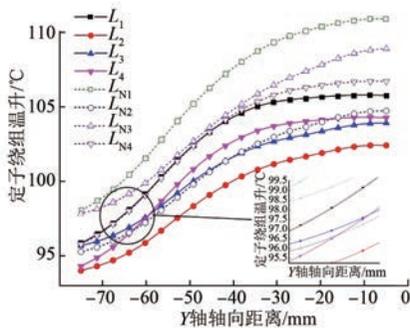


图 17 有无导风轮定子绕组 $L_1 \sim L_4$ 温升对比

图 18 所示为有无导风轮时电机内流场 XY 截面速度矢量图: XY 面 ($Z=0$)。由于转子的高速旋转造成转子附近形成局部低压区域,吸引后方气流不断涌向转子区域,与前方轴流风扇吸入的高速气流交汇,在电机内部形成涡流损失,不利于电机的散热。而在设置导风轮的电机流场中,风

轮旋转形成的前后压差将转子内部与发热部件进行热交换的热空气沿轴向吸入,并沿径向排出,排出的空气流经风轮上下端的定子绕组,继续与定子绕组发生热交换,起到良好的散热效果。通过试验测试得到导风轮的输入功率为 2.3 W , 约占电机总输入功率的 0.17% 。研究证明导风轮有效改善了电机内流场的空气流动情况,大幅降低了定子绕组温升,在电机风冷散热系统中起到了不可或缺的关键作用。

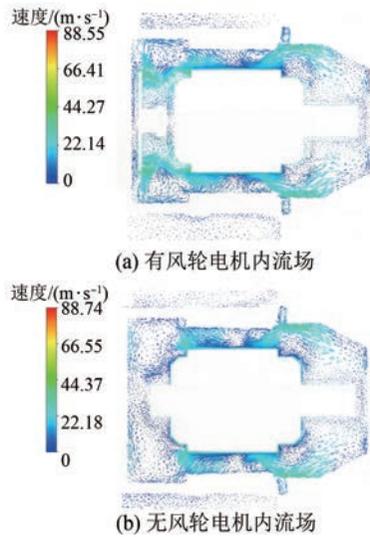


图 18 有无导风轮时电机内流场速度矢量图

5 结 语

(1) 本文针对 HC8840F 单相风冷串激电机进行了流体场计算与流固耦合传热的温度场分析,通过网格无关性验证选用计算效率最高的网格划分尺寸。通过试验测试验证串激电机流固耦合传热计算模型的合理性与模拟结果的准确性。

(2) 流场模拟结果显示试验风扇结构周围存在较多漩涡,引起涡流损耗,导致通风性能的下。电机流域内, 71.7% 的冷却气流流入转子流域,而流经上下部定子铁心表面的冷却空气流量占总流入空气流量的 26.3% , 可以考虑从改变流道结构与风扇结构参数的角度使通风效率提升,并加大流至定子绕组表面进行冷却的冷空气比例,从而降低定子绕组温升。

(3) 温度场研究表明,发热部件前端温度均低于后端,铁心矽钢片轴向热导率较低所带来的轴向温度分层现象较为明显,转子左右两端温升

低于上下端部,且定子绕组的平均温升在串激电机发热部件中最为严重,在设计中需要加以注意。

(4) 通过对有无导风轮时电机内流场与绕组温度场的分析,发现无导风轮时,定子绕组平均温度上升了 3.3 °C,且前后温差更为剧烈。研究表明导风轮在电机风冷散热系统中的作用是至关重要的。

【参考文献】

- [1] 汪镇国. 单相串激电机的原理设计制造 [M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1991.
- [2] 路义萍,丰帆,孙明琦,等. 同步电机定子与气隙流场数值计算与分析 [J]. 电机与控制学报,2011,15(8):47.
- [3] CHEN Y, CHEN C, DONG Q. CFD modeling for motor fan system [J]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference,2003.
- [4] 王琳. 离心机用高速永磁同步电机温度场及水冷分析 [D]. 湘潭:湘潭大学,2018.
- [5] 刘小梅. 封闭式小型异步电机的温度场研究 [D]. 焦作:河南理工大学,2014.
- [6] 刘雄,熊飞,朱林培,等. 电动汽车驱动电机三维 CFD 热分析与温升测试研究 [J]. 电机与控制应用,2019,46(3):83.
- [7] 王立坤,毕晓帅,朱志佳,等. 特高压输电用同步调相机端部涡流损耗及流固耦合传热研究 [J]. 中国电机工程学报,2022,42(5):1968.
- [8] 胡鑫,安跃军,杨维国,等. 基于流固耦合方法的真空泵用屏蔽电机冷却系统分析 [J]. 电机与控制应用,2020,47(2):80.
- [9] 崔别楷,程文杰,肖玲,等. 10 kW 超高速永磁电机三维瞬态温度场计算 [J]. 电机与控制应用,2018,45(2):90.
- [10] 贾振宇,曲兵妮,宋建成,等. 紧凑型高压异步电机三维流体场分析及温度场仿真计算 [J]. 电机与控制应用,2021,48(6):77.
- [11] 王立坤,李渊,陶大军,等. 压缩机水冷永磁同步电机转子旋态下流固耦合传热研究 [J]. 中国电机工程学报,2021,41(22):7830.
- [12] MOON S, YUN J, KIM W, et al. Thermal-flow analysis and cooling performance enhancement of a totally enclosed fan-cooled motor [C] // 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).
- [13] ZELENSKY P, BARTÁK M, ZAVØEL V, et al. Numerical analysis of air flow in a modular fan unit using CFD simulation [C] // E3S Web of Conferences, 2019.
- [14] LIN D, ZHOU P, STANTON S. An analytical model and parameter computation for universal motors [C] // 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC),2011.
- [15] 孙森,倪有源,王付胜. 单相串励电机的三维温度场分析 [J]. 微特电机,2014,42(11):40.
- [16] POLAT A, ERGENE L T, FIRAT A. Dynamic modeling of the universal motor used in washer [C] // International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference, 2011.
- [17] 张晶. 单相串激电机多目标优化设计 [D]. 广州:广东工业大学,2007.
- [18] KURIHARA K, SAKAMOTO S. Steady-state and transient performance analysis for universal motors with appropriate turns ratio of lead coils to lag coils [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2008,44(6):1506.

(上接第 99 页)

- [11] WENG C, SUN J, PENG H. A unified open-circuit-voltage model of lithium-ion batteries for state-of-charge estimation and state-of-health monitoring [J]. Journal of power Sources, 2014, 258: 228.
- [12] LAVIGNE L, SABATIER J, FRANCISCO J M, et al. Lithium-ion open circuit voltage (OCV) curve modelling and its ageing adjustment [J]. Journal of Power Sources, 2016, 324: 694.
- [13] XIONG R, YU Q, LIN C. A novel method to obtain the open circuit voltage for the state of charge of lithium ion batteries in electric vehicles by using H infinity filter [J]. Applied energy, 2017, 207: 346.
- [14] CHEN X, LEI H, XIONG R, et al. A novel approach to reconstruct open circuit voltage for state of charge estimation of lithium ion batteries in electric vehicles [J]. Applied Energy, 2019, 255: 113758.

携手节能减排 悠享生活空间
让你我从点滴做起



《电机与控制应用》杂志社宣

《电机与控制应用》征订



《电机与控制应用》是上海电器科学研究所（集团）有限公司主办的中国科技核心期刊。上海电器科学研究所始建于1953年，是多领域、综合性电工产品研究开发机构，上海市高新技术企业。电科所在电工行业内，从技术、检测、标准及人才优势等方面都具有举足轻重的地位，国内外对其关注程度都相当高。

《电机与控制应用》创刊于1959年，是经国家新闻出版总署批准注册，由上海电器科学研究所（集团）有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。每月10日出版，国内外公开发行，邮发代号4-199。在近半个世纪的岁月中，该杂志为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献，在中国电机及其应用领域享有很高的影响。

《电机与控制应用》期刊近年还被外国数据库收录，如“JST日本科学技术振兴机构数据库（日）（2021）”以及“Pж（AJ）文摘杂志（俄）（2020）”，在国际上拥有一定的知名度和影响力。

订阅方式

订报刊，
上中国邮政！

- 1 邮局订阅：具体咨询当地邮局，邮发代号4-199。
- 2 网上订刊渠道：中国邮政网上营业厅（<http://www.11185.cn>）。

联系方式：

期刊：《电机与控制应用》编辑部 地 址：上海市普陀区武宁路505号9号楼6楼（200063）
电话：021-62574990-574、462 传 真：021-32230809
网站：<http://www.motor-abc.cn> 电子邮箱：emca@seari.com.cn

扫码关注
《电机与控制应用》
微信公众号

