

• 电气工程 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202201329



本刊网刊

## 定子通风槽钢结构对提高中型高压电机散热性能分析

彭德其<sup>1</sup>, 曾航<sup>1</sup>, 殷伟<sup>1</sup>, 周晓辉<sup>1</sup>, 李广<sup>2</sup>, 艾润<sup>2</sup>, 谭卓伟<sup>1\*</sup>

(1.湘潭大学 机械工程与力学学院, 湖南湘潭 411105; 2.中车株洲电机有限公司, 湖南株洲 412000)

**摘要:**为降低YJK450-6、400 kW中型高压电机的通风散热性能, 本文对该电机不同通风槽钢结构进行了散热性能研究。首先, 在现有电机的直线标准型通风结构基础上, 提出单列缩放型、双列直线型、双列缩放型3种轴-径向混合通风结构形式; 在SpaceClaim软件中建立电机3维温度场数值计算模型, 根据基本假设和边界条件结合电机内部热量传递公式计算出电机仿真设置参数, 并导入Fluent软件进行仿真模拟, 其中, 计算温度场所用热源通过Ansoft Maxwell平台计算的电机损耗值获取。其次, 通过网格无关性和温升试验验证本文建立的电机3维温度场数值计算模型; 通过仿真模拟对比分析3种轴-径向混合通风结构与直线标准型结构对电机流场和温度场的影响; 采用正交试验法对轴-径向混合通风结构进行参数优化, 得到最佳散热结构和参数方案; 进一步探究冷却风速对双列缩放型槽钢的电机换热性能的影响; 结合定子绕组温升和电机整体的温升均匀性系数, 对最佳散热结构和参数方案电机进行散热效果评价。仿真结果表明: 本文建立的计算模型是有效的; 双列缩放型通风槽钢结构的各项散热性能指标均最好, 是最优通风槽钢结构; 径向风道高度为6 mm且数量为13的双列缩放型通风槽钢结构为最佳散热结构和参数方案; 双列缩放型通风槽钢结构两侧的平均对流换热系数随冷却风速增大而增大, 且槽钢迎风面的平均对流换热系数明显大于背风面; 径向风道高度为6 mm且数量为13的双列缩放型通风槽钢结构电机的内/外层绕组温升分布均匀性系数比直线标准型电机分别提高88.13%、20.11%。因此, 优化设计通风槽钢结构有利于电机内部空气流动和散热, 可实现有效降低电机内部温升的目的。

**关键词:** 中型高压电机; 轴-径向混合通风结构; 通风槽钢; 径向风道; 温升

**中图分类号:** TM301.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3246(2024)04-0297-10

电机温升过高会造成其绝缘材料脱壳、老化, 电机内出现放电、短路等不良现象, 给电机安全运行带来严重隐患<sup>[1]</sup>。因此, 通过优化电机散热结构来降低电机温升, 具有重要的研究意义。

针对电机散热通风结构: Li等<sup>[2]</sup>通过增设定子和朱高嘉等<sup>[3]</sup>通过建立一套转子径向风道系统, 均显著强化了电机的通风散热性能。Zhang等<sup>[4]</sup>通过合理优化电机定子通风结构, 提高电机内部传热介质的利用率, 以降低温升。霍菲阳等<sup>[5]</sup>在增加通风沟数量的同时减小通风沟尺寸, 达到降低电机温升的目的。李伟力<sup>[6]</sup>和Xiong<sup>[7]</sup>等分别通过试验和模拟方法探究定/转子铁芯径向通风孔数量、通风沟尺寸对电机散热的影响。丁树业等<sup>[8-10]</sup>揭示3种不同型号的径向通风

结构电机内流体流动特性及温升分布规律。针对电机散热性能的提升: 温嘉斌等<sup>[11-13]</sup>探究通风槽钢位置对电机内部流热特性的影响, 通过改变径向风道内定子通风槽钢近轴端的径向位置来提高电机散热性能。Zhao等<sup>[14]</sup>通过优化通风垫片, 提高电机内部通风效率, 有效降低电机温升。郭长光<sup>[15]</sup>通过改变通风道结构形式来降低电机温升。彭德其等<sup>[16]</sup>研究轴径向混合通风结构电机和单一通风结构电机内部温升, 指出轴-径向混合通风结构比轴向通风结构的散热效果更好。Marignetti等<sup>[17]</sup>通过改变电机径向风道内的通风槽钢结构参数, 分析温度场变化情况, 指出通风槽钢结构参数对温度场有很大影响。综上所述, 虽然通风槽钢在轴-径向混合通风散热系统中起到重

收稿日期:2022-12-05 修回日期:2023-04-25 网络出版日期:2024-07-05

基金项目:湖南省战略性新兴产业项目(2019GK4021)

作者简介:彭德其(1972—),男,教授,博士。研究方向:过程强化与节能环保。E-mail: pengshuaike@163.com

\*通信作者:谭卓伟,讲师, E-mail: tanzhuowe1990@126.com

要作用,但目前的研究主要集中于混合通风结构和通风槽钢结构对温度场的影响,而关于该结构的散热性能优化的研究较少,且对内部流热特性的分析还不全面。

本文对一台YJK450-6、400 kW中型高压电机进行散热性能研究。提出3种不同的定子通风槽钢结构;通过在SpaceClaim软件中建立3维温度场数值计算模型,结合基本假设和边界条件计算出电机在Fluent软件中的模拟设置参数。通过网格无关性和温升试验验证本文所建立的电机数值传热模型;通过流场和温度场的对比分析得出3种轴-径向混合通风结构的最优通风槽钢结构;结合直线标准型槽钢结构对电机径向风道的高度、数量进行参数优化,确定最优通风槽钢结构和参数方案;研究冷却风速对最优槽钢结构两侧平均对流换热系数的影响;将最佳散热结构和参数方案的双列缩放型电机与直线标准型电机的散热效果进行对比,并做出定量评价,分析电机强化散热性能。研究为中型高压电机温升特性分析和散热结构优化设计提供一定借鉴意义。

## 1 电机3维温度场数值计算

### 1.1 电机的基本参数及结构设计

中型高压电机的基本参数如表1所示。

表1 电机基本参数

Tab. 1 Basic parameters of motor

参数	数值
额定电压/kV	10
额定功率/kW	400
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	991
定子内、外径/mm	450、740
转子内、外径/mm	230.0、446.8
气隙长度/mm	1.6
铁芯长度/mm	790

位于径向风道内的通风槽钢起到连接支撑的作用,定子通风槽钢在电机中的安装位置示意图,如图1所示。混合通风电机通常选用直线标准型槽钢结构。在保证电机结构强度的前提下,本文在直线标准型槽钢结构基础上,设计了双列直线型、单列缩放型、双列缩放型3种轴-径向混合通风结构的异形槽钢结构,通过增强对空气的扰动,增加换热面积,进一步提升电机散热性能。

图2给出了4种通风槽钢的具体结构形式,依次为直线标准型、双列直线型、单列缩放型、双列缩放型。由图2可知:4种槽钢结构长度相同;双列直线型和双列缩放型由两个小型通风槽钢平行组合而成,其中,双列缩放型是将两侧槽钢外部参照“缩放管”收缩段和扩张段组成的形式设计而成。

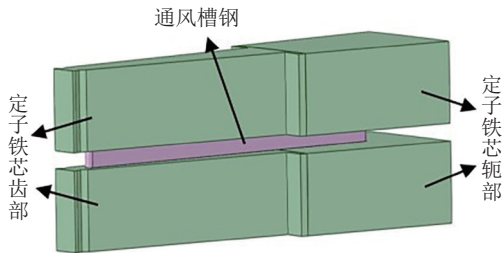


图1 相邻定子铁芯与通风槽钢示意图

Fig. 1 Schematic diagram of adjacent stator core and ventilation channel steel

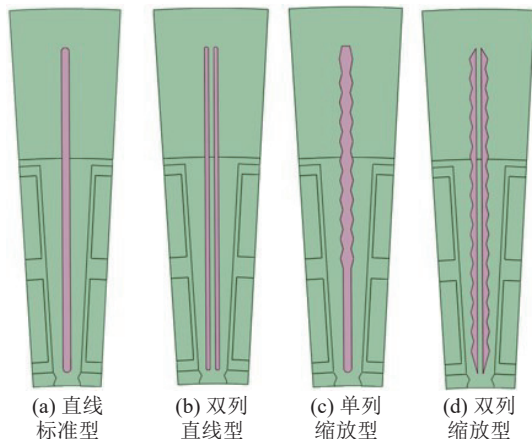


图2 不同方案的通风槽钢结构示意图

Fig. 2 Ventilation channel steel of different structural schemes

### 1.2 电机物理模型的建立

中型高压电机主要由定子铁芯、转子铁芯、定子绕组等组成,在定转子之间还有气隙风道。轴-径向混合通风电机中的径向风道结构形式由通风槽钢通用规格标准《通风槽钢》(JB/T2833—1922)决定,同时,通风槽钢受铁芯长度限制。将通风槽钢的结构参数按规格标准选取为:高度6、8、10 mm、数量12、13、14。根据表1的电机基本参数,考虑到电机整体对称性及计算效率,最终选取电机轴向1/2、周向1/6区域,在SpaceClaim软件中建立电机件3维模型,并按照电机内部气体流向构建出风道和端部气腔。所建立的模型示意图如图3所示。

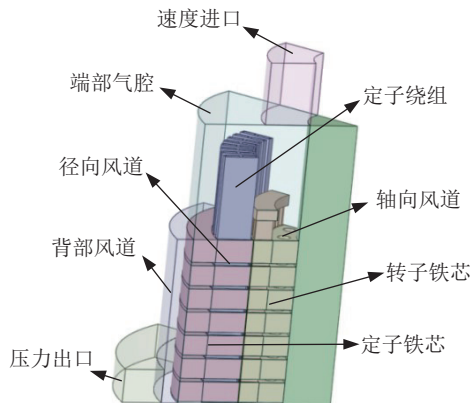


图3 混合通风结构电机物理模型

Fig. 3 Physical model of hybrid ventilation structure motor

### 1.3 基本假设与边界条件

3维温度场计算过程中,在保证计算精度情况下,为了提高计算效率,做出基本假设如下:1)仅考虑电机稳定运行时空气稳态流动<sup>[18-19]</sup>;2)电机内部空气马赫数较小,忽略其可压缩性<sup>[20]</sup>;3)忽略温度对各部件材料物性参数的影响;4)不考虑温升对损耗的影响;5)忽略绕组表面集肤效应,内外两层绕组设置相同热源密度<sup>[21]</sup>。

采用热-流-固耦合温度场分析方法<sup>[22]</sup>,给定求解边界条件如下:1)风道入口定义为速度入口,由电机实际结构和入口截面积等因素确定,初步设为1.7 m/s;2)风道出口设置成标准压力出口;3)流体场求解过程选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型;4)转子外表面设为旋转边界,转速参照电机额定转速,设为991 r/min;5)环境温度给定300 K。

### 1.4 损耗计算及主要参数设置

计算温度场所需的热源项通常由电机能量损耗计算得到。通过Ansoft Maxwell平台计算,得出中型高压电机的各项损耗,如表2所示。但是,采用Fluent软件进行热分析仿真时所需热源为体热源,即仿真过程中需要先将电机各部件的损耗转换为单位体积的热生成率,再进行温度场计算,温度场计算所需的各主要部件的材料物性参数如表3所示。

表2 电机各项损耗

Tab. 2 Each loss of motor

损耗项	定子铁耗	定子铜耗	转子铜耗	机械损耗	杂散损耗
损耗值/W	4139	4138	3396	3010	5080

表3 计算中主要参数设置

Tab. 3 Main parameter settings of the calculation

电机部件	使用材料	比热容/ (kJ·(kg·K) <sup>-1</sup> )	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	导热系数/ (W·(m·K) <sup>-1</sup> )
铁芯	硅钢片	448	7635	径向42.5、轴向5.8
定子绕组	铜	381	8933	379
转子	铜	381	8933	379
冷却空气	空气	1042	1.180	0.023

### 1.5 电机导热和流体控制理论推导

本文采用热-流-固耦合分析法<sup>[22]</sup>,结合电机温度场、流场对电机结构进行优化设计分析。由于电机冷却系统采用空冷和水冷相结合的形式,因此,热量传递主要以热传导和热对流形式发生,不考虑辐射换热的传递方式。电机内部3维导热控制方程<sup>[23-24]</sup>在笛卡尔坐标系中可以表示为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_v, \\ \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = 0, \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = h(T - T_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\lambda_x$ 、 $\lambda_y$ 、 $\lambda_z$ 分别为不同材料沿 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的导热系数, W/(m·K);  $T$ 为某一位置的温度, K;  $T_f$ 为电机的环境温度, K;  $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$ 分别为绝热面、散热面;  $q_v$ 为热源总值, W/m<sup>3</sup>;  $h$ 为表面对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $n$ 为边界上单位法线方向;  $k$ 为导热系数。

电机内部冷却介质的流动会受到质量、动量及能量守恒定律的约束。当电机内部流体不可压缩且处于稳定流动时,相应流体通用的控制方程式<sup>[25]</sup>为:

$$\text{div}(\rho u \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S \quad (2)$$

式中: $u$ 为速度;  $\phi$ 为通用变量;  $\rho$ 为流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\Gamma$ 为广义扩散系数;  $S$ 为源项;  $\text{div}(\cdot)$ 为散度函数;  $\text{grad}(\cdot)$ 为梯度函数。

## 2 仿真结果与分析

### 2.1 网格无关性和模型验证

由于第1.1节4种槽钢结构电机的转子、绕组等主要热源部件相同,且鉴于目前现成的直线标准型通风槽钢结构电机,因此,在保证计算边界条件相同的前提下,针对直线标准型电机仿真模型,在不同数量的网格下开展本文建立的3维温度场数值计算模型的温升模拟试验。通过比较电机的同一条外层绕组沿轴向各点温升值变化来验证网格无关性,绕组温升的计算结果如图4所示。

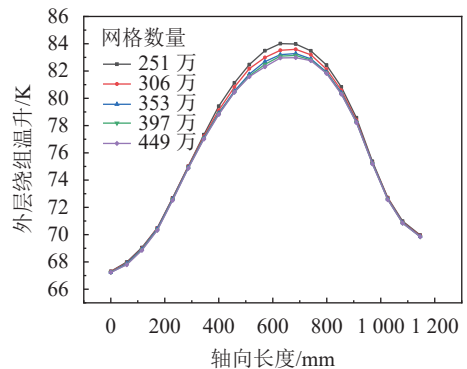


图4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification

由图4可知:网格数量大于353万后,对绕组温升的计算结果影响很小;当网格数量从353万增加到449万,绕组沿轴向各点温升值最大变化仅有0.3 K。综合考虑计算精度和计算周期,选取353万网格对电机开展温升模拟计算。

本文仿真的直线标准型通风槽钢结构电机中的定子绕组温升分布规律如图5所示。由图5可知:直线标准型电机定子绕组的温升分布沿轴向呈现出先增大后减小的趋势;最大温升位于外层绕组,为84.1 K;绕组平均温升为72.9 K。该结果表明本文仿真模型的温升能够满足电机绝缘等级规范要求。

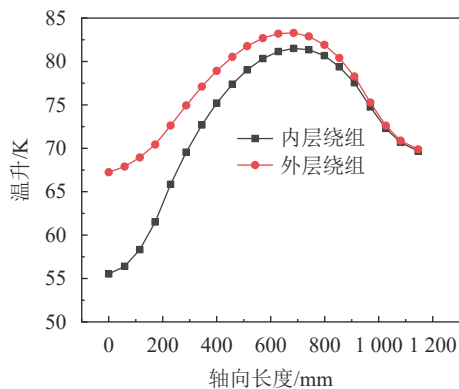


图 5 定子绕组沿轴向温升分布

Fig. 5 Temperature rise distribution of the stator winding along the axial direction

为了验证本文所建立的3维温度场数值计算模型有效且求解设置准确,将模拟计算的直线标准型通风结构电机在稳定工况下主要部件的平均温升值与电机厂所做的试验实测数据<sup>[26]</sup>进行对比。电机厂在额定工况下利用PT100传感器和热成像仪多点、多次测量得到直线标准型电机绕组端部、转子铁芯及定子端部平均温升值<sup>[26]</sup>与本文模拟计算的温升值的对比结果,如表4所示。由表4可知:绕组端部的模拟计算平均温升值为72.9 K,其与试验实测的平均温升值误差绝对值为4.2%;其余各位置的模拟计算与试验实测的平均温升值误差绝对值均在5%以内。这是由于试验时转子铁芯高速旋转,只能在电机停止转动后迅速完成测量并记录,因此试验测量温升值存在时间滞后性,但是,模拟计算与试验测量的温升值差异较小,对于模拟计算过程该误差在可接受的范围内,证明本文建立的计算模型有效,且求解设置合理。

表 4 电机试验和模拟温升数值对比

Tab. 4 Numerical comparison of motor test and simulated temperature rise

测温位置	试验实测平均温升值/K	模拟计算平均温升值/K	模拟计算与试验实测平均温升值的误差绝对值/%
绕组端部	76.0	72.9	4.2
定子端部	70.0	67.4	3.9
转子铁芯	31.6	30.2	4.6

## 2.2 流热特性分析

在求解边界条件相同前提下,通过对直线标准型、双列直线型、单列缩放型、双列缩放型4种不同通风槽钢结构的电机内部流热特性模拟分析及对比,确定最优通风槽钢结构。为方便比较,选取同一径向风道内部,图6和7分别展示4种不同通风槽钢结构周围流场分布和温度场分布云图。

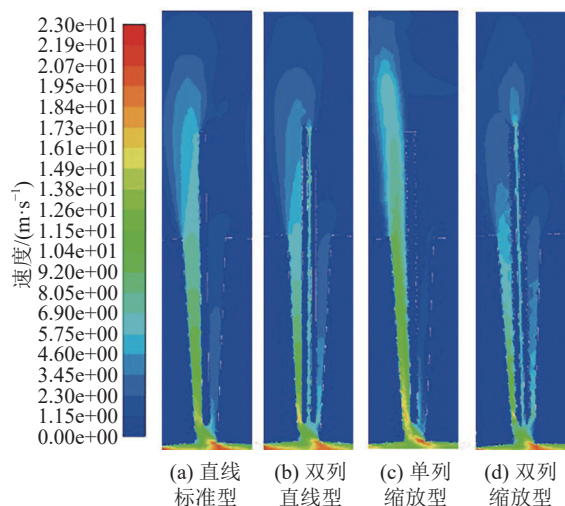


图 6 不同通风槽钢结构对电机的流场分布影响

Fig. 6 Influence of different ventilation channel steel structures on the flow field distribution of the motor

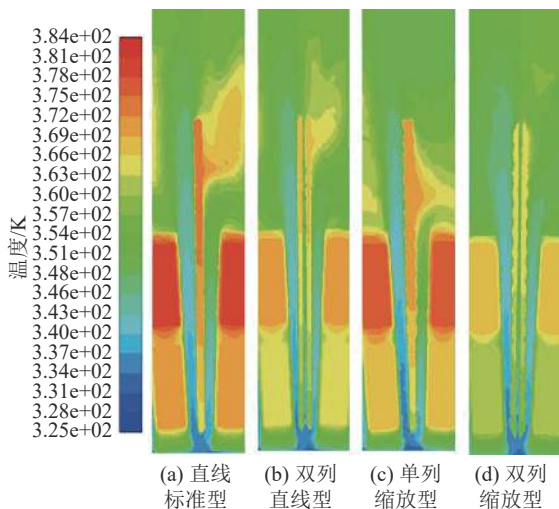


图 7 不同通风槽钢结构电机的温度场分布影响

Fig. 7 Influence of temperature field distribution of motors with different ventilation channel steel structures

结合图6和7可知:通过改变通风槽钢的结构可以改善电机内部散热特性。3种异形通风槽钢结构电机的流热特性分布均优于直线标准型槽钢电机。其中,双列缩放型通风槽钢结构对于增强冷却空气的扰动散热效果最好,该槽钢两侧冷却空气流速提升更加明显,能够带走更多热量,因此,双列缩放型通风槽钢结构的温升最低,其最高温升为73.5 K,比直线标准型通风槽钢结构的温升降低了10.6 K。

表5给出了4种不同通风槽钢结构的空气与绕组绝缘层之间的平均对流换热系数及通风槽钢换热面积。由表5可知:与直线标准型槽钢结构相比,其他3种异形通风槽钢结构的冷却空气与定子绕组绝缘层之间的平均对流换热系数和通风槽钢的换热面积都有所增加,使得冷却空气和电机之间的换热性能有所提高;双列缩放型槽钢结构的平均对流换热系

数及换热面积的增加最为显著,比直线标准型槽钢结构的平均对流换热系数及换热面积分别提升20.57%、78.28%,因此其散热效果最好。

表5 不同通风槽钢结构的平均对流换热系数和换热面积

Tab. 5 Average convective heat transfer coefficients and heat transfer areas of different ventilation channel steel structures

通风槽钢结构	平均对流换热系数/(W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> )	通风槽钢换热面积/mm <sup>2</sup>
直线标准型	20.9	2200.7
双列直线型	24.3	3910.9
单列缩放型	21.4	2426.3
双列缩放型	25.2	3923.4

进一步对4种不同通风槽钢结构的电机整体最高温升、定子铁芯平均温升、定子绕组平均温升、转子铁芯平均温升均进行分析,结果如表6所示。

表6 不同通风槽钢结构温升计算值

Tab. 6 Temperature rise calculation of different ventilation channel steel structures

通风槽钢结构	整体最高温升/K	定子铁芯平均温升/K	定子绕组平均温升/K	转子铁芯平均温升/K
直线标准型	84.1	67.4	72.9	30.2
双列直线型	75.4	62.1	64.9	29.8
单列缩放型	80.0	66.0	70.1	29.6
双列缩放型	73.5	60.1	63.1	29.5

由表6可知:采用3种异形通风槽钢结构的电机各项温升指标值都要低于直线标准型槽钢结构。双列缩放型槽钢结构的各项温升指标值均最低,其中,其定子绕组平均温升比直线标准型槽钢结构降低9.8 K,散热性能提高13.4%。由于降低绕组温升为散热结构优化最主要目的,故将降低温升的幅度作为评判标准,4种通风槽钢结构的散热性能排序为:直线标准型<单列缩放型<双列直线型<双列缩放型。因此,双列缩放型槽钢结构是本文最优的通风槽钢结构。

### 2.3 轴-径向混合通风结构参数优化

轴-径向混合通风结构具有良好性能,对其结构参数进一步优化。同一径向风道结构下热源及温度场边界条件相同。结合电机实际结构尺寸和散热要求,对4种轴-径向风道的通风槽钢结构进行多因素组合对比分析。4种通风槽钢结构、3个高度参数(6、8、10 mm)、3个数量参数(12、13、14)相互组合,共得到36种散热结构与参数组合,在不同的组合下仿真出电机各部件的温升计算结果,如图8所示。图8中,6 mm-12是径向风道高度为6 mm且数量为12的参数组合简称,其他同理。

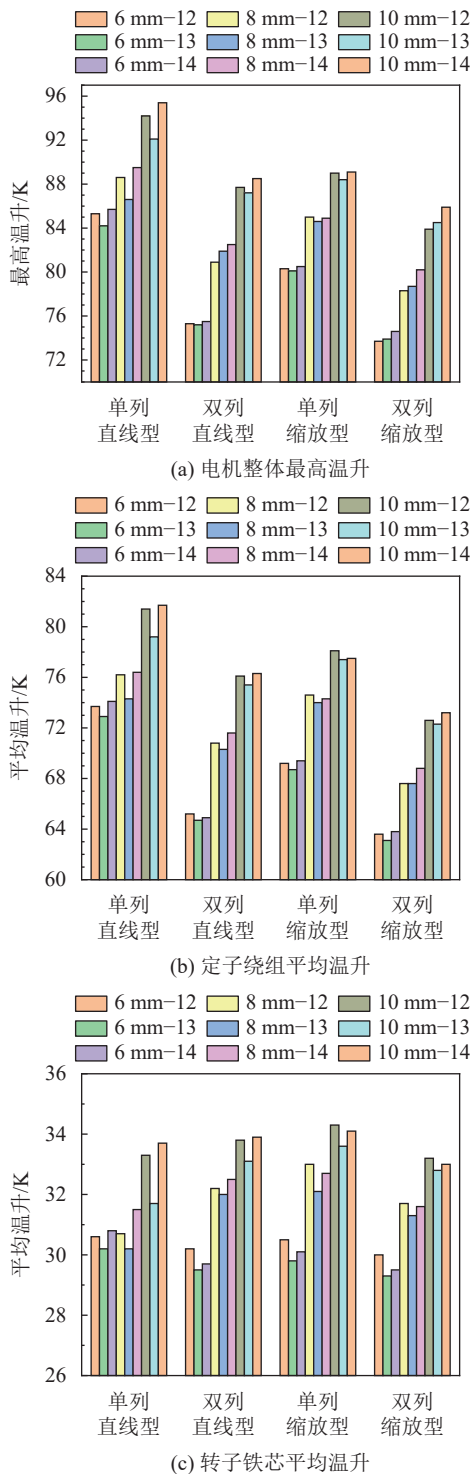


图8 不同槽钢结构和参数组合的电机各部件温升分布  
Fig. 8 Temperature rise distribution of each component of the motor with different structures and parameter combinations

由图8可知:本文提出的3种通风槽钢结构都可以降低电机的温升,其中,定子区域的降温最大,转子区域的降温较小,其主要原因是仅改变定子径向风道内通风槽钢结构,而转子处通风槽钢结构不变,其径向风道内冷却空气的导热性能变化远小于定子

径向风道内。径向风道高度为6 mm情况下,无论是直线标准型槽钢结构,还是3种异形通风槽钢结构,电机整体最高温升、转子铁芯平均温升及定子绕组平均温升方面都低于径向风道高度为8 mm和10 mm的情况。径向风道高度为6 mm且数量为13的双列缩放型通风槽钢结构的定子绕组平均温升比直线标准型样机降低了12.3 K,其散热效果提高了16.3%,因此,该方案是最佳散热结构和参数方案。

## 2.4 冷却风速对换热的影响

电机在稳定运行工况下,内部温升情况受通风速度的影响很大。根据电机实际结构与入口截面积等因素,选择风速变化范围为1.3~2.1 m/s,研究不同风速对电机换热性能的影响。

第2.2节分析表明双列缩放型槽钢为最优定子通风槽钢结构,因此,仅对采用双列缩放型槽钢结构的电机进行分析。各径向风道内的平均对流换热系数随风速变化规律基本相同,故选取同一定子径向风道(1号径向风道)内同一槽钢处进行监测,图9给出了不同冷却风速下双列缩放型槽钢处平均对流换热系数的对比。

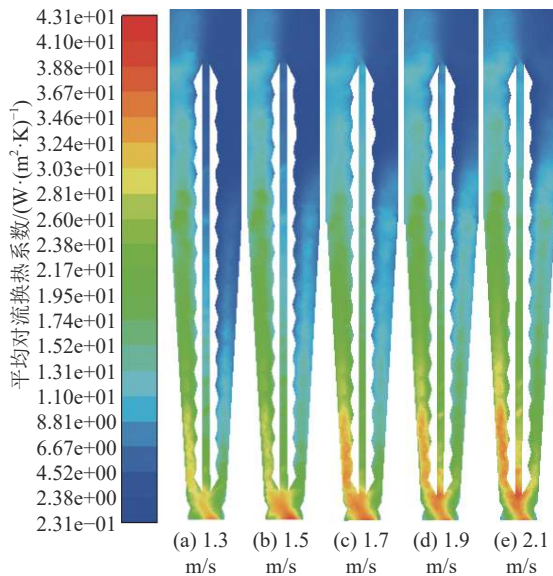
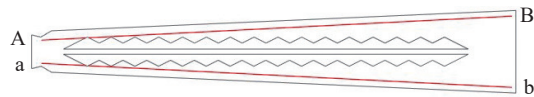


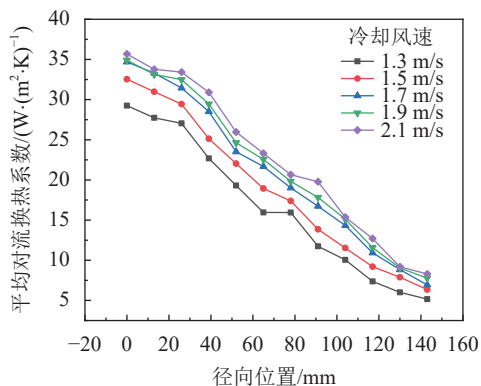
图9 不同冷却风速下双列缩放型槽钢处平均对流换热系数  
Fig. 9 Average convective heat transfer coefficients at double-row converging-diverging channel steel under different cooling wind speeds

由图9可知:冷却风速的改变对双列缩放型槽钢两侧的平均对流换热系数有明显的影响。平均对流换热系数随冷却风速增加而提升;槽钢两侧平均对流换热系数并不相同,这是由于转子旋转使得转子区域空气具有离心惯性,导致定子槽钢迎风面(左侧)空气流速较大,因此槽钢左侧平均对流换热系数明显大于右侧。

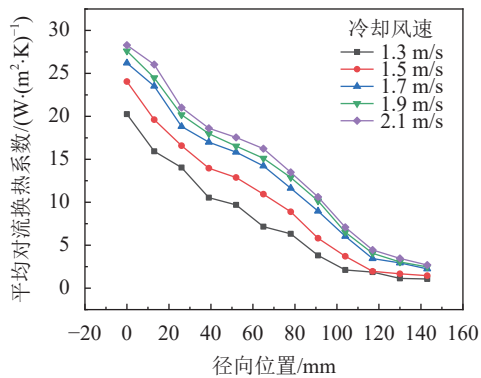
为了更直观地看到不同冷却风速下平均对流换热系数变化情况,分别取双列缩放型槽钢两侧的线AB、ab上的平均对流换热系数进行对比分析,其示意图及线AB、ab的平均对流换热系数分布如图10所示。



(a) 线AB、ab位置示意图



(b) 线AB平均对流换热系数分布



(c) 线ab平均对流换热系数分布

图10 双列缩放型槽钢两侧线AB、ab位置示意图及平均对流换热系数分布

Fig. 10 Schematic diagram of AB and ab positions on both sides of the double-row scaled channel steel and the distribution of average convective heat transfer coefficients

结合图10(b)、(c)的平均对流换热系数分布结果可知:冷却风速越大,双列缩放型槽钢两侧平均对流换热系数越大;但在风速大于1.7 m/s后,ab线上的平均对流换热系数沿a至b变化幅度减小。风速从1.3增加到1.7 m/s时,槽钢左、右两侧平均对流换热系数分别提升26.06%、60.61%;风速从1.7增加到2.1 m/s时,槽钢两侧平均对流换热系数分别提升7.66%、12.36%;平均对流换热系数沿径向呈现逐渐降低的趋势,这是由于空气在进入定子径向风道时,受气隙离心惯性影响较大,其流速较快;之后,空气流速逐渐减小且空气温度逐渐上升,因此平均对流换热系数下降。

当冷却风速为1.7 m/s时,双列缩放型槽钢左侧最大对流换热系数为34.69 W/(m<sup>2</sup>·K),槽钢左侧的平均对流换热系数是右侧的1.66倍。

### 2.5 散热效果评价

对采用最佳散热结构和参数方案(径向风道高度6 mm、数量13、双列缩放型槽钢结构)电机的散热效果进行分析。图11为最佳散热结构和参数方案电机的定子绕组温度分布云图,图12给出了最佳散热结构和参数方案电机的定子绕组温升沿轴向分布曲线。

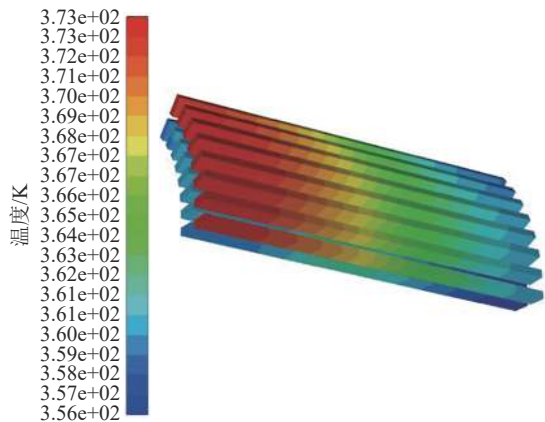


图 11 最佳散热结构和参数方案电机的定子绕组温度分布  
Fig. 11 Temperature distribution of motor stator winding with the optimal heat dissipation structure and parameter scheme

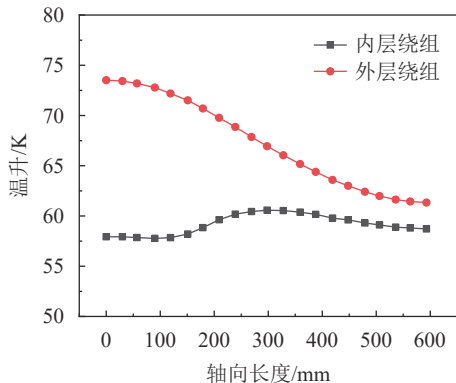


图 12 最佳散热结构和参数方案电机的定子绕组沿轴向温升分布

Fig. 12 Temperature rise distribution along the axial of motor stator winding with the optimal heat dissipation structure and parameter scheme

结合图11和12可知:最佳散热结构和参数方案下,电机外层绕组温升沿轴向逐渐降低,而内层绕组温升呈现先升后降趋势;外层绕组温升要普遍高于内层绕组,最大温升为73.5 K。因为通风过程中冷却空气先流经内层绕组,此时冷却空气温度最低,散热能力最强,所以内层绕组温升相对较低;随着冷却空气进一步进入电机的径向风道进行散热,空气温度

则逐渐上升,使得内外层绕组散热效果差距也逐渐缩小,二者温升接近;同时,由于电机采用两端进风方式,故中部的空气流量最大,此时空气流量对绕组的散热影响大于空气自身温度的影响,因此绕组中部温升较低。

为定量对比分析不同方案的散热效果,引入温升偏差比 $\Delta E$ 和温升分布均匀性系数 $\eta$ 作为评价指标,其表达式分别为<sup>[11]</sup>:

$$\Delta E = \frac{T_{\max} - \bar{T}}{\bar{T}} \quad (3)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{T} - T_i)^2} \quad (4)$$

式(3)~(4)中, $N$ 为取样点个数, $\bar{T}$ 为平均温升, $T_i$ 为取样点温升, $T_{\max}$ 为最大温升。

根据图5与图12中电机绕组的温升数值,分别计算直线标准型通风结构电机与最佳散热结构和参数方案电机的内/外层绕组温升偏差比 $\Delta E$ 及均匀性系数 $\eta$ ,如表7和8所示。

表 7 直线标准型电机与最佳散热结构和参数电机的温升偏差比

Tab. 7 Temperature rise deviation ratios of linear standard motor and the optimal heat dissipation structure and parameter motor

测温位置	直线标准型通风结构电机 $\Delta E_1$	最佳散热结构和参数方案电机 $\Delta E_2$	$\Delta E_2$ 比 $\Delta E_1$ 的降低幅度/%
内层绕组	0.13	0.02	84.62
外层绕组	0.09	0.08	12.50

表 8 直线标准型电机与最佳散热结构和参数电机的温升分布均匀性系数

Tab. 8 Temperature rise distribution uniformity coefficients of linear standard motor and the optimal heat dissipation structure and parameter motor

测温位置	直线标准型通风结构电机 $\eta_1$	最佳散热结构和参数方案电机 $\eta_2$	$\eta_2$ 比 $\eta_1$ 的提高幅度/%
内层绕组	8.51	1.01	88.13
外层绕组	5.62	4.49	20.11

由表7和8可知:与直线标准型通风结构电机相比,最佳散热结构和参数方案电机的绕组温升偏差程度极大降低,其温升分布均匀性系数显著提升。其原因是:直线标准型通风结构电机中绕组和定子通过两端与空气对流换热,或者与机壳热传导进行散热,而轴向中间区域的散热较为困难,局部温度较高,增加了电机整体温升的不均匀性。采用轴-径向混合通风最佳散热结构和参数方案的电机定子、绕组中间区域的温度通过优化的径向风道高效传递出去,从而增加了该区域散热性能,因此极大降低了最佳

散热结构和参数方案电机运行过程的温升;同时,中间的高温区域温度降低,使温升偏差程度极大降低,该方案的电机的温升均匀性也极大提高。

### 3 结 论

采用热-流-固耦合方法研究YJK450-6、400 kW 中型高压电机温升分布特性。首先,在直线标准型通风结构电机的基础上,设计3种轴-径向混合通风结构电机,通过在SpaceClaim中建立3维温度场数值计算模型,并依据基本假设和边界条件进行Fluent软件的参数设置;其次,在网格无关性和温升试验验证本文仿真模型正确性的基础上,研究轴-径向混合通风结构的最优定子通风槽钢结构形式,同时,对电机结构进行参数化寻优,分析冷却风速对双列缩放型通风槽钢结构电机温升的影响规律,并依据温升均匀性系数对最佳散热结构和参数方案电机、直线标准型通风结构电机进行散热效果评价,得出以下结论:

1)通过网格无关性和温升试验验证,本文建立的3维温度场计算模型是准确和有效的。

2)在采用直线标准型轴-径向混合通风散热方式基础上,提出单列缩放型、双列直线型、双列缩放型3种定子混合通风槽钢结构,改善电机径向风道内平均对流换热系数和换热面积,对降低电机定子区域温升有显著效果。4种结构的散热性能排序为:直线标准型<单列缩放型<双列直线型<双列缩放型,其中,双列缩放型槽钢结构各项散热性能指标最好,是最优通风槽钢结构。

3)对直线标准型、单列缩放型、双列直线型、双列缩放型4种轴-径向混合通风结构电机进行参数优化,其中,径向风道高度为6 mm且数量为13的双列缩放型通风槽钢结构为最佳散热结构和参数方案,定子绕组平均温升较直线标准型通风结构电机降低12.3 K,散热性能提升16.3%,且内、外层绕组温升分布均匀性分别提高88.13%、20.11%。

4)双列缩放型通风槽钢结构两侧的平均对流换热系数随冷却风速增大而增大,且槽钢迎风面的平均对流换热系数明显大于背风面。

5)对最佳散热结构和参数方案电机与直线标准型通风结构电机进行散热效果评价,径向风道高度为6 mm且数量为13的双列缩放型通风槽钢结构电机的内/外层绕组温升分布均匀性系数相对于直线标准型电机分别提高88.13%、20.11%。

由于计算资源限制,本文采用合理的简化方法对电机物理模型进行了简化,后续可考虑对其整体建模以进一步验证其仿真结果,提高计算的精确度。另外,后续可考虑更换不同冷却介质,实现高效冷却。

### 参考文献:

- [1] Gao Huamin, Zhang Zhuoran, Wang Chen, et al. Comparison and analysis of new high power density axial flux permanent magnet machine for electric propulsion aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(5): 325229. [高华敏, 张卓然, 王晨, 等. 电推进飞机新型高功率密度轴向磁场永磁电机对比与分析[J]. *航空学报*, 2022, 43(5): 325229.]
- [2] Li Weili, Li Dan, Li Jinyang, et al. Influence of rotor radial ventilation ducts number on temperature distribution of rotor excitation winding and fluid flow state between two poles of a fully air-cooled hydro-generator[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(5): 3767-3775.
- [3] Zhu Gaojia, Zhu Yinghao, Tong Wenming, et al. Analysis and enhancement of cooling system of high-speed permanent magnet motor based on computational fluid dynamics[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2017, 36(12): 1-7. [朱高嘉, 朱英浩, 佟文明, 等. 基于流固耦合的高速永磁电机冷却结构分析与改进[J]. *电工电能新技术*, 2017, 36(12): 1-7.]
- [4] Zhang Xiaochen, Gerada C, Li Jing, et al. The fluid flowing and heat transfer in a LSPMSM with rotor axial-radial ventilation system[C]//*Proceedings of the 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Jeju: IEEE, 2018: 185-190.
- [5] Huo Feiyang, Li Yong, Li Weili, et al. Calculation and analysis on stator ventilation structure of different optimum proposal in air-cooled turbogenerator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(6): 69-75. [霍菲阳, 李勇, 李伟力, 等. 大型空冷汽轮发电机定子通风结构优化方案的计算与分析[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(6): 69-75.]
- [6] Li Weili, Wang Yaoyu, Huang Dongzhu, et al. Influence of the rotor ventilation structure on the rotor fluid and temperature field of the PMSM[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2015, 39(2): 48-54. [李伟力, 王耀玉, 黄东洙, 等. 转子通风结构对永磁电机转子流体场和温度场的影响[J]. *北京交通大学学报*, 2015, 39(2): 48-54.]
- [7] Xiong Bin, Gu Guobiao, Ruan Lin, et al. Studies on the structure of radial ventilation channel to improve the cooling capacity of large turbo generator stator[C]//*Proceedings of the 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Hangzhou: IEEE, 2014: 354-357.
- [8] Ding Shuye, Zhao Yang, Chen Weijie, et al. Numerical simulation of rheological properties of megawatt generator with radial ventilation structure[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2014(4): 18-22. [丁树业, 赵杨, 陈卫杰, 等. 兆瓦级径向通风电机内流变特性数值模拟[J]. *大电机技术*, 2014(4): 18-22.]
- [9] Ding Shuye, Xia Zhihui, Li Hailing, et al. Analysis of fluid flow and heat transfer characteristics for radial ventilation generator[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2019, 24(1): 34-40. [丁树业, 夏之慧, 李海玲, 等.

- 径向通风电机流体流动及传热特性分析[J].*哈尔滨理工大学学报*,2019,24(1):34–40.]
- [10] Ding Shuye, Wu Chengcheng. Characteristics of fluid flow and heat transfer for a 5 Megawatt wind generator with radial ventilation structure[J]. *Electric Machines and Control*, 2019,23(10):68–76.[丁树业, 仵程程. 具有径向通风结构的5兆瓦双馈风力发电机内流热特性[J]. *电机与控制学报*, 2019,23(10):68–76.]
- [11] Wen Jiabin, Yan Hongyu. Influence of stator ventilation channel on fluid flow pattern inside ventilation duct[J]. *Electric Machines and Control*, 2010,14(11):58–62.[温嘉斌, 鄢鸿羽. 定子通风槽钢对通风沟内流体流动形态的影响[J]. *电机与控制学报*, 2010,14(11):58–62.]
- [12] Wen Jiabin, Hou Jian, Yu Xiwei. Influence of stator ventilation channel on the temperature field in the middle-size high voltage motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2016,20(8):40–47.[温嘉斌, 侯健, 于喜伟. 定子通风槽钢对中型高压电机内温度场的影响[J]. *电机与控制学报*, 2016,20(8):40–47.]
- [13] Wen Jiabin, Liu Yancui, Jiang Tianyi, et al. Analysis of fluid field of the internal fan and calculation of temperature rise for medium-size high-voltage asynchronous motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2018,22(4):33–41.[温嘉斌, 刘艳翠, 姜天一, 等. 中型高压电机内风扇流体分析与温升计算[J]. *电机与控制学报*, 2018,22(4):33–41.]
- [14] Zhao Xiang, Fan Yu, Li Weili, et al. Optimization of ventilation spacer for direct-drive permanent magnet wind generator[J]. *Energies*, 2019,12(8):1430.
- [15] Guo Changguang. Research on the influence of fluid flow properties in the motor based on doubly fed hydrogenerator ventilation channel steel[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.[郭长光. 双馈水轮发电机通风槽钢对电机内流体流动的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.]
- [16] Peng Deqi, Zhou Xiaohui, Yan Caisong, et al. Simulation study on heat dissipation enhancement characteristics of axial and radial mixed ventilation structure for medium-sized high-voltage motor[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023,42(1):75–82.[彭德其, 周晓辉, 晏才松, 等. 中型高压电机轴径向混合通风结构的强化散热特性模拟[J]. *机械科学与技术*, 2023,42(1):75–82.]
- [17] Marignetti F, Delli C V, Coia Y. Design of axial flux PM synchronous machines through 3-D coupled electromagnetic thermal and fluid-dynamical finite-element analysis[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008,55(10):3591–3601.
- [18] Traxler-Samek G, Zickermann R, Schwery A. Cooling air-flow, losses, and temperatures in large air-cooled synchronous machines[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010,57(1):172–180.
- [19] Han Jiade, Sun Peng, Zhu Lingbo, et al. 3D CFD thermal calculation for a vertical asynchronous motor with a squirrel-cage rotor[J]. *Electric Machines and Control*, 2020,24(12):55–61.[韩家德, 孙鹏, 朱凌波, 等. 立式鼠笼异步电动机三维CFD热计算[J]. *电机与控制学报*, 2020,24(12):55–61.]
- [20] Xie Ying, Guo Jinpeng, Shan Xueting, et al. Three-dimensional transient temperature field calculation and analysis of induction motor for oilfield pumping unit[J]. *Electric Machines and Control*, 2019,23(10):59–67.[谢颖, 郭金鹏, 单雪婷, 等. 油田抽油机用感应电动机三维瞬态温度场计算分析[J]. *电机与控制学报*, 2019,23(10):59–67.]
- [21] Shi Peicheng, Xia Xianyang, Chen Chen, et al. Temperature field of permanent magnet synchronous motor based on coupled field-circuit[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2021,53(3):425–434.[时培成, 夏仙阳, 陈晨, 等. 基于场路耦合方法的永磁同步电机温度场研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2021,53(3):425–434.]
- [22] Xie Ying, Guo Jinpeng, Chen Peng, et al. Coupled fluid-thermal analysis for induction motors with broken bars operating under the rated load[J]. *Energies*, 2018,11(8):1–17.
- [23] Song Shouxu, Hu Mengcheng, Du Yi, et al. Temperature field investigation of remanufacturing motor with mixed stator core[J]. *Electric Machines and Control*, 2020,24(6):33–42.[宋守许, 胡孟成, 杜毅, 等. 混合定子铁心再制造电机三维温度场分析[J]. *电机与控制学报*, 2020,24(6):33–42.]
- [24] Ding Shuye, Shen Shufeng, Yang Zhi, et al. Fluid-solid coupling simulation and performance analysis of high-speed permanent magnet synchronous motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2021,25(10):112–121.[丁树业, 申淑锋, 杨智, 等. 高速永磁同步电机流固耦合仿真与性能分析[J]. *电机与控制学报*, 2021,25(10):112–121.]
- [25] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7–11.
- [26] 贾志超. 产品型式试验报告[R]. 湘潭: 湘潭电机股份有限公司, 2020.

## Analysis of Stator Ventilation Channel Steel Structures to Improve Heat Dissipation Performance of Medium-sized High Voltage Motors

PENG Deqi<sup>1</sup>, ZENG Hang<sup>1</sup>, YIN Wei<sup>1</sup>, ZHOU Xiaohui<sup>1</sup>, LI Guang<sup>2</sup>, AI Run<sup>2</sup>, TAN Zhuowei<sup>1\*</sup>

(1. School of Mechanical Eng., Xiangtan Univ., Xiangtan 411105, China; 2. CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

**Abstract:** In order to reduce the ventilation and heat dissipation performance of the YJK450–6, 400 kW medium-sized high-voltage motors, the heat dissipation performance of different ventilation channel steel structures of these motors was studied in this paper. Firstly, on the basis of the

linear standard ventilation structure of the existing motor, three axial–radial hybrid ventilation structure forms were proposed, those are the single-row scaling type, the double-row linear type and the double-row scaling type. The 3D numerical calculation model of the temperature field of the motor was established in the SpaceClaim software. The simulation parameters of the motor were calculated according to the basic assumptions, the boundary conditions and the internal heat transfer formula of the motor. The simulation was carried out by Fluent software. Notably, the heat source for calculating the temperature field was obtained by the motor loss value computed by the Ansoft Maxwell platform. Secondly, the 3D numerical calculation model of the temperature field established in this paper was validated through the grid independence and temperature rise tests. A comparative analysis was conducted through simulation to assess the impact of the three axial–radial hybrid ventilation structures and the linear standard structure. The orthogonal test method was used to optimize the parameters of the axial–radial mixed ventilation structure to obtain the optimal heat dissipation structure and parameter scheme. The effect of cooling air velocity on the heat transfer performance of the double-row scaled channel steel was further explored. Combined with the temperature rise of the stator windings and the uniformity coefficient of the overall temperature rise of the motor, the heat dissipation effect of the optimal heat dissipation structure and parameter scheme of the motor was evaluated. The simulation results showed that the calculation model established in this paper is effective. The double-row scaling ventilation channel steel structure exhibit the best heat dissipation performance indexes, making it the optimal ventilation channel steel structure. The double-row scaling ventilation channel steel structure with a radial air duct height of 6 mm and a quantity of 13 is identified as the optimal heat dissipation structure and parameter scheme. The average convective heat transfer coefficient on both sides of the double-row scaling ventilation channel steel structure increases with the cooling air velocity, and the average convective heat transfer coefficient on the windward side of the channel steel is significantly higher than that on the leeward side. Compared to that of the linear standard motor, the uniformity coefficient of temperature rise distribution of the inner/outer windings of the double-row scaling ventilation channel steel structure motor with a radial duct height of 6 mm and a quantity of 13 increase by 88.13% and 20.11% respectively. Therefore, the optimal design of the ventilation channel steel structure is conducive to the internal air flow and heat dissipation of the motor, which can effectively reduce the internal temperature rise of the motor.

**Key words:** medium-sized high voltage motor; axial–radial hybrid ventilation structure; ventilation channel steel; radial air duct; temperature rise

(编辑 赵 婧)

引用格式: Peng Deqi,Zeng Hang,Yin Wei,et al.Analysis of stator ventilation channel steel structures to improve heat dissipation performance of medium-sized high voltage motors[J].Advanced Engineering Sciences,2024,56(4):297–306.[彭德其,曾航,殷伟,等.定子通风槽钢结构对提高中型高压电机散热性能分析[J].工程科学与技术,2024,56(4):297–306.]