文章编号:1674-2974(2024)06-0195-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024239

大型永磁同步电机内外双循环强化散热性能模拟

彭德其[1],曾航[1],张治坤[2],殷伟[1],晏才松[3],李广[3],谭卓伟[1†],张建平[1]
(1. 湘潭大学 机械工程与力学学院,湖南 湘潭 411105;
2. 湖南化工职业技术学院,湖南 株洲412000;
3. 中车株洲电力机车有限公司,湖南 株洲412000)

摘 要:针对高铁大型永磁同步牵引电机转子区域散热困难、内部温升分布不均匀的问题,在机壳水冷电机结构基础上的定子铁芯外表面处增设轴向矩形风道,并结合气隙、转子减重孔形成内外双循环散热结构,探究降低定子、绕组部位温升和提升电机内部散热均匀性的影响规律.首先通过Ansoft Maxwell平台仿真得到双循环散热结构在额定工况下各部件损耗值,同时为了更好模拟转子旋转带动气隙中的空气流动,对气隙进行分层处理,采用流-固耦合的有限元分析法模拟研究单、双循环散热结构下电机内部空气流动特性以及温升规律.结果表明,内循环风冷结构使电机内部空气流速显著提高,表面平均换热系数也显著提升,转子区域的热量会随着空气的流动更多地传给温度相对较低的定子区域及机壳,同时减少热量向转子部位传递,从而使转子和永磁体的温升降低.在此基础上,采用正交分析法对矩形通风孔的截面积、数量、高宽比进行结构参数优化,并采用温升分布均匀性系数对电机进行温升评价,得到最优方案下电机最高温升相比单循环散热结构降低12.1K,电机整体温升分布均匀性提升16.54%.

关键词:永磁同步电机;流固耦合;强化散热;流体场;温度场;风道
中图分类号:U264.5 **文献标志码**:A

Simulation of Enhanced Heat Dissipation Performance of Large Permanent Magnet Synchronous Motor with Internal and External Double Cycles

PENG Deqi[1],ZENG Hang[1],ZHANG Zhikun[2],YIN Wei[1],YAN Caisong[3],LI Guang[3],
TAN Zhuowei[1†],ZHANG Jianping[1]
(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;
2. Hunan Chemical Vocational Technology College,Zhuzhou 412000, China;
3. CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd.,Zhuzhou 412001, China)

Abstract: As for the problems of the difficulty of heat dissipation and uneven temperature distribution in the rotor area of large-scale permanent magnet synchronous traction motors for high-speed trains, a novel cooling structure is proposed, which involves adding axial rectangular air passages on the outer surface of the stator core of the water-cooled motor housing, and forms an internal and external dual-cycle cooling structure in conjunction with

* **收稿日期**:2023-07-21
基金项目:湖南省战略性新兴产业项目(2019GK4021),Strategic Emerging Industry Project in Hunan Province(2019GK4021)
作者简介:彭德其(1972—),男,湖南衡山人,湘潭大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail:tanzhuowei1990@126.com

the air gap and rotor lightweight holes. The purpose is to investigate the impact low of reducing the temperature rise in the stator and winding areas and improving the uniformity of internal motor cooling. Firstly, simulations are conducted using the Ansoft Maxwell platform to obtain the losses of various components in the dual-cycle cooling structure under rated operating conditions. To better simulate the airflow in the air gap driven by the rotation of the rotor, the air gap is treated in layers, and a fluid-structure coupled finite element analysis method is used to study the airflow characteristics and temperature rise patterns inside the motor under both single and dual-cycle cooling structures. The results indicate that the internal circulation air-cooling structure significantly increases the airflow velocity inside the motor and markedly improves the average heat transfer coefficient on the surface. As a result, more heat in the rotor area is transferred to the relatively lower temperature stator area and housing, while reducing the heat transferred to the rotor, thereby reducing the temperature rise of the rotor and permanent magnets. Furthermore, the orthogonal analysis method is used to optimize the structural parameters of the rectangular ventilation holes, including the cross-sectional area, quantity, and aspect ratio. The temperature rise uniformity coefficient is used to evaluate the temperature rise of the motor, and the optimal solution results in a 12.1 K reduction in the maximum temperature rise when compared to the single-cycle cooling structure and a 16.54% improvement in the overall temperature rise uniformity of the motor.

Key words: permanent magnet synchronous motor; fluid-structure coupling; enhanced heat dissipation; fluid field; temperature field; air duct

近年来,永磁同步电机凭借其高效性、高功率密度等优势在轨道交通、风电和汽车等领域得到大力发展和应用[1-2].而损耗密度高、散热困难也是电机在运行过程中面临的难题,给电机运行带来巨大安全隐患[3-4].因此,对永磁同步电机开展温升特性模拟研究并优化其冷却散热性能具有重要意义.

目前国内外学者针对永磁同步电机散热问题已开展大量研究,Jaege 等[5-8]针对电机绕组温升进行磁-流-固多物理场耦合计算及散热结构优化,并取得一定成果.Vansompel 等[9]通过在高功率密度电机端部增设导热插件来强化端部绕组散热.刘威[10]通过设计丁胞水冷结构来提升高速永磁电机散热效率.Tüysuz 等[11]针对一台无槽式高速永磁电机,设计了环形间隙散热结构来降低定子绕组温升.以上学者从不同角度对电机内部强化散热特性均做出大量研究,提供了多种研究电机强化散热的方法,在此基础上本文引入电机温升分布均匀性,更全面地进行电机散热结构优化分析.

针对风冷结构电机,Huang 等[12-15]通过改变风扇叶片数量、结构形式来提升永磁电机散热性能.但风扇叶片数量、结构形式对于全封闭大型永磁电机散热效果提升有一定限度.鞠宇宁等[16-17]通过搭建电机内部循环风路,对风道数量、尺寸等提出优化设计来实现电机内部高效散热.这些研究对电机全域温升分布情况有更为详细的分析探究,但大部分研究都是针对单一散热结构下的温度场分析,此外针对全封闭永磁电机风冷结构优化研究及相关流热耦合温升特性分析还不够全面.

本文以一台 1 000 kW 全封闭大型永磁同步牵引电机为例,针对永磁体温升过高问题提出内/外双循环散热方案,在机壳水冷方式基础上增加内部循环风散热,通过优化定子风道结构参数提升电机散热性能,为全封闭大型永磁同步电机温升分析方法及散热结构优化设计研究提供参考.

1 电机求解模型确立

1.1 电机的基本参数

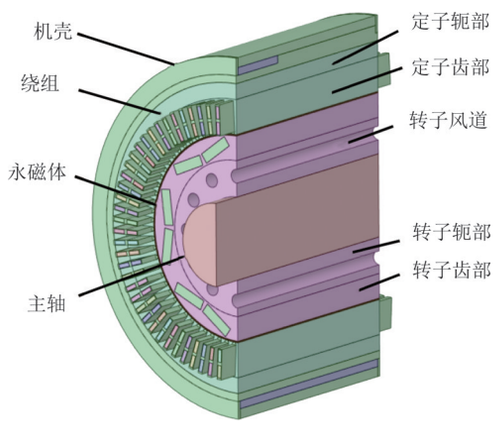
本文所用电机为 1 000 kW、1 500 r/min 大型永磁同步牵引电机,基本结构参数如表 1 所示.

永磁同步电机物理模型如图 1 所示,整体采用全封闭结构,为便于仿真模拟,将转子风扇所在空间设为空气入口区域,同端的定子端部空间设为空气出口区域.

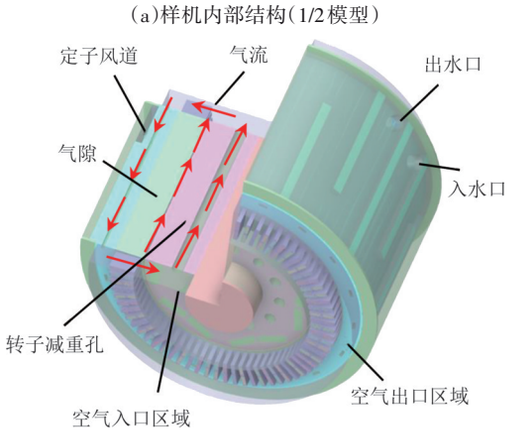
表 1　电机基本参数

Tab.1　Basic parameters of the motor

参数	数值	参数	数值
额定电压/V	1 140	定子槽数	72
额定功率/kW	1 000	转子内外径/mm	180/444
额定转速/(r·min^{-1})	1 500	气隙长度/mm	3
电机极数	6	铁芯长度/mm	500
定子内外径/mm	450/670	绝缘等级	F级



(a)样机内部结构(1/2模型)



(b)双循环散热结构(3/4模型)

图 1　电机结构示意图

Fig.1　Schematic diagram of motor structure

针对机壳水冷单循环样机转子区域散热困难、内部温升分布不均匀现象,提出内/外双循环(水冷和风冷)散热方案,即在电机一端主轴上增设离心风扇,在定子铁芯的外表面开设轴向矩形通风孔,并将转子铁芯原有的减重孔利用为转子轴向风道.在离心风扇作用下,转子铁芯区域高温空气由转子铁芯轴向风道和气隙向电机另一端移动,从定子铁芯表面开设的矩形通风孔返回,形成内部循环风冷,实现热量传递给定子铁芯和机壳(图1(b)中红色箭头为电机内部空气流通方向).初步选取矩形定子风道宽度为30 mm、高度为9 mm、数量为12个[18].

1.2　基本假设和边界条件

根据永磁电机有限元分析计算流程要求,结合其散热结构特点和文献[19],做如下基本假设:1)电机内部冷却流体马赫数很小,不考虑其可压缩性;2)为了简化建模用直线绕组代替弯曲的端部绕组;3)定子上下层绕组加载相同热源,忽略其集肤效应;4)电机各部件材料物性参数不随温度、时间等变化.

边界条件设置为:1)水道入口定义为速度入口,水速选用0.8 m/s,水温338 K;水道出口定义为标准压力出口.2)环境温度给定300 K.3)转子与旋转流体域交界面设置为旋转壁面,转速设置为1 500 r/min.4)利用UDF程序将风路出口温度附加给风路入口温度,以此来模拟循环风冷.

1.3　热源计算方法

在Ansoft Maxwell中使用二维瞬态磁场模型计算得到电机额定工况下各部件损耗值[20]以及转化后热生成率,如表2所示.

表 2　电机内损耗及热生成率

Tab.2　Motor internal losses and heat generation rate

名称	损耗值/kW	热生成率/(W·m^{-3})
定子铁芯	7.469	173 568.2
定子绕组	5.245	184 333.3
转子铁芯	0.526	114 166.7
永磁体	0.02	1 908.54
杂散损耗	5.128	—

1.4　气隙导热系数的确定

为了更准确地求解气隙导热系数,将气隙处空气进行分层处理,靠近定子铁芯的设为静止区域,导热系数按正常空气导热系数确定;靠近转子铁芯设为旋转区域,导热系数则引入气隙等效导热系数λ_g.气隙流场截面如图2所示,用等效导热方式来描述气隙处实际对流换热过程,等效导热系数λ_g由公式(1)得出[21-22]:

$$\begin{cases}\lambda_g = 0.019\eta^{-2.908\,4}\,\mathrm{Re}_g^{0.461\,4\ln(3.333\,61\eta)} \\ \mathrm{Re}_g = \pi r_0 \delta \dfrac{n}{60\gamma}\end{cases} \tag{1}$$

式中:$\eta = d/D$,d为转子铁芯外径,D为定子铁芯内径;δ为气隙厚度,mm;n为电机额定转速;γ为空气运动黏度系数.

结合本文研究电机实际结构参数及额定转速值,由公式(1)计算得出旋转区域气隙等效导热系数为4.297 W/(m·K).

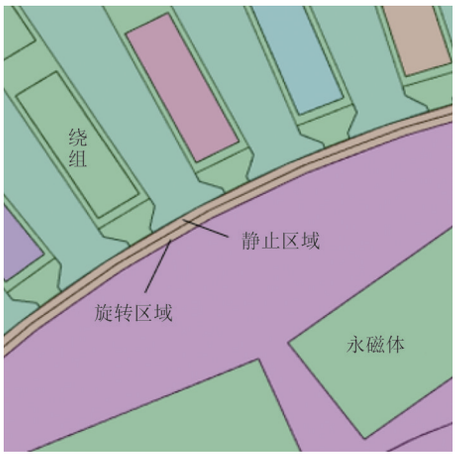


图2 气隙剖面示意图

Fig.2 Schematic diagram of air gap section

1.5 网格无关性和模型验证

保证计算边界条件相同前提下,分别使用534万、622万、706万、798万四种数量网格开展温升模拟计算.通过比较同一条外层绕组沿轴向各点温度值变化来验证网格无关性.温度计算结果如图3所示.当网格数量大于706万以后,绕组沿轴向各点温度值变化很小,最大变化仅有0.4 K,综合考虑求解精度与计算周期,选择706万网格开展流-固耦合温升模拟计算.

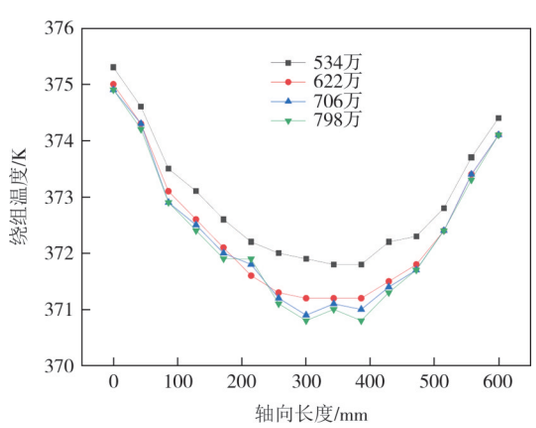


图3 网格无关性验证

Fig.3 Grid independence verification

企业所搭建的永磁同步电机温升测试平台如图4所示,图5为转子铁芯端部和永磁体端部的温升测点分布示意图.利用PT100传感器和热成像仪多点多次测量得到样机绕组端部、转子及永磁体端部温升的平均值,如表3所示.具体测量过程为:利用PT100传感器和热成像仪对绕组端部温升实时监测,待电机在额定运行工况温度稳定时,记录下绕组端部温升值.与模拟得到的温升值进行对比,可以看出各项温升值误差在5%以内.由于实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,因此该结果在可接受误差范围内,证明求解模型和求解器设置合理.



图4 试验测试平台

Fig.4 Test and test platform



图5 实验温升测点示意图

Fig.5 Experimental temperature rise measurement point diagram

表3 样机试验和模拟数值对比

Tab.3 Comparison of experimental and simulated values

测温位置	温升值/K		误差/%
	试验结果	模拟结果	
绕组端部	77.5	80.78	4.2
转子端部	122.6	128.59	4.9
永磁体端部	121.7	127.54	4.8

2 散热结构仿真分析及优化

2.1 单循环结构流场和温度场仿真分析

在额定工况下电机内部空气速度矢量图如图6所示,单循环时最大风速20.08 m/s,位于气隙靠近转子处.转子旋转带动了气隙转动,两端部的空气流速很小,空气沿轴向上基本无流动,因此转子区域的热量只能通过气隙沿径向传递给定子区域,而气隙处空气等效导热系数4.297 W/(m·K),使得转子区域散热困难.

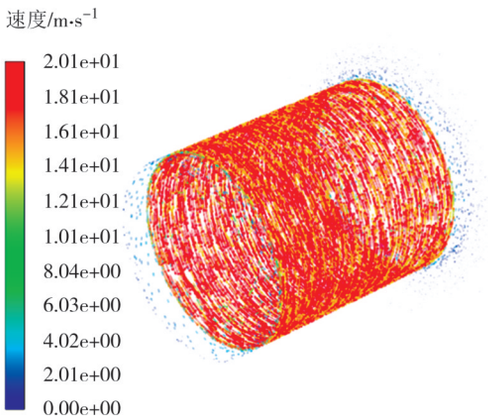


图 6　电机内部空气速度矢量图

Fig.6　Vector diagram of air velocity inside the motor

电机中心截面温度分布情况如图 7 所示,电机定子区域与转子区域的温差很大,整体最高温升值 129.4 K 位于转子铁芯处,而定子区域温升相对较低.这是因为定转子之间存在气隙,气隙空气靠近转子的部分会因转子带动而旋转,而靠近定子的部分几乎处于静止,且气隙处空气在轴向上基本无流动,两端部空气流速也非常小,因此转子区域温升较高,而定子铁芯由于靠近机壳,其散热效果良好,定/转子最高温升差值为 40.6 K.定子铁芯温度在径向由内向外表现为逐渐降低的趋势,最高温升位于定子齿部,为 88.8 K,而定子铁芯外表面直接与机壳接触,因此外表面温升较低,此外在轴向上几乎没有温度梯度.绕组最大温升位于内层绕组端部为 87.7 K.内层绕组温度要高于外层绕组温度,且二者温升差值较大,因为外层绕组靠近定子轭部,内层绕组更靠近定子齿部,且绕组被槽间绝缘包裹,槽绝缘导热效率较低.在轴向上,绕组端部温升要高于中部,这是因为绕组端部处在端部空气域中散热困难,绕组中部热量则通过轭部沿径向导出,散热相对较好.

2.2　双循环散热结构流场与温度场分析计算

通过对内外双循环散热结构电机的温升特性模拟,得到电机内部空气速度分布,如图 8 所示.在增加内循环风冷后,电机内部各区域空气流速显著增加,最大流速位于定子风道内,为 48.1 m/s,气隙最高流速为 21.57 m/s,较单循环散热结构电机气隙最高流速值提升 7.42%.通过图 9 可以看出,随着电机内部空气的流动增强,电机整体温升分布均匀性得到改善.其中在中间转子区域出现两处温度波动,因为这两处取样点位于转子风道内,在双循环方案下电机内空气处于流动状态,转子风道内空气温度要低于转子铁芯,说明内循环风冷的方式可以改善电机

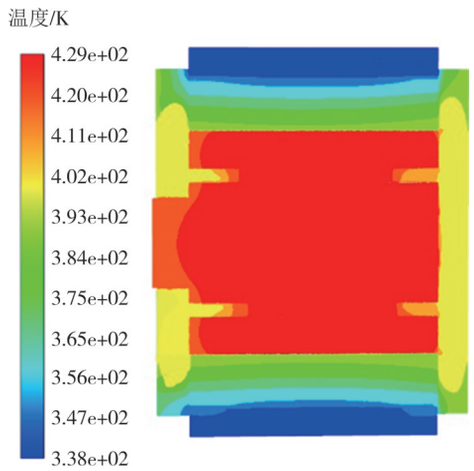


图 7　中心截面温度云图

Fig.7　Central section cloud image

内部空气流动性,从而利于转子区域的散热,尤其是降低了永磁体温升.

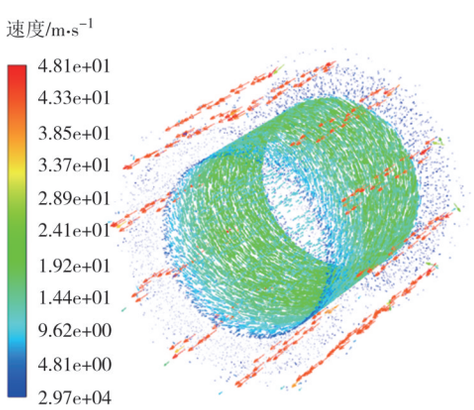


图 8　电机内部空气速度矢量图

Fig.8　Vector diagram of air velocity inside the motor

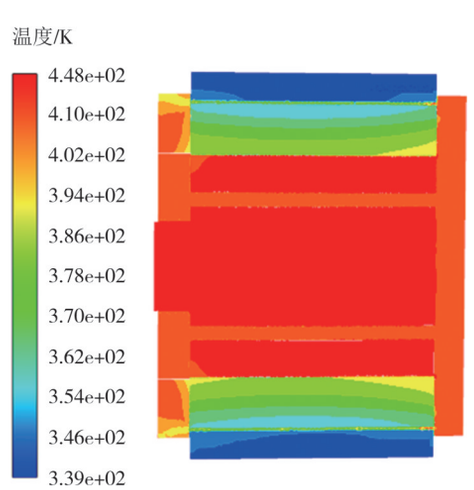


图 9　电机中心截面温度分布

Fig.9　Temperature distribution of motor center section

图 10 为双循环散热方案下各部件温度场分布具体情况.1)径向上转子铁芯的温度梯度很小;在轴

向上转子铁芯温度逐渐升高,因为空气从离子风扇一端流动到另一端,空气吸热后温度逐渐上升,对转子的散热能力逐步下降.2)永磁体温度分布规律与转子相同,永磁体嵌于转子内,转子温升对永磁体有直接影响,因此,可通过降低转子温升的方式来降低永磁体温升.3)电机最高温升依然位于转子区域,为118.3 K,但相比单循环结构电机降低11.1 K;与此同时定子区域温度有所上升,定/转子最高温升差值为23.6 K,相比单循环结构电机减小17 K.4)定子铁芯最高温升位于定子齿部,为94.7 K,定子风道处温升明显高于旁边位置,是因为定子风道使高温空气与定子和机壳充分换热.绕组最高温升位于端部,达到94.5 K,端部处于高温空气中,而中间区域通过轭部径向导热散热效果较好,温升相对较低.

2.3 两种冷却方案对比

由图11为两种方案下电机内部各区域空气平均流速对比,由图可知,内外双循环冷却方案下电机内部各区域空气平均流速均显著高于现方案,现方案下电机左端部、气隙、右端部空气平均流速分别为1.39 m/s、17.18 m/s、2 m/s,两端部的空气流速很小.内外双循环冷却方案下气隙处空气平均流速为19.1m/s,较现方案提升11.2%,左、右端部空气平均流速分别为4.33 m/s、5.63 m/s,较现方案分别提升211.5%、181.5%.伴随着各区域空气流速的提升,表面平均对流换热系数也显著提升,转子区域的热量会随着空气的流动更多地传给温度相对较低的定子区域及机壳.由此可见,内外双循环冷却方案极大程度改善了电机内部空气的流动特性,从而利于高温区域即转子铁芯处的散热,降低永磁体温升.

对2种冷却方案中电机各部件的最高温升计算结果进行对比分析,由图12所示.通过图12可知,在双循环冷却方案下,转子铁芯和永磁体温升降幅明显,永磁体最高温升为118.3 K,相比单循环方案下降10.7 K,冷却性能提高8.3%.与此同时,定子区域最高温升所在的定子齿部温升增加5.9 K,因为双循环风冷结构提高电机内部空气流动性,将转子区域更多的热量带到定子区域进行散热循环,在一定程度上提高电机温升的均匀性,且定子区域本身散热效果较好,有较大温升限度.而且双循环方案下定/转子最高温升差值减小,电机整体的温升均匀性得到较好的提升.

2.4 定子风道结构参数优化

基于双循环散热结构具有良好性能,对定子风道结构参数做进一步优化.以电磁转矩的减小量低于3%为约束条件,结合电机实际结构尺寸和散热要求,选取3种方案.其中定子风道结构参数的改变会引起定子铁耗及电磁性能的变化,因此需要利用Ansoft Maxwell软件重新进行电磁分析计算,并将所得

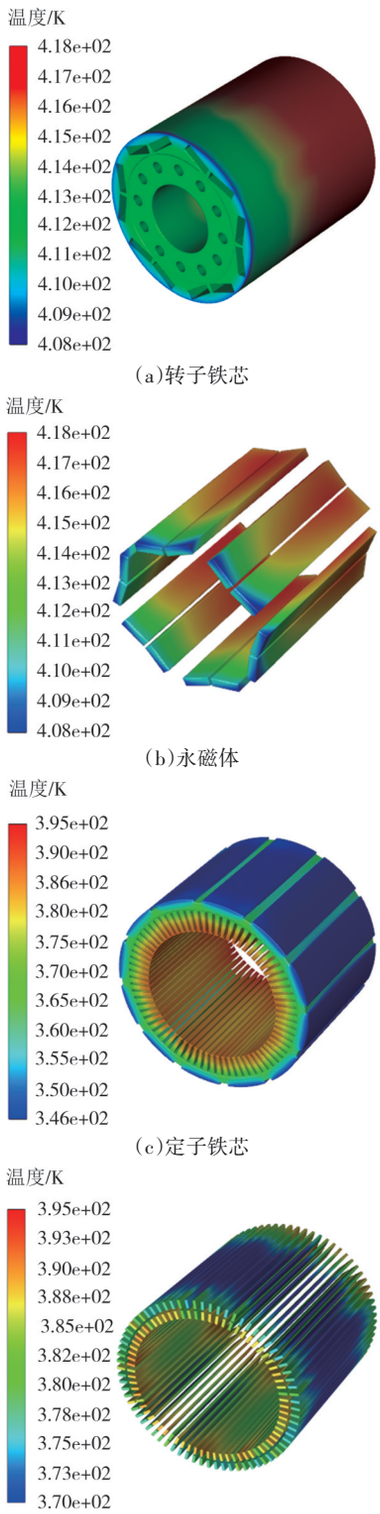


图10 双循环方案电机各部件温度分布

Fig.10 Temperature distribution of each part of the double cycle motor

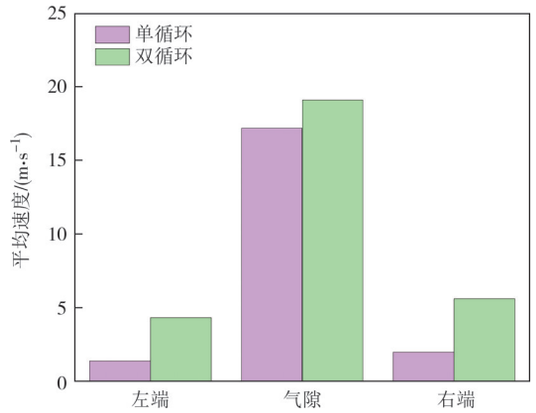


图 11　不同方案各区域空气流速对比

Fig.11　Comparison of air flow rates in different regions

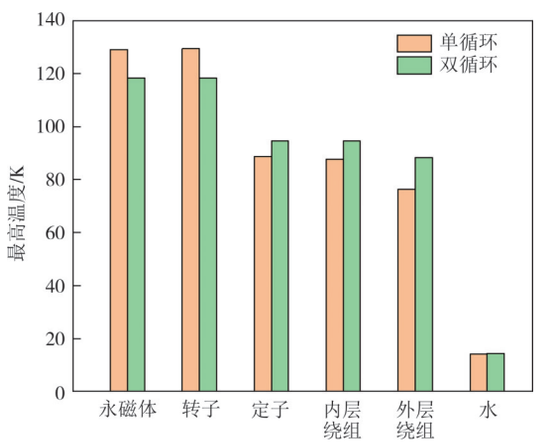


图 12　不同方案各部件最高温升对比

Fig.12　Comparison of the maximum temperature rise of each component in different schemes

损耗值转化为温度场求解热源,其余温度场求解边界条件均相同.具体参数见表 4.

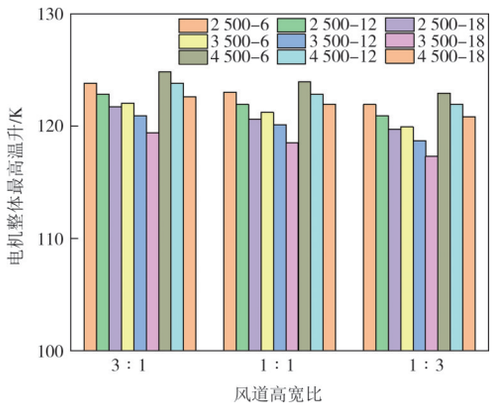
表 4　定子轴向风道设计参数

Tab.4　Design parameters of stator axial air duct

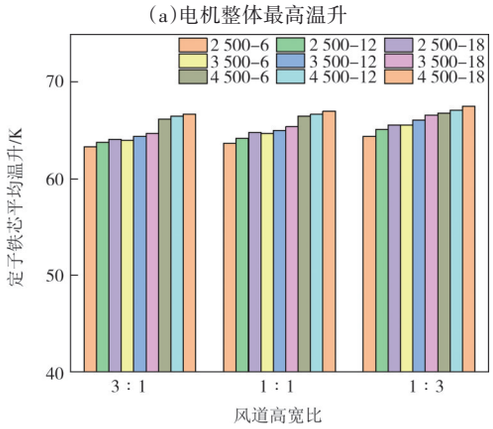
风道总截面积 S/mm²	风道数量	高宽比	定子铁耗/W	电磁转矩/(N·m)	电磁转矩减小百分比/%
2 500	6	3∶1	7 539.15	6 094.7	1.24
3 500	12	1∶1	7 751.65	6 056.4	1.7
4 500	18	1∶3	8 325.37	5 981.9	2.59

采用正交因素法确定的 27 种组合方案的温度场计算结果如图 13 所示.其中 2 500-6 是定子风道总截面积为 2 500 mm²、数量为 6 个的简称,其余结构参数简称同此.

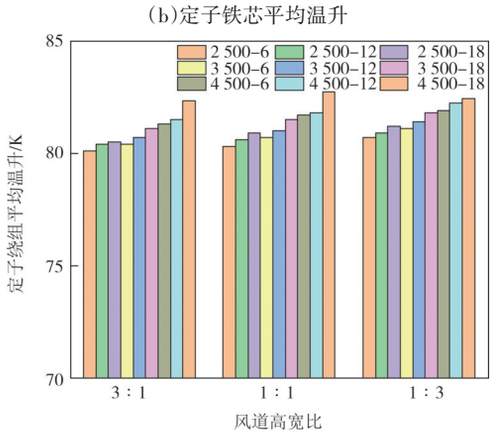
分析图 13 中各温升数据可知:1)定子风道总截面积对电机整体温升影响最大,电机最高温升值最大相差 3.5 K,定子风道高宽比的改变对电机整体温升影响最小,最高温升最大差值为 2.2 K.2)定子风道



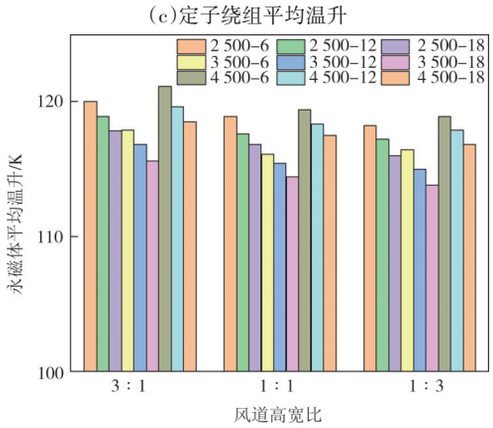
(a)电机整体最高温升



(b)定子铁芯平均温升



(c)定子绕组平均温升



(d)永磁体平均温升

图 13　不同结构参数电机温升分布

Fig.13　Temperature rise distribution of motor with different structural parameters

数量、高宽比一定时,定子风道总截面积并不是越大越好,因为此时定子铁耗变化幅度较大,对温升影响占主导地位.风道总截面积一定时,适当增加风道个数、减小风道高宽比均利于降低电机温升.3)当定子风道总截面积为3 500 mm^2、数量为18个、高宽比取1∶3时,散热效果达到最佳,电机最高温升为117.3 K,相比单循环结构电机降低12.1 K,散热性能提升9.35%;永磁体平均温升为113.8 K,与单循环结构电机相比降幅达到10.6%.

2.5 电机温升特性评价

最佳定子风道结构方案下电机各区域的平均对流换热系数如表5所示,可以看出,电机各区域平均对流换热系数相较单循环冷却结构电机均显著提升,左端部、气隙及右端部分别提升338.3%、13.7%、268.8%.

表5 不同冷却结构各区域平均对流换热系数对比

Tab.5 Comparison of the average convective heat transfer coefficient in each region of different cooling structures

位置	平均对流换热系数/$W/(m^2\cdot K)$		提升百分比/%
	单循环结构	双循环最佳冷却结构	
左端部	1.49	6.53	338.3
气隙	26.74	30.41	13.7
右端部	1.89	6.97	268.8

最佳定子风道结构方案电机和单循环结构电机内部径向温升分布对比如图14所示,转子区域的温升明显降低,定子区域以及机壳冷却水温升略有增加,电机整体温升分布的均匀性得到极大改善.单循环方案中定/转子最高温升差值为40.6 K,双循环方案下定/转子最高温升差值减小为23.6 K.

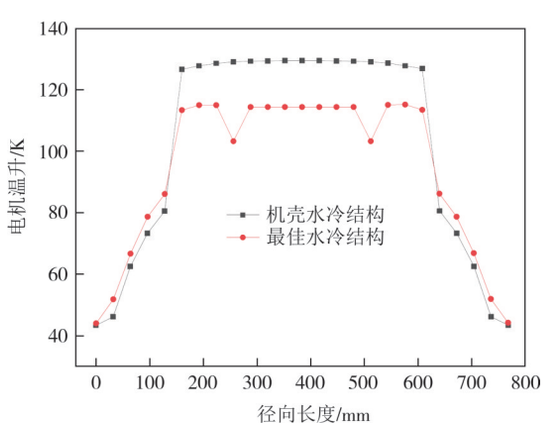


图14 不同散热结构电机中心截面中间位置径向温升分布

Fig.14 Radial temperature rise distribution in the middle position of the center section of motors with different cooling structures

为了量化评价不同方案下电机整体温升分布均匀性,引入温升分布均匀性系数η,具体计算方法如式(2)所示[23]:

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

式中:η为温升分布均匀性系数;$\bar{T}$为电机整体平均温升值;N为采样点个数;T_i为采样点温升值.

通过仿真数据计算得到,单循环散热方案下电机温升分布均匀性系数为32.46,而基于内外双循环散热结构,同时优化定子风道结构参数,所得到最佳定子风道结构方案均匀性系数为27.09,相比单循环方案极大改善了电机整体温升分布状况,使得电机温升分布更加均匀,电机整体温升分布均匀性提升了16.54%.

3 结 论

本文采用有限元分析法对一台1 000 kW大型永磁同步牵引电机进行研究,设计了一种内外双循环散热结构,并进一步对定子风道结构参数进行优化分析,得出如下结论:

1)单循环机壳水冷电机存在温升分布不均匀、转子区域散热困难以及永磁体温升过高问题,其中定/转子最高温升差值为40.6 K,永磁体最高温升129 K.

2)双循环散热方案极大程度改善电机内部空气的流动性,有利于转子区域散热、降低永磁体温升,定/转子最高温升差值减小23.6 K,电机整体温升分布均匀性得到改善.

3)通过定子风道结构参数多因素综合分析,最佳定子风道结构参数方案为:风道总截面积3 500 mm^2、数量18个、高宽比1∶3.该结构方案下电机最高温升相比单循环结构电机降低12.1 K,散热性能提升9.35%;永磁体平均温升为113.8 K,与单循环结构电机相比降幅达到10.6%;电机整体温升分布均匀性提升16.54%.

参考文献

[1] 付兴贺,江政龙,吕鸿飞,等. 电励磁同步电机无刷励磁与转矩密度提升技术发展综述[J]. 电工技术学报,2022,37(7):1689-1702.
FU X H, JIANG Z L, LÜ H F, et al. Review of the blushless excitation and torque density improvement in wound field synchronous motors[J]. Transactions of China Electrotechnical

Society,2022,37(7):1689-1702.(in Chinese)

[2] 周志刚,杨文豪,孟祥明. 不同冷源轮毂电机多模式切换温度场研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(8):51-58.
ZHOU Z G,YANG W H,MENG X M. Research on temperature field of in-wheel motors with different cold sources in multi-mode switching[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2021,48(8):51-58.(in Chinese)

[3] 赵纪龙,逯卓林,韩青峰,等.轴向磁通永磁电机系统及关键技术前沿发展综述[J].中国电机工程学报,2022,42(7):2744-2765.
ZHAO J L, LU Z L, HAN Q F, et al. An overview on development of axial flux permanent magnet motor system and the key technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2744-2765.(in Chinese)

[4] 龙吟,任晓辉,张珂,等. 基于模态实验的轨道牵引电机整机有限元模型的建立[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(6):1553-1559.
LONG Y,REN X H,ZHANG K,et al. Finite element modeling of rail traction motor based on modal experiments[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2019,16(6):1553-1559.(in Chinese)

[5] DU G H, XU W, ZHU J G, et al. Power loss and thermal analysis for high-power high-speed permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2722-2733.

[6] JAEGE R M,RUF A,HAMEYER K,et al. Thermal analysis of an electrical traction motor with an air cooled rotor[C]//2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Long Beach,CA,USA. IEEE,2018:467-470.

[7] DONG B T,WANG K,HAN B C,et al. Thermal analysis and experimental validation of a 30 kW 60 000 r/min high-speed permanent magnet motor with magnetic bearings[J]. IEEE Access,2019,7:92184-92192.

[8] 赵纪龙,全小伟,林明耀. 双转子混合励磁轴向磁通切换永磁电机设计与分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(24):7860-7868.
ZHAO J L, QUAN X W, LIN M Y. Design and analysis of a double-rotor hybrid excited axial switched-flux permanent magnet machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7860-7868.(in Chinese)

[9] VANSOMPEL H, SERGEANT P. Extended end-winding cooling insert for high power density electric machines with concentrated windings[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 948-955.

[10] 刘威. 非晶合金高速永磁电机热管理与转子动力学研究[D]. 太原:中北大学,2018.
LIU W. Thermal management and rotor dynamics of high speed permanent magnet motor with amorphous alloy [D]. Taiyuan: North University of China,2018.(in Chinese)

[11] TÜYSÜZ A, MEYER F, STEICHEN M, et al. Advanced cooling methods for high-speed electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2017,53(3):2077-2087.

[12] HUANG Z Y,FANG J C,LIU X Q,et al. Loss calculation and thermal analysis of rotors supported by active magnetic bearings for high-speed permanent-magnet electrical machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2016,63(4):2027-2035.

[13] ZHANG X T, ZHANG C M, FU P R, et al. A novel cooling technique for the windings of high-torque-density permanent magnet machines [C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju,Korea (South). IEEE,2018:332-337.

[14] FAWZAL A S, CIRSTEA R M, GYFTAKIS K N, et al. Fan performance analysis for rotor cooling of axial flux permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2017,53(4):3295-3304.

[15] 佟文明,程雪斌,孙静阳,等. 转子风刺对高速永磁电机永磁体温升的抑制作用[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1526-1535.
TONG W M, CHENG X B, SUN J Y,et al. Suppression effect of rotor wafters on permanent magnet temperature rise for high-speed permanent magnet motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1526-1535.(in Chinese)

[16] 鞠宇宁. 全封闭永磁同步电机温度场分析及冷却结构设计[D]. 天津:天津大学,2018.
JU Y N. Temperature field analysis and cooling structure design of fully enclosed permanent magnet synchronous motor [D]. Tianjin:Tianjin University,2018.(in Chinese)

[17] 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.
ZHU G J, ZHU Y H, TONG W M, 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.(in Chinese)

[18] CHEN W,JU Y N,YAN D,et al. Design and optimization of dual-cycled cooling structure for fully-enclosed permanent magnet motor[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 152: 338-349.

[19] VEG L,LAKSAR J. Comparison of two types of cooling of axial flux permanent magnet machines by CFD simulation[C]//2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE). The High Tatras,Slovakia. IEEE,2019:303-306.

[20] 徐显贺.基于多物理场的高铁永磁同步电机散热设计与性能优化[D].湘潭:湘潭大学.2023
XU X H .Heat dissipation design and performance optimization of high-speed rail permanent magnet synchronous motor based on multi-physics[D]. Xiangtan:Xiangtan University, 2023.

[21] ACQUAVIVA A, SKOOG S, THIRINGER T. Design and verification of In-slot oil-cooled tooth coil winding PM machine for traction application [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2021,68(5):3719-3727.

[22] HATZIATHANASSIOU V, XYPTERAS J, ARCHONTOULAKIS G. Electrical-thermal coupled calculation of an asynchronous machine[J]. Archiv Für Elektrotechnik,1994,77(2):117-122.

[23] 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.
PENG D Q,ZHOU X H,YAN C S,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.(in Chinese)