导风坡圆环对牵引电机热点温度的靶向抑制及量化评估

王宇， 佟庆彬， 曹君慈， 贾博
（北京交通大学 电气工程学院，北京 100044）

摘 要：针对高速动车组轻量化异步牵引电机存在的局部过热与冷却效率低问题，以额定功率 600 kW空冷型牵引电机为研究对象，采用传热学与计算流体力学方法开展分析。首先，建立符合牵引电机内部流体分布与部件温度变化规律的流固耦合模型，计算误差满足工程要求；其次，分析热敏感部件温度与局部流体特征的关联，提出基于轴向气流调控与热点靶向抑制的导风坡圆环结构。该结构布局精准契合后端空腔内绕组端部 1 附近的环流畸变区，并通过装配加热片的高温树脂电机模型试验验证其冷却效能；进一步基于非导磁材料选型，研究该结构对关键部件最高温度及轴向温差的影响，结合绕组端部 1 近表面气流分析与特定槽内绕组温度变化，揭示其靶向抑制机理；最后，根据降温程度与流量分配指标的局部灵敏度分析，量化坡道高度 H、延伸长度 B 和坡道长度 L 的冷却增益，结果表明坡道高度对热点抑制能力最强。

关键词：牵引电机；冷却系统；通风降温技术；传热学；流体动力学
DOI：10.15938/j.emc.2025.12.007
中图分类号：TM351 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-449X(2025)12-0075-12

Targeted suppression and quantitative evaluation of hot spot temperature of traction motor by wind-guided ramp circulation ring

WANG Yu， TONG Qingbin， CAO Junci， JIA Bo
（School of Electrical Engineering， Beijing Jiaotong University， Beijing 100044， China）

Abstract：To address localized overheating and low cooling efficiency in lightweight asynchronous traction motors for high-speed electric multiple units， a 600 kW air-cooled traction motor was selected as the research object， with analyses performed using heat transfer and computational fluid dynamics methods. Firstly， a fluid-solid conjugate model matching the motor's internal fluid distribution and component temperature variation laws was established， and the calculation error met engineering requirements. Secondly， the correlation between the temperature of heat-sensitive components and local fluid characteristics was analyzed， and a wind-guided ramp circulation ring was proposed for axial airflow regulation and targeted hotspot suppression. Precisely aligned with the circulation distortion zone near winding end-part 1 in the rear cavity， the structure's cooling performance was experimentally validated using a high-temperature resin motor model with heating elements. Further， based on non-magnetic material selection， its impact on the maximum temperature and axial temperature difference of key components was studied. The

收稿日期：2025-05-29
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51577007)；国机精工研究院重大科技专项(JGZD202301)
作者简介：王 宇(1995—)，男，博士研究生，研究方向为牵引电机内空间传热机理及冷却结构优化；
佟庆彬(1974—)，男，博士，教授，博士生导师，研究方向为轨道交通牵引传动与控制、故障诊断；
曹君慈(1979—)，男，博士，教授，博士生导师，研究方向为牵引电机传动及其系统、电机优化设计；
贾 博(1999—)，男，博士研究生，研究方向为牵引电机优化设计。
通信作者：曹君慈

targeted suppression mechanism was elucidated by analyzing airflow near the surface of winding end-part 1 and temperature variations of windings in specific slots. Finally, through local sensitivity analysis of temperature reduction and flow distribution, the cooling effects of ramp height H, extension length B, and ramp length L were quantified. The results show that ramp height exhibits the strongest hotspot suppression capability.

Keywords: traction motor; cooling system; ventilation and cooling technology; heat transfer; fluid dynamics

0 引 言

在当代机电装备紧凑化与高功率密度化的发展趋势下,高速动车组的牵引电机面临空间约束与热负荷激增的双重挑战。基于关键部件温度分布特征的精细化建模分析,电机热管理技术的设计焦点正从传统全域冷却体系构建转向热源靶向调控[1-2]。如何通过兼具系统延续性与热控针对性的技术路径,在保持主体冷却架构稳定性的前提下,规避牵引电机整体方案重构带来的资源消耗,提出新型冷却策略或梯度散热拓扑结构,实现局部热点区域的多维热疏导与热流密度再分配,显著提升能量转化节点的运行可靠性[3-4],成为近年来的研究热点问题。

国内外学者针对牵引电机冷却和热管理技术已经做出大量研究,TANG Chenqi 等[5]探讨了电机热管理技术的研究现状与发展趋势,包括热分析方法、精度影响因素、冷却技术特点及相变材料散热效率等。XU Jinquan 等[6]总结了运输用驱动电机的热管理技术、改进的分析方法和新型冷却形式,为电机设计中预测温度分布和选择合适的冷却方式提供了指导过程。JAEGER Markus 等[7]基于集总参数热网络(lumped parameter thermal network,LPTN)模型研究了径向磁通永磁牵引电机转子内部轴向冷却通道对永磁体高温的抑制作用,有效地扩大了高速电机可能的连续运行区域。GRONWALD Peer-ole 等[8-9]基于 LPTN 模型分析了牵引电机不同散热技术的传热机理及解析计算公式,对比了包括转子轴冷却、喷雾冷却、空气对流、轴承传热与定子-外壳接触在内的传热性能差异。为提高永磁轮毂电机的冷却性能,GUO Changbo 等[10]提出一种将冷却通道移至定子槽内的冷却结构,并通过电磁-热耦合分析对其冷却性能和电磁影响进行了评估。丰帆等[11]研究了异步牵引电机内冷却介质的流动特性并提出改善流量分配的措施,揭示了海拔高度与流体参数特性、电机绕组温升的关联性规律。HYEON Seounghwan 等[12]针对风冷永磁电机提出一种导流冷却系统,通过响应面法优化盘型和环型导流器的几何参数,最大化冷却绕组端部,有效降低了局部热点温度,为对牵引电机增强冷却技术提供参考。

吴江权等[13]根据封闭式空冷永磁同步牵引电机端部高温特征与局部气流特点,提出减小绕组端部伸出长度与加装扰流叶片的温升抑制方法,样机试验结果表明,后者使得绕组最高温升显著降低 27.8 K,为冷却结构优化思路提供了指导。陈璐翔等[14]分别研究了轴向与径向进风结构下自通风电机的流体及温度分布规律,结果表明前者在风道内气流流速的均匀性、流量分配的合理性、关键部件的冷却效能方面更具优势。朱粤等[15]提出混合冷却架构的永磁牵引电机风扇结构改进方案,降低了无效循环流体比例,提高了电机整体散热效率,仿真结果表明优化后的结构对转子与永磁体的热点温度影响较大。刘勇等[16]基于磁热耦合方法建立了 600 kW 牵引电机的二维电磁模型与三维流固耦合模型,分析了内空间流体特征和温度分布规律,典型位置的温升结果表明冷却结构的合理性。陈庆波等[17]针对牵引电机的入风口端盖结构,分析了开倒角、圆角及倾斜角度对电机压力损失与通风散热的影响,研究表明两种形式下的定子平均温升大约降低了 2.5 K。

既有研究在牵引电机热管理技术领域已取得显著冷却成效,但普遍采用的空间结构整体优化与气流通道传输路径改良策略存在双重局限性:其一,未能针对性缓解温度敏感部件的高位热点集中现象;其二,通过调整电机入风口构型及通风孔尺寸参数实现的气流路径重构,可能因局部流场特性改变诱发次生热点区域的形成,不仅削弱了散热强化效果,更可能因结构参数的重构设计需求显著增加制造成本,影响工程经济性。

针对上述问题,本文以一台 600 kW 的空冷型牵引电机为研究对象,构建能表征电机内空间冷却

气体流动特性的三维流固耦合模型,分析电机内部热点区域高温缘由,明晰绕组端部出现局部热点及整体轴向温差较大的核心诱因。在此基础上,针对性设计具备区域气流调控与高温靶向抑制功能的导风坡圆环结构,考虑该结构不同材料对相邻部件传热性能的影响和引入导风坡结构后的绕组温度特征变化;从气流变化角度阐明近出风口绕组端的热点靶向抑制机理,分析电机定子通风孔出口区域重构流场的分布规律;最后,采用灵敏度分析方法明确不同导风坡圆环的几何参数对环流畸变区的影响程度、气流调控作用和各部件的降温程度,为后期该类型空冷电机冷却设计提供参考。

1　牵引电机的流固耦合模型

1.1　流固耦合模型的构建

图 1 为高速动车组轻量化异步牵引电机的冷却气体流动路径,不同于自然冷却和带有轴端风扇的电机,单侧空冷型牵引电机的冷却系统由机壳上侧开口,体内复杂的机械结构使得冷却气体的整体分布不均匀,表现出流体域和温度域的非周期性。该冷却系统中的冷却气体通过入风口垂直进入电机内,流经端部绕组和非传动端轴承室所处的前端空腔,分三条路径分别进入定子通风孔、气隙、转子通风孔,对定转子、绕组直线段部分、内部导条起到降温作用,之后通过端部绕组和传动端轴承室所处的后端空腔,由后端机壳上的多个出风口流出。牵引电机基本参数如表 1 所示。

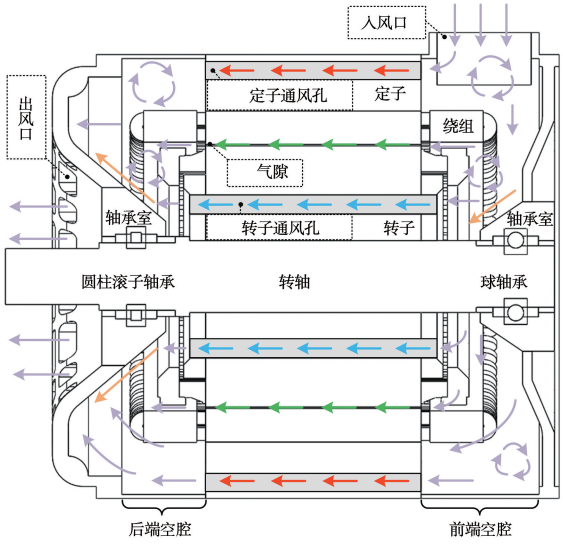


图 1　高速动车组轻量化异步牵引电机冷却气体流动路径

Fig. 1　Cooling gas flow path for lightweight asynchronous traction motor of high-speed train

表 1　电机基本参数

Table 1　Basic parameters of motor

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	600	定子铁心长度/mm	270
额定电压/V	2 730	定子外径/mm	555
额定电流/A	155	定子内径/mm	330
额定频率/Hz	155	气隙/mm	1.8
额定转速/(r·min^{-1})	4 636	转子内径/mm	90
效率/%	94	定子槽数	60

忽略细小安装部件的影响,建立如图 2 所示的三维流固耦合模型。该模型包含固体域和流体域,固体域由机壳、定子铁心、定子绕组、绝缘、转子铁心、导条、压圈、转轴、轴承室构成;流体域为冷却气体流经的区域,采用空气填充。其中,定转子铁心上均匀分布 36 条、24 条轴向通风孔。各部件的材料参数如表 2 所示。

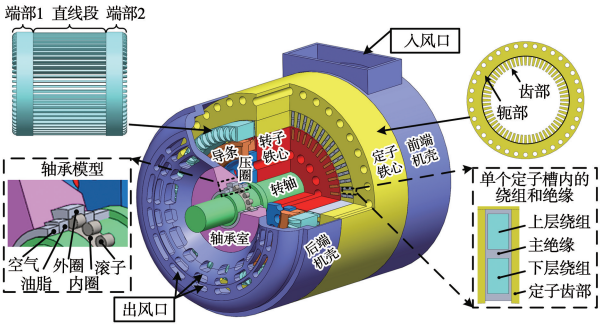


图 2　三维流固耦合全模型

Fig. 2　3D fluid structure coupling full model

表 2　材料参数

Table 2　Material parameters

部件	材料	热导率/[W/(m·K)]	热容/[J/(kg·K)]	密度/(kg/m^3)
机壳/转轴/轴承室	铁	16.27	502.48	8 030
定子/转子铁心	硅钢片	$\lambda_{x,y}=62$ $\lambda_z=4.43$	502	7 650
定子绕组/导条	铜	275	381	8 978
绝缘及槽楔	—	0.35	2 300	700

1)控制方程及边界条件。

根据直角坐标系下的质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程对采用有限体积法的牵引电机的流固耦合模型进行迭代计算。各基本控制方程的通用形式[18]为

$$\frac{\partial(\rho\psi)}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho \boldsymbol{v}\psi) = \mathrm{div}(\Gamma \mathrm{grad}\psi) + s。 \quad (1)$$

式中：ψ 为通用变量；ρ 为流体密度，kg/m^3；$\boldsymbol{v}$ 为速度矢量；Γ 为广义扩散函数；s 为源项。

根据固体的传热定律，不考虑导热系数随空间位置、材料温度的变化时，直角坐标系下的牵引电机三维稳态温度计算模型及边界条件可表示[19]为：

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) = -q; \\ &S_1: T = T_0; \\ &S_2: k\frac{\partial T}{\partial n} = 0; \\ &S_3: k\frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T - T_e)。 \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

式中：λ_x、λ_y、λ_z 分别为考虑各向异性的电机各部件材料在 x、y、z 方向上的导热系数，W/(m·K)；q 为电机内各部件的热源密度，W/m^3；S_1、S_2、S_3 分别为三类边界条件；T_0 和 T_e 分别为边界处已知温度和冷却介质表面温度，℃；α 为对流换热面的散热系数，W/(m·K)。

考虑到空冷型牵引电机圆形截面通风孔及端部空腔内的流体流动特性，采用对旋转剪切流、自由流、通道流和边界层流有着更精确模拟结果的 Realizable k－e 模型模拟气体的湍流状态，其控制方程的数学表达式为：

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \mu_e \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k + \rho\varepsilon; \\ &\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon \mu_e \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - \\ &\qquad C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}。 \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

式中：k、G_k 为湍流动能和产生速率；u_i 为湍流速度，m/s；x_i 和 x_j 为沿 i 轴和 j 轴的单位长度，m；μ_e 为修正湍流黏度系数；ε 为扩散因子；C_1、C_2 为常数；α_k、α_ε 为普朗克常数。

根据电机额定转速和给定冷却气体的入风流速，求解域内的边界条件设置如下：

①气体入口边界定义为 25.5 m/s 的速度入口，出口边界定义为零压出口。

②根据电机结构和风路的轴对称性，轴中心切面设置为对称边界。电机入风口和出风口分别设置为入口边界和出口边界，其余界面为壁面边界。

③初始温度设置为 16 ℃。

④鉴于本文进行的是系统级稳态热分析，气隙处局部流场特性并非研究重点。为降低计算时间成本，将气隙简化为与转子同速的单一旋转域，以简化该处因转子旋转产生的复杂速度梯度变化。

2）热源计算。

牵引电机内的热源主要由定子绕组铜耗 p_{winding}、转子导条损耗 p_{bar}、定转子铁心铁耗 p_{core} 和附加损耗（风磨损耗和杂散损耗）p_{add} 构成，其中轴承损耗并入电机附加损耗，附加损耗的其余部分由牵引制动试验获取，如下式[20]所示：

$$\left.\begin{aligned} &p_{\mathrm{winding}} = mI_{\mathrm{P}}^2 R_0[1 + \theta(T - T_0)]^2; \\ &p_{\mathrm{bar}} = \frac{l_{\mathrm{b}} s}{\sigma'} \sum_{a=1}^{A} J_{\mathrm{ze}}^2 \Delta_{\mathrm{e}}; \\ &p_{\mathrm{core}} = k_{\mathrm{hy}} f B_{\mathrm{m}}^2 + k_{\mathrm{cl}}(fB_{\mathrm{m}})^2 + k_{\mathrm{ex}}(fB_{\mathrm{m}})^{1.5}。 \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

式中：m 为电机相数；I_{P} 为电机相电流有效值；R_0 为定子绕组相电阻；T_0 为绕组初始温度；T 为绕组稳态温度；θ 为绕组铜导线电阻变化率；l_{b} 为导条长度；s 为转差率；σ' 为转子导体的电导率（考虑了端环电阻的影响）；A 为转子槽内总单元数；J_{ze} 为转子槽内各单元的感应电密；Δ_{e} 为转子槽内各单元的面积；k_{hy}、k_{cl}、k_{ex} 分别为磁滞损耗系数、涡流损耗系数与附加损耗系数；f 为交变电流频率；B_{m} 为铁心磁密幅值。

各部件损耗以体热密的形式添加，并将附加损耗折算至定、转子齿部损耗中，额定工况下各部件体积热密分布如表 3 所示。

表 3 额定工况下各部件体热密分布

Table 3 Thermal density distribution of each component under rated operating conditions

参数	绕组	定子		转子	
		齿部	轭部	铁心	导条
热密/(kW/m^3)	776.5	591.9	230.4	123.6	257.2

1.2 模型的实验验证

为验证流固耦合模型的准确性，搭建如图 3 所示的牵引电机温升实验测试平台。对电机进风口处的静压和额定工况下特定点的稳态温度进行测量，结果如表 4 所示。通过预埋在定子轭部测温孔的

温度传感器,采集铁心端面的热点数据,测温位置如图 4 所示,在 25.5 m/s 入口风速下,测点的实验稳态温升为 110.6 K,对应的仿真温升为 113.7 K。压力和温度的仿真结果与实验测试误差均低于6%,满足工程算需求,证明了计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)仿真模型的准确性。

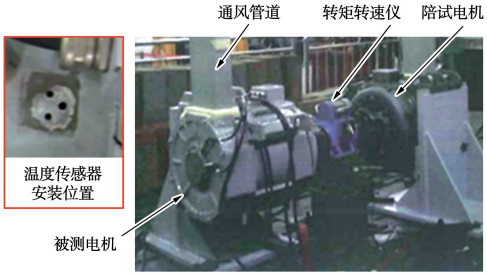


图 3　牵引电机的温升实验测试平台

Fig. 3　Temperature rise experimental testing platform for traction motor

表 4　不同入口风速下入口压力的对比结果

Table 4　Comparison results of inlet pressure at different inlet velocities

入口风速/(m/s)	CFD 仿真值/Pa	实测值/Pa	误差/%
14	566	576	5.21
19.6	1 036.2	1 057	4.96
25.5	1 789.4	1 848.2	-3.12
28	2 112.5	2 211	-3.49
33.6	3 023.4	3 178	-4.80

1.3　各部件高热属性与流体特征的关联性

图 5 给出了牵引电机各部件的温度分布。整体温度基本呈现靠近入风口温度低、靠近出风口温度高的轴向温度递增趋势。受定转子轭部通风孔影响,定子铁心与转子铁心的最高温度区域分别位于内侧齿部和外侧齿部,定子绕组与转子导条的最高温度区域位于靠近电机出风口的端部 1 上,绕组绝缘最高温度区域位于邻近定子绕组的周边。

为明确端部高热区间与流场特征的关联性,如图 6 所示,选取电机中心径向截面 Plane B 上的气流流速矢量分布展开分析。

首先,牵引电机内部复杂机械构型的空间约束与气流导向效应,致使流体在狭缝型多部件邻近域内形成多源的流场畸变区,其异化现象呈现典型的环流属性。环流畸变区主要集中在 4 个位置:定子通风孔出风口与端部 1 处的环流 A、后端空腔轴承室的环流 B、导条与转子铁心间的环流 C 和前端空腔的环流 D。尤其是环流 A 的存在性导致该区域流场流动方向发生特征性逆转,轴向气体的流通路径呈现异常折返现象——本应沿轴向输向出风口的冷却气体产生逆向回流效应,引发轴向有效冷却气流输运效能的显著降低。

其次,通过对比流体运动轨迹发现,定子铁心端面近壁域内空气动力学特性存在显著差异。在电机入风口所在的前端空腔,流场对定子端面及端部形成定向直接冲击效应,促使冷却介质与定子铁心之间形成强化对流换热;而在电机出风口所在的后端空腔,因缺乏有效的流场调控机制,且环流畸变现象的持续演化,导致通风孔的出流未能建立高效热输运路径,继而造成散热效能的局部耗散。该对比分析结果从流体组织维度揭示了两端空腔内各部件冷却性能差异的本质缘由。

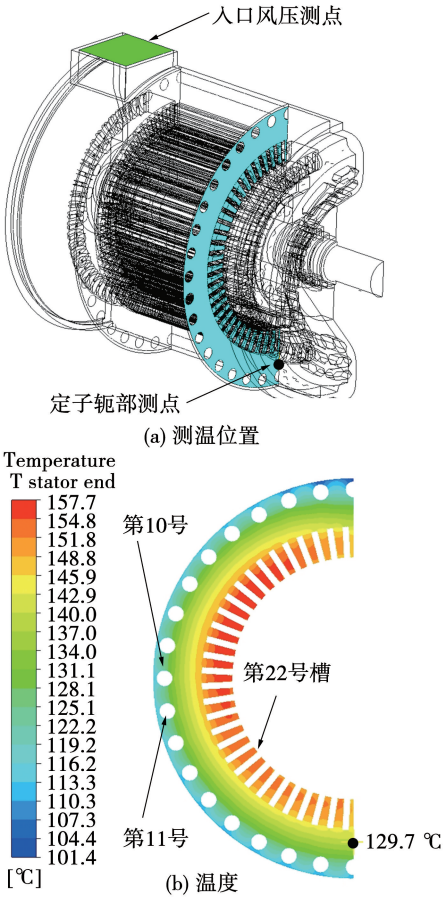


图 4　定子轭部端面测温点的温度

Fig. 4　Temperature measurement point on the end face of stator yoke

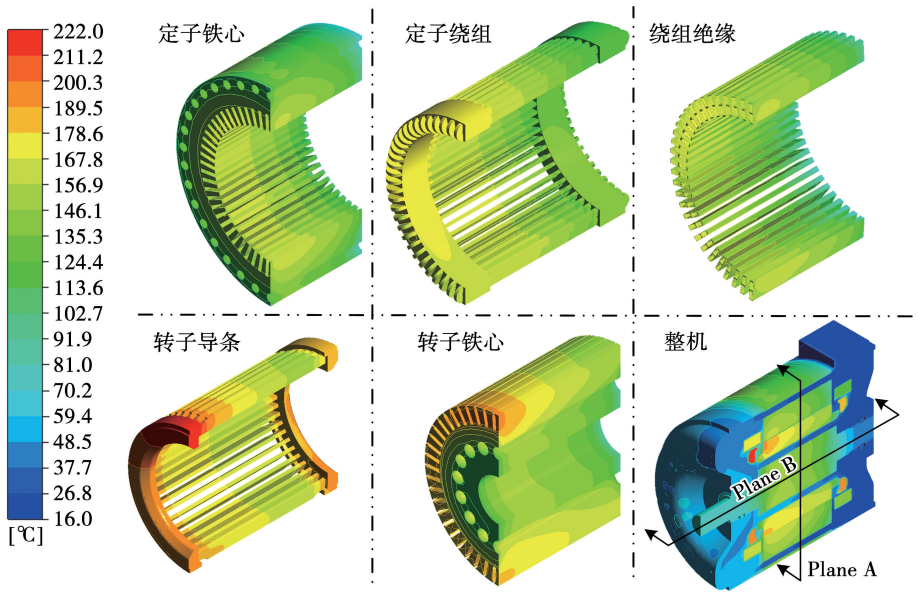


图 5 牵引电机各部件的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of various components of traction motor

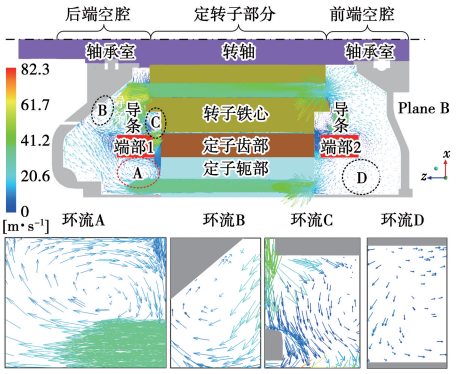
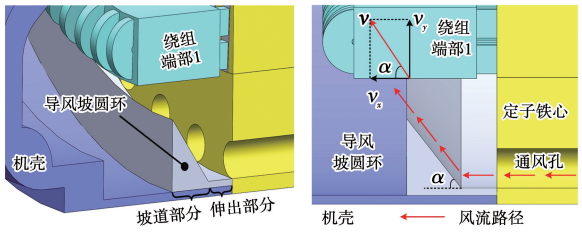


图 6 径向截面 Plane B 流速矢量图及主要环流区域

Fig. 6 Radial section Plane B velocity vector diagram and main circulation areas

量守恒定律,多余流体必然从定子端部 1 与定子铁心端面间的间隙、转子通风孔及气隙等其他通道流出。



(a) 导风坡圆环结构 (b) 风流路径

图 7 导风坡圆环结构及风流路径

Fig. 7 Structure of wind-guided ramp circulation ring and airflow path

2 导风坡圆环的增强冷却效应及机理分析

为实现定子端部 1 区域热点温度的抑制及轴向温差的平衡,提出一种在定子通风孔出口处紧贴机壳内部的五边形截面导风坡圆环结构,包括伸出部分和坡道部分,其基本结构如图 7 所示。导风坡道的流体导向作用使得原结构的轴向风流转为沿坡道的斜向风流,通过定子通风孔的高速冷却气体离开出口后直接吹向高温的定子端部 1 来缓解其近外表面的反向环流,继而增强绕组端部表面的对流换热效率;坡道部分的存在缩减了气体在定子端部 1 和机壳之间冷却通道的截面面积,基于流体动量与质

2.1 导热材料对热点温度的影响

为避免导磁材料对电机气隙磁场均布性及定子轭部漏磁的不利影响,导风坡圆环材料选择非导磁材料。在保持磁场分布及原有热边界条件不变的前提下,对比表 5 给出的 3 种材料:实心木材因低密度特性确保对牵引电机总重与轻量化标准影响较小,成为导风坡圆环材料的首选方案;尽管铁、铝密度较高,但其高导热性可能影响邻近高热部件的热分布。为实现冷却功效和成本优化的综合设计,在结构参数恒定条件下,评估材料导热属性对牵引电机热点部件和后端空腔端部传热性能的影响。

表 5　不同材料的物理参数

Table 5　Physical parameters of different materials

材料	密度/(kg/s)	比热容/[J/(K·kg)]	热导率/[W/(m·K)]
木材	700	2 310	0.173
铁	8 030	502.48	16.27
铝	2 719	871	202.4

图 8 给出了牵引电机原始模型,及引入 3 种材料导风坡圆环结构的关键热部件最高温度与轴向温差。引入木材材料的导风坡圆环结构后,牵引电机内各部件的最高温度与轴向温差存在明显下降。最高温度方面,热敏感绕组部件中绕组端部 1 绕组和直线段部分分别降低 15.1 ℃、10.0 ℃,转子导条和铁心分别降低 7.9 ℃、7.1 ℃,定子铁心轭部、齿部和端部 2 降温幅度较低;轴向温差方面,定子绕组的下降幅度最大均为 9.9 K,其次为导条和转子铁心的4.6 K和 3.7 K。充分证明导风坡圆环结构对于改善牵引电机温度热点以及平衡轴向温差具有良好效果。

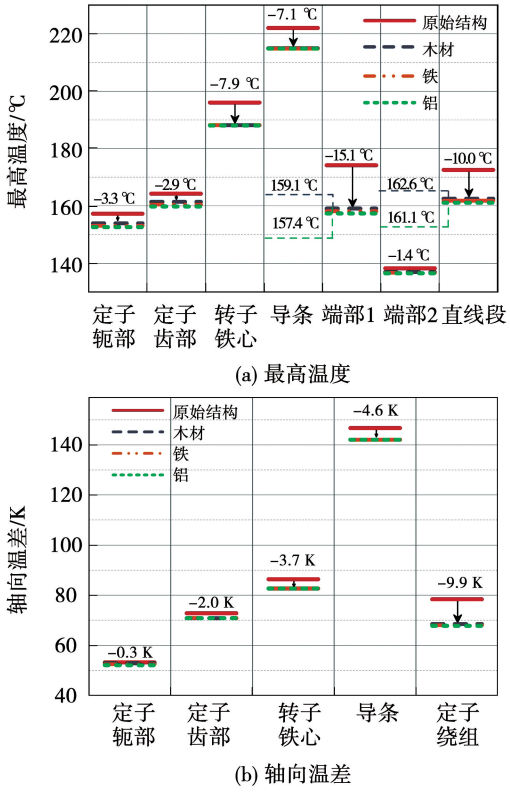


图 8　原始模型及引入导风坡圆环采用不同材料时各部件的热特性

Fig. 8　Thermal characteristics of components when using different materials for the original model and wind-guided ramp circulation ring

此外,图 8 中铝制材料下直线段部分和端部 1 的最高温度仅比木制材料最高温度低 1.5 ℃、1.7 ℃,也直接表明导风坡圆环材料的导热性能差异对热敏感部件的最高温度影响较小。

定子绕组是温度最敏感且易发生热故障的关键部件。因此以木材为导风坡圆环材料,提取绕组上、下层轴向采样线上的温度分布如图 9 所示。

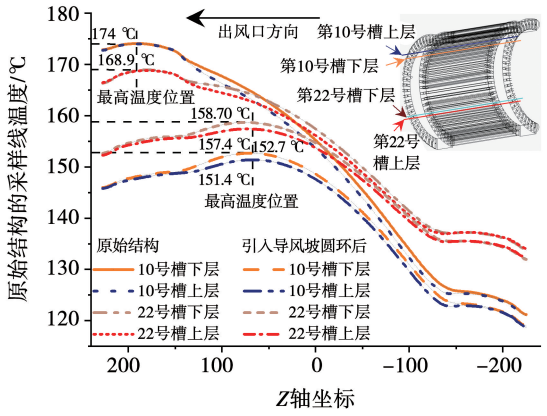


图 9　第 10 号和第 22 号槽内绕组轴向采样线的温度分布

Fig. 9　Temperature distribution of axial sampling lines for windings in slots 10 and 22

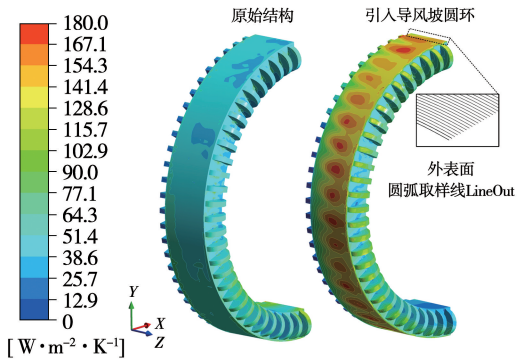
从该图中明显看出第 10 号、第 22 号槽内上下层绕组中心线上的温度随着气流向出风口方向过渡而升高。当引入导风坡圆环后,2 个槽内绕组的最高温度位置向远离出风口的方向发生偏移,第 10 号槽内上、下层绕组中心线上的最高温度由 174 ℃左右分别降低至 152.7 ℃和 151.4 ℃,而第 22 号槽内上、下层绕组中心线上的最高温度由 168.9 ℃分别降低至 158.7 ℃和 157.4 ℃,由此可见,导风坡圆环的引入对定子绕组产生了良好的降温效果。

2.2　温度敏感部件的热点靶向抑制机理

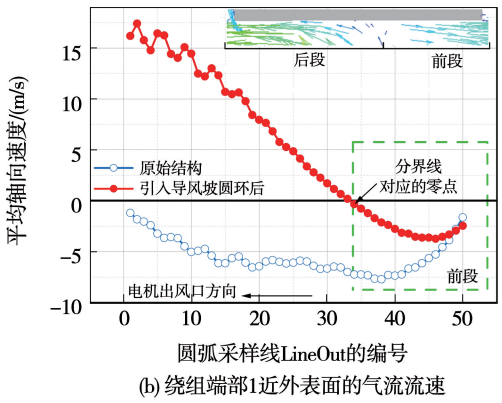
在牵引电机长时域连续运行工况下,绕组绝缘介电性能的稳定性是保障系统热安全边界的核心要素[21]。热关键部件定子绕组的高热点位空间分布直接制约设备绝缘等级设计规范[22]。

为进一步揭示绕组端部温度下降机理,如图 10 所示,提取绕组端部 1 表面的对流换热系数分布和近外表面的圆弧取样线上气流的平均流速随轴向的变化,解析参数的空间变化规律。图 10 表明,导风坡圆环使绕组端部 1 与后端空腔内冷却气流的对流换热系数大幅提升。以端部 1 的外表面为研究对象,原始结构中气流方向均与电机出风口相反,平均轴向速度随着轴向远离电机出风口而降低至

-7.7 m/s 的最小值,后升高至 -1.7 m/s,整体均值为 -5.5 m/s。而导风坡结构将气流分为前段和后段,前段和后段的流速最值分别为 17.4 m/s 和 -3.7 m/s,整体均值为 5.3 m/s。由此可见,引入导风坡圆环后,正向流体是端部 1 近表面冷却效能提升的根源。



(a) 绕组端部1的表面对流换热系数



(b) 绕组端部1近外表面的气流流速

图 10 端部 1 表面的对流换热效果及气流特征

Fig. 10 Characteristics and effects of airflow on the surface of end 1

2.3 引入导风坡圆环后的模拟实验验证

为了验证引入导风坡圆环后的增强冷却效果,利用 3D 打印技术制作了一台等比例的牵引电机树脂模型,其中后端空腔内端部 1 的环形位置上粘贴有不同功率的加热片,以模拟端部温度。冷却系统通风与高热端部抑制实验如图 11 所示。在本实验中,变频器调整冷却风机的转速从而控制入口风速[23-24];直流电源对加热片通电后,利用热电偶和温度记录仪实时获取表面各位置的温度。

表 6 给出了端部 1 上分布的加热片在不同入口风速时的稳态温度,从中可以看出,3 个加热片上稳态温度均随着入口风速的增加而略微下降。引入导风坡圆环后的加热片要比原始结构的温度更低,尤其是 2 号加热片在 3.35 m/s 入口风速时,两者的温差达到 12.5 K,而 3 号加热片在该风速下的温度最低降幅也超过 4 K。此模拟结果证明了导风坡圆环的增强冷却效果。

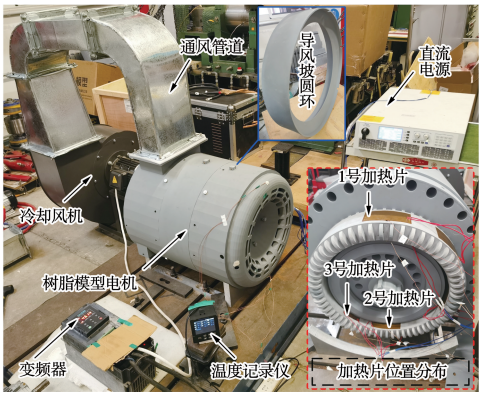


图 11 树脂模型电机的冷却系统通风与高热端部抑制实验

Fig. 11 Ventilation of cooling system and high heat end suppression experiment for resin model motor

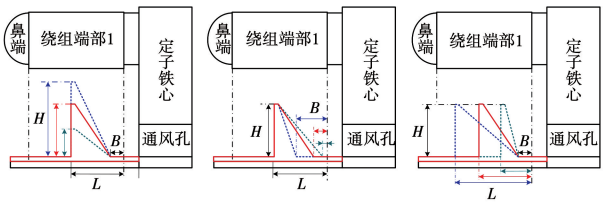
表 6 端部 1 上加热片的稳态温度

Table 6 Steady state temperature of heating element on end 1

入口风速/(m/s)	加热片位置	原始结构温度/℃	引入导风坡温度/℃	温差/K
3.35	1 号加热片	54.5	47	7.5
	2 号加热片	64.9	52.4	12.5
	3 号加热片	82.3	78.2	4.1
5.36	1 号加热片	50	44	6
	2 号加热片	59.4	49.1	10.3
	3 号加热片	78.3	73.7	4.6
7.08	1 号加热片	48.4	42	6.4
	2 号加热片	57.2	47.1	10.1
	3 号加热片	77.3	70.5	6.8
9.94	1 号加热片	47.3	41.4	5.9
	2 号加热片	55.8	46.1	9.7
	3 号加热片	74.4	67.9	6.5

3 坡道几何参数对冷却性能的影响

从坡道几何尺寸出发,将原始导风坡圆环结构称作方案 0,在此基础上坡道高度 H、延伸长度 B 和坡道长度 L 各进行 ±50% 的扰动,6 种典型坡度的导风坡圆环结构如图 12 所示,对比分析导风坡圆环几何参数对流体分布特性和关键部件热点温度降温效果的影响,各方案的结构参数如表 7 所示。



(a) 坡道高度H　(b) 延伸长度B　(c) 坡道长度L

图 12　不同坡道高度 H、延伸长度 B 和坡道长度 L 的导风坡圆环

Fig. 12　Wind-guided ramp circulation rings with different slope heights H, extension lengths B, and slope lengths L

3.1　环流畸变区域的气流调控机制

图 13 为各方案中环流 A 位置处的平面流速矢量对比,从图中可观察到流出定子通风孔出口后的气流运动轨迹。

表 7　不同导风坡圆环结构的几何参数

Table 7　Structural parameters of different wind guide slope circular ring schemes

参数	H/mm	B/mm	L/mm
方案 0	38.5	8.5	38
方案 1	57.75	8.5	38
方案 2	19.25	8.5	38
方案 3	38.5	12.75	38
方案 4	38.5	4.25	38
方案 5	38.5	8.5	19
方案 6	38.5	8.5	57

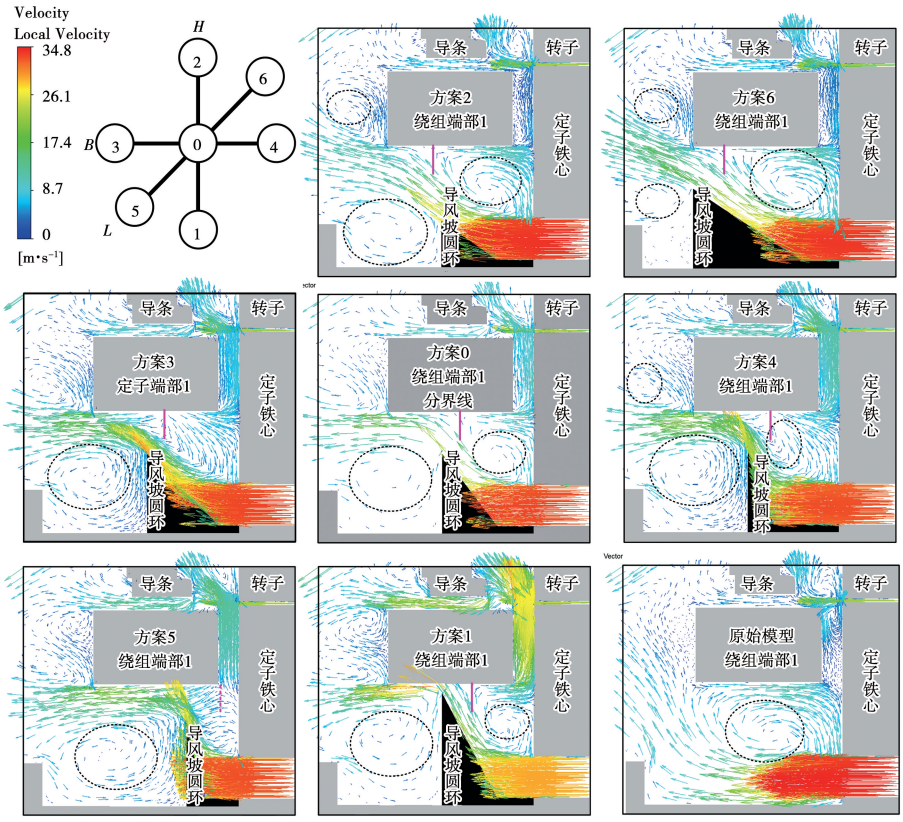


图 13　不同方案环流畸变区域的平面流速矢量对比图

Fig. 13　Comparison diagram of plane velocity vectors in different circulation distortion areas under different schemes

图 13 的纵向是不同坡道高度 H 时的气流轨迹,其中坡度最小的方案 2 中大部分流出定子通风孔的气流被导风坡导向后直接吹向出风口,仅有小部分流体倾斜吹向绕组端部 1 的外表面,之后气流运动轨迹与方案 0 相似;坡度最大的方案 1 与方案 0 的气流运动轨迹基本相似,但导风坡圆环坡道部分顶端与定子端部接近,导致该狭小区域气流含量比方案 0 有所降低,更多气流形成环流后吹向定子铁心与端部 1 间的区域。此外,对比可知随着坡道高度 H 不断升高即导风坡圆环坡道部分的顶端越接近定子端部 1 的外表面,气流分界线的位置越向定子铁心靠近。

图 13 的横向为不同延伸长度 B 时的气流轨迹,2 种方案的气流运动轨迹和气流分界线位置均与方案 0 基本相似。不同点在于越长的延伸长度造成坡道的坡角越大,由坡道吹向定子端部 1 的流体角度

更加垂直。

图 13 的倾斜方向为不同坡道长度 L 的气流轨迹,其中方案 2 中导风坡圆环与定子铁心间的环流消失,这是由于此区域的空间很小且导风坡的坡度长度很短,使得绕组端部 1 外表面的气流分界线位置偏移至端部 1 边界或绕组端部 1 和定子铁心之间的区域,破坏了原有结构形成环流的必要条件。方案 5 与方案 2 的情况相似,大部分被导风坡导向后的气流直接吹向牵引电机的出风口,仅有小部分流体对定子端部发挥对流换热作用。

3.2 电机各部件降温程度的评估

图 14 对比了不同方案导风坡圆环结构的降温效果,各方案部件最高温度和轴向温差均低于原始结构,通过绕组端部 1 最高温度对比顺序为:方案 2 > 方案 6 > 方案 4 > 方案 0 > 方案 3 > 方案 5 > 方案 1,其中方案 1 的降温效果最佳,转子铁心的最高温度及轴向温差降幅分别为 47.2 ℃、33.8 K;定子绕组有源部分分别为 21.8 ℃、16.5 K;端部 1 与端部 2 的最高温度分别降低 49.5 ℃和 3.3 ℃。

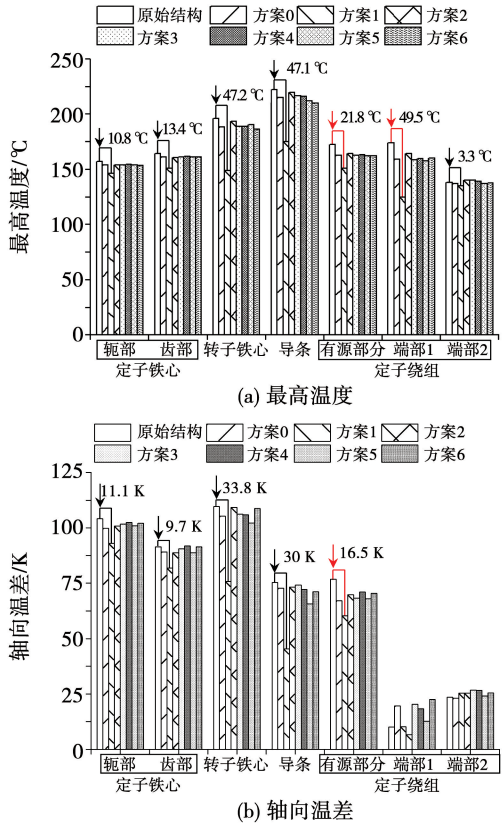


图 14 不同导风坡圆环的结构参数对关键部件的降温效果

Fig. 14 Cooling effect of key components on different structural parameters of wind-guided ramp circulation ring

方案 2、方案 0 与方案 1 相比,最高温度与轴向温差均随坡道高度 H 的升高而降低,其中绕组端部 1 的最高温度由 19.25 mm 坡道高度(方案 2)的 164 ℃降低至 57.75 mm 坡道高度(方案 1)的 124.6 ℃,降低了 39.4 ℃;方案 3、方案 0 与方案 4 相比,最高温度与轴向温差均随延伸长度 B 的延长而降低,其中绕组端部 1 的最高温度由 4.75 mm 的延伸长度(方案 4)的 159.8 ℃降低至 12.75 mm 延伸长度(方案 3)的 158.7 ℃,仅降幅 1.1 ℃。

方案 5、方案 0 和方案 6 相比,最高温度和轴向温差均随着坡道长度 L 的缩短而降低,其中绕组端部 1 的最高温度由 37 mm 的坡道长度(方案 6)的 160 ℃降低至 19 mm 坡道长度(方案 5)的 157.5 ℃,降幅为 2.5 ℃。

3.3 全冷却通道质量流量的分配

图 15 反映了各方案模型流经转子通风孔、定子通风孔以及气隙内的质量流量变化情况,由图可知,气隙内和总的质量流量基本不随导风坡圆环结构的改变而产生巨大的差异。导风坡圆环的几何参数主要影响定转子通风孔内的冷却气体含量,具体表现为:定子通风孔内的质量流量随坡道高度的升高而降低,且幅度最大;随延伸长度的伸长而略有下降,且幅度最小;随坡道长度的加长而增加,且幅度居中。相应地,转子通风孔内的质量流量存在与坡道高度和延伸长度呈正相关、与坡道长度呈负相关的关系。对于降温程度最优的方案 1 而言,其流经定子通风孔的质量流量仅为 225.4 g/s,相比原始结构下降了 62.2 g/s,这些气体几乎全部转移到转子通风孔中,使其质量流量升高了 54.9 g/s。从内空间的流阻特性看,质量流量的转移归咎于导风坡圆环的引入造成了定子通风孔外环流畸变区域的风阻增大。这也解释了方案 1 的转子部分组件温度明显下降的原因。

尽管引入导风坡圆环后各部件的温度均有明显下降,但畸变区域风阻的增加意味着必须提高进风压强才能维持电机入风的恒定流速,这种情况会导致外部风机的电流和输出功率相应增加,间接提高了冷却运行成本,电机冷却系统会产生一定的不利影响。

3.4 坡道几何参数的灵敏度分析

为了直观地展示几何参数对冷却性能参数的评估结果,采用局部灵敏度分析方法开展系统性分析,几何参数对模型输出的局部灵敏度计算公式为

$$S_j(x_i) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{f(x_i \pm \Delta x_i) - f(x_i)}{\pm \Delta x_i}。 \quad (5)$$

式中:x_i 分别为参数的初始值 $\boldsymbol{X}_0=[H_0,B_0,L_0]$ 中的各个元素;j 为量化指标的个数;N 为扰动的次数。

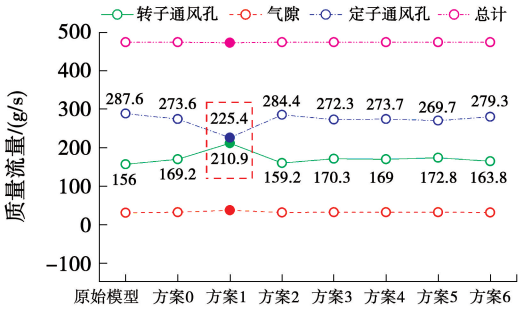
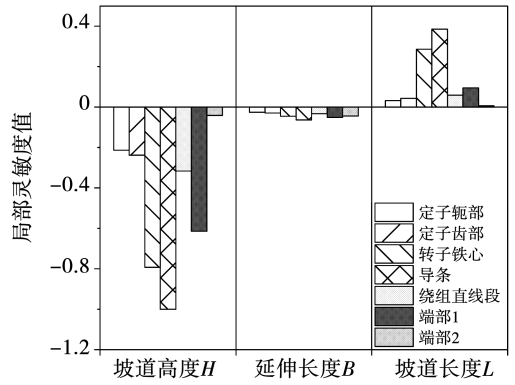


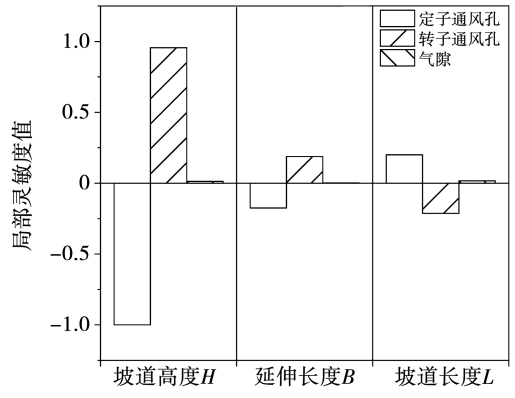
图 15　不同方案各冷却通道的质量流量分配情况

Fig. 15　Changes in mass flow rate of different cooling channels under different schemes

图 16 给出了局部灵敏度的分析结果,量化指标为各部件最高温度和各冷却通道内的质量流量,取各指标的最大灵敏度进行归一化处理。由图可知,坡道高度对于各部件最高温度和各通道质量流量的影响程度最明显,远超延伸长度和坡道长度。导条的最高温度是受坡道高度影响最大的部件,端部 1 的降温幅度也较大,这与图 14 的分析结论相同。



(a) 各部件的最高温度



(b) 各通道的质量流量

图 16　几何参数的局部灵敏度分析结果

Fig. 16　Local sensitivity analysis results of geometric parameters

4　结　论

1)建立了 600 kW 单侧空冷型牵引电机三维流固耦合模型,并通过实验数据验证了电机数值计算模型的准确性。分析了内部热敏感部件的高热缘由和气流分散特征,表明热敏感部件的热点温度与定子通风孔出口处环流畸变区域的无效冷却有关。

2)针对后端空腔绕组端部的高热属性,提出一种能抑制区域热点温度及平衡轴向温差的导风坡圆环结构,使电机原始模型最高温度下降 15.1 ℃,轴向温差降低 9.9 K;分析不同的导风坡材料对降温程度的影响以及绕组的变化特征,引入导风坡圆环后,第 10 号和第 22 号槽内绕组的最高温度向远离出风口位置偏移,降温幅度超过 11.5 K。

3)从气流扰动的角度阐明导风坡圆环对高热部件的靶向抑制机理在于后端空腔对流换热系数的提升,相较原始结构,端部 1 近外表面的气流最高速度从反向 −7.7 m/s 左右提高至正向 17.4 m/s。以树脂模型电机和端部加热片为主体的模拟实验验证了提出结构的冷却效果。

4)通过导风坡圆环坡道几何参数对降温程度、气流流量分配的灵敏度分析,量化了坡道高度、延伸长度和坡道长度的冷却增益效应,结果表明坡道高度为 57.75 mm 时绕组端部 1 的最高温度下降了 49.5 ℃。灵敏度分析结果直接反应了坡道高度 H 对各组件高温抑制效果的程度最强,坡道长度 L 次之,延伸长度 B 影响最小。

本研究对存在局部热点的牵引电机、永磁电机,尤其是外部强迫、开放式自通风、封闭式自通风的风冷电机和汽轮发电机,在高温靶向抑制和增强冷却技术方面提供了一定的理论指导,下一步将针对导风坡圆环的结构参数进行优化设计。

参 考 文 献:

[1] KIM Sunjin, LEE Sangwook, KANG Donggyun, et al. Motor cooling method using flow boiling of two-phase refrigerant and its analysis with lumped parameter thermal model[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 192: 108458.

[2] MADONNA Vincenzo, WALKER Adam, GIANGRANDE Paolo, et al. Improved thermal management and analysis for stator end-windings of electrical machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5057.

[3] SALEEM Arslan, HYEON Park-myeong, AMBREEN Tehmina, et al. Optimization of oil flow distribution inside the in-wheel motor assembly of electric vehicles for improved thermal performance [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201: 117753.

[4] ST-JACQUES Benoit Blanchard, SHI Ruisheng, PILLAY Pragasen. An enhanced PMSM cooling design for traction of an electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(2): 3845.

[5] TANG Chenqi, YU Zhongjun, LIU Zhixin, et al. Research status and development trends of thermal management technologies for motors[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2024, 48(4): 2025.

[6] XU Jinquan, JIN Wenbo, LIN Huapeng, et al. Multiobjective optimization method to maximize power density and efficiency of an electric propulsion motor in UAV applications[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(3): 5484.

[7] JAEGER Markus, RUF Andreas, HAMEYER Kay, et al. Thermal analysis of an electrical traction motor with an air cooled rotor [C]//2018 IEEE Transportation and Electrification Conference and EXPO (ITEC), June 13 - 15, 2018, Long Beach, CA, USA. 2018: 467 - 470.

[8] GRONWALD Peer-ole, KERN Thorsten A. Traction motor cooling systems: a literature review and comparative study[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2892.

[9] GRONWALD Peer-ole, WIESE Niels, KERN Thorstena, et al. Electric traction motor spray cooling—empirical model development and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2185.

[10] GUO Changbo, LONG Linshuang, WU Yu, et al. Electromagnetic-thermal coupling analysis of a permanent-magnet in-wheel motor with cooling channels in the deepened stator slots[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 35: 102158.

[11] 丰帆, 郑国丽, 黄鹏程, 等. 异步牵引电机冷却设计的分析与验证[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 63.
FENG Fan, ZHENG Guoli, HUANG Pengcheng, et al. Analysis and verification of cooling design for asynchronous traction motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(6): 63.

[12] HYEON Seounghwan, KIM Chiwon, LEE Kwan-soo. Thermal enhancement of an air-cooled motor with a flow guide[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022,183: 122228.

[13] 吴江权, 王春燕, 李坤, 等. 永磁同步牵引电机绕组最高温升抑制方法研究[J]. 防爆电机, 2020, 55(4): 37.
WU Jiangquan, WANG Chunyan, LI Kun, et al. Research on method of suppressing windings maximum temperature rise of permanent-magnet synchronous traction motor[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2020, 55(4): 37.

[14] 陈璐翔, 曹瑞丽. 轴向进风和径向进风结构对电机流场和温度场的影响[J]. 防爆电机, 2023, 58(4): 35, 90.
CHEN Luxiang, CAO Ruili. Influences of axial and radialair inlet structures on flow field and temperature field of electric motors [J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2023, 58(4): 35, 90.

[15] 朱粤, 余超, 罗定辉, 等. 某永磁牵引电机冷却结构优化分析[J]. 防爆电机, 2024, 59(3): 4, 42.
ZHU Yue, YU Chao, LUO Dinghui, et al. Optimization analysis on cooling structure of a certain permanent magnet traction motors [J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2024, 59(3): 4, 42.

[16] 刘勇, 邓莎, 黄宇峰, 等. 基于磁热耦合的新型高速动车组牵引电机传热特性数值研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2017, 40(1): 25.
LIU Yong, DENG Sha, HUANG Yufeng, et al. Numerical analysis of heat transfer characteristics for novel high speed EMU traction motor based on magneto-thermal coupling method[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2017, 40(1): 25.

[17] 陈庆波, 申政, 崔可, 等. 入风口端盖开倒角与圆角对牵引电机温度的影响[J]. 防爆电机, 2022, 57(2): 12.
CHEN Qingbo, SHEN Zheng, CUI Ke, et al. Influence of the chamfering and rounding of air-inlet endshield on the temperature of traction motor[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2022, 57(2): 12.

[18] 曹君慈, 闫华, 李栋, 等. 不同通风结构下高铁异步牵引电机温度场分析[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(2): 72.
CAO Junci, YAN Hua, LI Dong, et al. Temperature field analysis of asynchronous traction motor with different ventilation structures[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(2): 72.

[19] SU Ying, LI Weili, LI Dan, et al. Influence of incident angle of hydrogen in the ventilation ducts on multi-physical fields of 1 100 MW turbine-generator rotor[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 140: 852.

[20] 曹君慈, 李伟力, 程树康, 等. 复合笼条转子感应电动机温度场计算及相关性分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(30): 96.
CAO Junci, LI Weili, CHENG Shukang, et al. Temperature field calculation and associated factor analysis of induction motor with compound cage rotor[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(30): 96.

[21] LIANG Dawei, ZHU Z Q, FENG Jianghua, et al. Simplified 3-D hybrid analytical modelling of magnet temperature distribution for surface-mounted PMSM with segmented magnets[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(4): 4474.

[22] HE Qiang, WANG Jiwen, LI Kangshuai, et al. Thermal analysis and thermal management of high power density electric motors for aircraft electrification[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 260: 125006.

[23] 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.
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.

[24] 高俊, 韩雪岩, 王勇, 等. 强迫通风在低速大转矩永磁电机上应用分析[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(11): 58.
GAO Jun, HAN Xueyan, WANG Yong, et al. Application analysis of forced ventilation cooling method in low-speed high-torque permanent magnet motor[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(11): 58.

(编辑:刘琳琳)