

新能源汽车灌封电机温度特性研究

董江东, 许时杰, 于冰, 唐小春

(1. 中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 湖南省新能源电机工程技术研究中心, 湖南 株洲 412001)

摘要: 新能源汽车用电机对大小及质量的要求严格, 具有功率密度高、质量轻、体积小、内部结构紧凑等特点, 故不可避免会产生较大的散热压力, 因此带水套的液冷电机成为主流形式。如何建立电机内部与壳体之间高效的导热通道, 是限制电机性能的重要问题之一。运用电机灌封技术在定子槽内绕组以及端部绕组处填充热导率相对较高的灌封胶, 以提高绕组的导热效率。利用流体仿真的方法对灌封后的电机流场以及温度场进行研究, 与未灌封电机对比, 利用现有的试验平台, 对仿真结果进行验证。结果表明: 电机灌封后有效的改善了端部绕组以及槽内绕组的散热条件, 降低了端部与槽内的温度梯度, 电机绕组的最高温度下降了 22 K, 效果较为显著。

关键词: 新能源汽车电机; 电机灌封; 电机温度特性; 温度场仿真

中图分类号: TM 301.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)10-0092-07

Temperature Characteristics of Potting Motor Used in New Energy Vehicle

DONG Jiangdong, XU Shijie, YU Bing, TANG Xiaochun

(1. CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Electric Vehicle Motors, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Due to the strict requirement of small size and light weight, the motors used in new energy vehicle had the characteristics of high power density, light weight, small volume and compact structure, which inevitably had a significant influence on the heat dissipation of motors. Thus, the motors cooled by water jacket had emerged as a mainstream, but how to set up the efficient heat conduction passage from the internal motor to the shell was still one of the important problems restricting the motor performance. In order to improve the thermal conduction efficiency of windings, the potting gum with relatively higher thermal conductivity was filled into the stator slot winding and the end winding. The fluid field and temperature field of the potting motor and the unpotted motor were studied using the method of fluid simulation. The simulation results were verified by experiment using the existing experimental platform. The results showed that the heat dissipation condition of the end winding and the winding in the slot is improved effectively after the motor was potted, the temperature gradient between the end winding and the slot winding was reduced, and the maximum temperature of the motor winding was reduced by 22 °C.

Key words: new energy vehicle motor; motor potting; temperature characteristic of motor; temperature field simulation

0 引言

随着石油能源的愈发短缺以及国家对能源安全的日益重视, 新能源汽车成为国家大力扶持的

战略型新兴产业, 涌现出了各种类型的新能源汽车^[1]。目前较为主流的新能源汽车包括纯电动汽车、插电式混合动力汽车、增程式混合动力汽车以及燃料电池汽车^[2]。无论是上述哪种新能源汽车

作者简介: 董江东(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电机热管理。

许时杰(1992—), 男, 硕士, 研究方向为电机热管理。

于冰(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源汽车驱动电机。

车,电动机均作为直接或间接驱动部件,推动汽车的行驶,是必不可少核心部件,影响汽车的性能、成本以及安全^[3]。

新能源汽车电机具有功率密度高、质量轻、体积小、内部结构紧凑等特点,因此不可避免会产生较大的散热压力。若电机内部的热量不能有效排出,会引起严重的电机温升问题,成为限制电机功率提升的瓶颈之一。电机内部元件如绝缘漆、永磁体等的寿命受高温影响较大,将造成永磁体退磁、结构机械强度下降等现象^[4],不仅危害电机的正常运转,严重时会产生安全问题。

为了解决温升问题,电机通常配有冷却散热系统。冷却方式主要有风冷、水冷以及油冷^[5-7]。其中,油冷结构较为复杂,在现有电机中使用较多为风冷以及水冷,一般形式为流体冷却机壳或者通过通道使流体直接冷却定转子。新能源汽车所使用的电机,体积小且散热空间有限,冷却水套成为了市面上主流的散热方式^[8-9]。水套中通有不断循环的液体,能够高效带走定子及空气等传递至机壳的热量,具有较高的换热效率。但对于电机绕组,由于各类绝缘材料以及空气的存在,表面的热传导以及热对流效率较低,绕组产生的大量铜耗难以高效地传递至定子或者机壳,因此如何建立电机内部与壳体之间高效的导热通道是限制电机性能的重要问题之一。

本文以一款电动汽车用永磁同步电机(PMSM)为研究载体,通过将热传导系数较高的灌封材料填充至定子绕组与定子铁心(或机壳)之间的空隙,以提高绕组的传热效率,降低电机的温度,达到增强电机性能及稳定性的目的。本文研究了灌封后电机的热特性与温度场,并与未灌封电机进行了对比。

1 电机分析模型

1.1 电机温度场数学模型

根据热传导定律,稳态温度场中具有内热源的单元体导热过程可描述为

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_v = 0 \quad (1)$$

式中: λ_x 、 λ_y 、 λ_z ——介质 x 、 y 、 z 方向上的导热系数;

T ——温度;

q_v ——单位体积介质的发热量。

对于各向同性介质,式(1)可改写为

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_v = 0 \quad (2)$$

其中: $\lambda = \lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$ 。

在电机热分析中可用有限差分法将式(1)、式(2)微分方程离散成代数方程进行求解,但运算量较大,必须借用计算机的帮助^[10]。一般在工程中求解该类流体方程主要使用商用仿真软件,如 Fluent、Star ccm+等。本文也使用 Fluent 流体仿真软件对灌封电机的温度场进行计算,分析电机在灌封后的流场特性以及温度场特性,并与未灌封电机进行对比,从而对电机灌封的有效性进行验证。

1.2 灌封电机基本参数

本文以商用电动车用某型号 PMSM 为研究对象,进行灌封后电机的热特性研究及与未灌封电机的对比分析。灌封所使用的是亨斯迈 CW30334/HW30335 型灌封胶水,导热系数为 $1.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。灌封电机定子整体效果如图 1 所示。灌封胶基本上将定子附近的间隙全部充满,可以认为电机内不再有空气。电机基本参数如表 1 所示。



图 1 灌封电机定子整体效果图

表 1 电机基本参数表

参数名称	参数值
相数	3
定子槽数	50
绕组层数	2
定子外径/mm	180
定子内径/mm	130
裸线直径/mm	0.8

1.3 电机模型的建立及简化

电机的形状较为复杂,各类细节特征很多,这些细节对仿真的影响很小,但却会大大增加仿真的难度,因此在建模过程中对模型进行适当合理的化简。具体简化措施如下:

(1) 电机外壳的细节,例如吊耳、花纹、凸耳、加强筋以及各类倒角等对传热的影响较小,可忽略。

(2) 去除轴承等旋转部件,将其损耗加在其他位置。

(3) 将所有绕组及槽绝缘端绝缘等效为一个个体,如图 2 所示。利用传热学理论将绕组及绝缘的热参数等效至等效体上。



图 2 绕组等效模型图

电机简化模型图如图 3 所示。

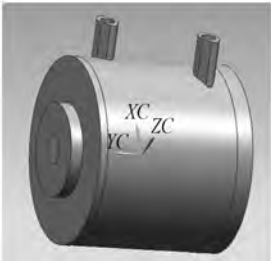


图 3 电机简化模型图

2 电机相关热参数计算

2.1 电机损耗计算

电机在运行过程中,电能不会完全转换为输出的机械能,不可避免地会产生一定的损耗。这些损耗最终都以热量的形式被电机吸收,是电机温升的主要原因。电机的损耗包括绕组的电阻铜耗、铁心的铁耗、磁钢涡流损耗以及机械损耗等。

由于铜线的电阻率会随着温度的升高而增大,相应产生的铜耗也会增大,分析过程中应当予以考虑,所以在仿真时利用 UDF 函数的功能给出

其变化关系。根据电阻率随温度的变化关系,可以推导出铜耗随温度变化的关系式:

$$\rho_{cu} = \rho_0 [1 + \alpha(T_{cu} - T_0)] \tag{3}$$

$$P_{cu} = P_0 [1 + \alpha(T_{cu} - T_0)] \tag{4}$$

式中: ρ_{cu} ——铜的电阻率;
 ρ_0 ——铜在 100 ℃时的电阻率(在电机热分析中的损耗值一般以 100 ℃下的值为标准);
 α ——电阻率随温度变化的系数;
 T_{cu} ——铜线的温度;
 T_0 ——100 ℃;
 P_{cu} ——绕组的铜损。

通过 Maxwell 仿真计算,可以得到额定工况下电机在 100 ℃时的损耗值,如表 2 所示。

表 2 100 ℃电机额定工况损耗值				W
绕组铜耗	铁耗	涡流损耗	机械损耗	
1 410	570	10	160	

2.2 绕组等效

电机中绕组的结构非常复杂,不仅包含多匝线圈,还有层绝缘、槽绝缘、浸渍漆、端绝缘、空气等不良热导体,完全建模难度很大。因此,本文参考文献[11-12]的等效方法,将槽内绕组等效为一个充满铁心槽的两层等效体。

内层为铜线等效层,简称铜层,由裸线及表面线绝缘等效而成,如图 4 所示。

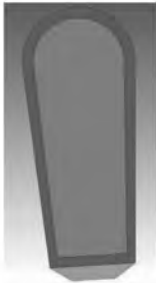


图 4 绕组等效体各等效层示意图

外层为槽内绝缘等效层(漆包线至定子铁心之间的部分),即槽内空气、浸渍漆以及槽绝缘(灌封电机为灌封胶和槽绝缘)构成的等效层,未灌封电机较为关键的数据为浸渍漆的挂漆率,决定了残留空气的数量。本文根据电机实际情况设定挂漆率为 80%。对于端部绕组,未灌封电机还存在端部绝缘,灌封电机则没有。等效体的等效热物性参数可表示为

$$\lambda_d = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \cdots + \delta_i}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \cdots + \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (5)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \cdots + \rho_i V_i}{V_1 + V_2 + \cdots + V_i} \quad (6)$$

$$c_d = \frac{c_1 \rho_1 V_1 + c_2 \rho_2 V_2 + \cdots + c_i \rho_i V_i}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \cdots + \rho_i V_i} \quad (7)$$

式中： λ_d 、 ρ_d 、 c_d ——等效体的热传导系数、密度以及比热容；
 δ_i 、 λ_i 、 ρ_i 、 V_i 、 c_i ——各个被等效层的厚度、热传导系数、密度、体积以及比热容。
经过计算，可以得到等效铜层以及等效绝缘层的各项热物理参数。等效至仿真模型中的材料属性如表 3 所示。

表 3 等效至仿真模型中的材料属性

主要参数	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	径向热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	切向热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	轴向热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
等效铜层	7 500	510	2.245 6	2.245 6	385
槽内绝缘等效层(未灌封)	1 020	1 450	0.175 9	0.175 9	0.25
槽内绝缘等效层(灌封后)	1 600	1 370	0.538 0	0.538 0	1.2
端绝缘等效层	1 350	1 200	0.512 4	0.512 4	0.512 4

3 电机流场与温度场分析

根据以上的等效简化模型以及计算，采用 Fluent 软件对灌封电机与未灌封电机的流场以及温度场进行稳态仿真，并对比分析二者的差异。电机在额定工况下工作，额定转速为 3 000 r/min，额定扭矩为 100 N·m。

3.1 网格模型

电机内部存在转速较高的部件，使得流场与温度场变得较为复杂。为了保证仿真的收敛性以及精确度，采用手动六面体结构化网格划分，网格数量共计 6 568 855。基于电机复杂的结构，运用网格分块以及装配的方法，降低了网格划分的难度。网格模型及某些局部细节如图 5 所示。

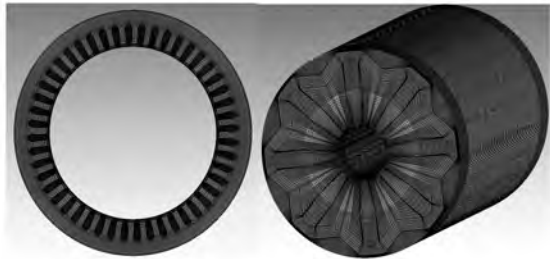


图 5 网格模型及某些局部细节

3.2 边界条件

边界条件对于仿真的收敛以及精度有较大的影响。为了模拟真实的情况，本文根据电机实际使用的工况对边界条件进行设置，如表 4 所示。

表 4 仿真边界条件

边界名称	边界条件	数值
机壳及端盖外壁/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	自然对流	15
水道入口流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	速度入口	0.64(12 L/min)
水道入口水温/ $^{\circ}\text{C}$	恒温	60
水道入口直径/mm	水力直径	20
水道出口/Pa	压力出口(表压)	0
水道直径/mm	水力直径	20
重力加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	负 x 方向	9.8

水冷电机中绝大部分热量被冷却液带走，机壳表面的散热对电机温升影响较小，忽略电机表面的热辐射，将自然对流系数设为 15 W/($\text{m}^2\cdot\text{K}$)。水道入口参数按照电机实际使用设置。

3.3 未灌封电机仿真

表 5 所示为未灌封电机各零部件的最高温度及最低温度。图 5 中，整个电机的温度最高点在端部绕组，为 120.1 $^{\circ}\text{C}$ 。图 6 所示为未灌封电机绕组等效体的温度仿真图。从图 6 可以看出，温度最高点出现在定子绕组的内部，而绕组表面温度却较低，原因是绕组表面包裹了绝缘，绝缘的热阻较大，形成了一定的温度梯度。

图 7 所示为绕组内部等效铜层的温度仿真云图。从图 7 可以看出，温度最高点出现在铜层两端的中部，说明绕组外表面的空气流动带走了一部分热量。整个铜层的温度分布呈现两头高、中间低的趋势。图 8 所示为绕组铜层靠近槽顶处随

表 5 未灌封电机零部件最高温及最低温

零部件	最高温/℃	最低温/℃
机壳及水道	70.7	60.0
前后端盖	85.0	65.4
定子槽内绕组	115.3	105.9
定子端部绕组	120.1	115.3
定子铁心	88.15	67.00
转子铁心	107.8	92.5
磁钢及填料	108.6	95.0
转轴	108.9	81.0

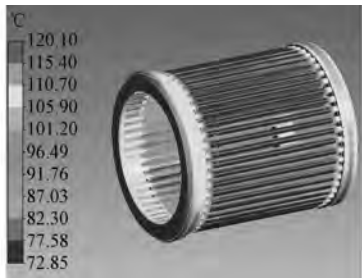


图 6 未灌封电机定子绕组表面温度云图

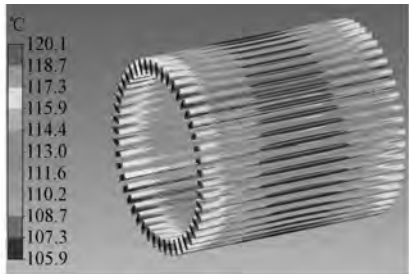


图 7 未灌封电机铜层表面温度云图

轴向距离变化的温度变化曲线图,其中 $x=0$ 处代表铁心轴向中心处的绕组。从图 8 可以看出,变化曲线呈 U 形分布,铁心轴向中心处的绕组温度最低,端部绕组的轴向端面处温度最高,二者温差约为 7.2 K,说明槽内绕组的散热条件较好。与槽内绕组相接触的定子铁心导热系数高,热阻低,并且水道大部分也均处于冷却铁心的位置,因此绕组的热量从铁心部位传导至机壳的速度更快,温度也就更低。端部绕组附近的流场流速较低,如图 9 所示,对流传热的效率较差,空气吸收热量后需与机壳再次进行低效率的对流传热,散热条件恶劣,需要将很大一部分热量传导至槽内绕组再通过铁心导出,与槽内绕组之间形成了一定的

温度梯度。

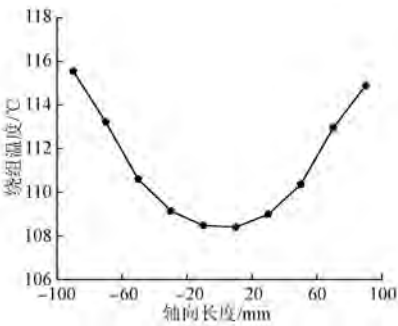


图 8 未灌封电机绕组轴向温度变化曲线

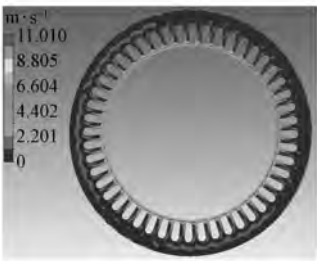


图 9 未灌封电机端部绕组轴向横截面流场分布图

相较于定子,PMSM 转子以及磁钢的损耗较小。但转子没有与机壳直接接触的通道,只能通过外表面的空气流场进行对流散热,而吸收热量的空气再与机壳发生对流传热,因此传热效率很低。图 10 所示为转子的温度分布图。转子最高温度为 107 °C,温度分布为中间高两端低,由转子在轴向上叠压了导热系数低的绝缘和转子空气流场主要在两端等因素共同造成。PMSM 磁钢涡流损耗较小,从图 10 及表 5 可以看出其温度几乎与转子铁心相同。

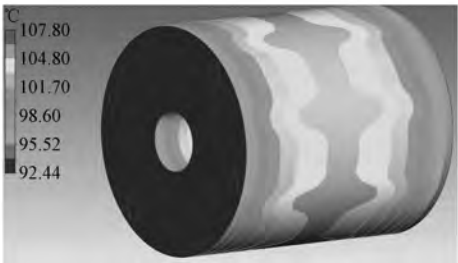


图 10 未灌封电机转子温度分布图

3.4 灌封电机仿真

表 6 所示为灌封电机各部分的最高温度及最低温度。从表 6 可以看出,温度的最高点已经不

在定子处,而在转子处,显然,是因为灌封大幅降低了定子绕组的温度。

表 6 灌封电机零部件最高温及最低温

零部件	最高温/℃	最低温/℃
机壳及水道	71.36	60.00
前后端盖	85.7	66.8
定子槽内绕组	92.2	83.5
定子端部绕组	97.5	92.2
定子铁心	90.61	67.07
转子铁心	107.5	92.8
磁钢及填料	108.50	94.32
转轴	107.40	81.75

图 11 所示为绕组的温度仿真图。图 12 所示为灌封电机等效铜层的温度分布图。最高温度仅为 97.5℃,比灌封之前下降 22.5 K,降温效果显著。对于端部绕组,上表面是靠近机壳处的温度最低,而靠近转子处的内表面温度最高,由内向外逐渐降低,说明灌封材料的热桥作用效果较为明显,改善了端部绕组表面的散热条件。但对于整个绕组,温度仍然呈现槽内低、端部高的趋势。



图 11 灌封电机绕组温度分布图

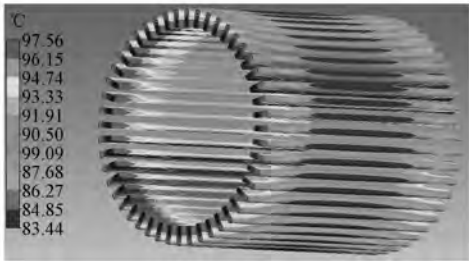


图 12 灌封电机等效铜层温度分布图

图 13 所示为靠近槽顶处绕组铜层随轴向距离变化的温度变化曲线图。从图 13 可以看出,温度分布依然呈现 U 形分布,端部绕组与槽内绕组

之间仍存在一定的温度梯度,说明灌封后槽内绕组散热条件仍然比端部绕组好,端部绕组仍然需要通过槽内绕组→铁心这一路径带走部分热量。

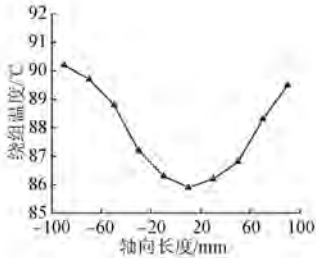


图 13 灌封电机绕组轴向温度变化曲线

与未灌封相比,端部绕组与槽内绕组的温差缩小了 40%,原因有:(1)灌封后绕组导热率的提升使端部绕组→槽内绕组→铁心→机壳这一路径的热阻降低;(2)灌封后端部绕组-机壳之间被灌封胶填充,形成热桥可以直接将热量传导至机壳,使得从绕组直接散至机壳的热量有较大的提升,减少了端部绕组→槽内绕组→铁心→机壳这一路径的热量。二者共同作用下,温度梯度随之降低。

与未灌封相比,也存在不同,电机的最高温出现在转子处,但温度分布以及大小与未灌封基本相同,如图 14 所示。说明尽管灌封阻挡了空气的流动,减少了电机内部的流场,但却没有降低转子处的换热效率。

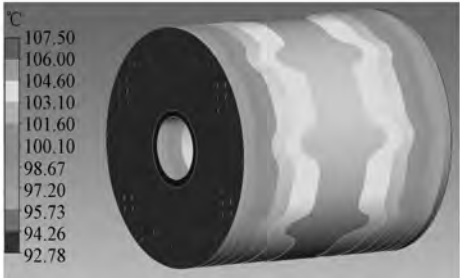


图 14 灌封电机转子温度分布图

4 试验验证

为了验证本文对灌封电机和未灌封电机的温度场及流场研究的正确性及准确性,采用温升试验的方法进行验证。利用现有的高速测试试验平台对电机的实际温度进行测量,并与仿真计算结果进行对比,高速测试试验平台如图 15 所示。

为了保证试验的精度以及获得准确的温度分布,采用在电机绕组内预埋温度传感器的方式测



图 15 高速测试试验平台

量温度。温度传感器的类型为 NTC, 预埋的位置为铁心槽顶附近的绕组以及端部绕组的轴向端面, 即温度最低点以及温度最高点。

图 16 所示为未灌封电机传感器温度随时间的变化图。由图 16 可见, 最高温度稳定在 118.9 °C, 仿真值与试验值相差 1.2 K, 误差为 1%。

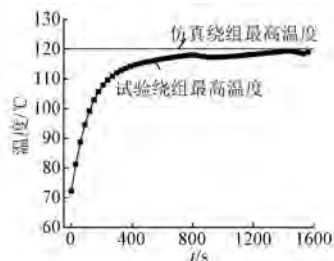


图 16 未灌封电机绕组最高温对比

图 17 所示为未灌封电机传感器温度随时间的变化图。由图 17 可见最高温度稳定在 99.3 °C, 仿真值与试验值相差 -2.0%, 最低温度稳定在 81.1 °C, 仿真值与试验值相差 2.9%。通过对比分析, 灌封电机以及未灌封电机的仿真误差均在 3% 以内, 精度较高, 满足工程需求。

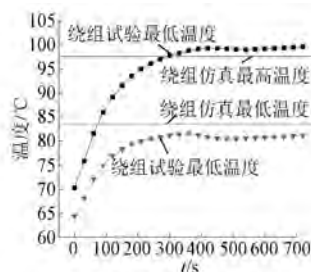


图 17 灌封电机绕组最高温及最低温对比

5 结 语

本文通过流体仿真的方法, 对灌封电机及未灌封电机的流场和温度场进行了仿真计算, 并将

二者进行了对比。利用现有的试验平台, 通过埋布传感器的方式测量电机绕组的温度, 对仿真结果进行了验证。得出主要结论如下:

(1) 本文采用的仿真模型精确度较高, 误差在 3% 以内, 可认为仿真结果具有一定的代表性。

(2) 电机灌封后可以有效地提高电机绕组部分的散热效率, 稳态额定工况下最高温度下降了 22.5 K, 降温效果较为显著。灌封对于转子部分影响较小, 虽然减少了电机内部的流场, 但并未使得转子部分温度升高。

(3) 未灌封电机的绕组温度分布呈现两端高中间低的趋势, 即端部绕组与槽内绕组之间存在一定的温度梯度, 说明由于定子铁心的高导热性以及水道所处的位置, 槽内绕组的散热条件好于端部绕组, 端部绕组产生的热量一大部分需要经过槽内绕组经由铁心传导出。

(4) 电机灌封后, 端部绕组与机壳之间形成热桥, 端部热量能直接通过热传导的方式传导至机壳, 改善了端部绕组的散热条件, 但与槽内绕组之间仍然存在温度梯度, 说明槽内绕组散热条件仍比端部好, 端部绕组热量仍有部分需通过槽内绕组→铁心→机壳这一路径导出。

【参考文献】

- [1] E J, XU S, DENG Y, et al. Investigation on thermal performance and pressure loss of the fluid cold plate used in thermal management system of the battery pack [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 145: 552.
- [2] 唐葆君, 刘江鹏. 中国新能源汽车产业发展展望 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2015, 17 (2): 1.
- [3] 曲荣海, 秦川. 电动汽车及其驱动电机发展现状与展望 [J]. 南方电网技术, 2016, 10 (3): 82.
- [4] 李翠萍, 管正伟, 丁秀翠, 等. 电动汽车用电机冷却系统设计及发展综述 [J]. 微特电机, 2019, 47 (1): 82.
- [5] DAVIN T, PELLE J, HARMAND S, et al. Experimental study of oil cooling systems for electric motors [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75: 1.
- [6] CHEN R, CHOW L C, NAVEDO J E. Effects of spray characteristics on critical heat flux in subcooled water spray cooling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45 (19): 4033.

(下转第 110 页)

- 速度传感器矢量驱动系统的研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2015, 35(1): 6.
- [7] 王杰, 谢源, 谢涛, 等. 基于 MRAS 的永磁同步电机无传感器矢量控制研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(1): 30.
- [8] KHLAIEF A, BOUSSAK M, CHAARI A. A MRAS-based stator resistance and speed estimation for sensorless vector controlled IPMSM drive[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108: 1.
- [9] 周博, 徐大林, 顾兆丹. 基于 MRAS 和模糊算法的 PMSM 无传感器控制[J]. 电子测量技术, 2013, 36(2): 39.
- [10] 陈永贵. 浅谈新能源汽车发展现状及应用前景[J]. 南方农机, 2017, 48(13): 142.
- [11] 汪琦, 王爽, 付俊永, 等. 基于模型参考自适应参数辨识的永磁同步电机电流预测控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(7): 48.
- [12] MORA A, ORELLANA A, JULIET J, et al. Model predictive torque control for torque ripple compensation in variable-speed PMSMs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4584.
- [13] 张晓光, 张亮, 侯本帅. 永磁同步电机优化模型预测转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4800.
- [14] ZBEDE Y B, GADOUE S M, ATKINSON D J. Model predictive MRAS estimator for sensorless induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3511.
- [15] XIE W, WANG X, WANG F, et al. Finite-control-set model predictive torque control with a deadbeat solution for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5402.

收稿日期: 2019-07-03

(上接第 76 页)

- [5] 朱常兴, 王殿友, 朱常权, 等. 西气东输工程 20 MW-2P 电动机转子系统临界转速计算[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(11): 59.
- [6] 张贵滨, 巩魁鑫. 超高速大功率电动机轴系不平衡响应分析[J]. 防爆电机, 2017, 52(4): 26.
- [7] 伍宙敏. 滑动轴承顶轴油设计[J]. 热力透平, 2013, 42(2): 100.
- [8] 林盛雄. 汽轮机组液压顶轴装置的设计[J]. 动力工程, 1981(4): 7.
- [9] 谢尉扬. 汽轮机顶轴油系统及相关问题研究[J]. 汽轮机技术, 2016, 58(3): 223.
- [10] 罗吉江, 赵正清, 邹伟明. AP1000 核电汽轮发电机组顶轴油调试[J]. 热力透平, 2017, 46(2): 148.
- [11] 杨灵, 陈赤, 何显富. 顶轴系统的设计[J]. 东方电气评论, 2002(3): 1.
- [12] 赵海廷, 赵彦铭. 采用低速动平衡解决汽轮发电机的一阶临界异常振动[J]. 发电设备, 2009, 23(1): 27.
- [13] 寇胜利. 发电机的现场平衡[J]. 大电机技术, 2006(1): 14.
- [14] 祝剑虹, 许永利. 局部预负荷对可倾瓦轴承性能的影响[J]. 动力工程学报, 2018, 38(7): 539.
- [15] 郑展友, 李辉, 傅滨. 300 MW 汽轮机低速碾瓦的分析及处理[J]. 山西电力, 2012(4): 60.
- [16] 张学超, 张宝, 李卫军. 600 MW 汽轮发电机组轴颈损伤事故分析与处理[J]. 发电设备, 2006, 20(3): 166.
- [17] 尹延国, 焦明华, 解挺, 等. 滑动轴承材料的研究进展[J]. 润滑与密封, 2006(5): 183.

收稿日期: 2019-06-11

(上接第 98 页)

- [7] 杜爱民, 张东旭, 孙明明, 等. 混合动力汽车用油冷永磁同步电机温度场研究[J]. 汽车技术, 2019(4): 34.
- [8] 童莉莉, 余剑, 朱克非. 电动客车用电机壳体设计[J]. 时代汽车, 2018(7): 98.
- [9] 郭军朝, 章国光, 邓丽梅, 等. 电机水套散热仿真与试验研究[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(9): 61.
- [10] 郑国丽, 丰帆, 周黎民, 等. 电机的热分析方法与应用[J]. 微特电机, 2017, 45(10): 78.
- [11] STATON D, BOGLIETTI A, CAVAGNINO A. Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial induction motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(3): 620.
- [12] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, STATON D. Determination of critical parameters in electrical machine thermal models [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(4): 1150.

收稿日期: 2019-07-09