

不同冷源轮毂电机多模式切换温度场研究

周志刚^{1,2†}, 杨文豪¹, 孟祥明¹

(1. 河南科技大学 车辆与交通工程学院, 河南 洛阳 471003;

2. 宁波圣龙(集团)有限公司, 浙江 宁波 315100)

摘要:针对轮毂电机电动汽车长时间运行时出现的散热困难问题,设计一种与之匹配的冷却机构和冷却方式.在此基础上,建立轮毂电机热磁耦合温度场仿真模型.对电动汽车的 2 种运行工况,开展基于不同冷源多模式方式下的轮毂电机热磁耦合温升研究及分析,并对仿真结果进行试验验证.结果表明:电动汽车在长时间运行过程中电机高温问题得到明显改善;2 种运行工况对电机温升有不同的影响.仿真结果与试验结果吻合度较高,工况 1 中绕组最大误差为 5.1%,转子最大误差为 4.9%,工况 2 中绕组最大误差为 4.8%,转子最大误差为 4.5%,为轮毂电机电动汽车长时间运行过程中高温问题的研究提供一定参考.

关键词:不同冷源;多模式切换;轮毂电机;电动汽车;温度场

中图分类号:TM35

文献标志码:A

Research on Temperature Field of In-wheel Motors with Different Cold Sources in Multi-mode Switching

ZHOU Zhigang^{1,2†}, YANG Wenhao¹, MENG Xiangming¹

(1. College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2. Ningbo Shenglong(Group) Co Ltd, Ningbo 315100, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of heat dissipation during long-term operation of in-wheel motor electric vehicles, a matching cooling mechanism and cooling method are designed. On this basis, a thermal and magnetic coupling temperature field simulation model of the in-wheel motor is established. Under the two operating conditions, the thermal and magnetic coupling temperature rise of in-wheel motors based on different cooling sources and multi-mode modes are carried out, and the simulation results are verified by experiments. The results show that the motor high-temperature problem is significantly improved during the long-term operation of electric vehicles; the two operating conditions have different effects on the motor temperature rise. The simulation results are in good agreement with the test results. The maximum winding error in working condition 1 is 5.1%, the maximum rotor error is 4.9%, the maximum winding error in working condition 2 is 4.8%, and the maximum error of the rotor is 4.5%. The study of high-temperature problems during long-term automobile operation provides a certain reference.

Key words: different cold source; multimode switching; in-wheel motor; electric vehicle; temperature field

* 收稿日期:2020-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305126), National Natural Science Foundation of China(51305126); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2017GGJS063), Henan Province Colleges and Universities Youth Key Teacher Training Project(2017GGJS063)

作者简介:周志刚(1978—),男,河南浉池人,河南科技大学副教授,博士

† 通信联系人, E-mail: hnmczg@163.com

轮毂电机驱动技术是将电机安装于车轮内部,利用车轮内部电机带动电动汽车运行^[1]。由于轮毂电机驱动技术将传统汽车的动力装置、传动装置及制动装置集成于车轮内,具有转向灵活性较好、传动效率高以及高度集成性等优势,但是较高的集成性使电机运行空间小,空气流通困难,造成电机散热条件差^[2-4]。过高的温升会对电机的功率、使用寿命和安全性造成一定影响^[5]。因此,为保证电动汽车长时间安全运行有必要采取与轮毂电机相适应的冷却系统。

目前,国内外学者对电机风冷^[6-9]、水冷^[10-12]以及油冷^[13-14]等冷却技术进行了大量研究。陈进华等^[15]提出一种丁胞水冷结构的散热方案,并对相同条件下多种冷却方案的流体场进行了分析。吴柏禧等^[16]依据水道中流体的流动特性分析,建立了水道圆角半径、入口水道宽度和水道压强的关系。赵兰萍等^[17]根据整车环境下对外转子轮毂电机进行温度特性研究,并对比自然风冷与油冷两种冷却方式的温度场。Lim等^[18]通过对两种轮毂电机在额定工况下进行热性能分析,设计了一种轮毂电机的喷油冷却模式通道,并对其热性能进行了分析。王晓远等^[19]提出油内冷轮毂电机冷却方式,根据自然风冷和油内冷轮毂电机有限元模型,对轮毂电机的不同冷却方式进行温升和温度场分析。

本文根据轮毂电机结构,设计了不同冷源冷却结构及多模式切换方式。首先,通过磁热耦合分析,对轮毂电机在自然风冷条件下进行温度场分析,同时,对比了自然风冷、水冷、油内冷以及多冷源冷却方式温度场分布情况。最后,分析两种不同工况对自然风冷、水冷、油内冷和多冷源冷却方式温度场的影响。通过对多冷源冷却方式进行试验分析,并与有限元计算数据相对比,对多冷源冷却结构与方式的正确性进行验证。

1 不同冷源结构及多模式切换方式

按照某款轮毂电机电动车尺寸进行建模分析,其结构主要包含永磁体、定子、绕组和转子等。表1给出轮毂电机的主要参数。

由于研究的轮毂电机采用不同冷源冷却结构与多模切换冷却方式,该方式根据电机温度,使冷却水和冷却油按照不同顺序进入电机内部,并且电机内部冷源与外部冷源持续进行交换,使电机内部冷源保持较低温度,从而达到更好的冷却效果,所以该方

式必须采用一种相匹配的冷却结构。对于外转子轮毂电机,车轴始终处于静止状态,所以电机出油道在车轴内部。由于出水道在电机机壳内部设置,为保证机壳与车轴连接处冷却水可以正常通过,在连接处安装内部旋转接头。电动汽车在运行过程中,车轮受到电机内部转子的作用,带动电动汽车运转,外转子轮毂电机机壳与车轮同时进行转动,为了与外部冷源进行连接,必须在电机进油道和进水道处增加外部旋转接头,使电机进水道和进油道可以保持一边旋转一边静止的状态。考虑到进入电机内部的冷源温度不受出口通道冷源温度的传热影响,将电机两个进出通道分开设置。该冷却结构如图1所示。

表1 轮毂电机主要参数

Tab.1 Main parameters of the in-wheel motor

名称	数值	名称	数值
额定功率/kW	12	定子外径/mm	274.4
峰值功率/kW	24	转子外径/mm	314
额定转速/(r·min ⁻¹)	800	定子槽数	24
峰值转速/(r·min ⁻¹)	1 400	铁芯轴向长度/mm	40
极对数	16	气隙长度/mm	0.8
绕组层数	2	永磁体厚度/mm	8
绕组节距	1	永磁体材料	NdFe35

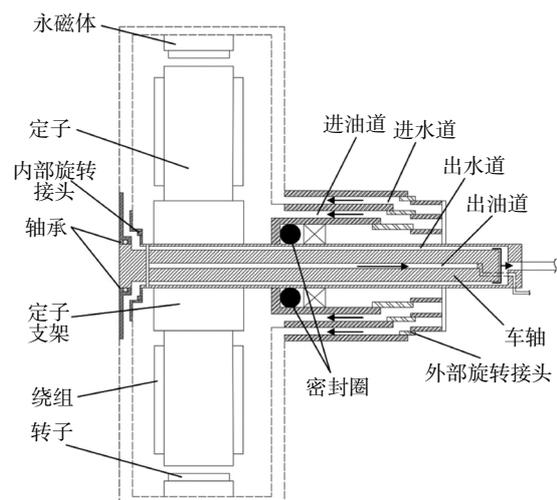


图1 不同冷源冷却结构

Fig.1 Different cooling source cooling structure

图2为不同冷源冷却系统简图。该系统主要由冷却系统控制器、温度传感器、循环泵、冷却油箱及

电磁阀组成. 为了使轮毂电机部件温度保持在合理范围之内, 需要对多个冷却油箱的电磁阀进行相应的控制, 使电机内部冷源进行切换. 对冷源切换标准定义为 T_1 和 T_2 , 根据电机内部温度的需要, 将电机冷却方式分为水冷、油冷和混合冷却, 并依次进行切换使电机达到较好的冷却目的. 不同冷源多模式切换过程如图 3 所示. 多冷源协调控制方式阀门工作状态如表 2 所示.

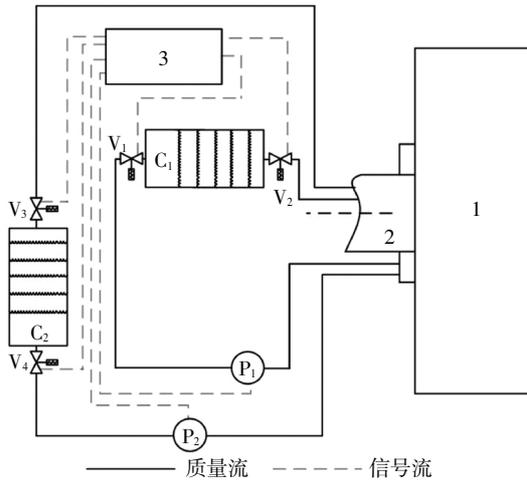


图 2 不同冷源冷却系统简图
 Fig.2 Schematic diagram of different cold source cooling systems

表 2 不同冷源冷却方式阀门工作状态

Tab.2 Valve working status of different cold source cooling methods

阀门	工作状态		
	第一阶段	第二阶段	第三阶段
V ₁	开	关	开
V ₂	开	关	开
V ₃	关	开	开
V ₄	关	开	开

2 轮毂电机热磁耦合温度场模型建立

2.1 电磁场数学模型

电动汽车在运行过程中, 热量主要来源于轮毂电机内部各种损耗. 电机内部损耗主要包含铁芯损耗、绕组损耗以及永磁体损耗等.

轮毂电机损耗可以表达为:

$$P = P_{Fe} + P_{Cu} + P_e \quad (1)$$

也可以写为:

$$P = k_h f B_m^2 + k_e f^2 B_m^2 + k_{ex} (f B_m)^{\frac{3}{2}} + 3I^2 R + \int V_m \frac{|J|^2}{2\sigma} \quad (2)$$

式中: P 为电机总损耗; P_{Fe} 为轮毂电机铁芯损耗; k_h 、 k_e 和 k_{ex} 分别表示为铁芯磁滞损耗系数、铁芯涡流损耗系数和铁芯附加损耗系数; f 为交变频率; B_m 为磁通密度的赋值; P_{Cu} 为绕组损耗; I 为电机绕组相电流; R 为电机绕组电阻; P_e 为轮毂电机永磁体涡流损耗; V_m 为永磁体体积; J 为电流密度赋值; σ 为永磁体的电导率.

2.2 温度场数学模型

依据传热原理, 轮毂电机的瞬态温度场可以表达为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial T}{\partial z}) + q = c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} |_{s_i} = 0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} |_{s_j} = h(T_i - T_j) \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_x 、 K_y 和 K_z 为在 x 、 y 、 z 方向上的导热系数; T 为电机温度; s_i 和 s_j 分别为电机第二类边界条件和第三类边界条件; h 为轮毂电机对流散热系数; T_i 和 T_j

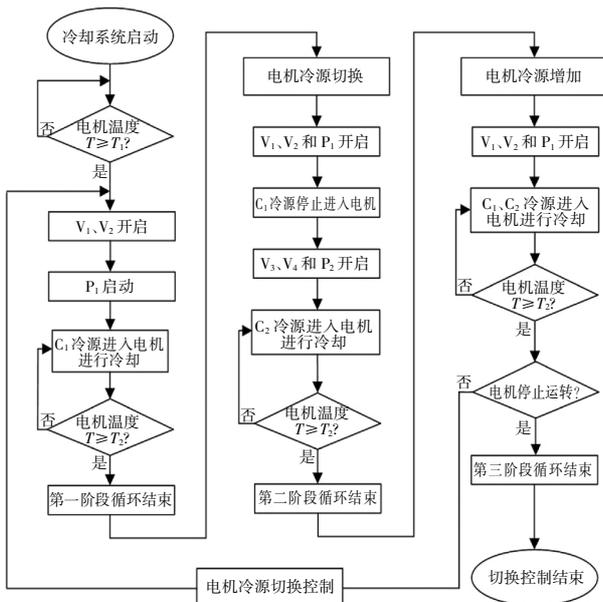


图 3 不同冷源冷却方式切换过程(工作原理)

Fig.3 Switching process of different cold source cooling methods (working principle)

分别为给定界面和周围介质的温度(介质温度随时间发生变化); q 为热流密度; n 为界面 s_i, s_j 上的法向矢量; c_p 为比热容; ρ 为介质密度; K 为界面 s_i, s_j 的法向热传导系数.在进行温度场计算时,轮毂电机的温升与材料导热系数密切相关,轮毂电机材料的导热系数如表3所示.

表3 轮毂电机不同材料导热系数

Tab.3 Thermal conductivity of different

materials for in-wheel motors $W \cdot (m \cdot K^{-1})$

名称	数值
空气	0.030 5
铝	402
铜	9
永磁体	180
硅钢片	40
变压器油液	0.128
冷却水	0.64

考虑到流体的黏性以及管道的扰动和阻滞作用,流体在轮毂电机内部流动过程中,会损失一定压力.流体的能量损失可以表示为:

$$h_1 = \sum h_f + \sum h_m \quad (4)$$

式中: h_1 为流体能量损失; h_f 为管道内流体沿程能量损失; h_m 为局部能量损失.

$$\begin{cases} h_f = \lambda_r \frac{\zeta}{d} \frac{v_o^2}{2g} \\ h_m = \phi \frac{v_o^2}{2g} \end{cases} \quad (5)$$

式中: λ_r 为阻力系数; g 为重力加速度; ζ 为油道总长度; d 水力直径; v_o 流体流速; ϕ 为局部阻力系数.

3 温度场仿真分析及试验验证

3.1 不同工况下轮毂电机磁热耦合仿真分析

为了全面考虑不同冷源冷却结构及多模式切换方式对轮毂电机温度的影响,选取两种不同运行工况,如表4所示.将两种不同转速的运行工况定义为工况1和工况2.

考虑到轮毂电机温升受其内部损耗影响以及磁热耦合方法计算的准确性,采用磁热耦合方法对轮毂电机温度场进行仿真计算,通过将电磁场仿真得

到的各种损耗加载到温度场中得到电机温度场分布情况.由于篇幅限制,本文仅列出工况2时轮毂电机温度场分布情况如图4及图5所示.

表4 轮毂电机不同运行工况

Tab.4 Different operating conditions of in-wheel motors

工况	电机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	环境温 度/ $^{\circ}C$	电机初始 温度/ $^{\circ}C$	冷源流速/ ($m \cdot s^{-1}$)
1	600	20	20	0.2
2	800	20	20	0.2

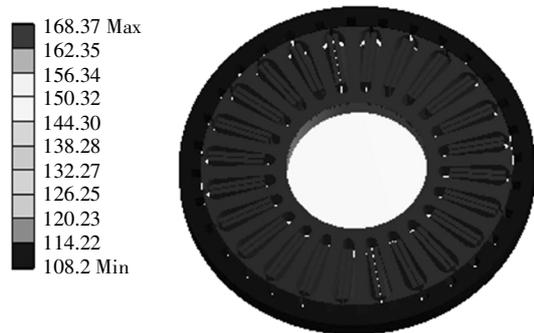


图4 电机整体温度分布图

Fig.4 Overall temperature distribution diagram of the motor

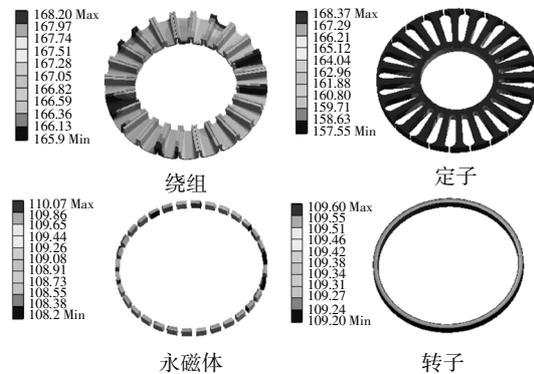


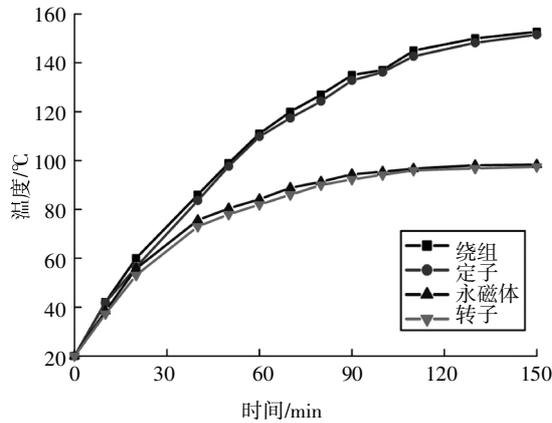
图5 电机各部件温度分布图

Fig.5 Temperature distribution diagram of each part of the motor

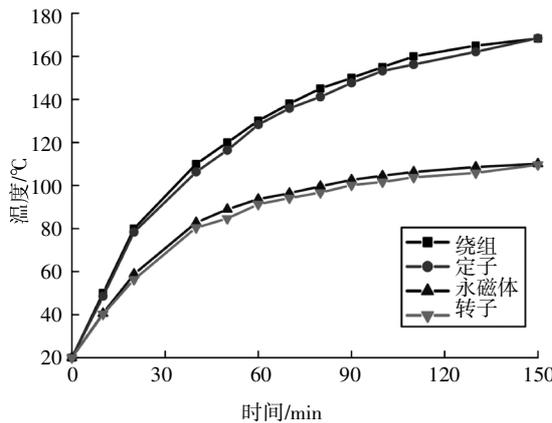
由图4可以看出电机采用自然风冷冷却方式时,温度场分布极不均匀,热量主要集中在绕组以及定子齿部,转子和永磁体热量分布较少.由图5可以得出,绕组与定子为最高温度部件,其中定子齿部与定子轭部温度差别较大.永磁体与转子温度较低,但是热量分布较均匀.

对轮毂电机在不同运行工况下进行仿真分析,运行时间为150 min,冷却方式为自然风冷,不同运行工况下电机各部件温升如图6所示.由图6可以

得出,电机的绕组与定子的温升受不同运行工况影响较大,而永磁体与转子受到的影响相对较小.两种电机的运行工况的温度上升趋势相同,先快速上升而后逐渐趋于平缓,电机的最高温度为绕组的 168 °C,影响电动汽车的长时间安全运行,因此为保证电动汽车的安全性,需要采用相应的冷却方式.



(a) 工况 1, 部件最高温度曲线



(b) 工况 2, 部件最高温度曲线

图 6 不同工况电机各部件最高温升曲线

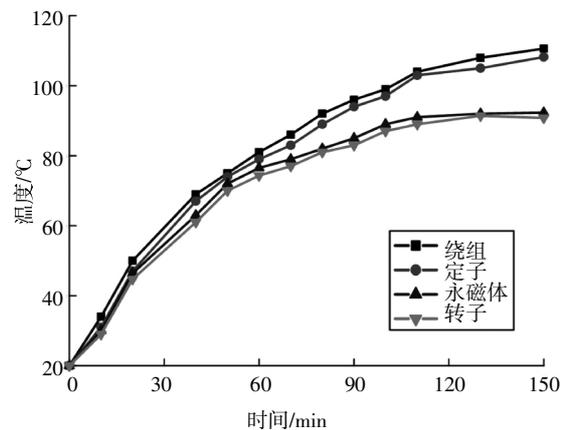
Fig.6 The maximum temperature rise curve of each part of the motor under different working conditions

3.2 冷却方式对电机温升影响

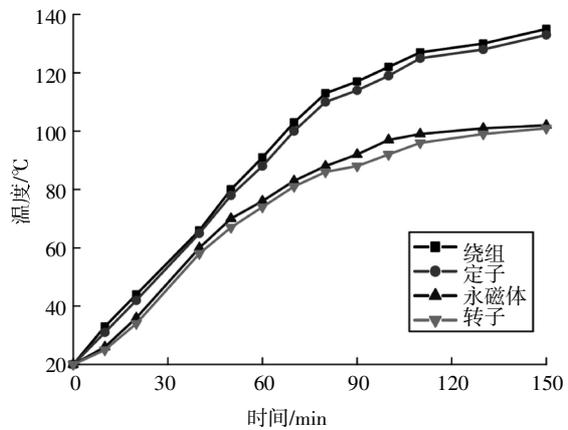
为降低轮毂电机的温度,保证电动汽车的安全运行,研究不同冷源轮毂电机多模式切换对温度场的影响,并对比分析水冷、油内冷及不同冷源冷却方式对电机温升的影响.

图 7 为不同工况下水冷和油内冷对电机各部件温升的影响.由图 7(a)(b)可以看出两种运行工况下水冷冷却方式对电机的高温部件绕组和定子具有较好的降温效果,但对永磁体和转子温升影响较小.由图 7(c)(d)可以看出油内冷冷却方式相对于水冷对电机的绕组和定子影响较小,且永磁体与转子温度

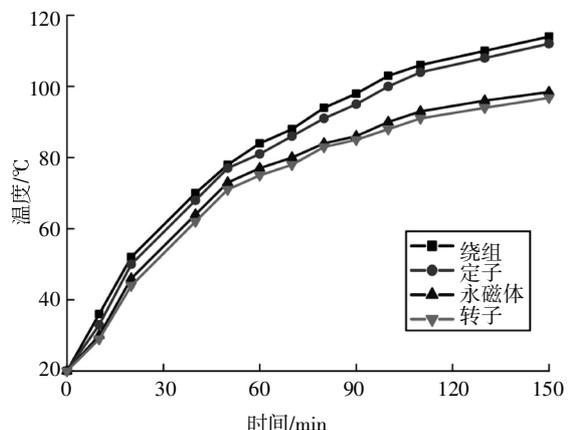
相对于自然风冷反而上升,这是因为冷却油在电机内部流动,具有均温效果,使永磁体及转子温度上升.两种冷却方式中,水冷冷却方式对电机绕组和定子具有较好冷却效果,但是电机内部温差较大.油内冷冷却方式对电机绕组和定子冷却作用较小,但是电机内部温差减小,有利于电机整体冷却.两种冷却方式对电机短时间运行都有较好的冷却效果,但是随着电机运行时间增加,温度持续上升,最高温度达到 139 °C,使电动汽车的安全运行存在一定隐患.



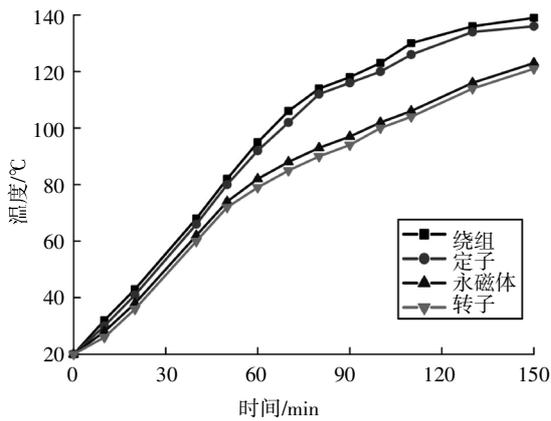
(a) 工况 1, 水冷冷却温度曲线



(b) 工况 2, 水冷冷却温度曲线



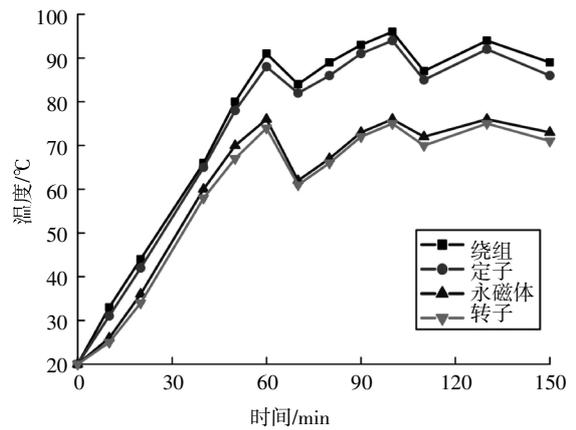
(c) 工况 1, 油内冷冷却温度曲线



(d)工况 2,油内冷冷却温度曲线

图 7 不同工况轮毂电机水冷及油内冷最高温升曲线

Fig.7 The maximum temperature rise curve of water cooling and oil cooling of in-wheel motors under different working conditions



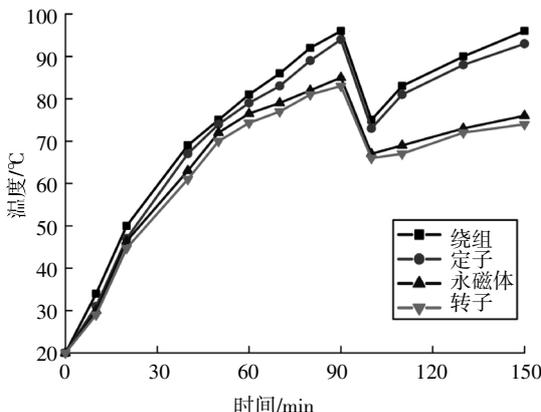
(b)工况 2,不同冷源冷却方式

图 8 不同冷源多模式切换方式轮毂电机最高温升曲线

Fig.8 The maximum temperature rise curve of the in-wheel motor with different cooling sources and multi-mode switching methods

3.3 不同冷源多模式切换方式对电机温升影响

图 8 为不同冷源多模式切换方式温升仿真结果.考虑到轮毂电机采用自然风冷温升较高,造成电机的切换次数增加,为降低轮毂电机温度上升速度及减少冷源切换次数,在电机温度上升至 A 点时采用第一阶段水冷冷却方式进行温升分析.图 8(a)由于工况 1 温升较慢,所以在冷却方式切换过程中只进行了一次冷源的切换,冷源切换后温度在短时间内下降,之后温度持续上升,但电机运行到 150 min 时最高温度在合理范围内,没有进行下一次的冷源切换;由图 8(b)可以看出,电机在冷却方式切换中一共切换了三次冷源,依次使电机最高温度下降了 7 °C、9 °C 和 5 °C,使电机最高温度保持在合理范围内.由于油冷冷源切换时,电机温度上升较快,所以对电机的冷却效果相对下降;而混合冷却中油冷冷源切换速度较快,导致水冷冷源温度较高,使混合冷却对电机冷却效果降低.不同冷源多模式切换方式中冷源切换次数受不同的电机工况影响较大,对电动汽车的长时间运行冷却效果较好.



(a)工况 1,不同冷源冷却方式

3.4 试验验证

轮毂电机试验测试平台如图 9 所示,主要包括:轮毂电机、测功机、电机控制器、温度传感器以及红外线测温仪.通过安装在绕组中的温度传感器及测温仪的作用,对电机的绕组和转子部件进行温度测量.轮毂电机样机如图 10 所示,通过相应的管路使冷却油进入电机内部,达到相应的冷却效果.



图 9 轮毂电机试验测试系统

Fig.9 In-wheel motor test test system



图 10 轮毂电机试验样机

Fig.10 In-wheel motor test prototype

图 11 为工况 1 计算结果与试验测量温度曲线.由图 11 可以得出,轮毂电机的绕组和转子试验结果与仿真计算结果温升变化趋势一致,在温升过程中进行了一次冷源切换;相较于工况 2 少进行两次冷

源切换,这是由于受到不同转速的影响,说明多冷源冷却结构及方式受冷源流速影响较大.随着电机运行时间的增加,试验测量结果与计算结果误差加大,绕组最大误差为 5.1%,转子最大误差为 4.9%,这是由于长时间的试验测量计算,计算精度下降,从而导致结果出现一定误差.

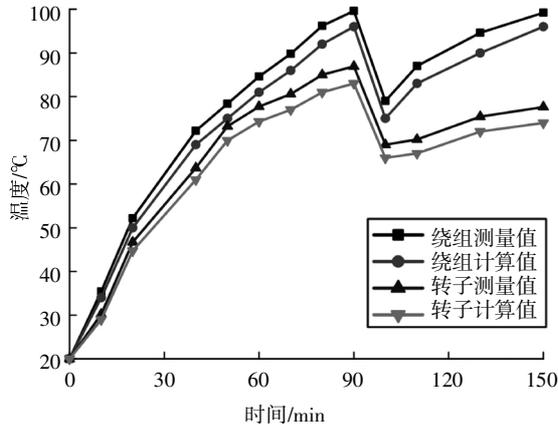


图 11 工况 1 计算结果与试验测量温度曲线

Fig.11 Working condition 1 calculation results and experimental measurement temperature curve

图 12 为工况 2 计算结果与试验测量温度曲线.由图 12 可以看出,试验结果与仿真计算结果都进行了三次冷源切换,且每次冷源切换后都使电机温度得到一定程度的下降;在第三次冷源切换后温度下降相对较少,一方面是由于电机的持续运行使电机温度较高,另一方面是由于冷却液本身带有一定热量,使电机冷却效果下降;工况 2 中试验测量结果与计算结果吻合度较高,但是存在一定误差,绕组最大误差为 4.8%,转子最大误差为 4.5%.这是受到试验环境、试验测量手段以及测量工具的精度影响,从而产生一定误差.

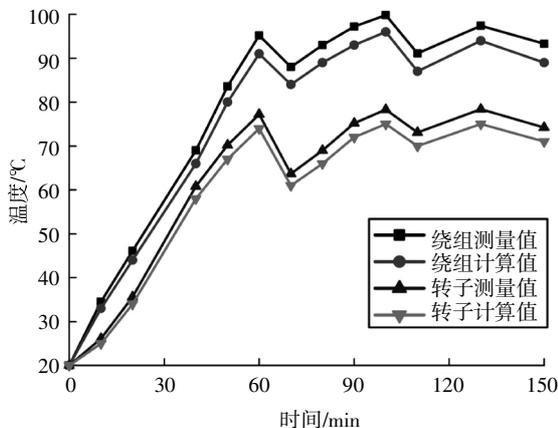


图 12 工况 2 计算结果与试验测量温度曲线

Fig.12 Working condition 2 calculation results and experimental measurement temperature curve

通过对轮毂电机多冷源冷却方式的试验验证可得,计算结果与试验测量结果吻合度较高,可验证该冷却方式的正确性.

4 结 论

本文针对轮毂电机电动汽车长时间运行产生较高温升问题,提出一种不同冷源多模式切换冷却方式.首先,采用磁热耦合方法对自然水冷方式的轮毂电机进行温度场仿真分析.其次,对采用水冷和油内冷的轮毂电机进行温升仿真分析.最后,通过对不同冷源多模式切换冷却方式进行温升仿真分析,从而进行水冷、油内冷和不同冷源多模式切换方式之间的温升对比分析.

对不同冷源多模式切换冷却方式的仿真结果分析表明,该方式通过对不同冷源的模式切换,可以有效减少电动汽车在长时间运行带来的高温问题;电机的不同运行工况对多冷源冷却方式的冷却效果影响较大;仿真与试验结果的对比分析,进一步验证了该冷却方式对电机降温效果的有效性,为轮毂电机电动汽车长时间带来的温升问题的研究提供一定参考.

参考文献

- [1] 应红亮,黄苏融,张琪,等.电动汽车用高性能直驱轮毂电机研制[J].机械工程学报,2019,55(22):5—10.
YING H L,HUANG S R,ZHANG Q,*et al.* Develop of high performance direct-driven in-wheel motor for electric vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering,2019,55(22):5—10. (In Chinese)
- [2] 曹小华,魏恒,王鑫.考虑温度影响的永磁同步电机参数辨识方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(8):64—71.
CAO X H,WEI H,WANG X. Parameter identification method of permanent magnet synchronous motor considering temperature influence [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2018,46(8):64—71. (In Chinese)
- [3] SONG F,TAN D. The advances on the study of heating and cooling issues for in-wheel-motor-driven systems[J]. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles,2017,9(2):121.
- [4] REN J W,HUANG J L,CHEN Q P,*et al.* Analysis and research of in-wheel motor temperature field for electric vehicles [J]. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles,2018,10(4):319.
- [5] 张立军,徐杰,孟德建.基于 Preisach 模型的永磁同步轮毂电机损耗及温度场建模与分析 [J]. 机械工程学报,2019,55(22):33—40.
ZHANG L J,XU J,MENG D J. Modeling and analysis of loss and temperature field in permanent magnet synchronous in-wheel motor

- based on Preisach theory [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(22):33—40. (In Chinese)
- [6] 贺景运, 边旭, 梁艳萍. 空冷水轮发电机定子冷却结构设计与分析[J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(12):111—119.
HE J Y, BIAN X, LIANG Y P. Design and analysis for stator cooling structure of air-cooled hydrogenerator[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(12):111—119. (In Chinese)
- [7] 朱高嘉, 刘晓明, 李龙女, 等. 永磁风力发电机风冷结构设计与分析[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(5):946—953.
ZHU G J, LIU X M, LI L N, *et al.* Design and analysis of the ventilation structure for a permanent magnet wind generator[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(5):946—953. (In Chinese)
- [8] CHAI F, TANG Y, PEI Y L, *et al.* Temperature field accurate modeling and cooling performance evaluation of direct-drive outer-rotor air-cooling in-wheel motor[J]. *Energies*, 2016, 9(10):818.
- [9] GALLONI E, PARISI P, MARIGNETTI F, *et al.* CFD analyses of a radial fan for electric motor cooling[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, 8:470—476.
- [10] ZHU G J, ZHU Y H, TONG W M, *et al.* Double-circulatory thermal analyses of a water-cooled permanent magnet motor based on a modified model[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54(3):1—4.
- [11] 王小飞, 代颖, 罗建. 基于流固耦合的车用永磁同步电机水道设计与温度场分析[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(s1):22—29.
WANG X F, DAI Y, LUO J. Waterway design and temperature field analysis of vehicle permanent magnet synchronous motor based on fluid-solid coupling[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(s1):22—29. (In Chinese)
- [12] 张凤阁, 蒋晓东, 李应光. 笼障转子无刷双馈电机水冷系统设计[J]. *电机与控制学报*, 2018, 22(6):70—76.
ZHANG F G, JIANG X D, LI Y G. Design of water cooling system of brushless doubly-fed machine with cage-barrier rotor [J]. *Electric Machines and Control*, 2018, 22(6):70—76. (In Chinese)
- [13] 杨文豪, 周志刚, 李争争. 油冷温度与流速对轮毂电机温度场研究[J]. *微电机*, 2020, 53(1):31—34.
YANG W H, ZHOU Z G, LI Z Z. Research on temperature field of hub motor with oil cooling temperature and flow velocity[J]. *Micro-motors*, 2020, 53(1):31—34. (In Chinese)
- [14] LIM D, LEE M Y, LEE H S, *et al.* Performance evaluation of an in-wheel motor cooling system in an electric vehicle/hybrid electric vehicle[J]. *Energies*, 2014, 7(2):961—971.
- [15] 陈进华, 刘威, 张驰, 等. 基于丁胞水冷结构的高速永磁电机温度场分析[J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(9):35—42.
CHEN J H, LIU W, ZHANG C, *et al.* Temperature field analysis of high-speed permanent magnet machine based on dimpled water-cooling structure [J]. *Electric Machines and Control*, 2019, 23(9):35—42. (In Chinese)
- [16] 吴柏禧, 万珍平, 张昆, 等. 考虑温度场和流场的永磁同步电机折返型冷却水道设计 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34(11):2306—2314.
WU B X, WAN Z P, ZHANG K, *et al.* Design of reentrant cooling channel in permanent magnet synchronous motor considering temperature field and flow field[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(11):2306—2314. (In Chinese)
- [17] 赵兰萍, 江从喜, 徐鑫, 等. 整车运行环境下油冷对外转子轮毂电机温度特性的影响[J]. *汽车工程*, 2019, 41(4):373—380.
ZHAO L P, JIANG C X, XU X, *et al.* The effects of oil cooling on the temperature field of out-rotor in-wheel motor under vehicle operation environment [J]. *Automotive Engineering*, 2019, 41(4):373—380. (In Chinese)
- [18] LIM D H, KIM S C. Thermal performance of oil spray cooling system for in-wheel motor in electric vehicles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 63(2):577—587.
- [19] 王晓远, 高鹏. 电动汽车用油内冷永磁轮毂电机三维温度场分析[J]. *电机与控制学报*, 2016, 20(3):36—42.
WANG X Y, GAO P. Analysis of 3-D temperature field of in-wheel motor with inner-oil cooling for electric vehicle [J]. *Electric Machines and Control*, 2016, 20(3):36—42. (In Chinese)