

电动汽车用永磁同步电机散热设计与仿真试验^{*}

王升平¹, 温万昱², 郭美华¹

(1. 中山职业技术学院 机电工程学院, 广东 中山 528404;

2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 通过热管传热技术快速导出端部绕组的热量, 实现电机温升的降低, 是解决电动汽车电机高功率密度问题的途径之一。设计了热管装配工艺, 利用 ANSYS Fluent 对 2 种电机进行有限元模型建立和温度场仿真计算, 并制作样机进一步试验。试验结果表明: 仿真结果与样机测试结果相近, 高温区域位于绕组端部, 装有热管的冷却系统电机设计能够有效地降低电机温升。

关键词: 永磁同步电机; 电动汽车; 热管; 温度场仿真

中图分类号: U 469.72 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)07-0074-05

doi: 10.12177/emca.2020.055

Heat Dissipation Design, Simulation and Test of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle^{*}

WANG Shengping¹, WEN Wanyu², GUO Meihua¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongshan Polytechnic, Zhongshan 528404, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aiming at the heat dissipation requirements of high power density electric vehicle motor, a cooling solution of motor based on heat pipe is proposed. Through pipes, the heat can be transmitted rapidly from the end winding to housing. It is one of the effective ways that can solve the problem of high-power density on motor. The heat pipe assembling technique is designed. Using the ANSYS Fluent software, the finite element models are established for both the original motor and the heat-pipe-based motor, and temperature field simulation is carried out. Tests between the original motor and the heat pipe-based motor are established. Prototype test results are similar to the simulation results. It is found that the high temperature region of the permanent magnet synchronous motor is mainly located at the end of the winding. Simulation and test show that the design of the cooling system based on the heat pipe can effectively reduce the temperature rise of the motor winding.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); electric vehicle; heat pipe; temperature field simulation

0 引言

在新能源汽车“电池、电机、电控”三横技术发展布局体系中, 电机作为电能与机械能转换的核心部件, 其性能好坏直接关系到整车性能的优

劣^[1]。新能源汽车电机与传统的电机相比, 功率密度要求更高。由于永磁同步电机(PMSM)具有振动噪声低、控制精度高、转矩平稳、效率高等优点, 被业界认为是颇具前景和竞争优势的一种新能源汽车驱动电机^[2]。在电动大巴等车型中, 大

收稿日期: 2020-03-26; 收到修改稿日期: 2020-05-10

^{*} 基金项目: 广东省普通高校科研平台项目(2018GKTSX024)

作者简介: 王升平(1969—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为机械设计和电机。

功率驱动电机一般采用水冷电机壳方式进行散热,虽然其散热效果明显,但电机安装受空间限制,机壳尺寸设计受到制约,为电机的散热设计带来困难。大功率电机轻量化发展趋势,给如何提高电机的散热效果带来挑战^[3-4]。有研究发现PMSM的局部高温区位于绕组端部处^[5-6]。也有部分电机散热方面的研究^[7-8],主要集中在水道的设计和优化上,较多采用提高水道的散热能力来降低机壳温度的方式,但该种方式效果有限,难以解决绕组温升过高的根本问题,热量仅从端部绕组传递到定子铁心,然后被机壳上的冷却水带走。鉴于此,本文将借助热管传热技术,通过在端盖安装热管的方式将热量从端部绕组快速导出到机壳,建立电机的温度场仿真模型,并进行样机试制与试验。

1 PMSM 传统结构与端部绕组散热

以某公司生产的新能源汽车用PMSM为研究对象,其结构主要由机壳、定子、转子、电机轴、轴承等组成。通过计算可知定子铁心和绕组是该电机的主要发热源,热量传递路线为经过绕组、定子铁心、机壳,再由机壳里的冷却水带走,其热量传递路线如图1所示。

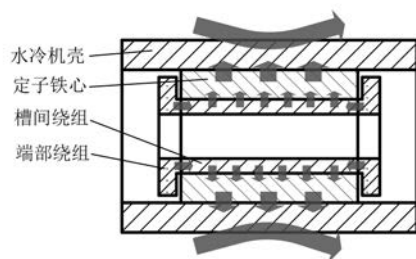


图1 电机的热量传递图

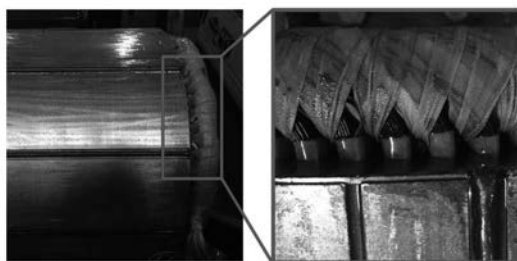


图2 端部绕组实物图

端部绕组发热量约占总发热量的1/3。端

部绕组间的绝缘纸以及漆包铜线之间充满绝缘漆,如图2所示。这将阻碍轴向传热,导致越靠近绕组两端温度越高。若能有效地导出端部绕组的热量,继而降低整机的温升,则既能增大电机的功率密度,又能提升绝缘的寿命和电机的运行稳定性。

2 电机的热管结构及装配工艺

如何将热量从端部绕组快速导出,是实现整机温升降低的关键。借助于中间传热介质,将绕组的热量直接导出传递至端盖,由端盖再传至机壳,最后由冷却液带走,从而使端部绕组实现降温。在中间介质中,热管属于一种高效相变导热的元件,内部工质工作时不停蒸发和凝结,有非常高的传热效率,但是传热的过程较复杂^[3]。因为热管有很强的导热性能,所以成为中间传热介质的最佳材料之一。装有热管的电机内部热量传递如图3所示。电机结构装配图如图4所示。主要由水冷机壳、定子铁心、定子线圈、电子灌封胶、开槽端盖、热管、热管压管板、转子、轴承、电机轴等组成,在两端端盖的开槽上分别均布了若干呈90°折弯的热管。端盖上的凹槽加工成对应的半圆形,热管被弯成90°,其中一端被导热硅脂涂抹后放入槽里并用压管板压实,另一端穿过盖上加工好的通孔伸入到电机内部端部绕组与机壳内侧

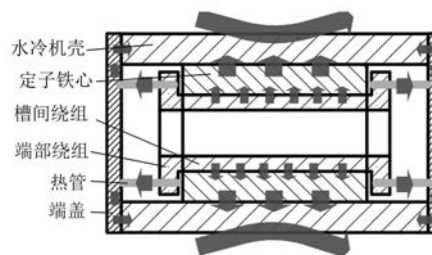


图3 新型热管结构电机热量传递图

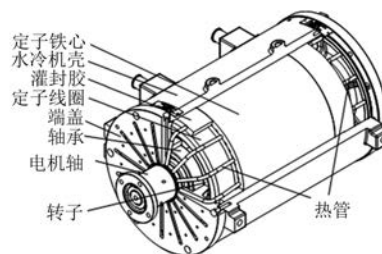


图4 电机结构装配图

的空腔中,热管周围区域再用电子灌封胶充满。另外,热管在端部绕组附近需要一次折弯处理,使其轴线与端部绕组的外锥面母线平行,结构更加紧密贴合,实现热阻减小、传热高效,从而降低端部绕组温度。热管安装效果图如图 5 所示。



图 5 热管尾部微曲安装示意图

3 基于热管的电机温度场仿真模型建立及分析

3.1 温度场仿真模型建立

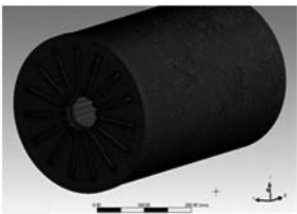
为了提高模型运算分析效率,对电机作如下假设:(1)热管视作一个具有高导热系数的实体处理;(2)铁心视作一个整体,具有各向异性的导热系数;(3)忽略机体内外热辐射对电机温度分布的影响;(4)流道中的冷却水等速、等温、均匀流入;(5)考虑到转子、轴承损耗较小,气隙导热系数较低,热量难以向转子传递,建模时去除转子、轴承、转轴等零件。因此,建立的模型主要由定子绕组、定子铁心、热管、机壳、端盖等组成。

设定边界条件时,热源部分按铁耗、铜耗分别赋予铁心、绕组体积源项;绕组与定子槽壁面间放置了较薄的绝缘纸,不宜直接建模,在 Fluent 中直接作为接触面边界条件设置;固体与固体、固体与液体接触面均按耦合面设置,使热流通过接触面,其余面则按壁面设置;绕组、铁心的轴向、径向导热系数差异较大,需要通过试验测定。电机有限元模型参数设定如表 1 所示。

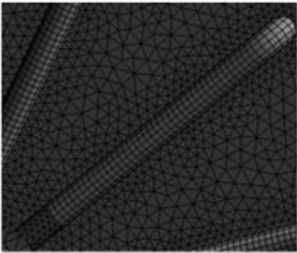
由于电机模型复杂,不能完全采用结构化网格。部分零件采用非结构化网格,有限元模型基本网格尺寸取 2 mm,最终建立的模型如图 6 所示。Fluent 提供了大量湍流模型可供选择^[7],综合考虑,最终选择采用高 *Re* 数 RNG *k-ε* 模型进行求解,以期获得更高仿真精度。

表 1 电机有限元模型参数设定表

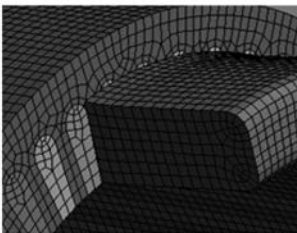
参数名称	参数值
铁耗/kW	0.73
铜耗/kW	4.2
定子铁心导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	轴向 4.43、径向 39
端部绕组导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	轴向 70、周向 378
槽间绕组导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	轴向 378、径向 1.56
热管导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	10 ⁵
绝缘纸导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.18
绝缘纸厚度/mm	0.35
机壳、端盖导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	237
冷却水流量/(L·min ⁻¹)	20



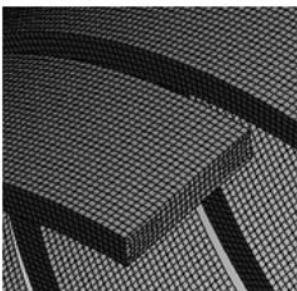
(a) 有限元模型整体图



(b) 端盖和热管网格局部图



(c) 绕组和铁心网格局部图



(d) 流体网格局部图

图 6 电机仿真模型图

3.2 仿真结果分析

基于前文建立的有限元模型对传统型电机及

基于尾部微曲式热管冷却系统的电机进行有限元仿真。图 7 为额定工况下传统电机定子绕组的温度分布结果。由图 7 可以看到,绕组整体表现出两端高、中间低的温度分布特征,且端部绕组最外侧是绕组高温区集中的地方,原因归结于前端盖侧的端部绕组厚度比后端盖侧绕组的厚度大。仿真结果显示,前端端部绕组的最高温度为 $149.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,根据公式 $\Delta T = T - T_0$ (T_0 为环境温度, T 为待测点实际温度),环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,计算出其温升为 124.9 K 。图 8 为传统型电机定子铁心的温度分布图。由图 8 可以看到,定子铁心均匀的外表面特征,说明其外表面温度低并且分布相对均匀。而后端盖侧附近出现了局部高温现象,说明此处集中的热量高,散热慢;同时在径向方向上,温度分布特征是最内侧温度最高,达到 $89.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,离机壳越近温度越低。图 9 为传统型电机机壳及端盖的温度分布图。由图 9 可以看到,在冷却水流道的覆盖区域附近的电机机壳呈现非常低的温度,而在远离水道的端盖附近出现最高温,此局部高温区域热源明显集中,与图 8 铁心局部高温区域位置基本一致,说明机壳内冷却水道的分布不仅影响机壳温度,还影响定子铁心、绕组的温度分布。



图 7 传统型电机绕组温度分布图

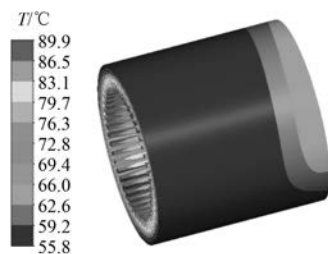


图 8 传统型电机定子铁心温度分布图

图 10 为微曲式热管电机绕组的温度分布结果。由图 10 可以看出,采用尾部微曲型设计的电



图 9 传统电机机壳与端盖温度分布图

机其端部绕组最高温度达到了 $133.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,经计算其温升为 103.5 K (其间环境温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$),与传统电机相比,温升最高下降了 21.4 K 。图 11 和图 12 分别是热管微曲型电机的定子铁心、机壳的温度图。发现定子铁心的温度出现了下降,机壳的温度出现了升高,说明运用热管技术的电机,端部绕组的热量能够快速传递到机壳上。尾部热管微曲只是将其伸入绕组旁的热管略微折弯,使其更贴近绕组。由此可知,将热管尽可能贴近端部绕组能够有效地降低端部绕组的最高温升。

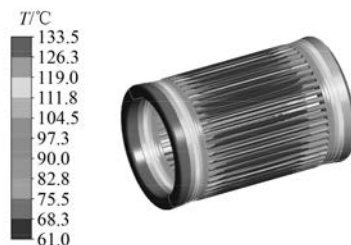


图 10 尾部热管微曲型电机绕组温度分布图



图 11 尾部热管微曲型电机定子铁心温度分布图

4 电机试验及结果分析

制作热管微曲型样机进行电机试验,如图 13 所示。试验测试平台主要由试验样机、电机特性试验台、K 型热电偶、温度数据采集卡和电脑等组成。电机测试工况运行条件与仿真相同,设置如下:电机功率为 65 kW ,转速为 $3\ 100\text{ r/min}$,水道



图 12 尾部热管微曲型电机机壳与端盖温度分布图

中冷却液流速为 13.6 L/min,温度控制在 60 ℃恒温状态。通过 K 型热电偶来执行电机绕组的温度数据采集,试验时 2 个测温点分别设置在前、后端端部绕组的最外侧,如图 14 所示。其中,前端的 2 个测温点定义为测温点 a、测温点 b,后端的测温点定义为测温点 c、测温点 d,每隔 5 min 温度采集仪自动记录热电偶传回的温度数据一次。



图 13 样机实物图

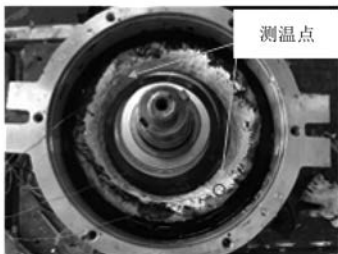


图 14 测温点位置图

测量数据整理后,样机温升降低值的测量结果与仿真结果对比如表 2 所示。

表 2 样机测试与仿真温升对比表							K
测温点	传统电机 测试温升	热管电机 测试温升	测试温升 降低值	传统电机 仿真温升	热管电机 仿真温升	仿真温升 降低值	
a	123.39	108.51	14.88	124.9	109.6	15.3	
b	119.54	105.27	14.27	124.9	109.6	15.3	
c	105.46	99.12	6.34	113.2	101.7	11.5	
d	113.54	105.63	7.91	113.2	101.7	11.5	

从表 2 可以看出,前端端部绕组的温升降低了约 14.9 K,后端则降低了约 6~8 K。而且测量值与仿真值近似,说明仿真结果具有可靠性和一定的参考价值。后端测量值与仿真值差别较大,主要是由于后端端部绕组的不规则外形以及热管布置数量减少,分析如下:(1)由于后端作为绕组接线端有 2 股导线束接出,造成热管布置时数量比前端盖少了 2 根(图 15),导致前后端测试点温度存在差异;(2)后端部绕组的导线束缠有绝缘材料导致厚度不均,造成内部传热环境复杂,即使对称点测温也会有一定的偏差。

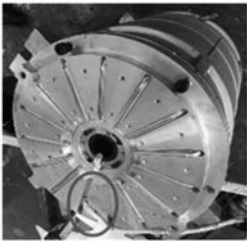


图 15 电机后端盖热管布置图

5 结 语

采用热管技术的 PMSM 水冷系统设计,能成功地通过热管和灌密封胶将端部绕组热量快速导出,实现端部绕组温升的有效降低,使 PMSM 在空间有限的情形下获得功率密度的进一步提升,为电动汽车 PMSM 的散热设计提出了新的思路。后续研究可以从以下方向持续改进:

- (1) 针对端盖散热的特性,对冷却系统流道进行更具针对性的优化设计,使其更好地适应基于热管技术的电机散热应用。
- (2) 完善端部绕组的整型方案,增加热管与端部绕组的紧密贴合度,继续深入研究绕组外表面与铁心端面夹角对电机散热的影响。
- (3) 在电子灌密封胶填充的机壳、定子铁心、端部绕组 3 者的空腔中装入独立热管,提升灌密封胶的导热能力,进一步研究热管布置、形状、装配工艺对电机散热的影响。

【参 考 文 献】

[1] WANG S, ZHANG Y, HU J. Thermal analysis of water-cooled permanent magnet synchronous motor for electric vehicles[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 610: 129. (下转第 92 页)