

# 基于热管-风冷系统的新能源汽车电机热分析\*

王升平<sup>1</sup>, 吴柏禧<sup>2</sup>, 温万昱<sup>2</sup>, 何佳兵<sup>1</sup>

(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:** 针对新能源汽车电机紧凑、轻量化、高功率密度和高可靠性的要求, 提出基于热管-风冷系统的新型冷却系统。设计了基于热管-风冷系统的电机结构, 建立电机有限元热分析模型并验证其可行性; 通过有限元模拟, 研究该新型电机在额定功率和峰值功率下的温度场。结果表明: 热管-风冷系统能有效地控制电机的温升。与水冷系统相比, 无需水泵、节温器、水箱、管路以及其他装置, 结构简单、紧凑, 有利于实现新能源汽车的轻量化和高功率密度。

**关键词:** 新能源汽车; 永磁同步电机; 热管; 冷却系统; 温度场

**中图分类号:** TM 301.4<sup>+1</sup> **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)08-0091-07

## Thermal Analysis of New Energy Vehicle Motor Based on Heat Pipe-Air Cooling System\*

WANG Shengping<sup>1</sup>, WU Boxi<sup>2</sup>, WEN Wanyu<sup>2</sup>, HE Jiabing<sup>1</sup>

(1. 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:** As proved, new energy vehicles rely on the compact structure, light weight, high power density and high reliability of motor. Therefore, a new cooling system based on heat pipe-air cooling system was designed. Firstly, a motor structure based on heat pipe-air cooling system was designed. Then a motor's finite element model (FEM) of thermal analysis was established and validated feasibly. The temperature field of this new kind of motor was investigated through FEM simulations under the rated power and the peak power. The results showed that the heat pipe-air cooling system could effectively control the motor's temperature rise. Compared with the water cooling system, the heat pipe-air cooling system was simple and compact because of no water pump, tank, thermostat and other necessities. Hence, the heat pipe-air cooling system fits itself more acceptable to realize the light weight and high power density in new energy vehicles.

**Key words:** new energy vehicle; permanent magnet synchronous motor; heat pipe; cooling system; temperature field

## 0 引言

电机在运行过程中会产生各种损耗, 产生的损耗转换成热能, 引起电机各部分温度升高, 温度过高将严重影响电机性能和使用寿命<sup>[1-2]</sup>。随着新能源汽车的发展, 电机单机容量不断增大, 且要

求体积小、重量轻、功率密度大, 对电机的温升控制带来极为严峻的挑战<sup>[3-5]</sup>。

由于电机温升控制的重要性, 国内外对电机的热分析和冷却系统做了大量的研究。目前使用最多的是利用有限元法对电机的温度场进行仿真模拟。Inamura 等<sup>[6]</sup>建立了开关磁阻电机的有限

\* 基金项目: 广东省科技计划项目(2014B010126003); 中山职业技术学院科研项目(2017KQ02)

作者简介: 王升平(1969—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电机设计和电机传热方向。

元模型,研究了内部空气强制对流换热的效果。哈尔滨工业大学朱巍<sup>[7]</sup>利用有限元分析方法讨论了冷却水进出口水温、冷却水的流速、散热筋高度及机壳的水路形状对电机温度分布梯度的影响,同时建立了摩擦阻力对水路形状的约束关系。文献[8]使用 ANSYS 对开关磁阻电机进行电磁和热分析,优化了参数后进行验证。河北工业大学乐智<sup>[9]</sup>利用 Fluent 分析电机温度场,优化水道,并使用 MATLAB/Simulink 软件对冷却系统进行了特性仿真。上海理工大学田玉冬等<sup>[10]</sup>建立了3种水道模型,并进行了模拟计算,提出了一种流场均匀、冷却效率高的C型环槽水路结构。张琪等<sup>[11]</sup>利用 ANSYS 对独立磁路混合励磁电机进行了热仿真,发现最低温度出现在磁钢处,最高温度出现在励磁绕组处,并得出结论:励磁绕组安置在转子侧,散热条件较差,容易引起较高的温升。文献[12]利用 CFD Research Corporation 对使用冷却套管开关磁阻电机的热场进行了分析,并对冷却结构进行合理设计,提升了定子、转子以及端部绕组的冷却性能。文献[13]对转子堵转时的异步电动机的定转子进行了瞬态温度仿真,发现在自然冷却过程中,定子绕组热量迅速扩散,并且受转子热扩散影响,其温度先升高后降低。

可见,目前对电机的热分析主要针对普通电机,研究主要集中在电机的温度场计算和模拟以及冷却结构的分析(如冷却介质的流道结构等)。对于较大功率的电机,基本采用水冷系统对电机机壳进行冷却。水冷系统结构复杂,体积庞大,存在冷却水泄漏的风险,与新能源汽车电机要求的紧凑、高效、轻量化、高功率密度和高可靠性等发展方向不相适应,因此,研究紧凑、高效的新能源汽车电机冷却系统极为必要。

本文针对某公司生产的用于新能源汽车的永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM),提出基于热管-风冷的新型冷却系统。热管均匀嵌入在 PMSM 定子的外表面,将电机由于各种损耗产生的热量从电机机壳内部直接导出,通过风冷将热量带走。设计基于热管的新能源汽车永磁电机冷却系统,建立有限元模型,分析采用该新型冷却系统的电机在额定功率和峰值功率下的温度分布。

## 1 基于热管的风冷冷却系统

### 1.1 电机损耗及传统水冷系统分析

电机作为一种电能与机械能的转换装置,在运转过程中不可避免会产生损耗。电机损耗主要包括铁损耗、铜损耗、机械损耗、杂散损耗等,这些损耗转化成热量造成电机温度升高。电机温度过高,一方面会降低永磁体的性能甚至引起不可逆退磁,另一方面还会破坏绕组绝缘,降低线圈的使用寿命,进而影响电机的长期稳定运行<sup>[14]</sup>。目前,新能源汽车电机的冷却系统均为强制循环水冷系统,如图1所示,包括水泵、散热器、冷却风扇、节温器、水箱、电机及水冷机壳。冷却水在水泵中增压后,进入电机的水冷机壳。冷却水从电机机壳流道流过并吸收电机产生的热量,之后进入节温器。节温器根据冷却水温度的高低自动调节进入散热器的水量,以调节冷却系统的散热能力,保证电机在合适的温度范围内工作。最后,流经散热器中的冷却水向周围的空气散热而降温,冷却后的水返回水泵,如此循环往复。在汽车行驶或冷却风扇工作时,空气从散热器周围高速流过以增强对冷却水的冷却。

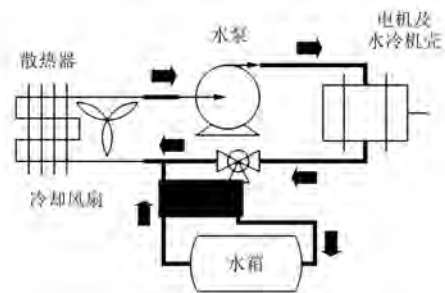


图1 电机水冷系统示意图

水冷系统具有较大的传热能力,能够将电机产生的热量有效地带走。但该系统存在一些不足<sup>[15]</sup>:在运行过程中,不可避免会产生水垢并沉积,从而堵塞水路,易造成沉积区域的换热环境恶劣,局部温升提高,严重时可能造成电机线圈局部温度过高而损毁;压力低时流速低散热效果不理想,而若压力太大,则可能造成水力钻孔现象,导致冷却水泄漏;整套冷却系统复杂、重量大、不紧凑,不符合新能源汽车电机紧凑、轻量化的发展方向。

### 1.2 基于热管-风冷系统的电机结构

为寻找一种紧凑、高效、轻量化的电机冷却系

统,提出基于热管的风冷冷却方案。该冷却系统主要由平板铝热管、散热翅片和风扇组成。热管是一种具有极高导热性能的传热元件,通过在全封闭真空管内的液体的蒸发与凝结来传递热量,具有强大的传热能力和极小的热阻。因电动汽车电机所处环境较为恶劣,故选用工作温度范围为 $-120\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、耐腐蚀性好的平板铝热管,以适应电机极端低温和高温工作环境。此外,平板铝热管能承受最大 $3\ 920\text{ kPa}$ 的外部压强,足以适应电机铁心及机壳对热管外壁产生的压力。基于热管的风冷冷却系统的电机结构如图2所示。平板铝热管通过锡焊焊接在定子外侧的矩形槽中,穿过端盖伸出电机主体之外,并利用锡焊焊接在外部翅片上。在电机工作温度范围内,定子铁心的热膨胀系数大约为 $11.8\times 10^{-6}(1/\text{K})$ ,铝热管的热膨胀系数约为 $23.6\times 10^{-6}(1/\text{K})$ ,热管与铁心的接触长度为 $300\text{ mm}$ ,取铁心的最大温升为 $130\text{ K}$ ,计算可得由于热胀冷缩差异,定子铁心与热管在长度方向上的最大变形差为 $0.46\text{ mm}$ ,此时焊锡产生的应变为 $0.001\ 5$ ,在弹性应变范围内。因此,热管不会因为热胀冷缩而脱落。将热管安装在电机定子外侧,一方面可减少其对定子铁心内部电磁场的影响;另一方面,由于电机产生的热量主要在定子铁心和线圈上积聚,能在尽可能接近热源的情况下,通过热管将电机产生的热量直接导出到外部翅片,对翅片进行强制风冷从而达到冷却电机的目的。热路示意如图3所示。

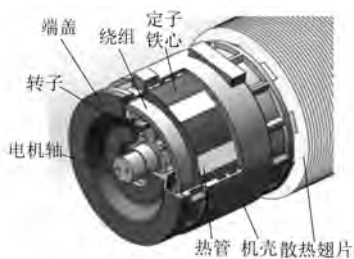


图2 基于热管的风冷冷却系统的电机结构示意图

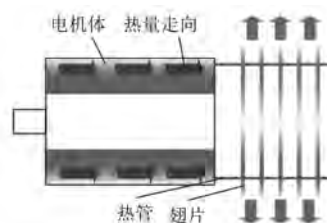


图3 基于热管的风冷冷却系统的电机热路示意图

对比图1和图2,与水冷系统相比,基于热管-风冷的冷却系统不需要水泵、水箱、冷却水套等部件,新增的翅片可集成到汽车的进气栅部分,所以电机及其冷却系统的体积和重量可大幅减小;翅片与平板铝热管相对水冷系统具有较大价格优势。因此,基于热管-风冷的电机体积小、重量轻、成本低,符合新能源汽车电机紧凑、轻量化、高功率密度的发展方向。

## 2 电机热分析有限元模型的建立

### 2.1 简化假设

所选用的PMSM为某公司生产的MD15D型外定子内转子结构电机。电机绕组由多股细小覆漆铜线绕制而成,各个方向的导热系数不同,建模困难,需要对绕组进行适当等效。考虑到PMSM转子上的损耗非常小,且通过转子、电机轴、机壳、端盖与空气发生的自然对流交换的热量也非常少,可以对模型进行适当简化。此外,由于热管的等温性好,各翅片与热管接触面的温度非常接近,且各翅片间空气流动情况基本一致,可以对翅片的换热情况进行等效简化。因此,为了提高计算分析效率,作出以下假设:

(1) 绕组为一整体,具有各向异性导热系数。

(2) 不考虑电机机壳、转子、电机轴、端盖等与空气发生热交换对电机温度分布造成的影响。

(3) 各翅片散热功率以及换热情况一致。

(4) 忽略热辐射。

### 2.2 翅片等效传热模型

由于流体计算需要占用大量系统资源,特别是进行流-固耦合热分析时,流体边界层网格加密后占用资源更多。传统计算方法是按照空气流过翅片对流换热的模式建立模型,但是在这个模型中,由于翅片数量多,边界面积大,会导致各翅片间产生严重湍流,且划分的网格数量量级在 $10^7$ 甚至 $10^8$ 以上,限制其工程应用;而且由于冷却风的单向进入,内部流动情况复杂,导致翅片间的流体并不是沿电机轴中心对称的,因此无法通过建立系统的部分尺寸模型来降低网格量。

如果能将流-固耦合传热计算转化成固体的第三类边界条件进行等效计算,可以省去大量流体网格,极大简化计算,提高效率。基于这一思想,建立了翅片的等效传热模型,如图4所示。空气从翅片

上下方掠过带走一定热量的模型,可以等效为静态空气以一定对流换热系数带走翅片热量的模型。

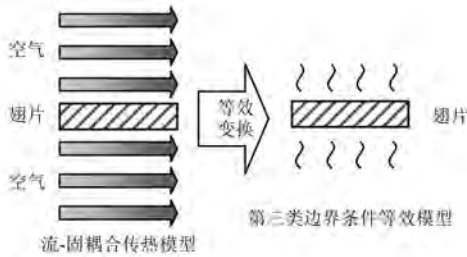


图4 翅片等效传热模型示意图

首先建立单级流-固耦合传热模型。单级翅片的三维模型图如图5所示,截取了6根均布铝热管的一段。在1个单级流-固耦合传热模型单元中,截取的铝热管两端距离翅片表面的长度均等于各翅片间的间距。冷却风从翅片的上下表面沿一定方向吹过,与翅片进行热交换带走热量。为便于计算,假设热管与空气不发生热交换。单级翅片模拟参数如表1所示。计算收敛后得到在采用壁面函数条件下,翅片与空气的平均对流换热系数  $h_{avg}$ , 而环境温度取空气平均温度  $T_{avg}$ , 利用这2个参数建立翅片等效传热模型。

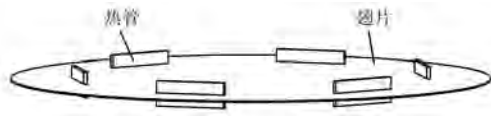


图5 单级翅片模型三维图

表1 单级翅片模拟参数

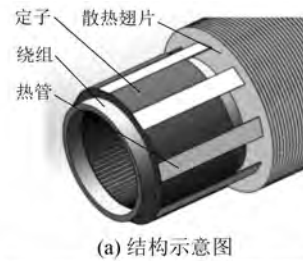
冷却介质	热源功率/W	入口温度/℃	入口速度/(m·s <sup>-1</sup> )	出口相对压强/Pa	出口温度/℃
空气	100	40	6.9	0	40

根据调查,中国城市汽车的平均行驶速度为24.6 km/h,不考虑汽车进气栅等影响,到达电机散热翅片附近的风速约为6.9 m/s。

### 2.3 整机冷却模型的建立

根据上述假设和翅片等效冷却模型,建立基于热管的风冷系统整机冷却模型,如图6所示。整机冷却模型由电机定子铁心、定子线圈、热管及多级散热翅片组成。

根据假设(3),赋予翅片第三类边界条件,平均对流换热系数由基于流-固耦合传热模型计算得出。热源部分则根据电机的铜耗和铁耗分别赋



(a) 结构示意图



(b) 有限元模型

图6 整机冷却模型

予线圈和铁心体积源项。根据实际情况,绕组线圈和铁心槽间还应放置槽间绝缘纸。由于其厚度仅0.35 mm,不宜直接建模,因此在Fluent中作为接触面接触条件设置。线圈采用外包绝缘的铜线绕制,其轴向和径向的导热系数有很大差异,须由试验测定。同样,铁心为表面涂有绝缘漆层的硅钢片叠压而成,其轴向与径向导热系数也有很大差异,亦须试验测定。热管导热系数为实测后圆整值,整机风冷冷却有限元模型参数设定如表2所示。为提升运算速度,基本网格尺寸为2 mm,均采用结构化网格,局部接触面网格细化,最终网格数量为  $1.34 \times 10^6$ ,节点数为  $2.14 \times 10^6$ 。

表2 有限元模拟相关参数表

参数名称	参数值	
铜耗/kW	额定	3.2
	峰值	4.2
铁耗/kW	额定	0.4
	峰值	0.8
工作制	额定	S1 连续工作制
	峰值	S3 断续工作制
流体平均温度/K	313	
线圈导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	轴向	367
	径向	1.56
铁心导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	轴向	4.43
	径向	39
绝缘纸导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.18	
铝热管尺寸/mm	60×3×780	
铝热管导热系数/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	400 000	
绝缘纸厚度/mm	0.35	
翅片层数	36	
翅片尺寸	φ400 mm×1 mm	

### 2.4 翅片等效传热模型和整机冷却模型可行性评估

为验证翅片等效传热模型的可行性,对等效模型与流-固耦合传热模型的模拟结果进行对比。图7和图8分别为基于流-固耦合传热模型和等效传热模型的单级翅片的温度分布。对比图7与图8可以看出,流-固耦合传热模型的温度分布情况和等效模型的温度分布情况基本一致,均出现中间低温、四周高温的分布模式,温度的等值线也基本重合。表3所示为单级翅片流-固耦合传热模型及其等效模型结果对比。观察表3中的数据,2种模型的高温和低温综合偏差 $\sigma$ 约为3.5%,高温和低温基本吻合。通过改变网格尺寸,发现翅片的高温、低温及其他参数基本不变,说明具有网格尺寸无关性。

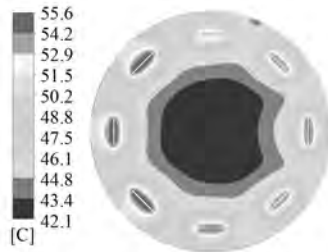


图7 流固耦合传热模型温度分布

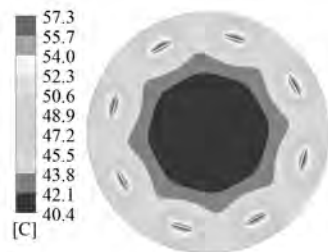


图8 等效模型温度分布

表3 单级翅片流-固耦合传热模型及其等效模型结果对比表

模型名称	2 mm		1.5 mm	
	流固耦合传热模型	等效模型	流固耦合传热模型	等效模型
翅片高温 $T_{max}/^{\circ}C$	55.6	57.3	55.4	57.1
翅片低温 $T_{min}/^{\circ}C$	42.1	40.4	41.9	40.2
换热系数 $h_{avg}/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	50.06		50.43	
偏差 $\sigma/\%$	3.50		3.52	

表3中,偏差 $\sigma$ 为原模型与等效模型最高温和最低温的相对偏差平均值,直接体现了等效模型与原模型模拟结果的相似性,用以评价该等效模型的可行性。 $\sigma$ 的计算公式为

$$\sigma = \frac{(|T_{1max} - T_{2max}|) / \{T_{1max}, T_{2max}\}_{max}}{2} + \frac{(|T_{1min} - T_{2min}|) / \{T_{1min}, T_{2min}\}_{max}}{2}$$

从以下几个方面评价整机冷却模型的可行性:

(1) 等效模型应用了 RNG  $K-\epsilon$  湍流模型<sup>[16-17]</sup>,采用标准壁面函数,壁面网格  $Y+$  值约为 60。一般工程计算使用的湍流模型为 Stabard  $K-\epsilon$  湍流模型,其收敛性和计算精度能满足一般的工程计算要求。本文选取的 RNG  $K-\epsilon$  湍流模型来源于严格的技术统计,相比 Stabard  $K-\epsilon$  湍流模型,其在更广泛的流动中具有更高的可信度和精度。为提高运算效率,模型采用标准的壁面函数,以模拟近壁面流体的传热过程。相应地,采用  $Y+$  值约为 60 的壁面网格,模拟结果能逼近实际情况,因而模拟结果是可靠的。

(2) 更改网格尺寸进行网格无关性检验,结果变化很小(0.6%),故模型具有网格无关性。进行网格无关性验证,说明计算结果不受网格尺寸的影响,从而保证模拟结果的唯一性。

(3) 偏差  $\sigma < 5\%$ , 偏差值较小,说明等效模型代替流-固耦合传热模型进行计算的方式是可行的。

综合前面的论述可以得出:本文所建立的有限元模型计算结果能逼近实际结果,建立的等效模型可以取代流-固耦合传热模型。因此,该整机冷却的有限元模型建立方式是可行的,其计算结果是可信的。

表4 不同风速点下车速对应表

点位	风速/ $(m \cdot s^{-1})$	等效时速/ $(km \cdot h^{-1})$
风速点1	6.9	25
风速点2	5.6	20
风速点3	4.2	15
风速点4	2.8	10
风速点5	1.4	5

### 3 结果与讨论

在不考虑进气栅等的阻拦作用时,可近似认为车辆行驶过程中的风直接作用于冷却翅片上。在不同冷却风速下,本文研究了以下几个风速点。

#### 3.1 额定功率下模拟结果分析

图9所示为基于热管冷却系统的MD15D电机在额定功率64 kW,冷却风速6.9 m/s工作时的模拟结果。由图9可以看出,定子铁心和线圈的最高温度分别为83.0 °C和104.1 °C,完全满足电机H级绝缘允许的温度要求。这表明采用基于热管的风冷系统对电机进行冷却可行。从图9还可看出,定子铁心的最低温度仅为56.2 °C,线圈的最低温度仅为71.8 °C,最低温度分布于热管及其附近区域。这一方面说明热管附近的散热效果非常好,另一方面说明采用热管直接从电机内部(定子)将热导出,再通过翅片风冷散热是有效的方案。此外,定子铁心和线圈的温度分布呈现明显的周向周期性,两相邻热管中部的温度最高,是造成线圈沿周向周期出现高温区的原因之一。



图9 基于热管的风冷 MD15D 电机额定工况下的温度分布

图10所示为在额定工况下,不同风速点时的电机线圈和铁心最高温度分布情况。可以看到,随着冷却风速的不断提升,线圈和铁心的温度不断下降。在风速点5时,对应时速为5 km/h,线圈温度为110.7 °C,仍处于较低水平。

#### 3.2 峰值功率下模拟结果分析

本文直接使用峰值热损耗进行稳态计算,计

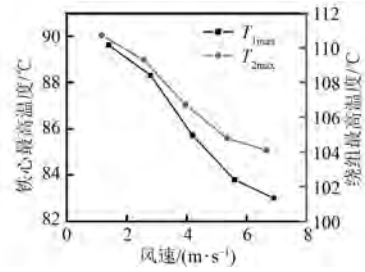


图10 额定工况下不同风速点的高温分布情况

算结果较为苛刻,更能反映出基于热管冷却系统的电机的冷却性能。基于热管的风冷MD15D电机峰值工况下的温度分布如图11所示。从温度梯度的分布规律来看,峰值工况和额定工况下的模拟结果非常相似,电机的铁心和线圈都呈现非常明显沿周向分布的温度梯度。定子铁心和线圈的最高温度分别为102.9 °C和126.9 °C,说明在峰值功率工作下,基于热管的风冷方法对电机进行冷却可行。

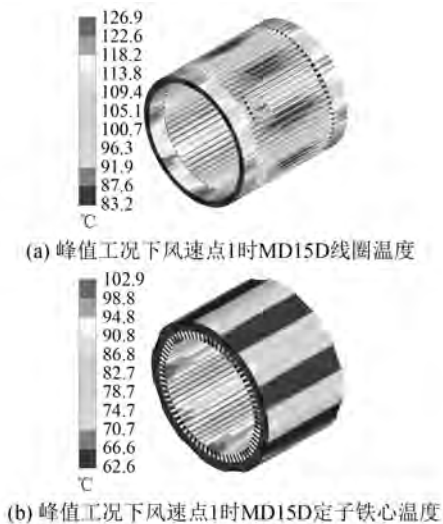


图11 基于热管的风冷 MD15D 电机峰值工况下的温度分布

在峰值工况下,不同风速时电机线圈和铁心最高温度分布情况如图12所示。在风速点5时,线圈温度最高为136.1 °C,仍处于较低水平。峰值工况采用稳态计算,而在电机实际运行时采用S3断续工作制,因此,实际峰值工况下的温度将低得多。

#### 3.3 极端高温环境下峰值功率运行模拟结果

新能源汽车电机有时在极端高温环境下运行。GB/T 18488.1—2015 中对电机高温工作的

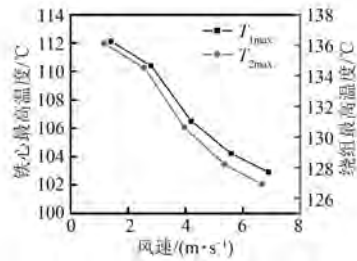


图 12 峰值工况下不同风速点的最高温度分布情况

定义为电机在 55 °C 的工作环境下运行。因此,为了模拟电机冷却系统在高温环境下的运行状况,设置电机冷却系统入口温度为 55 °C,并使用峰值功率下的损耗进行稳态计算,得到不同风速点时电机线圈和铁心最高温度的分布情况如图 13 所示。在风速点 5 时,定子铁心的最高温度为 127.0 °C,线圈最高温度为 151.1 °C,低于本电机 H 级绝缘等级的最高极限温度 180 °C。因此,基于热管的风冷系统可以维持电机在峰值功率、极端高温工况下正常运行。

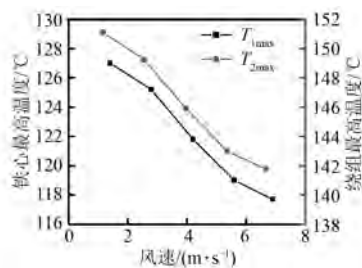


图 13 峰值工况极端环境下不同风速点的高温分布情况

## 4 结 语

为适应新能源汽车电机紧凑、轻量化、高功率密度的发展要求,本文提出基于热管的电机风冷冷却方法,为电机的冷却系统设计提供了新的思路,得到结论如下:

(1) 汽车驾驶速度为 25 km/h,翅片附近冷却风速为 6.9 m/s 时,运行在额定工况下的电机定子铁心和线圈的最高温度分别为 83.0 °C 和 104.1 °C;稳态运行在峰值工况下电机定子铁心和线圈的最高温度分别为 102.9 °C 和 126.9 °C,均处于较低水平,表明基于热管的风冷冷却系统能有效控制电机的温升。

(2) 在不同冷却风速下对电机线圈和定子铁心的温度进行了研究,发现在 1.4 m/s 的冷却风

速下,额定工况工作时,线圈的最高温度为 110.7 °C;峰值工况下稳态工作时,线圈的最高温度为 136.1 °C,也处于较低水平。特别当电机在峰值功率极端高温环境下工作时,定子铁心最高温度为 127.0 °C,线圈最高温度为 151.1 °C,仍能满足电机 H 级绝缘的温度要求。

(3) 采用基于热管的风冷方法对电机进行冷却,电机定子铁心和线圈的温度呈现周向周期性分布,热管附近区域温度低,两热管中间区域的温度高。可通过提高热管的分布密度,降低两热管中间区域的温度。

## 【参考文献】

- [1] WANG S W, ZHANG Y, HU J M. Thermal analysis of water-cooled permanent magnet synchronous motor for electric vehicles [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014(610): 129-135.
- [2] 陈萍,唐任远,佟文明,等.高功率密度永磁同步电机永磁体涡流损耗分布规律及其影响[J].电工技术学报,2015,30(6): 1-9.
- [3] 张琪,王伟旭,黄苏融,等.高密度车用永磁电机流固耦合传热仿真分析[J].电机与控制应用,2012,39(8): 1-5.
- [4] 钱洪.高能量密度电机水冷系统设计与选用[J].电机与控制应用,2013,40(1): 9-12.
- [5] 万珍平,温万昱,吴柏禧,等.考虑换热能力和压降的永磁同步电机冷却流道设计[J].华南理工大学学报(自然科学版),2017(7): 25-32.
- [6] INAMURA S, SAKAI T, SAWA K. A temperature rise analysis of switched reluctance motor due to the core and copper loss by FEM [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1554-1557.
- [7] 朱巍.电动车用高功率密度永磁同步电机热管系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [8] WU W, DUNLOP J B, COLLOCOTT S J, et al. Design optimization of a switched reluctance motor by electromagnetic and thermal finite-element analysis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(5): 3334-3336.
- [9] 乐智.纯电动汽车电机驱动系的冷却系统设计与研究[D].天津:河北工业大学,2010.
- [10] 田玉冬,王潇,张舟云,等.车用电机冷却系统热仿真及其优化[J].机械设计与制造,2015(2): 238-242.

(下转第 109 页)

- aspects[J]. *Renewable Energy*, 2015(78): 165-172.
- [4] 涂娟, 汤宁平. 一种新型直驱式风力发电系统控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2015, 42(7): 52-56.
- [5] 刘波, 潘巧波. 大型直驱风电机组快速响应控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2015, 42(11): 62-66.
- [6] GOLESTAN S, MONFARED M, FREIJEDO F D. Design-oriented study of advanced synchronous reference frame phase-locked loops [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(2): 765-778.
- [7] 王丽婕, 冬雷, 廖晓钟, 等. 基于小波分析的风电场短期发电功率预测[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(28): 30-33.
- [8] 茆美琴, 周松林, 苏建徽. 基于脊波神经网络的短期风电功率预测[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(7): 70-74.
- [9] 周松林, 茆美琴, 苏建徽. 风电功率短期预测及非参数区间估计[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(25): 10-16.
- [10] 贾文昭, 康重庆, 李丹, 等. 基于日前风功率预测的风电消纳能力评估方法[J]. *电网技术*, 2012, 36(8): 69-75.
- [11] 江岳春, 张丙江, 邢方方, 等. 基于混沌时间序列 GA-VNN 模型的超短期风功率多步预测[J]. *电网技术*, 2015, 39(8): 2160-2166.
- [12] ABBAS K, SAEID N, DOUG C. Prediction intervals for short-term wind farm power generation forecasts [J]. *IEEE Trans on Sustainable Energy*, 2013, 4(3): 602-610.
- [13] 杨德友, 蔡国伟. 基于因散经验模式分解与最小二乘支持向量机的风电场短期风速预测[J]. *东北电力大学学报*, 2015, 35(3): 44-49.
- 收稿日期: 2018-07-11

(上接第 97 页)

- [11] 张琪, 黄苏融, 丁烜明, 等. 独立磁路混合励磁电机的多领域仿真分析[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(6): 8-15.
- [12] JANG J H, CHIU H C, YAN W M, et al. Numerical study on electromagnetics and thermal cooling of a switched reluctance motor[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2015(6): 16-27.
- [13] LI W, CAO J, HUO F, et al. Numerical analysis of stator-rotor coupled transient thermal field in induction motors with blocked rotor [C] // *World Automation Congress, Hawaii, IEEE*, 2008: 1-6.
- [14] 杜国华, 房建成, 刘西全, 等. 高速永磁无刷直流电机的热分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2012, 38(8): 1101-1105.
- [15] 陈彦锡. 45 kW 汽车用水冷电机流体场计算与冷却系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [16] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [17] 熊莉芳, 林源, 李世武.  $k-\varepsilon$  湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. *工业加热(热能工程)*, 2007, 36(4): 13-15.
- 收稿日期: 2018-03-26

(上接第 103 页)

- [5] 魏岚婕. 风电并网逆变器控制方法研究[J]. *电力电子技术*, 2012, 46(12): 100-102.
- [6] 郑怡. 基于 PR 控制的风电机组整流侧并网系统研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2016, 5: 1-2.
- [7] 李立成, 叶林. 变风速下永磁直驱风电机组频率-转速协调控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(17): 26-31.
- [8] 王丹, 刘崇茹, 李庚银. 永磁直驱风电机组故障穿越优化控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(24): 83-89.
- [9] 叶瑞丽, 刘瑞叶, 刘建楠, 等. 直驱风电机组风电场接入后的电力系统暂态稳定计算[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(6): 211-218.
- [10] 杨钊. 永磁直趋风力发电机组的建模及控制技术的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [11] 周飞航, 刘军. 基于状态反馈的直驱风电系统模糊控制策略[J]. *电网技术*, 2016, 40(9): 2758-2763.
- [12] 刘忠义, 刘崇茹, 李庚银. 机械轴系模型对直驱永磁同步风力发电机暂态分析的影响[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(2): 145-152.
- [13] OMID A, AMIRNASER Y. A strategy for real power control in direct-drive PMSG-based wind energy conversion system [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(3): 1297-1305.
- [14] 黄守道, 高剑, 罗德荣. 直驱永磁风力发电机设计及并网控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- 收稿日期: 2017-12-04