

考虑沸腾传热的车用永磁同步电机 峰值工况温升特性研究

何联格^{1,2,3}, 陈红玲¹, 吴行³, 葛帅帅¹, 石文军¹, 严新¹

(1. 重庆理工大学汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室, 400054, 重庆; 2. 北京信息科技大学
现代测控技术教育部重点实验室, 100192, 北京; 3. 重庆青山工业有限责任公司, 402761, 重庆)

摘要: 为研究电动汽车在高原环境下峰值工况运行时永磁同步电机的温升问题, 建立 RPI 过冷沸腾换热模型。该模型考虑了气泡分离直径、气泡分离频率和气泡成核密度等的影响, 能够对沸腾换热过程中两相流状态进行准确分析。运用沸腾传热理论研究电机的温升特性, 在流体域中建立沸腾传热模型以及气泡子模型, 模拟电机在高原环境下的运行环境来研究冷却液进口温度、海拔高度以及进口流速等因素对电机温升的影响。结果表明: 在电机热机后进行试验与仿真, 考虑沸腾传热时电机的温升特性更接近试验结果, 所以研究电机的温升特性时应该要考虑冷却系统沸腾传热的影响; 峰值工况下电机的温升特性随着冷却液进口温度的升高, 电机绕组达到 150℃ 所用的时间越少, 即电机温度越高; 在平原或者高海拔环境下, 电机在峰值工况运行时的温度增长速率均随着冷却水进口水温的增大而增大, 而电机的温度随着大气压强的降低而下降; 由于冷却水的相变两相流沸腾传热现象, 在高海拔地区运行时的温升特性比平原地区更好。

关键词: 永磁同步电机; 峰值工况; 沸腾传热; 温升特性; 高原环境

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202204015 **文章编号:** 0253-987X(2022)04-0138-09



OSID 码

Study on Temperature Rise Characteristics of Vehicle Permanent Magnet Synchronous Motors under Peak Working Conditions Considering Boiling Heat Transfer

HE Liange^{1,2,3}, CHEN Hongling¹, WU Hang³, GE Shuaishuai¹, SHI Wenjun¹, YAN Xin¹

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacture Technology for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 3. Chongqing Tsingshan Industrial Co. Ltd., Chongqing 402761, China)

Abstract: To study the temperature rise of electric vehicle permanent magnet synchronous motors under peak working conditions in plateau environment, an RPI (Rensselaer Polytechnic Institute) subcooled boiling heat transfer model is established, which considers the effect of bubble separation diameter, bubble separation frequency, bubble nucleation density, etc. and could accurately analyze the two-phase flow state during boiling heat transfer. Using the boiling heat transfer theory to study the temperature rise characteristics of motors, we have established the boiling heat transfer model and the bubble submodel in the fluid domain, and simulated the

收稿日期: 2021-08-28。 作者简介: 何联格(1984—), 男, 博士后, 硕士生导师。 基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2021jcyj-msxmX0440); 国家自然科学基金资助项目(52005067); 现代测控技术教育部重点实验室开放课题资助项目(KF20211123201)。

网络出版时间: 2021-12-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20211216.1131.002.html>

working conditions of motors in the plateau environment to study the influence of factors such as coolant inlet temperature, altitude and inlet flow rate on the motor temperature rise. The result shows that the temperature rise characteristics of motors are closer to the test results after the motor is warmed up, so the influence of boiling heat transfer of the cooling system shall be considered when we study the temperature rise characteristics of motors. The temperature rise characteristics of motors under peak working conditions would increase with the coolant inlet temperature; the less time it takes for the motor winding to reach 150 °C, the higher the motor temperature. In plain or high-altitude environments, the temperature growth rate of the motor during peak working conditions would increase with the water temperature at cooling water inlet, while the temperature of the motor would decrease with the atmospheric pressure. Due to the phase transformation of the cooling water and two-phase boiling heat transfer, the temperature rise characteristics in high-altitude areas are better than those in plain areas.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; peak working condition; boiling heat transfer; temperature rise characteristic; plateau environment

近年来,新能源汽车在国家政策的鼓励下发展迅速,高海拔地区的电动汽车保有量也在逐年增加。作为电动汽车关键部件的电机在高原地区的温升特性受海拔高度的影响较大,海拔越高,电机温升越大,输出功率越小。同时,温升又会影响电机整机性能,进而影响纯电动汽车整车在高原环境下的适应性^[1]。电机温升过高还容易引起绝缘的损坏、永磁体退磁、结构强度降低、寿命急剧下降等问题^[2-3]。在高原环境中,大气压强随海拔升高而降低,冷却液饱和温度降低,在这种情况下,电机冷却水容易产生沸腾现象,俗称开锅,导致冷却系统不只存在简单的单相流对流传热,还存在两相流沸腾传热现象^[4]。研究沸腾传热条件下纯电动汽车电驱动系统永磁同步电机环境适应性特性,对电动汽车的高原环境适应性研究具有重要意义。

刘慧军等以某水冷电机为研究对象,对电机温度场和水道流场进行求解,分析了电机在不同冷却介质入口温度和流量、介质类型等因素下内部的流动传热情况^[5]。丁树业等以一台双介质冷却的高海拔型双馈风力发电机为研究对象,得到电机在海拔4 km运行时,机壳内冷却水的流动特性及电机温度分布规律^[6]。张琦等提出采用多物理场耦合分析水下电机损耗和冷却系统中流场和温度场的耦合关系,利用该方法得到冷却系统的计算结果^[7]。Zhang等研究了永磁同步电机的水道长度、宽度、层数以及机壳厚度对电机冷却效果的影响^[8]。RPI模型充分考虑了气泡的影响,能够对沸腾换热过程中两相流的流动状态进行准确分析。董非等将RPI模型应用到实际的内燃机缸盖冷却水腔的换热计算

中,与缸盖火力面测点温度试验结果进行对比,比较该模型与纯对流换热模型的计算精度^[9]。目前,对车用永磁同步电机的研究很少考虑在高原地区运行时由于海拔高度的升高导致冷却液沸腾的情况下电机的温升特性。

考虑电动汽车行驶过程中的加速、爬坡、超车等问题,本文以某95 kW车用永磁同步电机为对象,研究其在峰值工况下的温升特性。采用RPI沸腾传热模型,利用有限元仿真软件对电机温度场及温升特性进行了仿真分析,得到了两相流沸腾模型和单相流不考虑沸腾两种情况下的电机温度场分布及温升特性;同时,通过台架试验,验证了峰值工况时基于沸腾传热对电机进行温升特性计算的准确性,考虑沸腾传热的情况下电机绕组温度达到150 °C所用的时间更接近试验结果。

1 计算基本理论

1.1 电机温度场计算模型

基于流固耦合传热的方法对电机三维温度场进行数值计算,根据传热学基本理论研究瞬态温度场,将其内部传热过程简化为含有内热源的三维瞬态导热问题^[10-12]。用拉普拉斯微分方程描述电机热平衡方程,导热微分方程和边界条件为

$$\begin{cases} k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_v = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \\ T|_{s_1} = T_w \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_2} = q_w \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_3} = -h(T - T_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_x, k_y, k_z 为材料沿 x, y, z 方向的导热系数; T 为固体待求温度; q_v 为体热源密度; ρ 为固体密度; c 为固体的比热容; t 为时间; s_1, s_2, s_3 为求解域固体边界面; n 为 s_2 边界的法向量; T_w 为边界面温度; q_w 为边界面热流密度; h 为边界面对流换热系数; T_f 为水套附近对流换热系数。

1.2 过冷沸腾传热数学模型

1.2.1 欧拉模型

欧拉两相流模型中, 每一相都要满足一组能量方程^[13-16]。其中, 气相连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (2)$$

动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = & \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} - \\ & \alpha_q \nabla p + R_{pq} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} \mathbf{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \mathbf{v}_{qp}) + \\ & (F_q + F_{\text{lift},q} + F_{\text{wl},q} + F_{\text{vm},q} + F_{\text{td},q}) \end{aligned} \quad (3)$$

能量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q u_q h_q) = & \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \nabla u_q \boldsymbol{\tau}_q + \\ & \alpha_q \rho_q \mathbf{g} \cdot \nabla q_q + S_q + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为速度矢量; $\dot{m}_{pq}$ 和 $\dot{m}_{qp}$ 分别为相间质量转移; S_q 为能量源相; $\boldsymbol{\tau}_q$ 为应力应变张量; $F_q, F_{\text{lift},q}, F_{\text{wl},q}, F_{\text{vm},q}, F_{\text{td},q}$ 分别为外部体积力、浮力、壁面耗散力、虚拟质量力和湍流离散力; R_{pq} 为相间相互作用力; p_q 为压力; h_q 为气相比焓; q_q 为热通量; h_{pq} 为相间焓。

1.2.2 壁面沸腾传热模型

流动沸腾中壁面热流密度的计算模型认为壁面上的热量首先传递到临近壁面的过热液体微层上, 热量传递过程分为气泡生长和等待两个时间段^[17-19]。壁面传递的热量一部分用来产生相变, 另一部分用来提高液相温度, 壁面上总的换热热流包括壁面导热、气泡换热以及未被气泡覆盖的壁面与液体的对流换热 3 个部分, 即

$$Q = Q_c + Q_q + Q_e \quad (5)$$

式中: Q_c 为未被气泡覆盖的壁面与液体的对流传热热流; Q_q 为在气泡脱离壁面后周围过冷液体涌入壁面所产生的类似萃取热流; Q_e 为气泡生长周期中相变产生的热流。

萃取热流由下式计算

$$Q_q = 2A_q f \sqrt{\frac{t_{\text{wait}} \lambda_{\text{lip}} \rho_{\text{lip}} c_{p,\text{lip}}}{\pi}} (T_w - T_{\text{lip}}) \quad (6)$$

$$A_q = nk \frac{\pi d_{\text{dep}}^2}{4} \quad (7)$$

式中: f 为气泡成核频率; t_{wait} 为从气泡脱离到下一气泡产生的等待时间; λ_{lip} 为液相的导热率; ρ_{lip} 为液相的密度; $c_{p,\text{lip}}$ 为液体比定压热容; T_{lip} 为液体温度; A_q 为参与萃取热流的壁面比例; k 为气泡脱离时换热受到影响的核化点附近面积与气泡面积的比; d_{dep} 为气泡脱离直径; n 为核化点密度。

不考虑气泡间的相互作用, 壁面与液体间的对流传热热流密度由下式计算

$$Q_c = St \rho_{\text{lip}} c_{p,\text{lip}} u_{\text{lip}} (1 - A_q) (T_w - T_{\text{lip}}) \quad (8)$$

式中: St 为 Standon 数; u_{lip} 为近壁面液相的速度。

相变热流密度

$$Q_e = \frac{\pi}{6} d_{\text{dep}}^3 f \delta \rho_g H_{1g} \quad (9)$$

式中: ρ_g 为气相的密度; H_{1g} 为液体的汽化潜热。

$$\delta = [185(T_w - T_{\text{lip}})]^{1.805} \quad (10)$$

1.2.3 沸腾气泡子模型

气泡脱离直径

$$d_{\text{dep}} = \min\left(0.6 \exp\left(-\frac{T_{\text{sat}} - T_{\text{lip}}}{45}\right), 1.4\right) \quad (11)$$

式中 T_{sat} 为液相的饱和温度, 随冷却水的压力而变, 在冷却水压力为 $0.7 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时分别为 89.96°C 、 100°C 。

气泡脱离频率

$$f = \sqrt{4g(\rho_{\text{lip}} - \rho_g)/(3d_{\text{dep}}\rho_{\text{lip}})} \quad (12)$$

式中 g 为重力加速度。

气泡等待时间

$$t_{\text{wait}} = 0.8/f \quad (13)$$

2 有限元模型建立及边界条件设置

2.1 电机基本参数

本文以一台 48 槽/8 极永磁同步电机为研究对象, 电机为水冷散热, 基本参数如表 1 所示。

表 1 样机基本参数

Table 1 Basic parameters of prototype

参数	数值
定子槽数	48
极数	8
峰值转速/(r · min ⁻¹)	4 320
峰值功率/kW	95
铁心长度/mm	160
定子外径/mm	160
转子外径/mm	106.7

2.2 损耗计算

电机运行时产生的铜损耗、定子和转子铁耗以及永磁体涡流损耗是引起电机发热的主要原因,准确计算电机各部件的损耗是电机温升分析的首要条件^[20-22]。电机运行时的所有损耗为

$$P = P_c + P_{t1} + P_{t2} + P_w + P_{\Delta} \tag{14}$$

式中: P 为电机总的损耗; P_c 为定子绕组铜耗; P_{t1} 为转子铁耗; P_{t2} 为定子铁耗; P_w 为永磁体涡流损耗; P_{Δ} 为机械损耗和杂散损耗之和。

本文利用 Maxwell 对电机进行峰值工况下的瞬态电磁仿真计算,得到电机各部件在峰值工况下的具体损耗值,样机在峰值扭矩下运行时的热源分布计算值如表 2 所示。

表 2 样机在峰值扭矩运行时的热源分布
Table 2 The heat source distribution of the prototype at rated torque

热源部位	额定损耗/W	生热密度/(W·m ⁻³)
定子	1 034.54	789 954.34
转子	80.46	104 822.27
永磁体	4.46	24 624.56
绕组	4 470.16	7 961 726.715

2.3 温度场模型

为了合理简化求解过程,在进行有限元仿真计算之前,作出以下基本假设^[23]:

- (1)电机绕组、定子铁芯、转子铁芯以及永磁体产生的热量均匀分布在各部件;
- (2)忽略轴承摩擦损耗和风摩损耗;
- (3)忽略温度对电机各个部件的导热系数以及表面对流换热系数的影响;
- (4)电机内部各材料传导介质均为各同向性。

为了简化计算模型,提高计算准确度,本文建立包括机壳、冷却水、定子、绕组、转子、永磁体、轴的温度场求解模型,忽略了对电机散热影响较小的机座部分,模型如图 1(a)所示,样机冷却水道为螺旋状,如图 1(b)所示。

2.4 边界条件

2.4.1 对流换热边界条件

- (1)冷却水入口设置为速度入口边界,试验测试流速为 8 L/min;
- (2)冷却液出口设置为零压力出口;
- (3)仿真计算中流固耦合面为无滑移边界条件;
- (4)电机各零件端面散热系数参考文献^[24]进行处理。

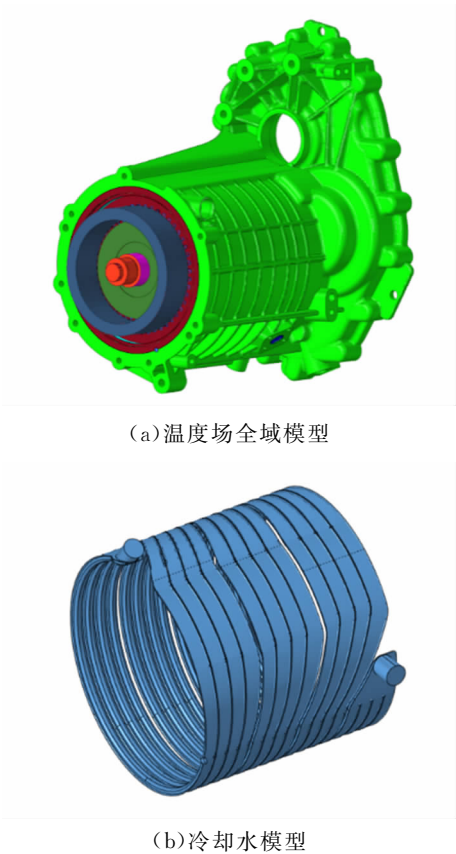


图 1 温度场求解模型

Fig. 1 Calculation model of temperature field

2.4.2 高原环境边界条件

- (1)取海拔 3 km 高度为仿真模拟环境,大气压强 0.7×10^5 Pa,冷却水饱和温度为 90 ℃^[6];
- (2)两相流进口流体为水,水的体积分数为 1,水蒸气的体积分数为 0^[12];
- (3)液相温度为入口水温,液相水为连续相,采用湍流双方程模型;水蒸气为离散相,采用零阻力传热模型,离散相的壁面为自由滑移壁面条件。

2.5 温度场求解

当电动汽车从经济时速匀速行驶到突然爬坡时,仿真计算电机从额定工况 38 kW、4 000 r/min 到峰值工况 95 kW、4 320 r/min 下的瞬态温度场,峰值工况的计算是将额定工况运行下的绕组温度达到 80 ℃时作为前置工况;然后,将额定工况热源改为峰值工况热源继续计算,在有限元软件中设置好热源、导热系数等相关参数,达到设置瞬态热分析仿真计算时间为 120 s,两相流沸腾传热计算模型采用 RPI 沸腾传热模型,得到峰值工况下电机绕组温度达到 150 ℃左右时电机的温度仿真云图,如图 2 所示。此时的电机定子最高温度为 122.594 ℃,转子最高温度为 103.4 ℃,永磁体最高温度为 103.113

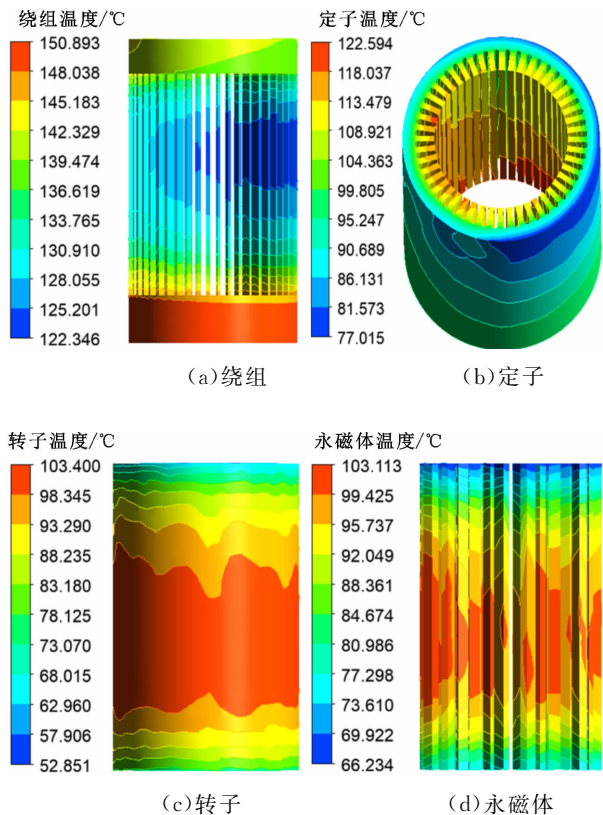


图 2 各部件温度分布云图

Fig. 2 Temperature distribution cloud map of each component

℃, 整机最高温度依然是绕组端部, 为 150. 895 ℃。由于电机最高温度出现在绕组的端部, 所以本文主要研究绕组端部温升情况。

3 模型验证及计算结果分析

图 3 为电驱动系统性能测试台架。在样机端部绕组的内侧放置热电偶测取温度, 通过恒温水箱控制进水口温度, 通过软件控制系统的时间基准, 实现所有测量数据的实时同步测量与记录, 可以保证数据的时效一致性。

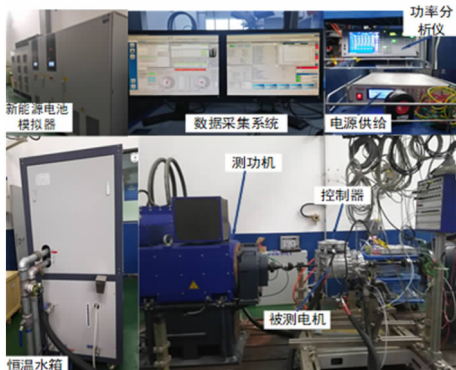


图 3 AVL 电驱动系统性能测试台架

Fig. 3 Electric drive system performance test bench

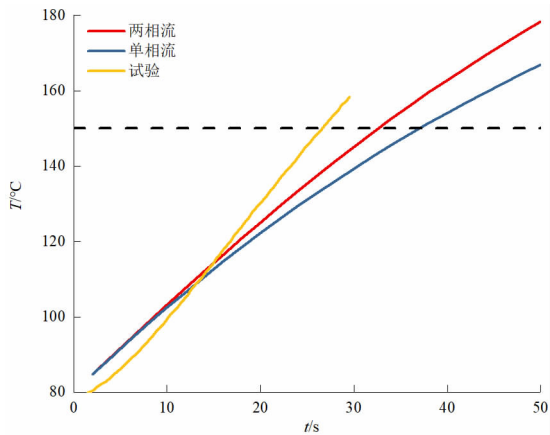


图 4 电机运行时绕组温升曲线

Fig. 4 Winding temperature rise curves when the motor runs

根据绝缘耐温等级要求, 绕组最高温度不得高于 150 ℃, 同时根据电动汽车实际使用工况, 峰值工况下绕组达到最高温度 150 ℃所需的时间不得低于 30 s 的可靠性考核要求。图 4 为电机在峰值工况下运行时绕组的温度变化曲线。由图可知, 样机试验在 26. 62 s 时绕组温度达到 150 ℃, 基于沸腾传热的两相流仿真计算温度在 32. 55 s 时绕组温度达到 150 ℃, 单相流仿真温度在 37. 04 s 时绕组温度达到 150 ℃。通过仿真计算结果与试验数据对比分析可知, 两相流仿真结果与试验数据更接近, 说明电机从额定工况到峰值工况运行时, 冷却水内部有产生沸腾传热现象, 采用气液两相流沸腾传热模型, 考虑冷却水的沸腾传热更加符合电机冷却水套内冷却水的流动传热的实际情况。

4 不同因素对沸腾换热的影响分析

沸腾传热机理复杂, 在发生相变的过程中会受到海拔高度及冷却水进口温度等因素的影响, 所以研究电机冷却液进口温度、大气压强对电机温升的影响具有重要的意义。

4.1 进口温度对电机温升的影响

在 0.7×10^5 Pa 和 0.9×10^5 Pa 大气压强下, 气相气泡直径为 1 mm, 冷却水进口流速为 8 L/min 时, 不同的冷却液进口温度下, 基于两相流沸腾传热计算所得到的电机从额定工况到峰值工况 95 kW、4 320 r/min 下绕组温升特性, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 随着冷却液进口温度的升高, 电机绕组达到 150 ℃所用的时间越少, 具体所用时间如表 3 所示。这是因为降低冷却液温度能够增强传热, 冷却液流经电机定子壁面时, 冷却液进口温度越低, 与电机定子壁面的温差也就越大, 吸收的热量也

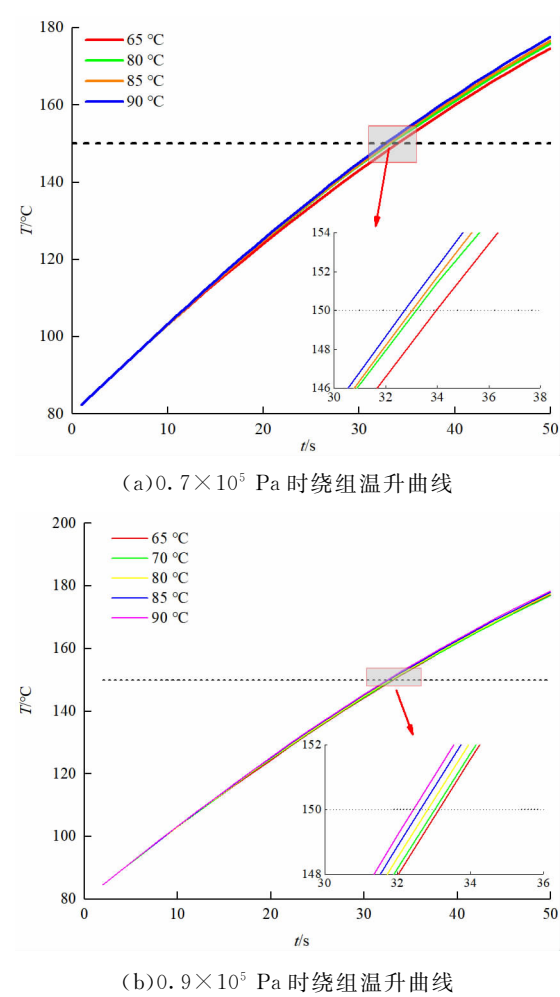


图 5 不同进口水温时绕组的温升曲线

Fig. 5 Temperature rise curves of winding at different inlet water temperature

就越多;同时,由于冷却液流速相同,随着进口水温的升高,水道内产生的气泡数量增加,气液两相之间的扰动减弱,冷却系统换热强度减小,电机的温度增加。此外,气泡数量增加,沸腾产生的气泡不易被主流区液体带走,此时壁面上附着气泡较多,对流传热

表 3 各个进口温度对应的时间

Table 3 The time corresponding to each inlet temperature

p/kPa	$T/^{\circ}\text{C}$	t/s
70	65	33.95
	80	33.17
	85	33.01
	90	32.72
90	65	33.13
	70	33.02
	80	32.83
	85	32.62
	90	32.44

热流及萃取热流减少,总的热流下降也将导致电机温度增加。

4.2 大气压强对电机温升的影响

工程上往往可以通过提高冷却系统压力来抑制冷却液的沸腾,但是压力增加会导致冷却系统的压力损失增加,也会加大水泵的功率。压力对自然对流换热影响很小,可忽略不计,但是对于过冷沸腾传热,冷却液饱和温度随着大气压强而改变。在冷却水进口流速为 8 L/min、气泡直径为 1 mm 下,进口温度为 80 °C 时,电机在 0.7×10^5 Pa、 0.9×10^5 Pa 和 1×10^5 Pa 大气压强下,基于两相流沸腾传热计算所得到的电机从额定工况到峰值工况 95 kW、4 320 r/min 下绕组的温升特性,如图 6 所示。各个进口温度及压强对应的时间如表 4 所示。

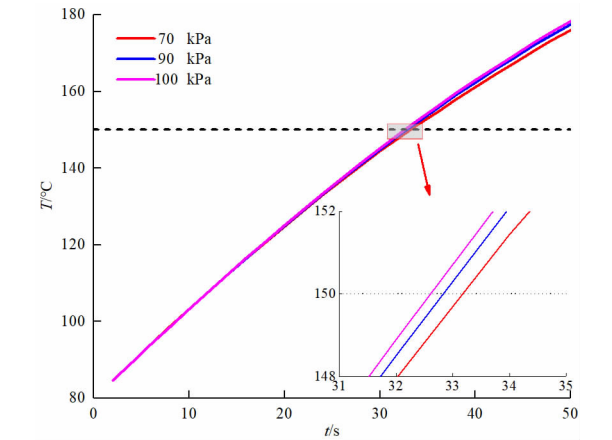


Fig. 6 Temperature rise curves of winding under different atmospheric pressures

表 4 各个进口温度及压强对应的时间

Table 4 Time for each inlet temperature and pressure

p/kPa	t/s
70	33.17
90	32.83
100	32.61

由图 6 可知,在相同进口水温和流速下,电机的温升特性随着大气压强的降低而下降,进口水温为 80 °C 时,在 1×10^5 Pa 和 0.7×10^5 Pa 大气压强下绕组温度达到 150 °C 所用的时间见表 4,即大气压强较大时电机更早达到高温。这主要是因为电机在高海拔地区运行时,随着海拔的升高,大气压强下降,冷却液的饱和温度随大气压强的降低而降低。在相同热源下,冷却液所处的环境大气压强越低,沸腾程度越强,沸腾传热效果越好,此时沸腾传热作用加强,

近定子壁面水蒸气分布较多,电机温度下降。随着大气压强升高,气相体积减少,沸腾传热减弱,由于流速不变,对流换热几乎不变,总的换热效率降低,电机温度升高。因此,电机从额定工况到峰值工况 95 kW、4 320 r/min 时,高原地区温升特性优于平原地区。

4.3 进口流速对电机温升的影响

在 0.7×10^5 Pa 大气压强下,取气相气泡直径为 1 mm,冷却液进口温度 80 °C,改变冷却液进口流速分别为 7 L/min、8 L/min、9 L/min、10 L/min,基于两相流沸腾传热计算所得到的电机从额定工况 38 kW、4 000 r/min 到峰值工况 95 kW、4 320 r/min 的绕组温升特性如图 7 所示,各个进口流速对应的时间见表 5。

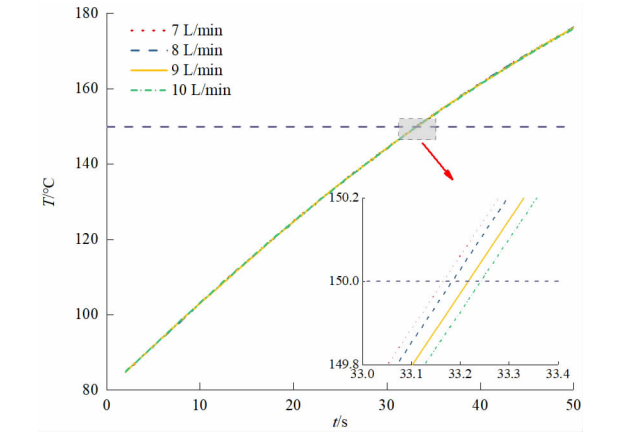


图 7 不同流速下绕组的温升曲线

Fig. 7 Temperature rise curves of winding under different flow velocity

表 5 各个进口流速对应的时间
Table 5 Time for each inlet flow rate

$v/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	t/s
7	33.17
8	33.18
9	33.22
10	33.24

从图 7 可以看出,电机绕组的温度随流速增大而降低,表现为随流速增大,绕组的温度达到 150 °C 时所需的时间越长,即绕组温度越低。这主要是因为随着流速的增大,水套内两相之间的湍流扰动作用增强,湍动能增加,对流换热作用增强,但相互之间时差几乎可以忽略不计。因此,在实际工程应用中,可以较少地考虑流速的影响,选用功率较小的水泵也能满足要求,减少电机运行过程中水泵的功率

损失。

5 结 论

(1)对比仿真数据与试验数据发现,电机在峰值工况运行时,考虑沸腾传热的情况下电机的温升特性更接近试验结果,在峰值工况研究电机的温升特性应该考虑冷却系统的两相流沸腾传热现象。

(2)在 0.7×10^5 Pa 及 0.9×10^5 Pa 大气压强下,在峰值工况下电机的温升特性随着冷却液进口温度的升高,电机绕组达到 150 °C 所用的时间减少。因此,在高原环境下为了电动汽车的行驶安全性,要尽量的降低冷却水的进口温度。

(3)在平原或者高海拔环境下,电机在峰值工况运行时的温度增长速率均随着冷却水进口水温的增大而增大,而电机的温度随着大气压强的降低而下降,即电机由于冷却水的相变两相流沸腾传热现象,在高海拔地区运行时的温升特性比平原地区更好。

参考文献:

[1] 李德龙. 高原型气候对电气设备的影响 [J]. 青海大学学报(自然科学版), 2009, 27(4): 71-74.
LI Delong. Influence of plateau climate on electrical equipment [J]. Journal of Qinghai University(Natural Science), 2009, 27(4): 71-74.

[2] 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): 34-39.
DU Aimin, ZHANG Dongxu, SUN Mingming, et al. Research on temperature field of the permanent magnet synchronous motors for hybrid vehicles cooled by oil [J]. Automobile Technology, 2019(4): 34-39.

[3] HE Liange, SHI Wenjun. Temperature characteristics of vehicle motors under extreme variable working conditions [J]. Journal of Power Electronics, 2021, 21(2): 376-383.

[4] 李作文. 氟利昂自循环蒸发冷却发电机的工业性试运行 [J]. 中国电机工程学报, 1986(6): 29.
LI Zuowen. Industrial trial operation of freon self-circulation evaporative cooling generator [J]. Proceedings of the CSEE, 1986(6): 29.

[5] 刘慧军, 陈芬放, 黄瑞, 等. 车用驱动电机冷却系统仿真研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(7): 2002-2012.
LIU Huijun, CHEN Fenfang, HUANG Rui, et al. Simulation study on cooling system of automotive driving motor [J]. Journal of Central South University

- (Science and Technology), 2020, 51(7): 2002-2012.
- [6] 丁树业, 葛云中, 孙兆琼, 等. 高海拔用风力发电机流体场与温度场的计算分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 74-79.
- DING Shuye, GE Yunzhong, SUN Zhaoqiong, et al. Calculation and analysis of fluid field and temperature field for high-altitude type doubly-fed wind generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 74-79.
- [7] 张琦, 李增亮, 刘延鑫, 等. 充油式水下异步电机冷却系统多场耦合分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2867-2877.
- ZHANG Qi, LI Zengliang, LIU Yanxin, et al. Multi-field coupling analysis method of oil-filled underwater induction motor cooling system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2867-2877.
- [8] ZHANG Bin, QU Ronghai, FAN Xinggang, et al. Thermal and mechanical optimization of water jacket of permanent magnet synchronous machines for EV application [C] // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1329-1335.
- [9] 董非, 苑天林, 武志伟, 等. 基于 RPI 模型的内燃机冷却水腔内数值模拟研究 [J]. 化工学报, 2019, 70(增刊 2): 250-257.
- DONG Fei, YUAN Tianlin, WU Zhiwei, et al. Numerical study of engine water jackets using RPI model [J]. CIESC Journal, 2019, 70(S2): 250-257.
- [10] 丁树业, 朱敏, 江欣. 永磁同步电机三维全域温度场与温度应力耦合研究 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22(1): 53-60, 71.
- DING Shuye, ZHU Min, JIANG Xin. Coupling study of 3 D universal temperature field and temperature stress for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(1): 53-60, 71.
- [11] 刘雄, 熊飞, 朱林培, 等. 电动汽车驱动电机三维 CFD 热分析与温升测试研究 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(3): 83-89, 108.
- LIU Xiong, XIONG Fei, ZHU Linpei, et al. Three-dimensional CFD thermal analysis and temperature rise test of drive motor for electric vehicle [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(3): 83-89, 108.
- [12] 路玲, 王淑旺. 永磁同步电机全域温度场分析与水道优化设计 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(5): 52-57.
- LU Ling, WANG Shuwang. Analysis of 3D global temperature field of PMSM and design of flow channel optimization [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(5): 52-57.
- 何联格, 等. 考虑沸腾传热的车用永磁同步电机峰值工况温升特性研究 [J]. 内燃机工程, 2013, 34(3): 32-38.
- HE Liange, ZUO Zhengxing, XIANG Jianhua. Simulation study on cylinder head temperature field with consideration of two-phase flow boiling heat transfer [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(3): 32-38.
- [14] 邢鹏. 基于 RPI 模型的内燃机冷却水腔内数值模拟分析 [J]. 内燃机与配件, 2020(23): 62-63.
- XING Peng. Numerical simulation analysis of cooling water chamber of internal combustion engine based on RPI model [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(23): 62-63.
- [15] 雷冬旭, 白敏丽, 吕继组, 等. 内燃机鼻梁区内过冷沸腾两相流研究 [J]. 内燃机工程, 2016, 37(6): 176-181.
- LEI Dongxu, BAI Minli, LV Jizu, et al. Two-phase heat transfer study in the bridge zone of cylinder head about boiling supercooled [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(6): 176-181.
- [16] TORREGROSA A J, BROATCH A, OLMEDA P, et al. Experiments on subcooled flow boiling in I. C. engine-like conditions at low flow velocities [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 52: 347-354.
- [17] 韩立军, 刘建敏, 王普凯, 等. 模拟柴油机缸盖水道沸腾传热的实验研究 [J]. 汽车工程, 2018, 40(4): 417-422.
- HAN Lijun, LIU Jianmin, WANG Pukai, et al. An experimental study for simulating the boiling heat transfer of water-jacket in the cylinder head of a diesel engine [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(4): 417-422.
- [18] 何联格, 左正兴, 向建华. 气缸盖冷却水腔内两相流动沸腾传热仿真研究 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(1): 21-26.
- HE Liange, ZUO Zhengxing, XIANG Jianhua. Simulation of two-phase flow boiling heat transfer in cylinder head cooling water jacket [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(1): 21-26.
- [19] CHEN Erfeng, LI Yanzhong, CHENG Xianghua. CFD simulation of upward subcooled boiling flow of refrigerant-113 using the two-fluid model [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(11/12): 2508-2517.
- [20] 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(增刊 1): 22-29.
- WANG Xiaofei, DAI Ying, LUO Jian. 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.
- [21] 林明耀, 乐伟, 林克曼, 等. 轴向永磁电机热设计及其研究发展综述 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 1914-1929.
- LIN Mingyao, LE Wei, LIN Keman, et al. Overview on research and development of thermal design methods of axial flux permanent magnet machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 1914-1929.
- [22] 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): 620-628.
- [23] 代雅洁, 蓝益鹏. 可控励磁磁悬浮直线同步电机磁热耦合研究 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47(12): 54-59, 86.
- DAI Yajie, LAN Yipeng. Research on magnetic-thermal coupling of controllable excitation magnetic levitation linear synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(12): 54-59, 86.
- [24] 邵永, 刘赵森. 感应电机全域三维瞬态温度场分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 114-120.
- TAI Yong, LIU Zhaomiao. Analysis on three-dimensional transient temperature field of induction motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 114-120.

(编辑 荆树蓉 杜秀杰)