

电动汽车驱动电机绕组端部喷淋冷却温度场分析*

韩世琦¹, 安辉¹, 陆艳君², 胡玉勇¹, 尚华颖⁴, 邓文字³, 魏来¹, 齐丽君³, 安跃军¹

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳芯源微电子设备股份有限公司, 辽宁 沈阳 110168;

3. 沈阳中北通磁科技股份有限公司, 辽宁 沈阳 110159;

4. 辽宁省节能监察服务中心, 辽宁 沈阳 110083)

摘要: 电动汽车驱动用永磁同步电机(PMSM)具有功率密度高、质量轻、体积小、内部机构紧凑等特点。因此,电机内部散热压力较大,若不能及时有效地散热,会产生严重的温升问题,限制电机功率。针对PMSM绕组端部发热严重的问题,采用喷淋冷却的方式,通过将冷却介质离散化,分析了不同喷嘴、不同流量和不同喷淋位置下的冷却效果和流体运动情况。选择合理的喷淋形式与喷淋流量后,将喷淋冷却与水冷电机绕组端部的温度场进行比较。分析结果证明了喷淋冷却的有效性,为后续的电动汽车驱动电机的喷淋冷却研究提供了一定的参考。

关键词: 绕组端部; 喷淋冷却; 温度场; 离散相模型(DPM)

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)06-0052-07

doi: 10.12177/emca.2023.053

Temperature Field Analysis of Winding End Spray Cooling of Electric Vehicle Drive Motor*

HAN Shiqi¹, AN Hui¹, LU Yanjun², HU Yuyong¹, SHANG Huaying⁴, DENG Wenyu³,
WEI Lai¹, QI Lijun³, AN Yuejun¹

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. KINGSEMI Co., Ltd., Shenyang 110168, China;

3. Shenyang General Magnetic Co., Ltd., Shenyang 110159, China;

4. Liaoning Provincial Energy Conservation Supervision Service Center, Shenyang 110083, China)

Abstract: The permanent magnet synchronous motor (PMSM) for electric vehicle drive has the characteristics of high power density, light weight, small size and compact internal mechanism. Therefore, the internal heat dissipation pressure of the motor is high, if the heat is not dispersed effectively in time, it will cause a serious temperature rise problem and limit the power of the motor. Aiming at the serious heat problem at the PMSM winding end, the cooling effect and fluid movement are analyzed under different nozzles, different flow rates and different spray positions by using spray cooling method and discretizing the cooling medium. After selecting a reasonable spray form and a spray flow rate, the temperature fields of the winding end of the spray cooling and water cooling motor are compared. The analysis results prove the effectiveness of spray cooling and provide a reference for the future research on spray cooling of electric vehicle drive motor.

Key words: winding end; spray cooling; temperature field; discrete phase model (DPM)

收稿日期: 2023-01-15; 收到修改稿日期: 2023-02-28

* 基金项目: 辽宁省“揭榜挂帅”科技重大专项项目(2022JH1/10400038)

作者简介: 韩世琦(1996—),男,硕士研究生,研究方向为特种电机及其控制。

安跃军(1962—),男,教授,博导,研究方向为特种电机及其控制。

0 引言

电动汽车技术的快速发展对电机的设计提出了新的挑战,功率密度更高的电机的需求稳步增长。热管理是电机设计中的一个关键方面,有效的冷却结构已成为高性能电机的必需品^[1]。随着散热要求越来越高,机壳水冷已经达不到相应的冷却效果,电机发热最严重的绕组端部问题更为严峻。因此,文献[2]设计了一款新型冷却管道,放置在绕组端部上下层之间,对绕组端部最高温度点进行冷却,具有不错的效果。但这与机壳水冷一样,都属于间接冷却。通过冷却液与绕组的直接接触,可以更好地提升冷却效果。文献[3-4]证明了直接液体冷却是最有效的散热方法之一,该方法可以消除热量并有助于实现紧凑、高效和可靠的电机设计。直接冷却可以通过用冷却液浸没绕组端部或者对其进行喷淋冷却来实现。文献[5]提出了一种用于高转矩密度电机的定子浸油冷却解决方案,该方案通过在气隙内使用套筒来分离转子和定子空间。文献[6]提出了一种适用于 150 kW 永磁电机的半淹没式冷却解决方案。定子充满油以改善冷却效果,而转子可以保持干燥。这种定子浸油冷却方法需要在气隙处建立一个套筒来分离转子与定子,对定子铁心和绕组的冷却效果明显,但是需要单独考虑转子的冷却,而且增加了电机发生故障的概率。

许多年来,喷淋冷却作为一种十分有效的冷却技术,已经在许多行业得到研究和应用^[7]。21 世纪 10 年代初以来,电动汽车行业对喷淋冷却的研究有所增加。包括丰田、特斯拉、本田和博格华纳在内的制造商已经开发了各种不同种类的机油喷射冷却产品^[8]。与浸油冷却不同,喷油冷却不需要浸没电机的内部区域,从而消除了气隙中设置分离器套筒的限制。喷油冷却的简单性、有效性和可靠性使其非常适合应用到大规模生产的商业产品中,不会显著提高成本或系统复杂性。

虽然存在大量文献可以证明喷油冷却的有效性,但是在仿真计算方面,由于喷油冷却中冷却液运动状态的不确定性,一般只能使用等效热网络法来进行仿真计算。由于等效热网络法以集中参数法为依据,不能精确计算出热点的具体位置,然

而热点的出现才是限制电机温升限度的主要问题。因此,本文采用温度场流固耦合法,使用计算流体力学软件将喷淋的液滴离散化,并通过离散相模型(DPM)来模拟油滴在空气域中的运动状态,同时分析不同喷嘴、不同喷淋情况下,喷淋角度和冷却油流量对绕组端部温度的影响,为电动汽车驱动电机的喷淋冷却结构以及热分析提供参考。

1 喷淋冷却系统模型搭建

由于冷却液运动状态的不确定性,相比于计算机壳水冷电机的温度场与流速场,喷淋冷却的仿真要难得多。DPM 能模拟分散在空气中的粒子,包括液滴破裂与聚合,从而更加准确地模拟粒子行为。

1.1 喷淋冷却的数学模型

电机内部热量传递的主要形式为热传导,根据传热学基本原理,冷却系统内的热交换可用三维稳态导热微分方程表示^[9]:

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} \\ \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_c) \end{cases} \quad (1)$$

式中: K 为电机内介质的导热系数; K_x 、 K_y 、 K_z 分别为电机内介质在 x 、 y 、 z 方向上的导热系数; T 为物体温度; q 为热流密度; c 为比热容; ρ 为物体的密度; τ 为时间; n 为物体边界的法向量; α 为散热系数; T_c 为冷却介质温度。

冷却系统内流体的流动同时满足质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。由于冷却系统中冷却液的流速不快,可认为是不可压缩流体,相应的三维流体通用控制方程^[10]可表示为如下形式:

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{u} \varphi) = \operatorname{div}(\Gamma \cdot \operatorname{grad} \varphi) + S \quad (2)$$

式中: \mathbf{u} 为速度矢量; φ 为通用变量; Γ 为扩展系数; S 为源项。

通用控制方程的展开形式为

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u} \varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \mathbf{v} \varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \mathbf{w} \varphi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + S \quad (3)$$

式中： u 、 v 、 w 分别为速度在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

由于喷淋冷却中的冷却介质不在固定管道中流动，故流动状态为湍流状态，采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。其控制方程^[11]为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(u + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(u + \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中： G 为平均速度梯度引起的湍动能； σ_k 、 σ_ε 分别为湍动能、耗散率的有效湍流普朗特数的倒数； u_t 为湍流黏性系数； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数。

1.2 边界条件与基本假设

根据文献[12]可知，电机的温度最高点出现在绕组端部。因此，为了能准确地计算出绕组端部流速场的温升情况，并尽可能地捕捉到所有的粒子分布情况，本文对电机的绕组端部流体域进行观察，基本假设与边界条件如下。

(1) 认为冷却系统内各介质的物理特性参数不随温度变化。

(2) 根据油在不同温度下表现的不同黏度和电机的实际工作温度，选择 40 °C 的 BP 涡轮机油 2389 作为冷却介质，其冷却特性如表 1 所示。

表 1 冷却油物理特性

参数名称	参数值
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	950
比热容 $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1 860
导热系数 $/ (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.15
40 °C 时的黏度 $/ (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.012

(3) 绕组固体域与空气流体域的交界面设置 DPM 边界条件为 wall-jet，以捕捉冷却油，对绕组进行冷却。

(4) 考虑重力对冷却介质流动的影响。

2 绕组端部喷淋冷却分析

一般的喷淋装置通过位置固定的喷嘴将冷却介质均匀地喷淋在绕组端部，从而进行冷却。本

文所用的冷却介质是油，其的比热容比水小很多，吸收相同的热量，其的升温快得多，尤其是发热比较严重的绕组端部。本节选用平射喷嘴与锥形喷嘴两种喷嘴，分别以径向喷淋和轴向喷淋的方式进行冷却。考虑到不同类型的喷嘴覆盖的有效冷却面积不同，为了更好地观测不同喷嘴作用下冷却油的流动状态和其对绕组端部的冷却效果，各只选用一个冷却喷嘴。控制两种喷嘴的直径和冷却油的质量流量相同，并在电机 1/6 模型上进行计算。图 1 和图 2 为径向喷淋与轴向喷淋的位置示意图。



图 1 径向喷淋位置

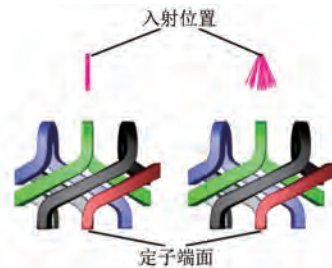


图 2 轴向喷淋位置

2.1 平射喷嘴的温度场与流速场分析

平射喷嘴通过将冷却液加至所需的压力，然后喷射出来，形成高压液流来进行冷却。平射喷嘴中射出单相的流体，径向喷淋与轴向喷淋时冷却油的温度与流速分布如图 3 和图 4 所示。

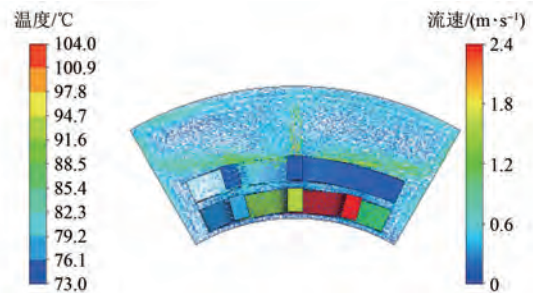


图 3 平射喷嘴径向喷淋的温度与流速分布

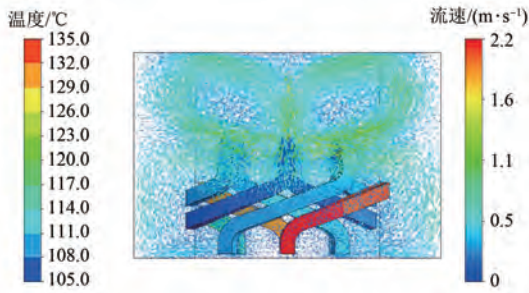


图4 平射喷嘴轴向喷淋的温度与流速分布

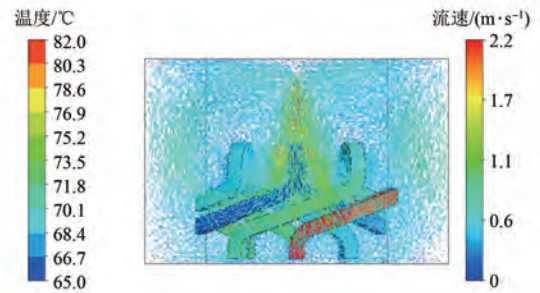


图6 锥形喷嘴轴向喷淋的温度与流速分布

从图3中可以看到,径向喷淋时,冷却油从喷嘴喷出后,与上层绕组进行激烈碰撞,液滴弹射到下层绕组进行冷却,接触点为最高点,冷却油在接触到发热绕组后会向低点流动进行散热。并且,因为绕组是斜向排布,冷却油经过上层绕组进行反射后,喷向左侧下层绕组,对右侧下层绕组基本没有冷却作用,所以有效冷却只存在于上层绕组和左侧下层绕组,温度最高点则出现在右侧下层绕组,最高温度达到 104 °C,而最低温度仅有 73 °C,温差明显。

从图4中可以看出,轴向喷淋时前侧的温度更低。轴向喷淋时由于绕组前端在同一平面,喷嘴直径较小且喷出直流液体,冷却油会产生液体反射,反射后的冷却油不会参与直接散热,散热面积小且热生成率高,导致最高温度为 135 °C,温度高于径向喷淋时的最高温度。

2.2 锥形喷嘴的温度场与流速场分析

相比于平射喷嘴,锥形喷嘴是人为地将入射角度打开,使油以雾状更加均匀地喷洒在发热绕组表面,使冷却效果更加均衡。但是冷却油实际出口处的尺寸较小,制造较复杂,该方法容易造成喷嘴堵塞,提高成本。图5和图6为锥形喷嘴径向喷淋和轴向喷淋时的温度与流速分布。

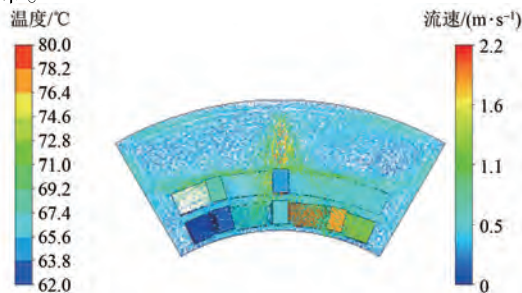


图5 锥形喷嘴径向喷淋的温度与流速分布

从图5和图6中可以看到,粒子分布密集的位置温度低,锥形喷嘴的温度分布与平射喷嘴的温度分布类似,径向喷淋的温度最高点在下层绕组,轴向喷淋的温度最高点在后方绕组。但由于使用锥形喷嘴,冷却液以更宽的角度入射,可以更均匀地喷洒在绕组表面,冷却效果更好,温度也更均匀。并且从图6中看到,一些冷却油绕过绕组前端,直接喷洒在密集的中心区域,增加了冷却油与发热绕组的直接接触面积,提升了冷却效果。径向喷淋的最高温度为 80 °C,轴向喷淋的最高温度为 82 °C。

2.3 喷角对冷却效果的影响

永磁电机绕组端部的喷淋系统一般安装在机壳或者端盖处。锥形喷嘴喷雾可覆盖的面积与喷嘴尖端到被喷物之间的距离和喷嘴的喷角有关。因此,保持喷嘴到绕组端部之间的距离不变,可以得到不同喷角下,绕组端部区域的温度最大值与最小值之间的温差曲线,如图7所示。

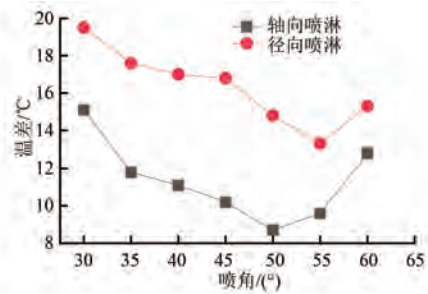


图7 喷角与温差之间的关系

从图7中可以看出,对于轴向喷淋和径向喷淋来说,随着喷角的增加,绕组端部的温差降低。轴向喷淋时,喷角增加到 50° 之后,温差开始增大;径向喷淋时,喷角增加到 55° 之后,温差开始增大。因为电机绕组端部的径向厚度与轴向长度

不同,所以覆盖所有绕组端部所需要的喷角大小也不同。喷角小时,喷嘴喷出的冷却油无法直接覆盖所有的发热导体,导致没有被直接喷淋到的位置的温度较高,与直接喷淋到的位置之间形成较大温差。

随着喷角的持续增大,冷却油可以覆盖全部的绕组端部,温差随之降低。当温差达到最低点之后,喷角继续增加,此时的喷雾覆盖面积已经大于电机绕组端部的面积。继续增大喷角,将有更多的冷却油直接喷淋在机壳内表面和端盖处,不参与绕组端部冷却。且流量固定时,喷角过大会导致边缘处的冷却油喷洒路径过远,流速不够,从而无法准确地喷淋在边缘处,温差会进一步增大。因此,对于锥形喷嘴,需要设计合理的数目与喷角,使冷却油可以直接喷淋在所有的绕组端部上。

2.4 冷却油流量对电机温升的影响

由于安装空间有限,对电动汽车驱动电机冷却泵的体积有限制。因此,冷却泵的功率不能太大,而冷却泵的体积与冷却液的流量直接相关。过大的流量带来过高的流速会对绕组表面的绝缘层造成不同程度的破坏,因此冷却油的质量流量不能太大。并且对于电机来说,温度最高点往往是制约绕组热安全性和影响电机功率密度的关键。

保持喷嘴的尺寸不变,改变冷却油的质量流量,可以得到绕组端部的最高温度随冷却油质量流量变化的关系曲线。图 8 为使用平射喷嘴时,冷却油的质量流量与绕组端部最高温度的关系曲线。从图 8 中可以看出,当质量流量小于 1.5 g/s 时,随着质量流量的增加,绕组的最高温度下降明显;但当质量流量继续增加后,最高温度的变化幅度降低,趋于平缓,此时继续增加质量流量,对绕组端部的冷却效果不明显,故需要增加绕组端部与冷却油的接触面积。

当流量很低时,喷嘴处冷却油的流速过低,轴

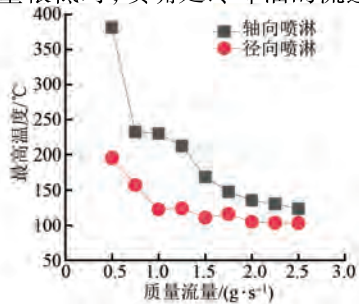


图 8 平射喷嘴质量流量与最高温度的关系

向喷淋可能无法直接喷淋到绕组表面,导致绕组端部平均温度过高。图 9 和图 10 为质量流量为 0.5 g/s 时径向喷淋和轴向喷淋下平射喷嘴的流速与温度分布图。

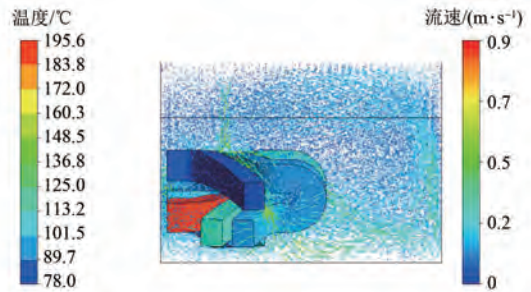


图 9 径向喷淋绕组端部温度与流速分布

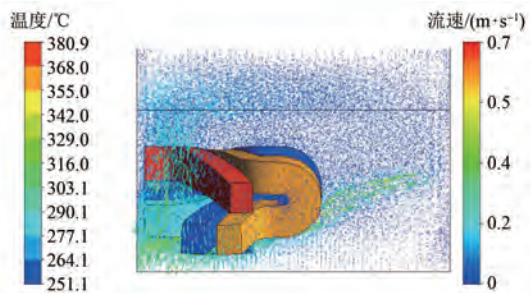


图 10 轴向喷淋绕组端部温度与流速分布

从图 9 中可以看出,虽然流量较小导致冷却油流速小,绕组端部温度高,但是大多数冷却油经喷嘴喷出后,依旧可以到达上层绕组并进行反射,对绕组端部进行冷却。但从图 10 中看出,当流量很小时,由于重力的原因,冷却油无法完全覆盖绕组端部表面,甚至只有少部分接触到绕组前端,更多的是从绕组下方直接流过,不接触发热绕组,从而无法进行有效冷却。

图 11 为使用锥形喷嘴进行喷淋冷却时,冷却油的质量流量与绕组端部最高温度的关系曲线。从图 11 中可以看出,采用锥形喷嘴后,不同质量流量下的绕组端部最高温度均低于使用平射喷嘴时的最高温度。因此,对于喷淋冷却来说,只单独增加流量,而不增加对流散热面积,即绕组端部与冷却油的有效接触面积,是无法达到目标效果的。实际应用中应使用多个喷嘴同时工作以确保冷却油可以均匀地喷淋在每根发热绕组上。

从图 11 中也可以看出,对于锥形喷嘴的轴向喷淋来说,存在冷却油无法喷淋到绕组端部

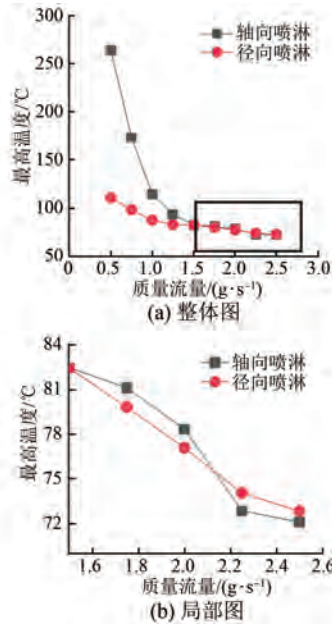


图 11 锥形喷嘴质量流量与最高温度的关系

的问题,但是因为选择的流量不够小,且锥形喷嘴采用圆形发散的喷淋方式,所以上半部分的冷却油可以落在绕组端部,从而对绕组进行冷却。随着流量的增加,轴向喷淋的冷却效果快速上升,当质量流量达到 1.5 g/s 时,即冷却油已经可以完全覆盖绕组端部时,绕组端部的最高温度低于径向喷淋时的最高温度。这是由于随着流量的持续增大,对于径向喷淋,未被绕组端部捕捉的部分冷却油最终到达端盖或者机壳内表面,并向下流到出口,从始至终不与绕组端部接触,不参与冷却。而对于轴向喷淋来说,流量的增大会使部分冷却油直接喷淋到定子表面,并顺着定子向下流,可能还会接触到另外的绕组,有助于散热。综上,当流量足够大时,轴向喷淋的冷却效果往往好于径向喷淋。

在实际工况中,冷却油的出口往往设置在绕组端部的下方机壳处,当油量过大时,在出口处可能会产生积液,对于径向喷淋的下方喷嘴来说,可能造成喷嘴处的回流或者压力不够,甚至造成喷嘴的堵塞,导致冷却油无法按照计划喷淋到绕组端部表面进行散热。

3 喷淋冷却效果分析

3.1 机壳水冷温度场分析

电机基本参数如表 2 所示。

表 2 电动汽车驱动电机基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	15	定子外径/mm	250
额定电压/V	220	定子内径/mm	150
极数	4	铁心长度/mm	180
槽数	24	气隙/mm	1
额定频率/Hz	50	最高效率/%	95

根据冷却水在机壳内部的不同流向,水道一般可以分为轴向“Z”字形和周向螺旋形两种。轴向“Z”字形水道中,冷却水流入水道后沿着平行分布的隔板在电机的轴向流动,进、出水口较容易设计在电机的同一端。周向螺旋形水道中,冷却水沿着机壳的圆周方向以螺旋前进的形式流动,与机壳接触面积大。

本文使用的水道为周向螺旋形水道,水流量为 100 g/s,结构如图 12 所示。图 13 为机壳水冷时绕组端部温度分布图,从图 13 中可以看到最高温度为 90 °C。

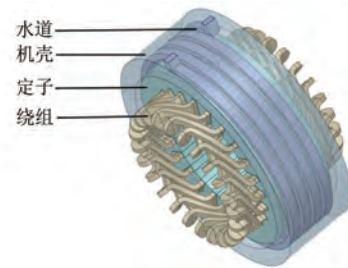


图 12 周向螺旋形水道

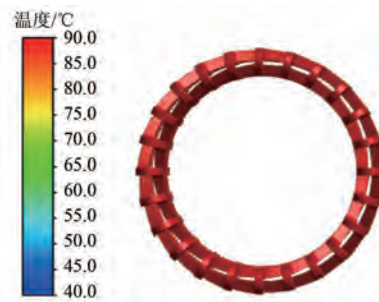


图 13 机壳水冷绕组端部温度分布

3.2 喷淋冷却温度场分析

由前文可知,对于本文研究的电机来说,轴向喷淋时的温差小于径向喷淋时的温差,温度更加均衡,并且考虑到实际安装的问题,对于电机绕组端部的全域模型,本文选择 8 个直径为 1 mm 的

锥形喷嘴,以 50°的喷角轴向喷淋,并且将质量流量保持在泵能输出的最大流量 2.5 g/s。图 14 和图 15 为喷淋冷却时电机绕组端部的流速场与温度场云图。

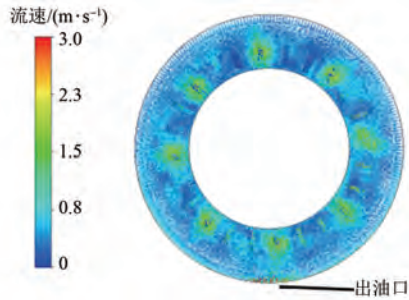


图 14 喷淋冷却时绕组端部流速分布

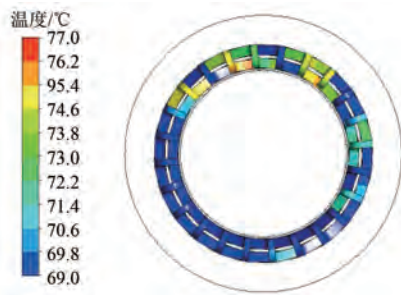


图 15 喷淋冷却时绕组端部温度分布

从图 14 中可以看到,8 个喷嘴呈中心对称,均匀分布在绕组端部处,同时对绕组端部进行喷淋。从图 15 中可以看到,电机下半部分的平均温度整体低于上半部分,由于重力的原因,冷却油会从上方往下流,通过下方出油口离开冷却区域,并且由于喷嘴按照规律均匀分布,下方的绕组不仅由本身负责其冷却的冷却油进行冷却,上方喷嘴喷淋后流下来的冷却油也会对下方绕组进行二次冷却,导致下方绕组平均温度低于上方绕组,最高温度为 77 °C。

4 结 语

本文应用 CFD 流固耦合的方法,通过将喷淋的冷却液滴离散化详细分析了绕组喷淋冷却的影响因素。并通过分析绕组端部的温度场和流速场分布以及不同喷嘴、不同喷淋方式对绕组端部温升的影响,得到以下结论。

(1) 喷淋冷却的冷却效果与喷嘴形式有关,平射喷嘴的冷却效果不如锥形喷嘴。

(2) 喷淋冷却效果与喷淋方向有关,电机端部轴向长度过长或者喷淋流量不大时,轴向喷淋无法完全覆盖电机端部,冷却效果比径向喷淋差,随着流量的增加,轴向喷淋的冷却效果通常优于径向喷淋。

(3) 对于锥形喷嘴,冷却效果与喷角的大小有关,喷角的选择需要考虑每个喷嘴负责的冷却面积。喷角过大或过小均会导致冷却效果变差。

(4) 冷却油流量的增加可以有效降低绕组端部温升,但随着流量持续增加,绕组端部温升逐渐降低,温度变化缓慢,趋于稳定,在实际工程中,需考虑过高流速对绕组表面绝缘层的损害。

(5) 对于电机发热最严重的绕组端部区域,喷淋冷却的冷却效果优于周向螺旋形机壳水冷。

【参 考 文 献】

- [1] POPESCU M, STATON D A, BOGLIETTI A, et al. Modern heat extraction systems for power traction machines—a review [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3) : 2167.
- [2] MADONNA V, WALKER A, GIANGRANDE P, et al. Improved thermal management and analysis for stator end-windings of electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2019, 66(7) : 5057.
- [3] PONOMAREV P, POLIKARPOVA M, PYRHONEN J. Thermal modeling of directly-oil-cooled permanent magnet synchronous machine [C] // 2012 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2012.
- [4] ROCCA A L. Thermal analysis of a high speed electrical machine [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2016.
- [5] 吴广. 高转矩密度电机极限工况下的热特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [6] ROCCA A L, XU Z, ARUMUGAM P, et al. Thermal management of a high speed permanent magnet machine for an aeroengine [C] // 2016 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016.
- [7] JAMBUNATHAN K, LAI E, MOSS M A, et al. A review of heat transfer data for single circular jet impingement [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1992, 13(2) : 106.

(下 转 第 65 页)

FSPMSM 为例,通过有限元分析软件对其三维模型进行温度场仿真、冷却系统分析,并与一台同功率等级的 PMSM 进行对比分析,得出以下结论。

(1) 在外加螺旋水冷冷却系统的条件下,当电机在稳定工作点运行时,FSPMSM 的温度由外向内递增,电机转子处散热条件最差,温度最高,应重点加强此处的温度监测。

(2) 通过对温度场进行仿真分析,证明本文设计的电机选用水道截面直径为 7 mm、水道圈数为 6 圈、25 °C 恒温冷却水的螺旋水道冷却系统最为合理有效。

(3) 通过两台电机的温度场仿真结果对比可知,FSPMSM 的最高温度比相同冷却条件、同功率等级的 PMSM 的最高温度降低了 17.16 °C,即 24.9%。仿真结果验证了采用 FSPMSM 可以解决真空干泵驱动环境下电机温升过高、散热困难的问题。

【参考文献】

- [1] 刘敏强. 真空仪器设备应用与发展[J]. 中国仪器仪表,2017(9): 21.
- [2] 姜燮昌. 适用于化工工业的真空泵[J]. 真空,2020,57(2): 1.
- [3] 苏玉萍,张明达,王壮. 我国真空行业获得产品质量状况分析[J]. 真空,2015,52(5): 21.
- [4] 邓文字,齐丽君,王光玉,等. 中国高端真空泵驱动电机及控制技术的现状和发展[J]. 电机与控制应用,2020,47(7): 1.
- [5] 曹建平. 耐腐蚀超洁净涡旋真空泵用屏蔽电动机设计研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [6] 黄鑫. 真空泵用经济性铁氧体永磁同步电机设计[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2019.
- [7] ZHAO J, YAN Y S, YAN B, et al. Influence of different rotor teeth shapes on the performance of flux switching permanent magnet machines used for electric vehicles[J]. Energies,2014,7(12): 8056.
- [8] 郭晋才. 磁通切换永磁电机的优化设计[D]. 北京:华北电力大学,2019.
- [9] 王培欣,花为,胡铭甄,等. 余弦削极转子磁通切换永磁电机设计与性能分析[J]. 中国电机工程学报,2022,42(22): 8372.
- [10] 李伟. 高速感应电机转子涡流损耗及其温升与电磁力研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.
- [11] 毕晓舜,安跃军,杨维国,等. 真空干泵用屏蔽电机温度场仿真分析与试验[J]. 电机与控制应用,2020,47(5): 64.
- [12] 安跃军,殷福久,王光玉,等. 真空泵屏蔽电动机温度场与屏蔽套应力场分析[J]. 沈阳工业大学学报,2016,38(2): 121.
- [13] 安跃军,张振厚,张强,等. 干式涡旋真空泵用特种电机温度场仿真与实验[J]. 电机与控制学报,2017,21(8): 48.
- [14] CHEN S J, ZHANG Q, HE B, et al. Thermal analysis of high density permanent magnet synchronous motor based on multi physical domain coupling simulation [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology,2017,12(1): 91.
- [15] CAO Z, LI W, LI J, et al. Research on the temperature field of High-Voltage high power line start permanent magnet synchronous machines with different rotor cage structure [J]. Energies, 2017, 10(11): 1829.
- [16] 魏永田,孟大伟,温佳斌. 电机内热交换[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [8] LIU C, CHONG Y C, MICHON M, et al. Model calibration of oil jet and oil spray cooling in electrical machines with hairpin windings [C] // 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2021.
- [9] 毕尧舜,安跃军,杨维国,等. 真空干泵用屏蔽电机温度场仿真分析与试验[J]. 电机与控制应用,2020,47(5): 64.
- [10] 黄国治,傅丰礼. 中小旋转电机设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [11] 佟文明,程雪斌. 高速水冷永磁电机冷却系统分析[J]. 电机与控制应用,2016,43(3): 16.
- [12] 韩雪秋,安跃军,安辉,等. 真空干泵驱动电机冷却效果分析[J]. 电机与控制应用,2021,48(6): 69.

(上接第 58 页)