

永磁发电机混合冷却系统设计与数值计算

王鸿鹄, 姚丙雷

[上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063]

摘要: 设计1台额定功率300 kW、额定转速2 700 r/min的永磁发电机,要求中心高不大于225 mm,则功率密度约是普通电机的6倍,电机的温升控制成为了亟待解决的问题。为了降低电机的温升,设计了水冷机座,通过有限元仿真计算,发现电机绕组端部温升仍然较高。为了进一步降低绕组端部温升,在原始水冷机座基础上增加了4条轴向通风道,并使冷却水能够对4条轴向通风道内的冷却气体进行冷却,电机端部温升计算值显著降低。为了验证这种混合冷却结构的可行性,制作了1台样机并进行型式试验,试验结果与设计值基本吻合,从而验证了设计的准确性和轴向通风道对端部绕组散热的有效性。

关键词: 永磁发电机; 混合冷却; 数值计算

中图分类号: TM 313 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)12-0070-06

doi: 10.12177/emca.2020.164

Design and Numerical Calculation of Hybrid Cooling System for Permanent Magnet Generator

WANG Honghu, YAO Binglei

[Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China]

Abstract: The aim of the research is to design a permanent magnet generator with rated power of 300 kW and rated speed of 2 700 r/min. For this generator, the center height should be no more than 225 mm, and the power density is about 6 times that of ordinary generator. Therefore, the temperature rise control of the generator has become an urgent issue. In order to reduce the temperature rise of the generator, the water cooling frame is designed. Through the finite element simulation calculation, it is found that the temperature rise at the end of the generator winding is still high. In order to further reduce the winding end temperature rise, four axial ventilation channels are added on the basis of the raw water cooler base, and the heat exchange between the cooling water and the cooling gas in the four axial ventilation channels is made possible. In this way, the calculated temperature rise of the generator end is significantly reduced. In order to verify the feasibility of the hybrid cooling structure, a prototype is made and type test is carried out. The test results are basically consistent with the design values, which verifies the accuracy of the design and the effectiveness of the axial ventilation channels for heat dissipation of the end windings.

Key words: permanent magnet generator; hybrid cooling; numerical calculation

0 引言

随着中国工业化水平的不断发展,系统集成设备的高效化、轻量化、高可靠性成为了主要的发展方向,对设备的驱动电机的安装空间和质量提出了更严格的要求,因此高功率密度电机已经成

为主要的发展方向。在高功率密度电机设计中,温升控制是高功率密度电机的设计难点之一,如果不能很好地控制温升,不仅电机的效率难以提升,而且会降低绝缘寿命和电机的可靠性。电机的温升设计综合了机械、电磁、流体等多个环节,为了保证电机温升设计的准确性,同时保证电机

收稿日期: 2020-08-31; 收到修改稿日期: 2020-10-22

作者简介: 王鸿鹄(1981—),男,高级工程师,研究方向为永磁电机、磁阻电机和异步电机关键技术与产品开发。

设计的高自由度,学者们通过有限元仿真进行电机的冷却系统设计和仿真研究,在不同冷却介质对电机温升的影响和计算方法^[1-5]、冷却水道系统的设计方法^[6-7]、电机内部气隙等结构对电机设计的影响^[8-9]等方面进行了详细研究与验证,为本文的电机温升设计奠定了基础。

本文针对一种特殊用途发电机进行散热系统设计,电机参数要求如表 1 所示。

表 1 电机参数要求

参数名称	参数值
额定功率/kW	300
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 700
中心高/mm	≤225
定子外径/mm	390
铁心长度/mm	245
气隙长度/mm	1.8
冷却水量/(m ³ ·h ⁻¹)	0.3~1.8
绝缘温升限值/K	105(F 级)
总质量/kg	≤450

在通用电机设计中,中心高 225 mm、额定转速 3 000 r/min 的电机的功率一般约为 45 kW,本文开发的电机功率密度约是普通电机的 6 倍,即在电机效率不变的情况下,发热量约是普通电机的 6 倍,而考核温升仍为 F 级(105 K),这就要求在设计电机时,一方面要保证电机的电磁性能,降低电机的损耗,减少热源;另一方面要提升电机本身的散热能力。由于电机的中心高和质量限制了电机的散热面积,高功率密度设计对电机的冷却系统设计提出极大的挑战。

为了有效降低电机温升,本文设计了电机水冷机座,通过有限元仿真计算,发现电机的端部绕组温度过高,绕组温升超过了 F 级绝缘的考核要求。为了加强端部绕组的散热效果,考虑对常用的定子绕组端部灌封^[10]进行设计优化。灌封技术将端部到机座的空气热传导部分升级为固体复合材料热传导,提高了传热效率,但这种方法长时间使用将存在开裂、脱落的风险,不利于电机的可靠性。最后,通过综合分析,采用增加轴向通风道的方法进行设计优化,实现电机绕组前后端部的冷却气体通过通风道相连接,冷却空气在通风道流动的过程中,通过冷却水对冷却空气进行冷却,对电机端部绕组起到更好的降温效果。

1 机座结构设计与优化模型

常用的水冷机座的结构大体可分为 2 种:轴向水路和周向水路^[6]。轴向水路优点是结构简单、可靠性高,缺点是电机温度沿周向分布不均,适用于长径比较大的电机;周向水路的优点是阻力最小,缺点是结构较为复杂,而且机座前后的温度分布不均,适用于长径比较小的电机。本文设计的电机产品应用场合对电机的可靠性要求很高,且电机的长径比较大,因此选用轴向水路结构,如图 1 所示。

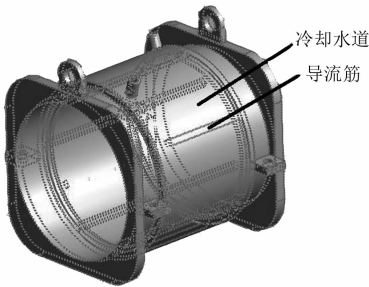


图 1 机座结构

为了提高电机绕组端部的冷却效果,在水冷机座基础上设计了一套独立风冷回路。为了打通机座前后空间,在机座前后两端设计了通风孔结构,并在机座水冷系统外侧设计了 4 条轴向风路。在电机运行过程中,通过电机转子的后置风扇的驱动作用,冷却空气将完成:转子风扇→定子绕组轴伸端喇叭口→机座轴伸端通风孔开口→机座轴向风路→机座非轴伸端通风孔开口→定子绕组非轴伸端喇叭口→气隙和转子通风孔→转子风扇的风路自循环,如图 2 所示。为了确保 4 根连通电机的前后端部空间的空气能够和机座内的冷却水有更加充分的接触,通风道的一侧与机座水路共面,管道中的空气与冷却水仅相隔一层水路外套。

新型机座的水冷系统和风冷系统各自独立工作,其中水冷系统为主要散热形式,主要解决定子铁心产生和传递热量的问题。而风冷系统为辅助散热形式,主要解决定子端部冷却效果不佳的问题,2 种冷却系统相辅相成,为发电机提供整体的冷却解决方案。优化后的发电机机座结构如图 3 所示。

为了预留出风路的进出口空间,在设计中缩

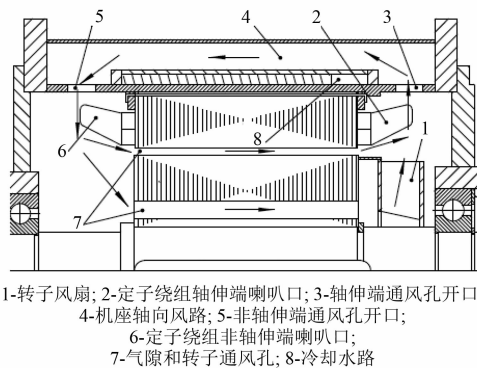


图2 冷却空气自循环路径

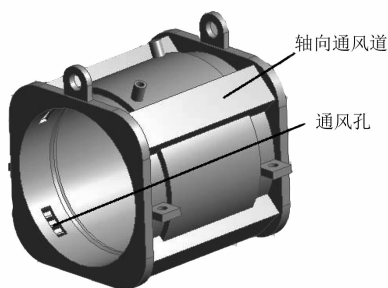


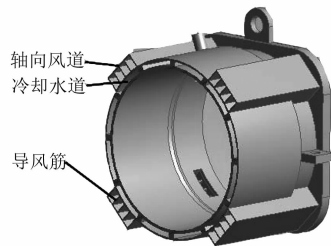
图3 优化后的发电机机座结构

短了水路轴向长度,水路长度完全覆盖铁心轴向长度,保证定子铁心和绕组通过热传导的散热能力。4根通风道均匀分布在机座水道外侧,位于机座端部挡板内侧,确保电机外形的规则性,有效利用了电机的空间。为了抑制风路中的冷却空气涡流,在每根轴向通风道内部设置了4根平行导风筋,贯穿风路前后。机座的水路和风路分布如图4所示。

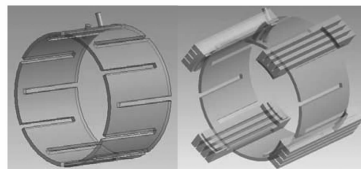
风路连通了轴伸端和非轴伸端的定子绕组端部空间,结合转子轭部通道和定转子间气隙,通过转子风扇驱动,实现电机内部空气的轴向循环。在循环过程中,冷却气体通过端部绕组、转子轭部、气隙,将其中产生的热量带入风路中,通过机座冷却水的热交换,给冷却气体降温。

2 电磁场、流体场与温度场的耦合

为了计算电机冷却系统的冷却效果,确保电机绕组的温升控制在 105 K 以内进行温度场的有限元计算。温度场中的热源由 2 部分产生,一部分是由电磁场产生的铜耗、铁耗、永磁体涡流损耗;另一部分是由轴承的机械摩擦产生,在热源确



(a) 机座径向截面图



(b) 水路 (c) 通风道及位置关系

图4 水路和风路分布图

定方面,本项目先通过给定电流和绕组电阻,计算电机的定子铜耗为 1 611 W,然后将电流值输入 Maxwell 进行了电磁场有限元仿真,6 ms 后达到稳定值,得到铁耗 1 638 W、永磁体涡流损耗 618 W。电机电磁场的铁耗和永磁体涡流损耗仿真曲线如图5所示。

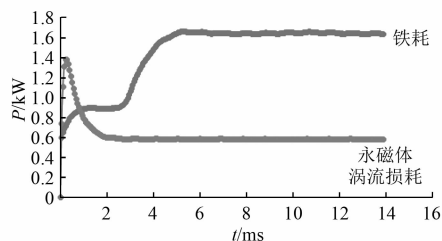


图5 损耗仿真曲线

2 个轴承摩擦损耗约为 76 W,计算式如下:

$$p_f = 1.05 \times M \cdot n \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

式中: p_f 为深沟球轴承的摩擦损耗; M 为轴承的摩擦力矩, $M = \frac{0.0015 \times P \cdot d}{2}$, P 为轴承负荷, d 为公称内径; n 为额定转速。

电机采用散嵌绕组,定子槽内包含铜、绕组绝缘、浸渍漆、层间绝缘、槽绝缘、空气和槽楔,结构复杂,建模计算量大,无法直接应用于工程设计中。为了简化计算,槽中采用实心导体,导体和铁心间采用了等效槽绝缘,其等效导热系数^[11]:

$$\lambda = 0.8 \sqrt{k_{ck}} \lambda_{jy} \quad (2)$$

式中: λ 为槽等效绝缘导热系数; k_{ck} 为槽空率; λ_{jy}

为槽绝缘导热系数。

在端部绕组温升等效计算模型中,用铜制圆环等效端部绕组,外部覆盖绝缘材料,采用了类似槽内绕组的绝缘等效方法,材料为等效槽绝缘。定子绕组端部导线的紧密度较低,导线间距较大,充分浸漆后,与槽内绕组相比,端部绕组相邻导线间的导热能力较差;在绝缘结构上,端部虽然无槽绝缘和层间绝缘,但增加了相间绝缘和端部绑扎带,与导线之间的间隙较大,浸漆后的效果约为槽绝缘厚度的 1.5~2 倍。综合考虑以上因素,设置端部绕组的等效表面绝缘厚度为等效槽绝缘的 2.5 倍。电机绕组采用的等效绝缘法,其材料参数和厚度在计算过程中添加,无需体现在建模中,因此简化模型,以提升计算效率。

电机的冷却介质为空气和水,电机零部件中与空气和水接触的部分,通过流体的对流换热将热量带走,即在计算温度场前需要进行流体场计算。计算中假设冷却水和空气不能压缩,转子转速为 2 700 rad/s,求解连续性方程和动量方程:

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

动量方程为

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (4)$$

式中: $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力张量,由 Boussinesq 假设, $\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$ 。

计算中采用 $k-\varepsilon$ RNG 模型。

最后根据电机的热源和对流换热系数计算结果,通过温度场有限元仿真计算,得出电机的温升。

3 冷却系统数值计算

为了便于比较,将原设计和优化后的结构和计算结果进行对比分析。无轴向风路结构绕组两侧端部附近的空气各自独立,结构上未连通,如图 6(a)所示。优化设计后,增加了轴向通风道,连通了前后端部空间,风路情况如图 6(b)所示。

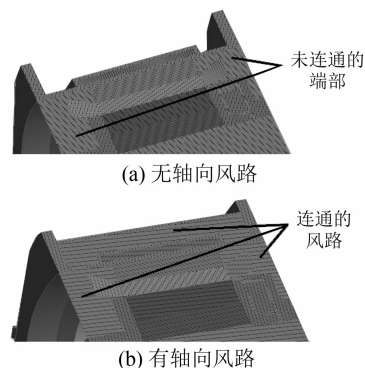


图 6 有无轴向风路对比

风路结构改变了电机内部空气循环方式,实现了轴伸端和非轴伸端的气体流动,而机座无风路结构中,轴伸端和非轴伸端仅通过转子通风道和气隙连同,很难构成气体通路的循环。在额定转速下,2 种结构的端部流体分布如图 7 所示。

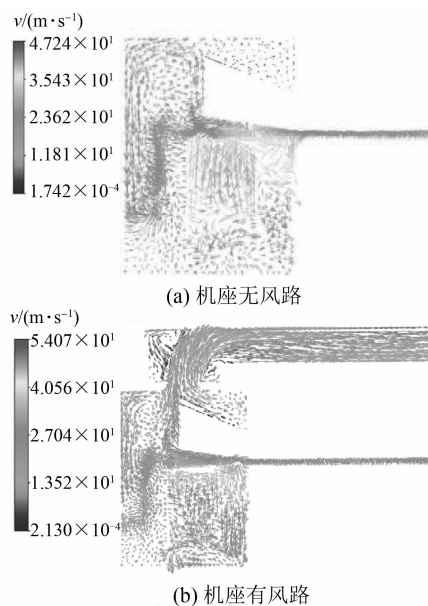


图 7 端部风路

可见轴向风路能够连接前后端部空气,明显改善电机的内循环,轴向风路平均风速约为 15.8 m/s,总风量约为 550 m³/h,而无轴向风路结构的绕组端部空气,仅能在一侧端部形成涡流。

电机转子轭中开设有轴向通风孔,与气隙一同构成了轴向风路的一部分,气隙和通风孔中的空气流动情况如图 8 所示。

通过计算气隙处流体的流速平均值约为

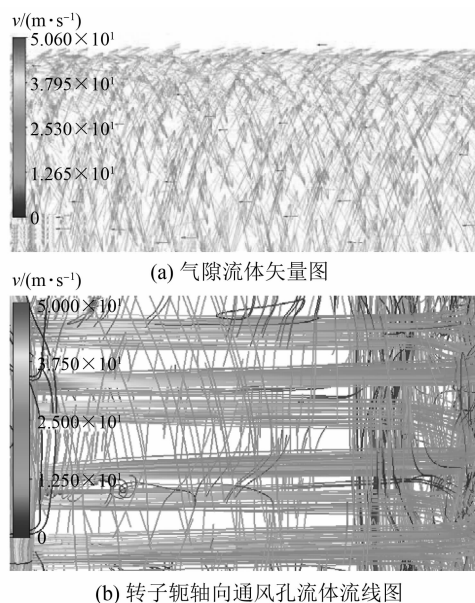


图8 转子轴向风路

42.5 m/s, 转子轭轴向通风孔的流体流速平均值约为 26.8 m/s, 转子轴向风路通畅。通过流体场仿真计算, 得到风路对流换热系数分布如图 9 所示。

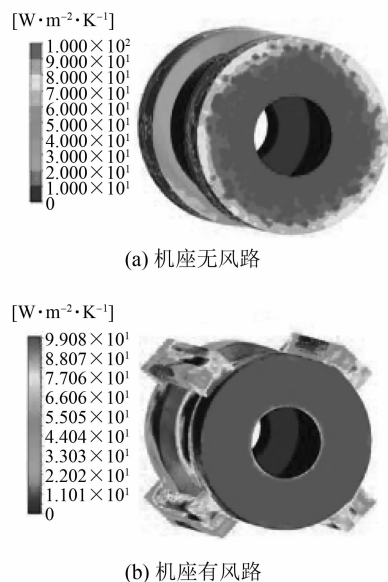


图9 风路对流换热系数分布

从图 9 可以看出, 与无轴向风路相比, 有轴向风路的机座风扇端的端部对流换热系数很大, 非风扇端的端部对流换热系数略小。

为了保证电机的可靠性, 冷却水量按照要求

的最低水量 $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 计算, 得到冷却水对流换热系数、温度和机座的温度分布如图 10 所示。

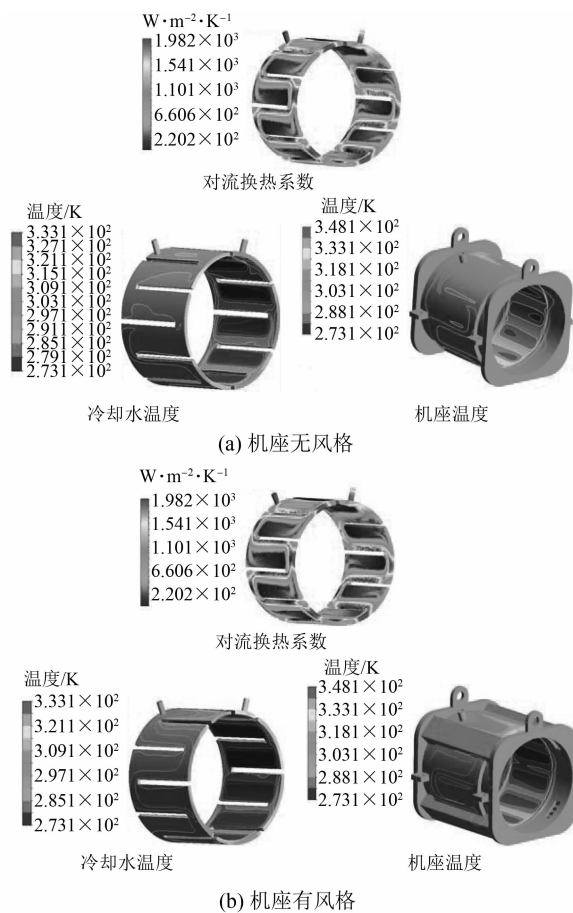


图10 冷却水和机座温度

从图 10 可以看出, 无轴向风路的结构定子铁心温度略低, 轴向风路提高了冷却水的温度, 削弱了冷却水对定子铁心的散热能力。经计算有轴向风路的出水口温度分别为 31.5°C , 无轴向风路的出水温度为 29.8°C 。为了便于观察电机端部温度分布, 取模型的轴向剖面, 电机端部绕组的温度分布如图 11 所示。

增加了定子机座轴向风路结构后, 绕组端部平均温升由 111.8 K 降至 104.1 K , 整个电机绕组的平均温升由 107.1 K 降至 102.6 K , 满足 F 级绝缘 (105 K) 的考核要求。

为了验证设计的准确性, 制作了 1 台样机, 样机冷却结构为优化后的带有轴向风路的混合冷却结构, 样机中心高 225 mm , 总质量 425 kg , 外形尺寸和质量符合设计要求。样机试制完成后对样机进行型式试验, 如图 12 所示。

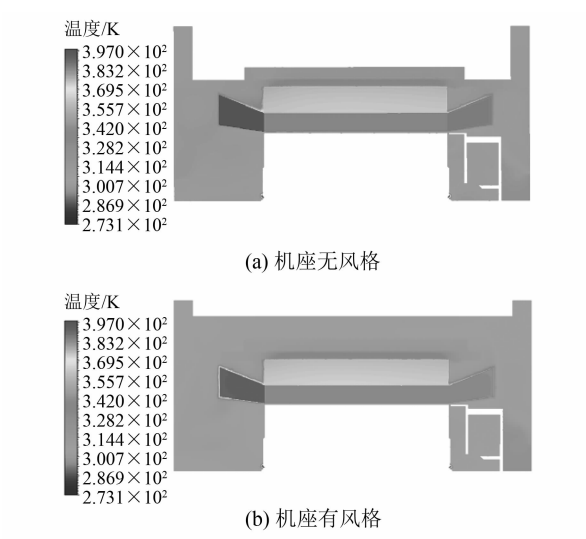


图 11 绕组端部温度

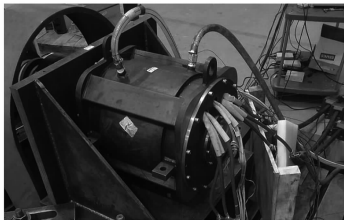


图 12 样机型式试验

优化前后的设计数据与试验数据对比如表 2 所示。

表 2 优化前后数据对比

参数	设计值		有风路 试验值
	无风路(原设计)	有风路(优化后)	
电枢绕组温升/K	107.1	102.6	104.2
机座温度/℃	31.8	32.6	31.3
进水温度/℃	23.0	23.0	23.0
出水温度/℃	29.8	31.5	31.0
环境温度/℃	20.0	20.0	22.0

从样机的试验数据可以看出,冷却系统的设计数据与试验数据基本吻合,验证了该设计的准确性,证明了轴向通风道结构能有效抑制电机端部的温升。

4 结 语

本文提出了一种适用于高功率密度电机端部绕组散热的混合冷却系统结构,即在水冷机座基

础上增加了连接端部空间的轴向风路,形成了电机内部空气的内循环,并在循环过程中使内循环空气能够通过机座与冷却水进行热交换,提升了电机端部绕组的冷却效果。

通过有限元法分别对优化前后的 2 种冷却结构进行了数值计算,对比了有无机座轴向通风道电机的温升,并试制了优化冷却系统后的样机,完成了样机的型式试验。试验结果验证了设计的准确性,证明了轴向风路对电机绕组端部具有良好的冷却效果。

【参 考 文 献】

[1] 程树康,李翠萍,柴凤. 不同冷却结构的微型电动车用感应电机三维稳态温度场分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(30): 82.

[2] SUN X, CHENG M. Thermal analysis and cooling system design of dual mechanical port machine for wind power application [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(5): 1724.

[3] 卓亮,赵飞,马立丽,等. 航空电机及控制器的温度场仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(7): 51.

[4] 李立毅,张江鹏,闫海媛,等. 高功率密度电机三维温度场计算及导热优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3642.

[5] 张晓晨,李伟力,邱洪波,等. 超高速永磁同步发电机的多复合结构电磁场及温度场计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(30): 85.

[6] 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.

[7] 谢增林. 炉用水冷密封电机冷却系统的设计与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2014.

[8] HOWEY D A, CHILDS P R N, HOLMES A S. Air-gap convection in rotating electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(3): 1367.

[9] 崔荆楷,程文杰,肖玲,等. 10 kW 超高速永磁电机三维瞬态温度场计算[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(2): 90.

[10] 王刚,李巧,詹忙秋,等. 低脉动无刷电机灌封材料及工艺研究[J]. 微电机, 2010, 46(6): 87.

[11] 吴尧辉,刘小梅. 小型电机绕组导热系数的研究[J]. 微电机, 2015, 48(4): 27.