

真空干泵用磁通切换永磁同步电机 温度场仿真分析*

张培一¹, 安辉¹, 胡玉勇¹, 魏来¹, 齐丽君², 邓文字², 安跃军¹

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳中北通磁科技股份有限公司, 辽宁 沈阳 110159)

摘要: 针对真空干泵驱动用电机在极端真空环境下工作时发热严重的问题, 以一台 4.5 kW 磁通切换永磁同步电机(FSPMSM)为研究对象, 分析了其冷却结构, 并进行了温度场仿真计算。通过有限元软件建立 FSPMSM 三维温度场仿真计算模型, 设定边界条件和热源激励, 得到电机内部各部件的温度分布情况, 并分析了水道截面直径、水道圈数对电机温度变化的影响。与一台技术要求相同的永磁同步电机(PMSM)在同等冷却条件下进行温度场对比分析, 结果表明本电机设计合理。相比于真空干泵常用的传统 PMSM, 本电机能更好地减少损耗并降低温升, 为开发真空干泵用 FSPMSM 新产品提供了一定的参考。

关键词: 磁通切换; 永磁同步电机(PMSM); 真空干泵; 温度场分析

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)06-0059-07

doi: 10.12177/emca.2023.062

Temperature Field Simulation Analysis of Flux Switching Permanent Magnet Synchronous Motor for Vacuum Dry Pump*

ZHANG Peiyi¹, AN Hui¹, HU Yuyong¹, WEI Lai¹, QI Lijun², DENG Wenyu², AN Yuejun¹

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

2. Shenyang General Magnetic Co., Ltd., Shenyang 110159, China)

Abstract: Aiming at the problem that the motor for vacuum dry pump drive is seriously heated when working in extreme vacuum environment, a 4.5 kW flux switching permanent magnet synchronous motor (FSPMSM) is taken as the research object to analyze its cooling structure, and the temperature field simulation calculation is carried out. The three-dimensional temperature field simulation calculation model of the FSPMSM is established by finite element software. The boundary conditions and heat source excitation are set to obtain the temperature distribution of each component inside the motor. The influence of the diameter of the water channel section and the number of water channel turns on the temperature change of the motor is analyzed. The temperature field comparison analysis with a permanent magnet synchronous motor (PMSM) with the same technical requirements under the same cooling conditions shows that the motor design is reasonable. Compared with the traditional PMSM commonly used in vacuum dry pump, this motor can better reduce the loss and reduce the temperature rise, which provides a certain reference for the development of new products of FSPMSM for vacuum dry pump.

Key words: flux switching; permanent magnet synchronous motor (PMSM); vacuum dry pump; temperature field analysis

收稿日期: 2023-02-15; 收到修改稿日期: 2023-03-10

* 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: 张培一(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机及其控制。

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

随着真空技术在芯片制造、航天航空、医疗器械以及半导体制造等领域^[1-2]的应用日渐广泛,各种行业对真空设备的要求日益严格。传统油式真空泵因存在泵油微粒会污染环境,且泵油微粒还会与其他物质反应而失去功效,进而影响真空泵的性能,其已经难以达到工业生产条件。

如今干式无油真空泵应用更为广泛。在真空环境下,热量不能以对流的形式传递到电机外面,真空干泵驱动用电机散热困难,真空干泵机组运行的稳定性受到影响,因此对电机的冷却结构进行研究分析具有一定实用意义。目前,真空干泵驱动用电机主要以永磁同步电机(PMSM)和异步电机为主^[3-6]。相比于异步电机,磁通切换永磁同步电机(FSPMSM)转子中不设置绕组,其损耗中没有转子绕组铜耗,因而电机效率得到改善;相比于PMSM,FSPMSM转子无永磁体,成本更低,耐高温性能更好,无高温失磁现象。综上,相较于传统真空干泵用电机,FSPMSM能更可靠地应用于真空环境。

本文设计了一台4.5 kW的真空干泵驱动用FSPMSM,采用余弦削角的方式对传统转子结构进行改进,进一步降低了转子损耗。通过机械软件建立机壳带有螺旋水道的电机三维模型,将由有限元分析软件获得的电机定子铁耗、转子铁耗、永磁体涡流损耗以及铜耗导入,充当热源。对定子铁心、转子铁心、定子绕组逐一分析,得到该电机各部位的温度分布情况。并分析了冷却水道截面直径、冷却水道圈数对电机温度变化的影响,确立了模型。最后与相同设计参数下的PMSM温度场进行对比分析,验证了本文设计的FSPMSM的优越性。

1 FSPMSM 模型及温度场分析

1.1 FSPMSM 结构模型

对于传统真空干泵用电机来说,电机转子散热问题严峻,因此降低转子损耗对机组的稳定可靠运行具有重要作用。FSPMSM转子结构的优化^[7-8]对电机性能有显著影响。本文采用余弦削角极转子^[9],该方法可以有效减小电机转矩脉动,降

低谐波损耗,从而降低电机转子损耗。

1.1.1 FSPMSM 结构

本文设计了一台4.5 kW、6 000 r/min的三相12/10极FSPMSM,其基本结构拓扑如图1所示,其转子上既无绕组也无永磁体,定子由12块永磁体和U型铁心拼装组成,永磁体为切向充磁,且相邻永磁体充磁方向相反。图2为电机三维模型。

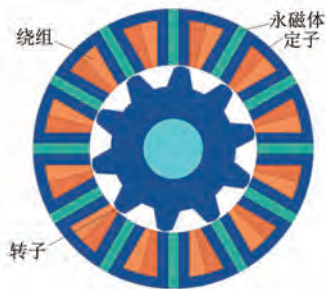


图1 FSPMSM 结构拓扑图

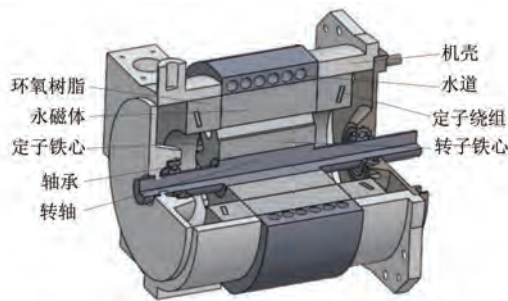


图2 FSPMSM 三维模型

1.1.2 FSPMSM 设计参数

根据给定的电机功率转速要求,并结合永磁电机设计经验与有限元软件计算,确定了本文研究的FSPMSM的最终设计尺寸,其中定子永磁型电机尺寸计算公式为

$$D_{so}^2 l_a = \frac{P_2}{\frac{\sqrt{2}\pi^3 N_r}{120 N_s} K_d K_s K_{sio}^2 A_s B_{gmax} n c_s \eta} \quad (1)$$

式中: D_{so} 为定子外径; l_a 为转子铁心长度; P_2 为输出功率; N_s 和 N_r 分别为定、转子极对数; K_d 为漏磁系数; K_s 为转子斜槽系数; $K_{sio} = D_{si}/D_{so}$ 为定、转子外径比,其中 D_{si} 为转子外径; A_s 为线负荷; B_{gmax} 为气隙磁密峰值; c_s 为极弧系数; η 为电机效率; n 为电机转速。

电机部分设计参数如表1所示。

表1 FSPMSM 部分设计参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	4.5
转速/(r·min ⁻¹)	6 000
定子外径/mm	105
定子内径/mm	62
轴长/mm	61
气隙长度/mm	0.5
永磁体厚度/mm	4
转子齿宽/mm	4
定子齿宽/mm	4

1.2 电机散热理论

本文设计的 FSPMSM 转子运行时处于高度真空条件,因此热量几乎不以对流的方式进行传递,主要以热辐射的方式散去,根据热力学定律,电机的传热公式^[10-11]为

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} \big|_{S_1} = 0 \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} \big|_{S_2} = \alpha(T - T_e) \end{cases} \quad (2)$$

式中: q 为热源密度; T 为电机温度; c 为比热容; γ 为密度; τ 为时间; S_1 为电机绝缘散热面; S_2 为电机散热边界面; T_e 为 S_2 周围介质的温度; α 为 S_2 的散热系数; K 为 S_1 和 S_2 的法向导热系数。

式(2)中第一项右端等于零,说明温度收敛趋于稳定。式(2)即为电机三维稳态温度场的数学模型^[12]。

1.3 FSPMSM 温度场设置

1.3.1 热源激励设置

通过有限元法对 FSPMSM 进行计算,可以得到电机定、转子铁耗以及涡流损耗的曲线图,如图3~图5所示,其中电机定子铁耗为 82.47 W,转子铁耗为 35.42 W,永磁体涡流损耗为 86.31 W。由

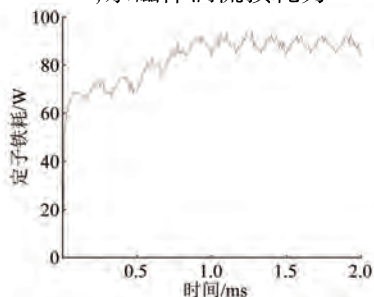


图3 FSPMSM 定子铁耗

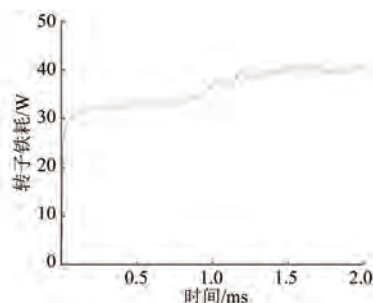


图4 FSPMSM 转子铁耗

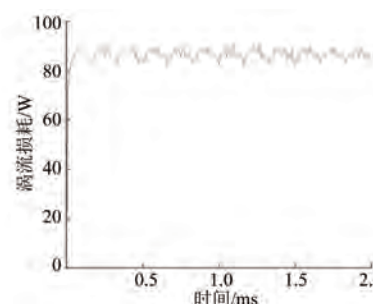


图5 FSPMSM 涡流损耗

于永磁体位于 FSPMSM 定子上,气隙磁场的基波分量和高次谐波分量均会切割永磁体,因此该电机的涡流损耗较大。

本文采用公式法计算电机定子铜耗,电机的定子铜耗可表示为

$$P_{ac} = P_{dc} + P_{ad} \quad (3)$$

式中: P_{ac} 为交流损耗; P_{dc} 为直流损耗; P_{ad} 为附加损耗。

直流损耗计算公式为

$$P_{dc} = mI^2 R_s \quad (4)$$

式中: m 为绕组相数; I 为相电流有效值; R_s 为定子绕组直流电阻。

附加损耗计算公式为

$$P_{ad} = P_{dc}(k_d - 1) \quad (5)$$

式中: k_d 为平均电阻系数。

电机绕组相电阻计算表达式为

$$R = \frac{2\rho_c L N_{ph}}{a_1 S_d N_1} \quad (6)$$

式中: ρ_c 为 50 ℃时的铜电阻率; N_{ph} 为绕组匝数; L 为线圈半匝长; a_1 为并联支路数; S_d 为导线截面积; N_1 为并绕根数。

通过公式法计算得到的定子绕组铜耗为 122.7 W。

将电机损耗与体积的比值作为热源值^[13-14],计算电机温度分布。本文研究的电机温度场计算材料主要包括铜、硅钢片、钕铁硼等,其折射率等材料属性如表 2 所示,额定运行时各关键部件热源参数如表 3 所示。

表 2 温度场部分材料属性

材料	密度/(kg·m ⁻³)	折射率	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
铜	8 900	0.03	385
硅钢片	7 800	0.15	420
钕铁硼	7 500	0.15	504
机壳	7 800	0.16	400

表 3 FSPMSM 内热源参数

部件	生热率/(W·m ⁻³)
定子铁心	4.98×10 ⁵
转子铁心	3.15×10 ⁵
永磁体	1.40×10 ⁶
定子绕组	1.07×10 ⁶

1.3.2 边界条件设置

本文研究的电机运行时转子处于高度真空环境下,主要散热方式为外加水冷散热,在电机机壳上设置螺旋形水道,水道内强制对流传热,将水冷系统的散热能力等效成水道传热系数,并假设水道内表面光滑,无摩擦阻力。根据传热学原理^[15]可得:

$$\begin{cases} Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \\ Nu = \frac{hd}{\lambda} \\ Pr = \frac{v}{u} \\ a = \frac{\lambda}{\rho c} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Nu 为努塞尔数; Pr 为普朗特数; Re 为雷诺数; h 为水道传热系数; d 为水道直径; v 为运动黏度; ρ 为水的密度; a 为热扩散率; λ 为水的导热系数。

电机使用的冷却水部分参数如表 4 所示。

2 FSPMSM 温度场仿真

本文研究的电机利用浇注环氧树脂密封,以保证运行环境中的真空度。利用有限元软件得到

电机的整体温度分布和关键部件的温度分布,如图 6~图 9 所示。

表 4 冷却水部分参数

参数名称	参数值
努塞尔数	1
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.62
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	4 187
运动黏度/(m ² ·s ⁻¹)	8.125×10 ⁻⁷
普朗特数	5.521 67
流速/(m·s ⁻¹)	0.5
入水口温度/℃	25

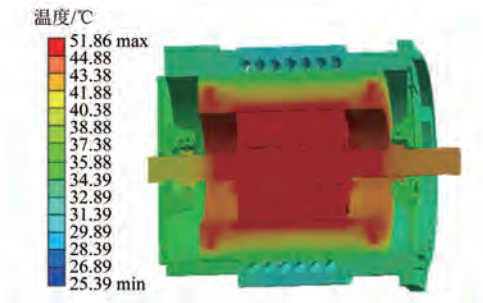


图 6 FSPMSM 整体温度分布云图

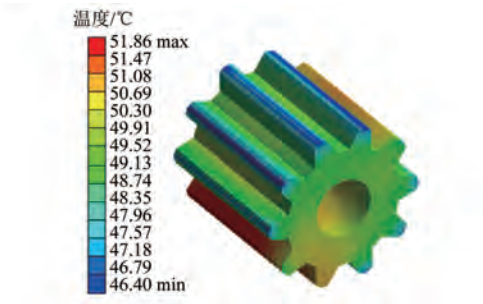


图 7 FSPMSM 转子铁心温度分布云图

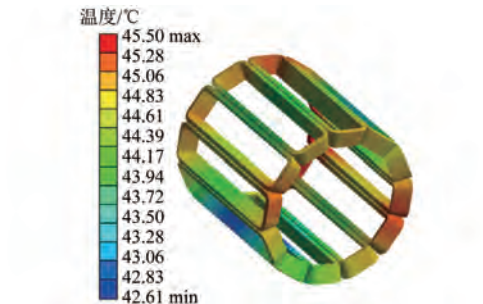


图 8 FSPMSM 定子绕组温度分布云图

由图 6 可知,最高温度处于电机转子处,这是

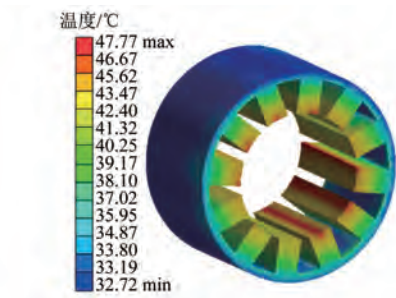


图9 FSPMSM 定子温度分布云图

因为在真空干泵机组运行中,该电机转子处在真空环境下,无法通过对流传递热量,造成散热困难,导致转子温升大。温度最高达到 51.86°C ,但与其他部件相比并没有高出太多,仍在合理范围内。

3 水冷系统对电机温度的影响

根据牛顿冷却定理^[16]可得:

$$Q = \beta S(T_1 - T_0) \quad (8)$$

式中: Q 为传热量; β 为传热系数; S 为传热面积; T_1 为壁面温度; T_0 为水温。

3.1 冷却水道圈数对电机温度的影响

保持电机机壳的水道截面直径和冷却水流量不变,仅改变水道螺旋圈数,电机关键部件温度变化如图 10 所示。

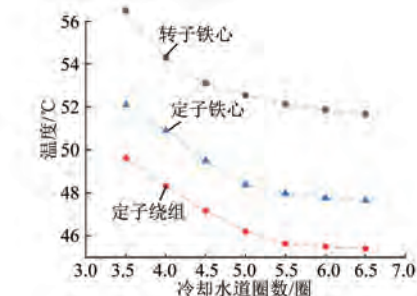


图10 冷却水道圈数对电机部件温度的影响

由图 10 可见,随着水道圈数的增加,电机各部件温度均在下降,6 圈之后温度几乎保持不变,因为冷却水带走的热量是一定的,第 6 圈时已经达到饱和状态。水道圈数与水泵功率是匹配的,水道圈数增加,水泵功率也会上升。综合考虑水泵功率及电机散热情况,冷却水道圈数选择 6 圈较为合适。

3.2 冷却水道截面直径对电机温度的影响

保持电机机壳的水道螺旋圈数和冷却水流量

不变,改变冷却水道截面直径会直接影响冷却水道的传热量,仿真结果如图 11 所示。

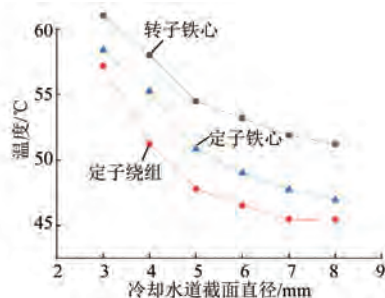


图11 冷却水道截面直径对电机部件温度的影响

由图 11 可知,水道截面直径变化范围在 3~6 mm 时电机温度差异较大,随着直径的增长,温度急剧下降。7 mm 之后电机温度几乎不发生变化,这是由于此时冷却水覆盖的冷却部分几乎不再发生变化,冷却水带走的热量在水道宽 7 mm 时已经接近饱和状态。结合工艺与经济性,冷却水道截面直径为 7 mm 较为合适。

综上,本文设计的电机选用如图 12 所示的水道截面直径为 7 mm、水道圈数为 6 圈的螺旋水道冷却系统。



图12 螺旋冷却水道

4 温度场对比仿真分析

为了验证 FSPMSM 应用于真空驱动场合的优越性,本节设计了一台与本文电机性能要求、功率尺寸相同的 PMSM。该电机的二维结构如图 13 所示,三维结构如图 14 所示,主要设计参数如表 5 所示。

为了确保该台 PMSM 温度场仿真结果与本文设计的 FSPMSM 温度场仿真结果对比的合理性,两台电机使用相同的冷却条件、温度场求解条件及温度场计算材料。其热源参数如表 6 所示。

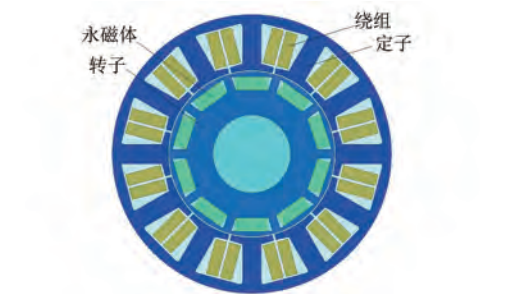


图 13 PMSM 结构拓扑图

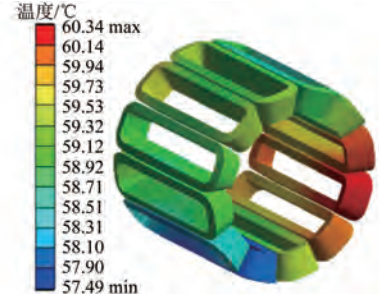


图 16 PMSM 定子绕组温度分布云图

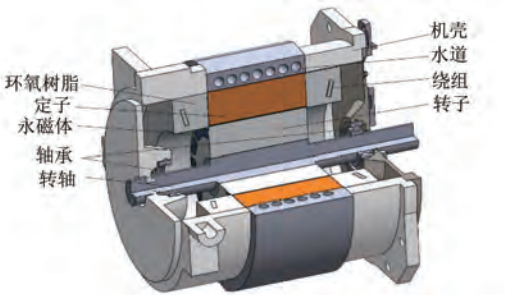


图 14 PMSM 三维模型

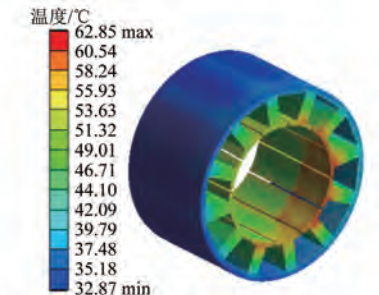


图 17 PMSM 定子铁心温度分布云图

表 5 PMSM 主要设计参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	4.5
转速/(r·min ⁻¹)	6 000
定子外径/mm	105
气隙长度/mm	0.5
轴长/mm	61

表 6 PMSM 内热源参数

部件	生热率/(W·m ⁻³)
定子铁心	6.27×10 ⁵
转子铁心	1.95×10 ⁵
永磁体	1.95×10 ⁶
定子绕组	1.37×10 ⁶

利用有限元软件对该 PMSM 进行温度场仿真,得到部分关键部件温度分布云图如图 15~图 17 所示。

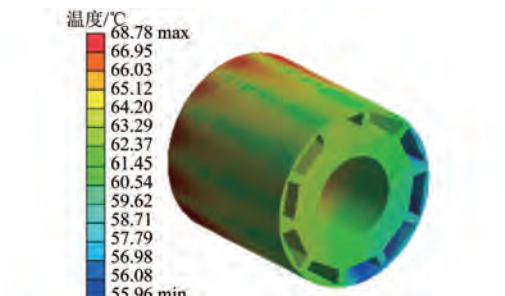


图 15 PMSM 转子铁心温度分布云图

由图 15~图 17 可知,PMSM 在转子处温度最高,达到 69.02 ℃,高于 FSPMSM 转子最高温度 51.86 ℃。这是由于 FSPMSM 转子上没有永磁体,所以在电机额定运行时,其转子损耗更小,当两者处于相同的冷却条件时,FSPMSM 转子温度更低,两者各部件最高温度对比如图 18 所示。

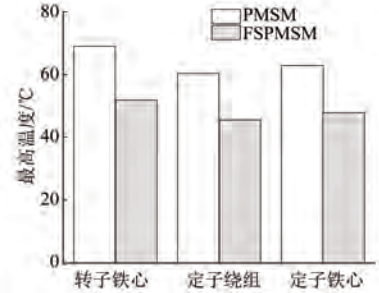


图 18 两台电机关键部件最高温度对比图

图 18 将 FSPMSM 和 PMSM 各关键部件在额定运行时的最高温度进行了直观对比,通过对比发现,FSPMSM 各关键部位最高温度均比 PMSM 低超过 20%,因此应用 FSPMSM 驱动真空设备可以有效地解决极端真空环境下发热严重的问题。

5 结 语

本文以一台 4.5 kW 真空干泵驱动用

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 ℃ 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 ℃,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, 胡铭颀, 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.

(上接第 58 页)

- [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] 毕尧瞬, 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.