

真空泵用定子永磁型与转子永磁型电机 热性能对比^{*}

宿泽达¹, 安跃军¹, 安辉¹, 唐志英¹, 孔祥玲², 毕德龙²

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 中国科学院沈阳科学仪器股份有限公司 真空干泵事业部, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 针对真空泵用驱动电机在额定运行过程中转子热膨胀积累导致轴承抱死的工程问题, 根据实际真空泵驱动工况要求, 设计了1台磁通切换永磁同步电机(FSPMSM)。利用有限元软件, 分析对比了具有相同技术要求的FSPMSM, 表贴式永磁同步电机(SPMSM)和内置式永磁同步电机(IPMSM)的电磁场、温度场及热应力场。综合分析了上述3种电机的性能差异, 研究表明:FSPMSM的转子温升、轴承热形变等均优于2台转子永磁型电机。验证了FSPMSM相比于传统转子永磁型电机能更好地减小运行时的转子损耗与温升, 为永磁电机拓扑结构的选择和新产品研发提供了科学的参考依据。

关键词: 定子永磁型电机; 转子永磁型电机; 真空泵; 转子散热

中图分类号: TM 358 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)04-0058-07

doi: 10.12177/emca.2021.003

Comparison of Thermal Performance of Stator Permanent Magnet Motor and Rotor Permanent Magnet Motor for Vacuum Pumps^{*}

SU Zeda¹, AN Yuejun¹, AN Hui¹, TANG Zhiying¹, KONG Xiangling², BI Delong²

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

2. Vacuum Dry Pump Division, SKY Technology Development Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168, China)

Abstract: The drive motor for the vacuum pump has the engineering problem of the accumulation of thermal expansion of the rotor during the rated operation. According to the actual driving conditions of the vacuum pump, a flux switching stator permanent magnet synchronous motor (FSPMSM) is designed. The electromagnetic field, the temperature field and the thermal stress field of FSPMSM, surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) and interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) with the same technical requirements are compared and analyzed using finite element software. Comprehensive analysis of the performance differences of the three types of motors shows that the temperature rise and the thermal deformation of the FSPMSM are better than the rotor permanent magnet motor. It is verified that FSPMSM can better reduce the rotor loss and temperature rise during operation compared with the traditional rotor permanent magnet motor, which provides a scientific reference for the choice of topology of permanent magnet motor and the development of new products.

Key words: stator permanent magnet motor; rotor permanent magnet motor; vacuum pump; rotor heat dissipation

收稿日期: 2021-01-01; 收到修改稿日期: 2021-02-08

^{*} 基金项目: 国家科技重大专项项目(2017ZX02201005-002)

作者简介: 宿泽达(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机及其控制。

安跃军(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为特种电机及其控制。

0 引言

真空技术与人们的生活息息相关,从食品包装到航空航天均离不开真空技术^[1]。随着中美贸易战的持续发酵,芯片产业的重要程度愈发凸显。对于生产芯片所需的真空泵、真空泵驱动电机等真空获得设备的性能要求也越来越高。

在工业生产中,为了保证真空泵的真空度,常将驱动电机机壳与真空泵腔体直接相连,当真空泵工作到稳定状态时,腔体内部为真空状态,电机机壳内部也为极限真空状态。在此状态下,电机转子的热量无法通过热对流进行散热,只能通过热辐射和热传导来传递热量,散热效率较低,导致转子难以散热。大部分热量传递至转轴上的轴承内套,使内套温度高,但外套温度低,导致轴承塑性形变。不但产生振动和噪声,而且发生热膨胀导致轴承内部游隙过小,内部负荷过大,严重时会导致轴承磨损或抱死,威胁真空泵的稳定运行,因此真空泵用驱动电机需要尽可能减少转子上的损耗,降低转子温度。

目前,真空泵使用的驱动电机主要为感应电机^[2]和永磁同步电机(PMSM)^[3]。而针对这一工程问题,已经有学者开始寻找新的电机拓扑结构并已进行了一系列相关的研究工作。文献^[4-6]分别以永磁辅助式同步磁阻电机、同步磁阻电机、开关磁阻电机作为真空泵驱动电机展开研究,研究分析了各电机各部分的损耗及其稳态运行时的温度分布;文献^[7]采用拼装式结构解决电机下线难的问题,并能在一定程度降低电机温度;也有学者通过寻找更优冷却方式来降低电机温升来达到更好的散热效果,比如文献^[8]采用不同水道对真空泵用屏蔽电机进行冷却并对散热效果进行分析。

本文根据实际真空泵驱动工况要求,采用有限元法设计并优化了1台磁通切换永磁电机(FSPMSM),并设计了2台与其相同功率等级、定子外径、转子内径、转速的转子永磁型电机,一台是表贴式永磁同步电机(SPMSM),另一台是内置式永磁同步电机(IPMSM)。首先对3台电机的电磁性能进行了对比分析,并得到电机各部分损耗,确定了系统内热源激励,然后建立了3台电机的电机与机壳一体化三维模型,3台电机采用相

同的水冷结构,最后根据电机内部热交换及相关传热学理论,确定温度场边界条件,假设理想工况,通过温度场仿真得到电机内部的温度及热应力的分布情况,并对3台电机的热性能进行了对比与分析。

1 真空泵驱动电机模型

本文设计的FSPM采用12/10极结构^[9],定、转子均为双凸极结构,定子齿间嵌入永磁体作励磁用。同时,定转子采用削角的方式来减小转矩脉动和定转子铁耗^[10]。FSPMSM作为定子永磁式电机,永磁体和绕组位于定子上,因此可通过机壳水冷方式有效控制电机的转子和整体温升^[11],避免真空工况下转子温度过高导致转轴抱死的情况发生,可以保证真空泵机组的耐用性和可靠性。

为了更好地验证所设计的FSPMSM性能,同时设计了具有相同技术要求的SPMSM和IPMSM与之进行对比。图1~图3是3台电机的二维拓扑结构。

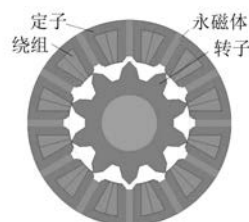


图1 FSPMSM 拓扑结构

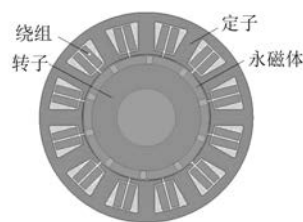


图2 SPMSM 拓扑结构

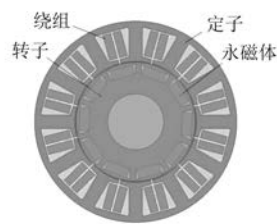


图3 IPMSM 拓扑结构

3 台电机定转子采用同型号的硅钢片叠压而成,永磁体选用磁性能优异的 N30UH。

3 台电机参数如表 1 所示。为了更好地对比电机性能,3 台电机技术要求相同。

表 1 3 台电机参数表			
参数名称	FSPMSM	SPMSM	IPMSM
额定功率/W	4 500	4 500	4 500
额定电压/V	180	180	180
转速/(r·min ⁻¹)	6 000	6 000	6 000
频率/Hz	1 000	500	500
定子外径/mm	105	105	105
气隙/mm	0.5	0.5	0.5
轴长/mm	61	61	61
定子极数	12	12	12
转子极数	10	10	10
永磁体厚度/mm	4	4	4

2 电磁性能对比

2.1 空载气隙磁密

永磁电机的空载气隙磁密波形影响着电机的空载反电动势和输出转矩。气隙磁密波形的优劣直接影响电机的性能^[12]。图 4 为 3 台电机的空载气隙磁密波形对比图。

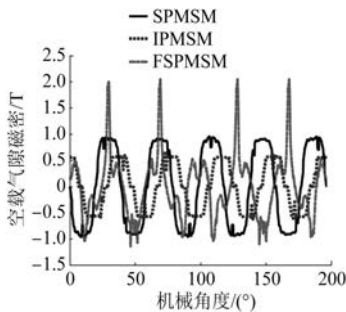


图 4 3 台电机空载气隙磁密波形对比图

因为 FSPMSM 的气隙磁密含有直流偏磁分量^[13],所以导致正弦度与转子永磁型电机相差较大。但是其峰值比 2 台转子永磁型电机更大,这是因为磁通切换定子永磁型电机采用了聚磁结构。

2.2 空载反电动势

永磁电机的空载反电动势是机电能量转换的关键^[14],图 5、图 6 分别为 3 台电机的空载反电动

势波形图和反电动势谐波分析图。

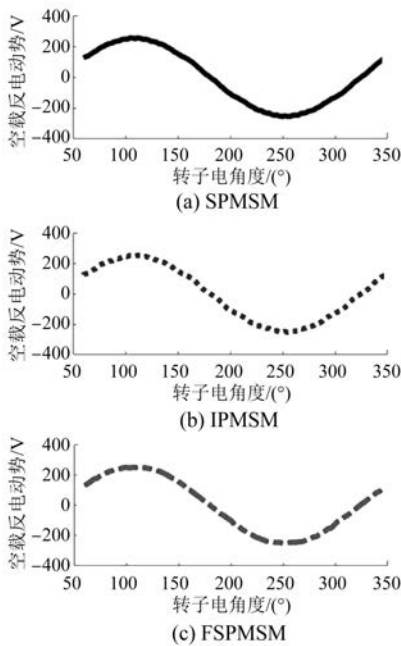


图 5 3 台电机空载反电动势波形图

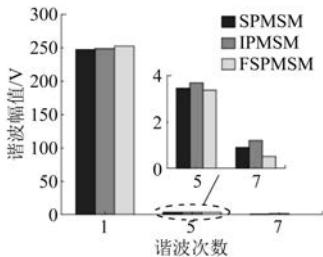


图 6 3 台电机空载反电动势谐波分析图

由图 6 可知,3 台电机的空载反电动势波形谐波幅值低,正弦度均较高。其中,磁通切换定子永磁型电机正弦度高是由于 12/10 极结构的 FSPMSM 具有绕组一致性和绕组互补性^[15],可以减少或抵消永磁磁链和反电动势波形中的高次谐波分量。

2.3 电机损耗

电机运行时的损耗是计算温度场时的热源,需要准确计算。对 3 台电机额定运行时的损耗进行计算,可知主要损耗为定子绕组铜耗、定转子铁心损耗、永磁体损耗。图 7 为 3 台电机的损耗对比图。

由图 7 可知,FSPMSM 转子上的总损耗比其他 2 台转子永磁型电机的转子总损耗小,说明

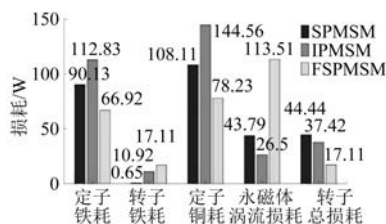


图7 3台电机损耗对比图

FSPMSM 比转子型永磁电机转子总损耗有下降,证明本文设计思想具有可行性。从图7还可知,与2台转子永磁型电机相比,FSPMSM 的定子铁耗更低,这是由于本文设计的磁通切换定子永磁型电机将永磁体嵌入定子中,并采用了定转子削角结构,使得 FSPMSM 定子体积比2台转子永磁型电机小,定子约为2台转子永磁型电机定子的89%。因此,产生的铁耗相对较少。另外,对比3台电机的总损耗可以发现,FSPMSM 的总损耗并不是最小的,一部分原因是其永磁体的涡流损耗要明显比2台转子永磁型电机的涡流损耗大。这是由于转子永磁型电机的永磁体是以同步速度随转子进行旋转,与旋转磁场基波不存在切割,只有高次谐波对永磁体有相对运动,会在永磁体上产生涡流损耗,但是高次谐波比基波含量小很多,因此产生的涡流损耗也很小。而 FSPMSM 的永磁体位于定子上,除了高次谐波会切割永磁体产生涡流损耗外,基波也会切割永磁体,产生涡流损耗,因此,相比之下,FSPMSM 的永磁体损耗更大。

3 温度场对比

3.1 温度场有限元基础

真空泵用驱动电机温度场热传导、热对流、热辐射问题可以描述为^[16]

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_1} = 0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_2} = \alpha(T - T_e) \\ Q_{i-j} = A_i F_{ij} \varepsilon (T_i^4 - T_j^4) \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_x 、 K_y 、 K_z 分别为电机各介质 x 、 y 、 z 方向的导热系数; T 为物体温度; q 为热源密度; c 为比热

容; γ 为密度; τ 为时间; K 为 S_1 和 S_2 面法向导热系数; S_1 为电动机绝热边界面; S_2 为电机的散热边界面; α 为 S_2 面的散热系数; T_e 为 S_2 周围介质的温度是时间函数; Q_{i-j} 是由平面 i 到平面 j 传递的热量; A_i 是平面 i 的面积; F_{ij} 为2个平面的角系数; ε 是平面的总发射率; T_i 、 T_j 分别为2个平面的温度。

3.2 温度场边界条件

为了简化计算过程,温度场模型的边界条件设置如下:定转子内各部件间为热传导边界,机壳表面无空气对流,设为自然散热面边界,温度场仿真的环境温度为 25 °C。

本文所研究的 4.5 kW 真空泵用驱动电机冷却方式采用水冷设计,即沿机壳圆周方向设置螺旋水道。该冷却方式属于管道内强制对流传热,将水冷系统的传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^[17]:

$$\begin{cases} Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \\ Nu = \frac{hl}{\lambda} \\ Pr = \frac{v}{a} \\ a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Nu 为努塞尔数; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; h 为水道传热系数; l 为水道直径; λ 为流体热导; v 为运动黏度; a 为热扩散率; ρ 为流体密度; c_p 为比热容。

3.3 温度场仿真结果分析

采用 ANSYS Workbench 进行三维温度场的计算仿真,在 SolidWorks 中绘制电机、机壳与水道,然后装配成完整的三维电机模型。FSPMSM 三维模型如图8所示。

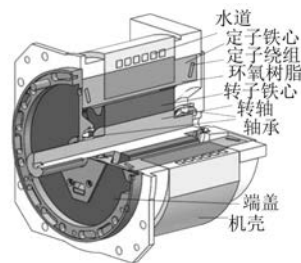


图8 FSPMSM 三维模型

本文研究的真空泵用驱动电机通过在定子绕组中浇筑环氧树脂来进行密封,以保证真空泵运行环境内的真空性和无泄漏性。将画好的三维电机模型导入 Workbench 中,电机各部分损耗与其体积之比作为温度场仿真中的热源赋给温度场计算模型,计算得到电机温度分布^[18-19]。图 9、图 10 分别为 SPMSM、IPMSM 和 FSPMSM 的转子与轴承温度分布图。

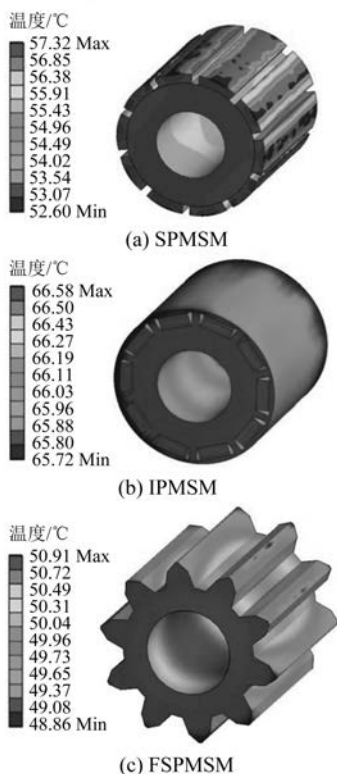


图 9 3 台电机转子温度分布图

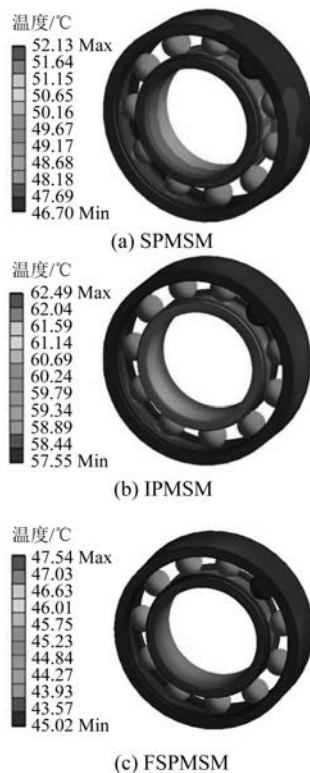


图 10 3 台电机轴承温度分布图

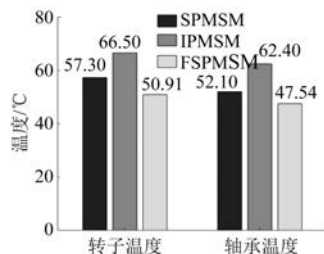


图 11 3 台电机转子、轴承最高温度对比图

3 台电机转子、轴承最高温度如图 11 所示。

从仿真结果可以发现,FSPMSM 的转子铁心最高温度和轴承最高温度比转子永磁型电机低,原因是 FSPMSM 转子上的总损耗比另外 2 台转子永磁型电机转子上的总损耗低。在相同冷却条件下,FSPMSM 的转子铁心产生的热量更少。在真空泵长时间运行工况中,FSPMSM 转子的温升更小,运行更安全。

4 三维热应力场仿真分析

4.1 热应力场有限元基础

当电机内各部件受温度影响时会产生热形变,而且各部件的形变量与温度变化量成正比。

当温度变化较大时,各部件会产生较大的热形变,可能在电机的薄弱部位发生结构问题^[20]。

根据热应力理论,通过将弹性力学中的胡克定律推广到热应力问题上,得到物体热应力的数学表达式^[21]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \beta t \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] + \beta t \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] + \beta t \end{cases} \quad (3)$$

式中: ε_x 、 ε_y 、 ε_z 为 x 、 y 、 z 方向上的应变; E 为物体

的弹性模量; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为 x 、 y 、 z 方向上的正应力; μ 为泊松比; β 为线性膨胀系数。

4.2 热应力场仿真结果分析

针对轴承内套温升高,易磨损的问题,对转轴上轴承的热形变进行了仿真分析,将温度场的仿真结果作为热应力场的载荷代入热应力场进行仿真^[22-23]。由于本文关注的是转轴上轴承的热形变,将研究重点为转轴上轴承部分的热应力场分布。图 12、图 13 所示分别为采用 3 台电机的转轴与轴承的热形变图和热应力图。表 2 为 3 台电机轴承内套、外套、滚珠的最大热形变和热应力对比表。

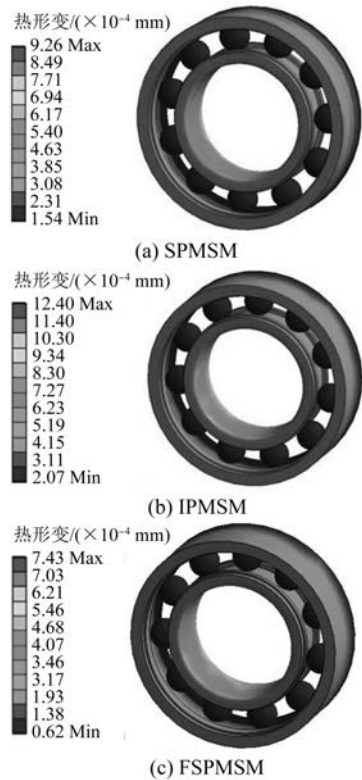


图 12 3 台电机轴承热形变分布对比图

表 2 3 台电机热形变与热应力对比表

参数名称	SPMSM	IPMSM	FSPMSM
轴承外套/mm	3.65×10^{-4}	5.37×10^{-4}	2.87×10^{-4}
轴承内套/mm	9.26×10^{-4}	1.24×10^{-3}	7.43×10^{-4}
滚珠/mm	7.49×10^{-4}	1.02×10^{-3}	6.07×10^{-4}
轴承外套/MPa	70.851	103.89	58.78
轴承内套/MPa	183.07	246.37	157.02
滚珠/MPa	133.72	187.21	112.13

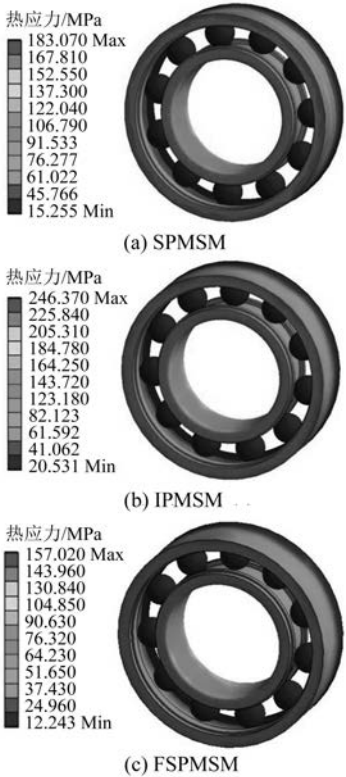


图 13 3 台电机轴承热应力分布对比图

通过仿真结果可以发现,3 台电机的轴承内套形变量均大于轴承外套,并且,与转子永磁型电机相比,FSPM 的热形变、热应力更小,在真空泵驱动电机额定运行工况下,使出现轴承抱死的危险情况得以降低。

5 结 语

FSPM 在真空泵用驱动电机领域具有良好的发展空间和巨大潜力。本文通过多物理场仿真的方法,采用有限元软件对所设计的 FSPMSM、SPMSM、IPMSM 的电磁场、温度场以及热应力场进行了仿真计算与对比分析,得出以下主要结论:

(1) 通过对比 3 台电机的电磁场和温度场仿真结果可知,FSPMSM 比转子永磁型电机转子温升更低,比同功率等级的 SPMSM 低了 6.41℃,即 11.18%;比 IPMSM 低了 15.67℃,即 23.50%。仿真结果验证了采用 FSPMSM 可以解决真空泵驱动环境下转子温升高,散热难的问题。

(2) 通过 3 台电机热应力场对比,可以发现 FSPMSM 的热形变比转子永磁型电机电机更小,

比同功率等级的 SPMSM 低了 1.83×10^{-4} mm, 即 19.7%; 比 IPMSM 低了 4.97×10^{-4} mm, 即 40%。仿真结果验证了采用 FSPM 作为真空泵驱动电机, 轴承的热形变更小, 减少了轴承抱死的风险。

【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] 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.
- [3] 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.
- [4] 姜利岗. 真空泵用永磁辅助式同步磁阻电动机设计与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [5] 杨天宇. 真空泵用同步磁阻电动机设计研发与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [6] 杨南. 超洁净涡旋真空干泵用开关磁阻电动机研究与热场分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- [7] 安跃军, 杨维国, 胡鑫, 等. 真空干泵用定子拼装式永磁电机性能分析与实验[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(3): 114.
- [8] 胡鑫, 安跃军, 杨维国, 等. 基于流固耦合方法的真空泵用屏蔽电机冷却系统分析[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(2): 80.
- [9] CHEN J T, ZHU Z Q. Comparison of all and alternate poles wound flux-switching PM machines having different stator and rotor pole numbers[C]// 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009.
- [10] ZHU X F, HUA W, CHENG M. Cogging torque minimization in flux-switching permanent magnet machines by tooth chamfering[C]// 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016.
- [11] 黄志文. 三相永磁开关磁链电机弱磁技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [12] 李争, 聂雅盟, 薛增涛, 等. 液质悬浮式三自由度电机电磁特性的计算分析[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(4): 44.
- [13] 陈明. 电动汽车用磁通切换永磁电机冷却系统设计与分析[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [14] 裴锋, 薛勇. 定子焊槽对永磁电机空载反电势的影响[J]. 微特电机, 2015, 43(6): 16.
- [15] 花为. 新型磁通切换型永磁电机的分析、设计与控制[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [16] 梁艳萍, 李伟, 王泽宇, 等. 高速感应电机转子涡流损耗的计算方法及影响因素[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(5): 42.
- [17] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [18] 安跃军, 张强, 李文瑞, 等. 新型移相式屏蔽电动机屏蔽套涡流与温升分析[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 50.
- [19] 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.
- [20] 谢颖, 辜承林. 笼型感应电动机三维全域温度场计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 96.
- [21] 王小飞, 代颖, 罗建, 等. 电动汽车牵引用水冷异步电机耦合场分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(4): 110.
- [22] 梁大伟. 大型水轮发电机定子温度与热应力的耦合计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
- [23] 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.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录, 请在来稿时向本刊声明, 本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部