

真空干泵用横向磁通开关磁阻电机对比分析*

王 跃¹, 安跃军¹, 安 辉¹, 孔祥玲², 毕德龙², 李立红¹

(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: 为了解决真空泵用电机工作在真空环境中, 转子不易散热的问题, 需要严格控制真空泵用电机的温升, 从而提高系统运行的稳定性。开关磁阻电机(SRM)转子无绕组, 转子损耗较小, 整体温升较低, 对于提升真空泵用驱动电机的性能具有重要意义。在传统 SRM 的基础上, 设计了一款真空泵用横向磁通 SRM, 由于定子绕组空间较大, 有利于电机散热, 进一步减少了定子的损耗, 从而降低了电机的整体温升。最后, 对同功率、同体积的异步电机、径向 SRM 和横向磁通 SRM 进行了温度场、轴承的热应力和热形变的对比分析。结果表明, 横向磁通 SRM 的温升、轴承的热应力和热形变均最小, 说明横向磁通 SRM 作为真空泵用驱动电机的可行性。

关键词: 横向磁通开关磁阻电机; 真空干泵; 温度场; 应力场

中图分类号: TM 358 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)05-0046-07

doi: 10.12177/emca.2021.002

Comparative Analysis of Transverse Flux Switched Reluctance Motor for Vacuum Dry Pump*

WANG Yue¹, AN Yuejun¹, AN Hui¹, KONG Xiangling², BI Delong², LI Lihong¹

(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: In order to solve the problem that the vacuum pump motor rotor is difficult to dissipate heat in a vacuum environment, it is necessary to strictly control the temperature rise of the vacuum pump motor to improve the stability of the system operation. The rotor of switched reluctance motor (SRM) has no windings, the rotor loss is small, and the overall temperature rise is low, which is of great significance to improve the performance of the drive motor for vacuum pumps. On the basis of the traditional SRM, a transverse flux SRM for vacuum pumps is designed. Due to the large space of stator winding, it is conducive to the heat dissipation of the motor, and further reduces the loss of the stator, thereby reducing the overall temperature rise of the motor. Finally, the temperature field, thermal stress and thermal deformation of the bearing of the induction motor, radial SRM and transverse flux SRM with the same power and volume are compared and analyzed. The results show that the temperature rise, thermal stress and thermal deformation of the bearing of the transverse flux SRM are minimum, which indicates the feasibility of the transverse flux SRM as the driving motor for vacuum pump.

Key words: transverse flux switched reluctance motor (SRM); vacuum dry pump; temperature field; stress field

收稿日期: 2021-01-05; 收到修改稿日期: 2021-02-04

* 基金项目: 国家科技重大专项项目(2017ZX2201005-002)

作者简介: 王 跃(1995—), 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

随着真空技术的不断发展,可靠性高、无污染、适用范围广的真空干泵广泛应用于对国民经济起着重要作用的多个领域,包括制药、化工、航空航天、薄膜和半导体等行业^[1-2]。真空干泵驱动电机的性能直接影响真空干泵的过载能力、振动噪声、极限真空度等性能指标^[3]。真空干泵驱动电机的转子处于真空状态,主要靠热辐射散热,散热效果较差,因此电机温升是衡量电机性能的重要指标,直接影响真空泵系统运行的稳定性^[4]。

传统真空泵的驱动电机主要为异步电机和永磁同步电机(PMSM)^[5],而异步电机的转子上有绕组,在电机实际运行时转子绕组发热会导致电机内部温度升高。由于电机气隙处于真空环境,热量无法通过对流方式传到电机外部,从而导致电机温度过高。文献[6]设计了一款PMSM作为真空泵的驱动电机,与异步电机相比,PMSM转子上只有永磁体没有绕组,因此不会产生绕组铜耗,但是PMSM在变频调速时的谐波会在永磁体内产生涡流损耗,涡流损耗产生的热量也会使转子温度升高,没有从根本上解决真空泵用驱动电机转子散热困难的问题。文献[7]设计了一款开关磁阻电机(SRM)作为真空泵的驱动电机,与异步电机相比,SRM转子无绕组,与PMSM相比,SRM转子上也没有永磁体,因此SRM的转子上只有很小的铁耗,有效解决了真空泵用驱动电机转子散热困难的问题。SRM更适合作为真空干泵的驱动电机,但该电机的功率密度有限^[8]。

本文在径向SRM的基础上,设计了一款真空干泵用横向磁通SRM,很好地解决了传统径向SRM电和磁相互制约的问题,实现了电和磁的解耦,可以提高电机的功率密度^[9-11]。与径向SRM相比,由于功率密度的提高,横向磁通SRM定子绕组空间较大,有利于电机的散热,电机整体温度更低^[12]。为了验证横向磁通SRM作为真空干泵用驱动电机的可行性,本文对同功率、同体积的异步电机、径向SRM和横向磁通SRM进行了温度场、轴承热应力和热形变的对比分析。

1 横向磁通SRM设计与电磁场分析

1.1 电机主要尺寸参数设计

横向磁通SRM因为双凸极结构,转矩脉动较大,所以需要合理优化其主要尺寸参数,减小其转矩脉动。其电磁转矩^[13]为

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{L_{\max}}{\beta_s} \left(1 - \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \right) \quad (1)$$

式中: i 为定子绕组电流; $L_{\max}$ 为最大电感,定转子齿完全对齐时电感最大; β_s 为定子极弧系数; $L_{\min}$ 为最小电感,定转子齿完全不对齐时电感最小。

由于最小电感 $L_{\min}$ 相对于最大电感 $L_{\max}$ 来说数值较小,则:

$$1 - \frac{L_{\min}}{L_{\max}} = K \quad (2)$$

式中: K 为常数。

故式(1)可简化为

$$T_e = \frac{1}{2} K i^2 \frac{L_{\max}}{\beta_s} \quad (3)$$

当电机定转子齿处于完全对齐位置时,最大电感 $L_{\max}$ 与电机尺寸参数的关系如下:

$$L_{\max} = \frac{N^2}{R_g} \quad (4)$$

式中: N 为定子绕组一相匝数; R_g 为定转子齿完全对齐位置的气隙磁阻。

当横向磁通SRM磁路线性非饱和时,定转子齿完全对齐位置的气隙磁阻^[14]为

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 L_{sp} D_{s1} \sin(\beta_s/2)} \quad (5)$$

式中: g 为气隙; μ_0 为真空磁导率; L_{sp} 为定子极身高; D_{s1} 为定子内径。

将式(5)代入式(3)可得横向磁通SRM电磁转矩与主要尺寸参数的关系:

$$T_e = \frac{\mu_0 N^2 L_{sp} D_{s1} \sin(\beta_s/2)}{\beta_s g} \quad (6)$$

综上所述,以电机输出转矩最大,转矩脉动最小为目标,对横向磁通SRM的尺寸参数进行优化选取。取电机的气隙、定子极身高、转子极身高、定子齿宽度、转子齿宽度、定子轭厚度和转子轭厚度等参数为变量进行优选^[15]。最终可得横向磁通SRM优选前后的主要参数,如表1

所示。

表 1 横向磁通 SRM 优选前后的主要参数

参数名称	优选前	优选后
额定功率/W	550	550
额定电压/V	330	330
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 500	1 500
相数	4	4
定、转子极数	8/6	8/6
冷却方式	水冷	水冷
定子外径/mm	120	120
定子内径/mm	75	77
转子外径/mm	74.0	76.5
转子内径/mm	35	35
定子极身高/mm	13	15
转子极身高/mm	13	15
定子齿宽度/mm	14	16
转子齿宽度/mm	15	18
定子轭厚度/mm	11	12
转子轭厚度/mm	11	13
气隙/mm	0.50	0.25
铁心长度/mm	65	65

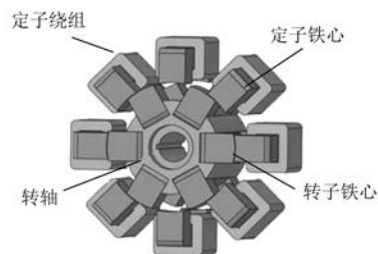
1.2 横向磁通 SRM 电磁场仿真

根据表 1 所列数据,利用三维有限元软件建立横向磁通 SRM 三维模型并进行有限元仿真。图 1 所示为横向磁通 SRM 三维模型、定转子齿非对齐位置磁密分布云图和定转子齿对齐位置磁密分布云图。

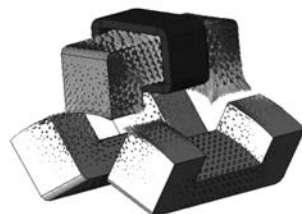
由图 1(b)、图 1(c)可知,横向磁通 SRM 的磁力线和定子绕组不在同一平面内,空间上互相垂直,符合横向磁通 SRM 电和磁互相解耦的特点。定转子齿处在非对齐位置时,磁阻最大,磁密最小,此时该相电感最小;定转子齿处在对齐位置时,磁阻最小,磁密最大,此时该相电感最大。

横向磁通 SRM 电磁转矩与电感变化率和电流有关^[16-17],由式(1)可知,电机的电磁转矩与电流的平方和电感随转子位置角的变化率成正比。图 2 和图 3 分别为电感和电磁转矩随转子位置角变化的曲线。

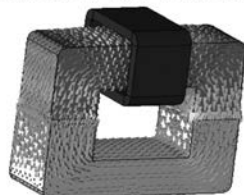
图 2 中, τ_r 为转子极距, θ 为转子位置角,其中 $\theta_1 \sim \theta_2$ 之间为定转子齿非对齐位置,此时相电感最小; $\theta_3 \sim \theta_4$ 之间为定转子齿对齐位置,此时相



(a) 横向磁通 SRM 三维模型



(b) 定转子齿非对齐位置磁密分布



(c) 定转子齿对齐位置磁密分布

图 1 电机三维模型及磁场分布

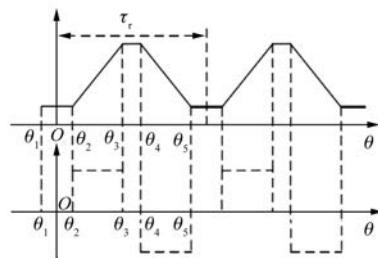


图 2 电感与转子位置角的关系

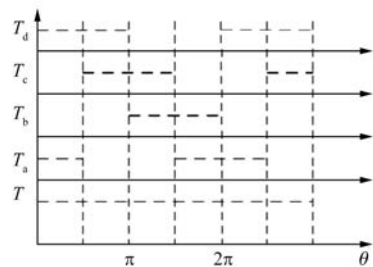


图 3 电磁转矩与转子位置角的关系

电感最大。由此可知,相电感随转子位置角呈周期性变化。由图 3 可知,当横向磁通 SRM 定子绕组电流恒定时, T_a 、 T_b 、 T_c 、 T_d 分别为 A、B、C、D 各

相的电磁转矩, T 为电机的电磁转矩, 是 T_a 、 T_b 、 T_c 、 T_d 各相电磁转矩之和。计算横向磁通 SRM 参数优选前后的转矩, 结果如图 4 所示。

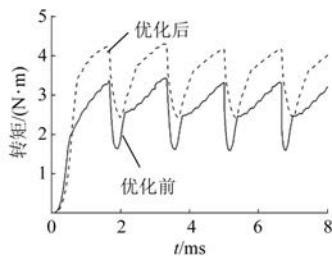


图 4 电机参数优选前后转矩曲线

优选前横向磁通 SRM 平均转矩为 $2.72 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，优选后平均转矩为 $3.58 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，优选后平均转矩比优选前增加了 $0.86 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。优选前转矩脉动为 25%，优选后为 15.6%，降低了 9.4%。

横向磁通 SRM 转子上既没有绕组也没有永磁体, 因此电机的损耗主要为定子铜耗、定子铁耗和转子铁耗。利用有限元软件对参数优选后的横向磁通 SRM 损耗进行分析, 得到电机在额定工况时各部分的损耗值, 如图 5 所示。其中, 电机定子铜耗的平均值为 14.6 W , 定子铁耗的平均值为 9.9 W , 转子铁耗的平均值为 8.3 W , 并将此损耗值作为温度场计算的热源。

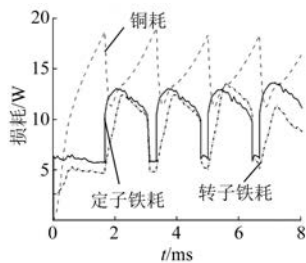


图 5 横向磁通 SRM 损耗曲线

2 温度场对比分析

2.1 温度场理论基础

对同功率和同体积的异步电机、径向 SRM 和横向磁通 SRM 进行温度场的对比分析。真空泵驱动电机的转子在工作时处于真空环境中, 电机内部无法通过对流散热, 主要散热方式为热辐射和热传导, 因此真空泵驱动电机的温度场模型^[18]可以表示为

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} |_{S_1} = 0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} |_{S_2} = \alpha(T - T_s) \end{cases} \quad (7)$$

式中: K_x 、 K_y 、 K_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的导热系数; T 为温度; q 为热源密度; ρ 为密度; c 为比热容; t 为时间; K 为 S_1 和 S_2 面法向导热系数; n 为边界法向量; S_1 为绝热边界面; S_2 为散热边界面; α 为 S_2 面的散热系数; T_s 为 S_2 周围的介质温度。

温度场仿真中的热源为电机各部分损耗, 3 种电机主要损耗如表 2 所示。

表 2 3 种电机主要损耗				W
对比参量	异步电机	径向 SRM	横向磁通 SRM	
定子铜耗	20.6	20.2	14.6	
定子铁耗	10.6	10.4	9.9	
转子铜耗	25.3	0	0	
转子铁耗	8.8	8.6	8.3	

对比分析需要保证电机冷却条件相同, 除了环境温度一致外, 还需要保证 3 种电机的冷却水路、水路的水流速度相同。本文中 3 种电机均选用螺旋型水道作为冷却水路, 其冷却结构如图 6 所示。冷却水道主要参数如表 3 所示。

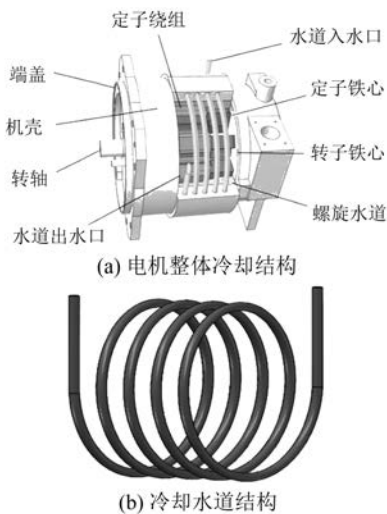


图 6 电机冷却系统结构示意图

2.2 温度场仿真结果分析

使用 Workbench 进行三维温度场分析, 生成

三维模型后,经计算可得异步电机、径向 SRM 和横向磁通 SRM 的定子绕组、定子和转子温度分布图如图 7~图 9 所示。

表 3 冷却水道主要参数

参数名称	参数值
结构形式	螺旋型
水道直径/mm	5
水道材质	铜
冷却介质	水
冷却介质温度/℃	25
冷却介质流速/(m·s ⁻¹)	0.9

由图 7 可以看出,异步电机定子绕组最高温度为 75.19 ℃,定子最高温度为 73.64 ℃,转子最高温度为 81.45 ℃,异步电机最高温度出现在转子上。由图 8 可以看出,径向 SRM 定子绕组最高温度为 65.23 ℃,定子最高温度为 65.36 ℃,转子最高温度为 58.35 ℃,最高温度出现在定子上。由图 9 可以看出,横向磁通 SRM 定子绕组最高温度为 55.32 ℃,定子最高温度为 54.84 ℃,转子最高温度为 53.52 ℃,横向磁通 SRM 最高温度出现在定子绕组上。



图 7 异步电机温度分布图

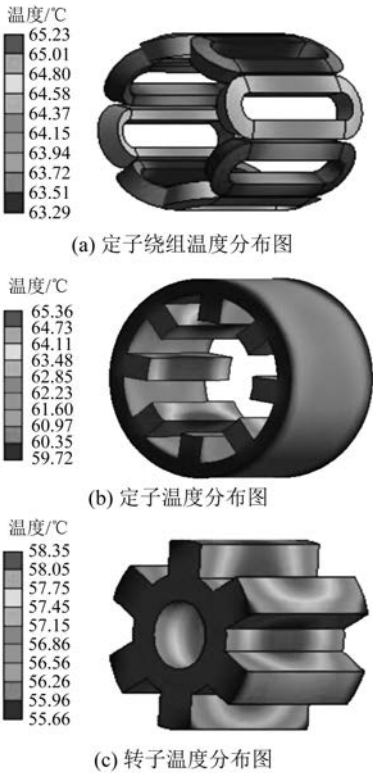


图 8 径向 SRM 温度分布图

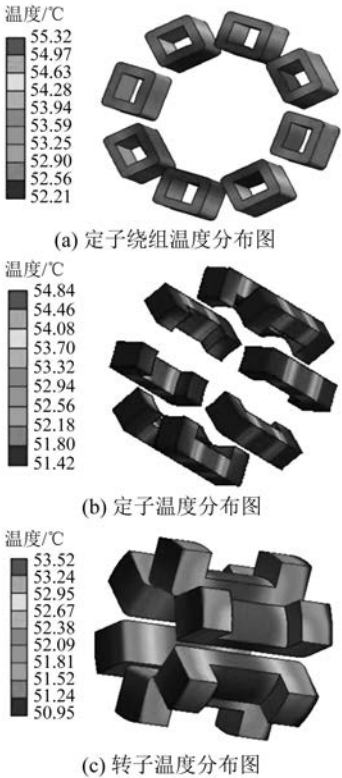


图 9 横向磁通 SRM 温度分布图

由温度场仿真结果可知,横向磁通 SRM 最高温度未出现在转子上,可以有效避免传统真空泵驱动电机转子温度过高的问题。同时,横向磁通 SRM 转子温度在 3 种电机之中最低,与异步电机相比,横向磁通 SRM 转子最高温度降低了 27.93 ℃,降低幅度为 26.9%;与径向 SRM 相比,横向磁通 SRM 转子最高温度降低了 4.83 ℃,降低幅度为 8.3%。

3 轴承热应力和热形变对比分析

3.1 热应力场理论基础

在真空泵驱动电机工作时,转轴两端与轴承内套配合,轴承外套与机壳轴承室配合,转子会将热传递给轴承内套,内外套温差较大,轴承内外套因热膨胀而产生的热形变量不同,会导致轴承抱死故障,严重影响真空泵系统运行的可靠性,因此对轴承的热应力和热形变进行分析十分必要。

物体的形状会随温度变化产生微小的热形变,当物体温度不同时,产生的热形变量也不相同,其关系如下^[19]:

$$\Delta L = \alpha L_0 (T_1 - T_0) \quad (8)$$

式中: ΔL 为物体膨胀量; L_0 为温度变化前的物体长度; α 为材质的热膨胀系数; T_0 为初始温度; T_1 为稳态温度。

由式(4)可知,物体的热形变量正比于温度的变化量,则电机轴承热应力场数学模型^[20]为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \beta T \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] + \beta T \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] + \beta T \end{cases} \quad (9)$$

式中: ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的热形变; E 为物体的弹性模量; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的热应力; μ 为泊松比; β 为膨胀系数。

3.2 热应力场仿真结果分析

对 3 种电机的轴承进行热应力和热形变的对比计算,得到其轴承热应力和热形变的分布图,如图 10~图 12 所示。

图 10 中,异步电机轴承最大热应力为 200.21 MPa、最大热形变量为 0.001 621 mm。图 11 中,径向 SRM 轴承最大热应力为

161.95 MPa、最大热形变量为 0.001 23 mm。图 12 中,横向磁通 SRM 轴承最大热应力为 120.75 MPa、最大热形变量为 0.000 837 7 mm。

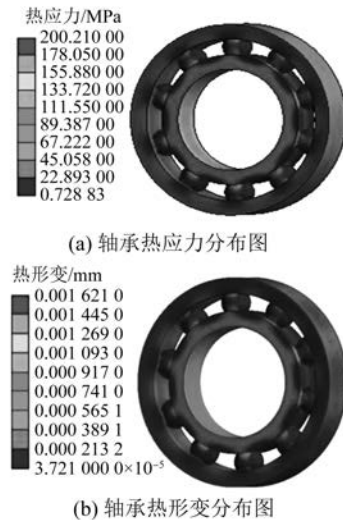


图 10 异步电机轴承热应力和热形变分布图

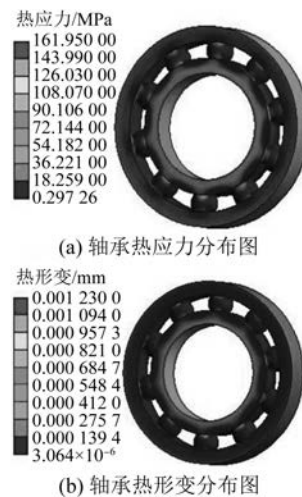


图 11 径向 SRM 轴承热应力和热形变分布图

由热应力场仿真结果可知,在 3 种电机中横向磁通 SRM 轴承的最大热应力和最大热形变量均最小。横向磁通 SRM 轴承的最大热应力为 120.75 MPa,与异步电机相比,轴承的最大热应力减小了 39.7%;与径向 SRM 相比,轴承最大热应力减小了 25.4%。横向磁通 SRM 轴承的最大热形变量为 0.000 837 7 mm,与异步电机相比,轴承最大热形变量减小了 48.3%;与径向磁通 SRM 相比,轴承最大热形变量减小了 31.9%。

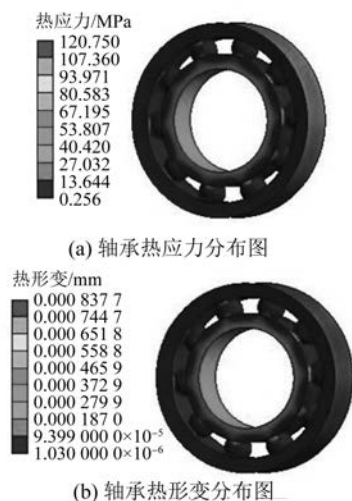


图 12 横向磁通 SRM 轴承热应力和热形变分布图

横向磁通 SRM 轴承最大热应力和最大热形变量的减小,可以降低真空泵驱动电机发生轴承抱死故障的几率,对提高真空泵系统运行的稳定性具有重要意义。

4 结 语

本文针对真空泵驱动电机工作在真空环境中,转子不易散热的问题,设计了一款真空泵用横向磁通 SRM。对所设计电机的主要尺寸参数进行了设计和优选,并且将其与同功率、同体积的异步电机和径向 SRM 进行了温度场和热应力场的对比分析。得出如下结论:

(1) 通过对真空泵用横向磁通 SRM 的主要尺寸进行设计和优选,平均转矩增加了 $0.86 \text{ N}\cdot\text{m}$,转矩脉动由 25% 降为 15.6%。

(2) 横向磁通 SRM 最高温度未出现在转子上,其转子最高温度为 53.52°C ,与异步电机相比,转子最高温度降低了 26.9%;与径向 SRM 相比,转子最高温度下降了 8.3%。有效地解决了真空泵驱动电机转子散热困难的问题。

(3) 横向磁通 SRM 轴承的最大热应力和最大热形变量均大幅减小,与异步电机相比,分别降低了 39.7% 和 48.3%;与径向 SRM 相比,分别降低了 25.4% 和 31.9%。横向磁通 SRM 可以降低轴承发生抱死故障的几率,提高真空泵系统运行的稳定性。为横向磁通 SRM 作为真空干泵驱动电机提供了一定的参考依据。

【参考文献】

- [1] 苏玉萍,张明达,王壮,等.我国真空行业获得产品质量状况分析[J].真空,2015,52(5):21.
- [2] 姜燮昌.粗真空、中真空获得设备的最新进展与应用[J].真空,2017,54(3):1.
- [3] 杨乃恒.真空获得设备[M].2版.北京:冶金工业出版社,2001.
- [4] 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.
- [5] 安跃军,张志恒,张振厚,等.真空干泵用屏蔽电机无速度传感器带速重投控制系统[J].电工技术学报,2018,33(12):2665.
- [6] 薛力铭.超洁净真空泵用永磁同步电动机多物理场分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [7] 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.
- [8] 陈吉清,洗浩岚,兰凤崇,等.开关磁阻电机结构性转矩脉动抑制方法[J].机械工程学报,2020,56(20):106.
- [9] 赵宇,柴建云,李艳芳,等.高转矩密度横向磁场开关磁阻电机的设计[J].电机与控制应用,2007,34(5):5.
- [10] BOUCHNAIF J, GRARI K, BENSLIMANE A, et al. Analytical approach and thermal signature of switched reluctance motor iron losses,2020,27(4):3161.
- [11] 宋受俊,葛乐飞,刘虎成,等.开关磁阻电机设计及多目标优化方法[J].电工技术学报,2014,29(5):197.
- [12] 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.
- [13] 颜建虎,汪盼,费晨.模块化开关磁阻式横向磁通电机设计与分析[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6723.
- [14] 汪盼.新型模块化横向磁通开关磁阻电机设计及优化[D].南京:南京理工大学,2019.
- [15] TAKAYUKI K, TAKUTO H, KAZUHIRO U, et al. Phase-current waveform for switched reluctance motors to eliminate input-current ripple and torque ripple in low-power propulsion below magnetic saturation[J].IET Power Electronics,2020,13(15):3351.

(下转第 65 页)