

真空泵用反凸极永磁同步电机设计与性能分析

田士强¹, 安辉¹, 陆艳君², 田玉宝¹, 邓文宇³, 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 110169;

3. 沈阳中北通磁科技股份有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

Design and Performance Analysis of Negative Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motor for Vacuum Pump

TIAN Shiqiang¹, AN Hui¹, LU Yanjun², TIAN Yubao¹, DENG Wenyu³,
QI Lijun^{3*}, AN Yuejun¹

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

2. KINGSEMI Co., Ltd., Shenyang 110169, China;

3. Shenyang General Magnetic Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

Abstract: Aiming at the problems of high rotor temperature and difficult heat dissipation during the operation of the drive motor for vacuum pump, a negative salient pole permanent magnet synchronous motor and a conventional permanent magnet synchronous motor are designed according to the actual requirements of the driving conditions of vacuum pump. Firstly, the impact of the size of the rotor magnetic barrier on the motor torque and the impact of the number of magnetic barrier layers on the inductance are analyzed using finite element software, so the suitable values of the rotor magnetic barrier size and the number of magnetic barrier layers are obtained. Secondly, the electromagnetic performances of the two motors, such as the air gap magnetic density waveforms, no-load back electromotive force and losses are comparatively analyzed. Finally, the temperature fields of the two motors as well as the temperature rises at the rotors and shafts of the two motors are analyzed by simulation comparison. The results show that compared with the conventional permanent magnet synchronous motor, the negative salient pole permanent magnet synchronous motor has better torque performance, smaller rotor loss and rotor temperature rise, which provides a scientific reference for the development of new products.

Key words: vacuum pump; negative salient pole permanent

magnet synchronous motor; rotor magnetic barrier; rotor temperature rise

摘要: 针对真空泵用驱动电机运行过程中存在转子温度高、散热难的问题,根据真空泵驱动工况的实际要求,设计了一台反凸极永磁同步电机和一台常规永磁同步电机。首先,利用有限元软件,分析了转子磁障尺寸对电机转矩的影响以及磁障层数对电感的影响,从而得出了转子磁障尺寸和磁障层数的合适值;其次,对两台电机的气隙磁密波形、空载反电动势和损耗等电磁性能进行了对比分析;最后,通过仿真对比分析了两台电机的温度场以及两者转子和转轴处的温升。结果表明,相比于常规永磁同步电机,反凸极永磁同步电机的转矩性能更好、转子损耗和转子温升更小,为新产品研发提供了科学的参考依据。

关键词: 真空泵; 反凸极永磁同步电机; 转子磁障; 转子温升

0 引言

近年来随着半导体芯片、生物医学制药和光伏产业等领域的蓬勃发展,真空泵作为关键工艺设备受到了重点关注^[1]。真空泵驱动电机是真空泵的核心部件,其性能直接影响真空泵的过载能力、振动噪声和极限真空度等性能指标^[2]。

目前,真空泵用驱动电机主要以感应电机和永磁同步电机为主^[3-4]。感应电机作为应用最广

基金项目: 2023 年辽宁省“揭榜挂帅”科技计划项目 (2023JH1/11100010)

2023 Liaoning Province Open Bidding for Selecting the Best Candidates Science and Technology Plan Project (2023JH1/11100010)

泛的电机,具有结构简单、运行可靠等特点,但由于转子绕组的存在,感应电机实际运行时转子绕组发热会导致电机内部温度升高,效率降低^[5]。相比之下,永磁同步电机运行可靠、高效节能^[6],同时由于转子中不设置绕组,其损耗中没有转子绕组铜耗,转子温升较低。

反凸极永磁同步电机在常规永磁同步电机的基础上,通过对电机转子进行重新设计,使电机具有与常规凸极电机不同的反凸极特性(即直轴电感 L_d 大于交轴电感 L_q)^[7]。在兼具常规永磁同步电机优点的同时,具备的反凸极特性改善了常规永磁同步电动机调速范围窄、负载运行下永磁体退磁风险高等关键性问题,降低了铁心损耗,提高了电机效率^[8]。文献[9]利用转子永磁体分段处的磁桥以及调整铁心为直轴磁通提供路径,实现了直轴电感大于交轴电感,有效扩大了电机的弱磁范围。文献[10]设计了一台“V”型分段结构的反凸极永磁电机,通过在“V”型结构中间增设退磁桥以增大电机的反凸极比,降低了永磁体不可逆退磁的风险,减小了电机的漏磁和永磁体涡流损耗。文献[11]采用内部磁障的设计,提出将转子永磁体通过磁障分割成各个独立部分,有效提升了电机气隙磁密波形的正弦性,提升了电机的过载能力。综上所述,可通过对磁障的灵活设计,使反凸极永磁同步电机相比常规永磁同步电机具有更良好的性能和更小的转子损耗,降低真空泵电机转子热量的产生。

基于此,本文设计了一台 3 kW、3 000 r/min 的反凸极永磁同步电机和一台相同性能指标的常规永磁同步电机,并对两台电机的电磁性能和热性能进行对比分析。

1 电机模型与运行原理

本文设计的反凸极永磁同步电机采用 4 极 24 槽的极槽配合,在定子侧采用斜槽结构以减小转矩脉动及谐波损耗,转子侧采用具有聚磁特性的切向式永磁体结构,并采用内部磁障结构。内部磁障结构相较于表面磁障结构设计更加灵活,有利于对电机性能进行优化^[12]。

为了更好地验证所设计的反凸极永磁同步电机的性能,同时设计了具有相同技术要求的常规永磁同步电机与之进行性能对比。两台电机定子

结构完全相同,但反凸极永磁电机由于对磁阻转矩的利用较为充分,因而设计时永磁体用量较少。两台电机的技术要求如表 1 所示,主要参数如表 2 所示。

表 1 两台电机的技术要求

Tab. 1 Technical requirements of two motors

参数名称	反凸极永磁电机	常规永磁电机
额定功率/W	3 000	3 000
额定电压/V	380	380
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000	3 000
频率/Hz	100	100
效率/%	>92	>92
功率因数	>0.96	>0.96
最大转矩倍数	>2.2	>2.2
冷却方式	水冷	水冷

表 2 两台电机的主要参数

Tab. 2 Main parameters of the two motors mm

参数名称	反凸极永磁电机	常规永磁电机
定子外径	118	118
定子内径	77	77
气隙	0.8	0.8
铁心长度	85	85
永磁体厚度	3.6	4
永磁体宽度	19	19.5

所设计的两台电机的二维拓扑结构如图 1 所示。其中反凸极永磁同步电机转子磁障在永磁体两侧分多层设计,在增加 d 轴电感的同时又能解决切向式结构的永磁体顶部漏磁问题。对于弧形磁障,本文在磁障宽度和长度尽量大以保证一定反凸极比的情况下,分析两者对电机转矩性能的影响,得到磁障尺寸的合适取值范围,并综合考虑来选择最优值。

2 磁障设计及性能分析

2.1 磁障尺寸设计

本文通过在交轴磁路上设计磁障来降低交轴电感,从而获得 $L_d > L_q$ 的反凸极特性^[13]。磁障的设计原则为阻隔交轴磁路的同时尽量降低对直轴磁路的影响。本文研究了磁障的宽度、长度对电机转矩性能的影响以及磁障层数对交、直轴电感的影响。

2.1.1 磁障宽度设计

对于反凸极永磁同步电机,在合理范围内,磁障的宽度越大反凸极比越大,但过宽的磁障将会

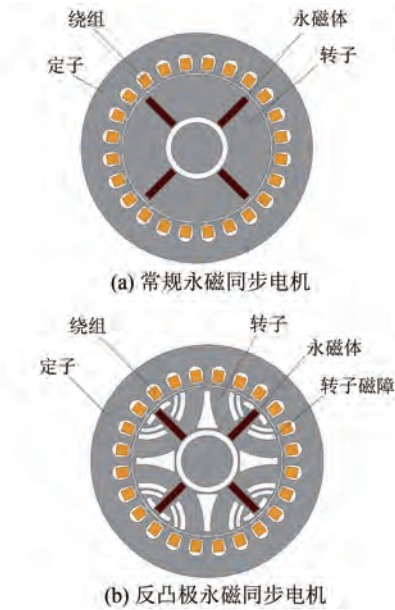


图1 两台电机的二维拓扑结构

Fig. 1 Two-dimensional topology of two motors

导致铁心磁路严重饱和,电机反凸极比下降,使得转矩减小,转矩脉动增大。

通过多次测试得到,当磁障宽度小于 2 mm 时,电机无法获得反凸极特性;磁障宽度大于 3 mm 后,电机转子铁心磁路饱和程度过高,转矩大幅下降,转矩脉动迅速上升。因此,在其他参数不变的情况下,本文在 2 mm~3 mm 的范围内改变磁障的宽度,分析转矩与转矩脉动的变化,结果如图 2 所示。

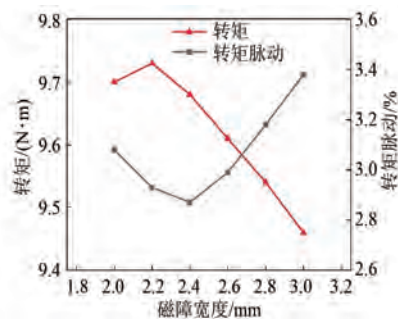


图2 磁障宽度对转矩的影响

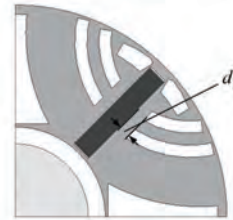
Fig. 2 Effect of magnetic barrier width on torque

由图 2 可知,磁障宽度小于 2.2 mm 时电机转矩逐渐增加;但当磁障宽度超过 2.2 mm 后,由于铁心磁路逐渐饱和,电机转矩减小。当磁障宽度为 2 mm~2.4 mm 时,电机转矩脉动逐渐下降;磁障宽度大于 2.4 mm 时,转矩脉动逐渐增大。综合考虑,本文选取磁障宽度为 2.2 mm。

田士强,等:真空泵用反凸极永磁同步电机设计与性能分析

2.1.2 磁障长度设计

由于弧形磁障的长度难以测量,因此,采用磁障端部与永磁体之间的距离 d_1 来代替弧形磁障的长度,即 d_1 越大,磁障的长度越短^[14]。 d_1 在转子中的位置如图 3 所示。

图3 d_1 在转子中的位置Fig. 3 Position of d_1 in the rotor

保持其他参数不变,将 d_1 由 2 mm 逐渐增大至 3 mm,分析不同磁障长度对电机转矩及转矩脉动的影响,结果如图 4 所示。

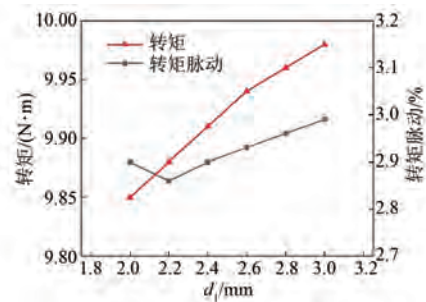


图4 磁障长度对电机转矩的影响

Fig. 4 Effect of magnetic barrier length on torque

由图 4 可知,随着 d_1 的增大,转子铁心在磁障端部的饱和程度逐渐减小,转矩逐渐增大,在 d_1 大于 2.6 mm 后增大趋势减弱。转矩脉动先减小后增大,当 d_1 为 2.2 mm 时转矩脉动存在最小值。综合考虑,本文选取磁障端部与永磁体之间的距离 d_1 为 2.6 mm。

2.1.3 磁障层数设计

在磁障宽度不变的情况下,磁障的层数同样影响着反凸极永磁同步电机的电感。层数过少将影响磁力线的流通,而层数过多则会增加制造的难度和成本。因此保持磁障总宽度不变,对弧形磁障的层数进行分析,得到电机电感随磁障层数的变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,当磁障层数较低时,磁障宽度较大,导致 d 轴磁力线流通受到阻碍, d 轴电感较小;随着磁障层数的增加,磁障宽度分布变得均

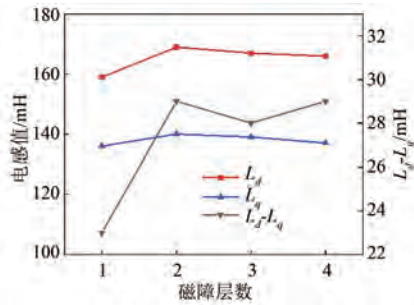


图 5 随磁障层数对电感的影响

Fig. 5 Effect of the number of magnetic barrier layers on inductance

匀, d 轴电感增加; 当磁障层数大于两层后电感变化较小, d 、 q 轴电感的差值变化也较小。因此, 本文选取磁障层数为两层。

2.2 电磁性能分析

2.2.1 气隙磁密

永磁电机空载气隙磁密波形的优劣直接影响电机的性能^[15], 图 6 为两台电机的空载气隙磁密波形对比图。

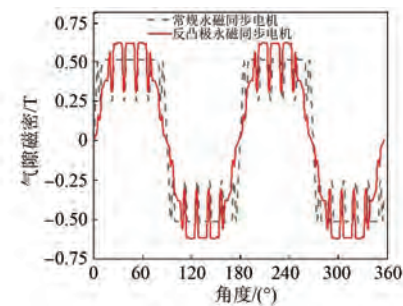


图 6 气隙磁密波形对比图

Fig. 6 Comparison diagram of air gap magnetic density waveforms

由图 6 可知, 反凸极永磁同步电机气隙磁密波形峰值高于常规永磁同步电机, 这是因为转子磁障对磁通的引导作用, 使磁通更靠近磁极中间位置。

2.2.2 空载反电动势

对于永磁电机, 空载反电动势是机电能量转换的关键^[16], 图 7 和图 8 分别为两台电机的空载反电动势波形对比图和谐波分析对比图。

由图 8 可知, 反凸极永磁同步电机的反电动势波形基波含量较高, 谐波含量较少。通过计算可知, 反凸极永磁同步电机的反电动势谐波畸变率比常规永磁同步电机低 18.22%, 这是因为多层的磁障将永磁体近似分为了多个独立的部分, 通

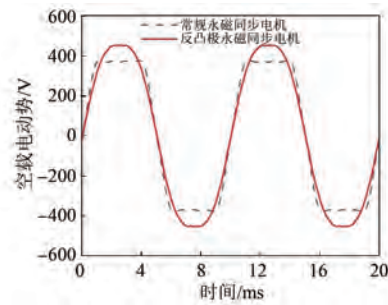


图 7 空载反电动势波形对比图

Fig. 7 Comparison diagram of no-load back electromotive force waveforms

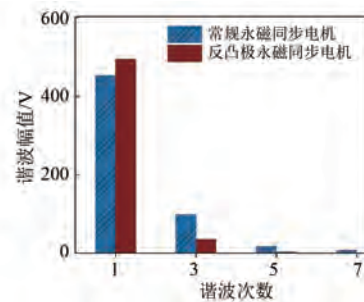


图 8 空载反电动势谐波分析对比图

Fig. 8 Comparison diagram of harmonic analysis of no-load back electromotive force

过改变磁障的尺寸使磁密在气隙中的分布更加合理。

2.2.3 交直流电感

电机的电感特性对电机性能有着重要的影响, 而反凸极永磁电机的电感特性更是其反凸极特性的体现, 即 $L_d > L_q$ 。图 9 为两台电机 d 、 q 轴电感随电流幅值变化的曲线。

由图 9 可知, 两台电机的电感均随着电流的增大而减小。常规永磁同步电机 d 轴电感小于 q 轴电感, 但 d 轴由于永磁体的存在, 电感下降幅度远小于 q 轴; 反凸极永磁同步电机由于在 q 轴设置了磁障, 因此 d 轴电感大于 q 轴电感, 且由于磁障的存在, 相比常规永磁同步电机其电感下降趋势更为平缓。

2.2.4 电机损耗

电机损耗是电机发热的根本原因, 同时也是计算温度场时所需的热源。电机损耗主要包括定子绕组铜耗、定转子铁心损耗、永磁体涡流损耗和机械损耗。图 10 为两台电机额定运行时各项损耗的具体数值。

由图 10 可知, 除机械损耗外, 反凸极永磁同

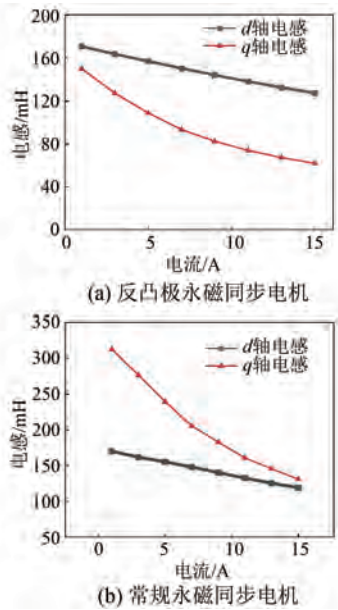


图9 d轴和q轴电感变化曲线

Fig. 9 d-axis and q-axis inductance change curves

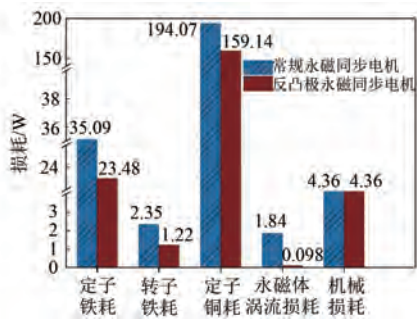


图10 各项损耗对比图

Fig. 10 Comparison diagram of various losses

步电机的各部分损耗均小于常规永磁同步电机,证明了本文设计思想的可行性。由于转子磁障的设计,使反凸极永磁同步电机的反电势波形谐波含量较少,因此其定转子铁耗和永磁体涡流损耗比常规永磁同步电机更小。同时,在输出转矩相同的情况下,反凸极电机定子铜耗也更小,这是因为反凸极电机将磁阻转矩和永磁转矩进行了充分利用,使得转矩密度更大,所需激励更小,因此在绕组相同的情况下定子铜耗更小。

3 温度场分析

3.1 温度场有限元基础

真空泵用驱动电机温度场热传导、热对流及热辐射问题可以描述为^[17]

田士强,等:真空泵用反凸极永磁同步电机设计与性能分析

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} |_{s_1} = 0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} |_{s_2} = \alpha(T - T_e) \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为物体温度; q 为热源密度; c 为材料比热容; γ 为材料密度; τ 为时间; S_1 为电机绝热边界面; 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 表面的散热系数; K 为 S_1 和 S_2 法向导热系数; K_x 、 K_y 、 K_z 分别为电机各介质在 x 、 y 、 z 方向的导热系数。

3.2 边界条件和网格设置

为了简化计算过程,设置如下边界条件:电机各部件直接设为热传导边界,各表面设为热辐射边界,机壳表面设为空气自然散热边界,环境温度为 25°C 。采用管内强制对流散热的水冷式的冷却方式,根据传热学原理将其传热能力等效为水道对流换热系数^[18]:

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

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 为流体导热系数; v 为运动黏度; a 为热扩散率; ρ 为流体密度; c_p 为比热容。

网格剖分不仅决定了有限元软件的计算精度,也影响着求解运算的时间。通过对不同部件进行合理的网格剖分,最终网格平均单元质量为 0.81 。

3.3 温度场仿真结果分析

采用有限元软件对电机进行三维温度场的计算仿真。电机的主要结构包括机壳、环氧树脂及水道等,其三维模型如图11所示。两台电机的机壳、水道等结构均相同。

根据电磁场仿真得到电机损耗,以电机各部分损耗与其体积之比作为温度场仿真中的热源^[19-20],得到电机转子、转轴的温度分布如图12

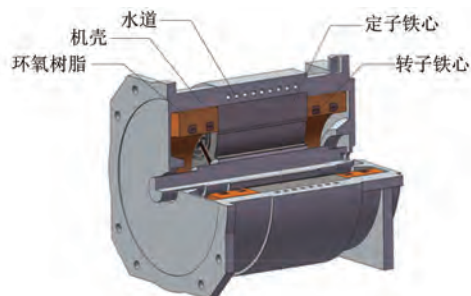


图 11 反凸极永磁同步电机的三维模型

Fig. 11 Three-dimensional model of negative salient pole permanent magnet synchronous motor

和图 13 所示。

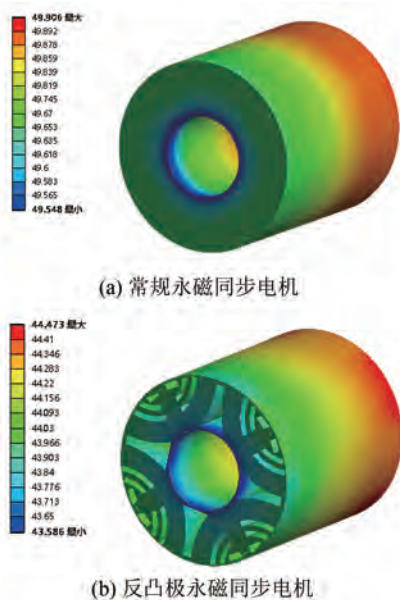


图 12 两台电机转子的温度分布

Fig. 12 Temperature distribution of two motor rotors

从仿真结果可以看出,由于可通过转轴进行传递热量,两电机转子最低温均出现在靠近转轴的一侧,分别为 49.55 °C、43.59 °C;而定转子之间传递热量较为困难,所以靠近气隙侧温度最高,分别为 49.91 °C、44.47 °C。

任何情况下,转子铁心温度不可以达到使任何邻近的绝缘材料或其他材料有损坏危险的数值。本文使用的 N35 永磁体的最高使用温度为 80 °C^[21]。在水冷作用下,两电机转子铁心温度均在合理范围内,但反凸极永磁同步电机转子铁心和转轴温升相比常规永磁同步电机均更低,原因在于反凸极永磁同步电机转子的总损耗更小,在相同冷却条件下,反凸极永磁同步电机转子产

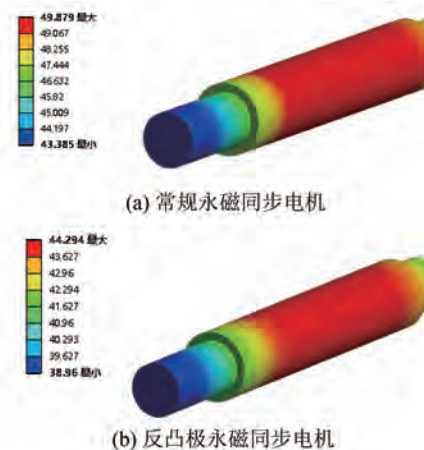


图 13 两台电机转轴的温度分布

Fig. 13 Temperature distribution of two motor shafts

生的热量更少,因此,当真空泵长时间运行时,反凸极永磁同步电机运行更加安全稳定。

4 结语

本文通过对所设计的反凸极永磁同步电机和常规永磁同步电机的电磁场和温度场进行仿真对比分析,得出以下主要结论:

(1) 通过反凸极永磁同步电机转子磁障的设计及电磁场仿真结果对比分析可知,反凸极永磁同步电机空载反电动势波形谐波畸变率比常规永磁同步电机低 18.22%,转子总损耗比常规永磁同步电机低 33.57%。

(2) 通过对比两台电机的温度场仿真结果可知,反凸极永磁同步电机比常规永磁同步电机的转子温升高 12.34%,有利于真空泵长时间安全稳定地运行。

参考文献

- [1] 熊昱强,安跃军,安辉,等. 真空干泵用爪极永磁电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(5): 48-53.
XIONG Y Q, AN Y J, AN H, et al. Design and analysis of claw pole permanent magnet motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(5): 48-53.
- [2] 王跃,安跃军,安辉,等. 真空干泵用横向磁通开关磁阻电机对比分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(5): 46-52+65.
WANG Y, AN Y J, AN H, et al. Comparative analysis of transverse flux switched reluctance motor

- for vacuum dry pump [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(5): 46-52+65.
- [3] 邓文宇, 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): 1-8.
- DENG W Y, QI L J, WANG G Y, et al. Present situation and development of drive motor and control technology for high-end vacuum pump in China [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(7): 1-8.
- [4] 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.
- CAO J P. The design and analysis of caned motor used on ultra clean and corrosion-resistant scroll vacuum pump [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [5] 戴建兴. 真空干泵驱动用永磁同步电动机悬浮支撑研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- DAI J X. Research on levitation support of permanent magnet synchronous motor for driving vacuum dry pump [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [6] 娄利岗. 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.
- LOU L G. Design and analysis of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor for vacuum pump [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [7] 杜隆鑫. 可控漏磁反凸极永磁同步电机的设计与研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.
- DU L X. Design and research of controllable leakage flux reverse salient permanent magnet synchronous machine [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.
- [8] 邓先明, 郑康, 龚书生, 等. 新结构反凸极永磁同步电动机的设计与分析[J]. *实验室研究与探索*, 2021, 40(6): 81-86.
- DENG X M, ZHENG K, GONG S S, et al. Design and analysis of novel structure negative-saliency permanent magnet synchronous motor [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2021, 40(6): 81-86.
- [9] 李春艳, 王豫, 孟涛. 反凸极永磁同步电机弱磁特性分析[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(增刊2): 474-483.
- LI C Y, WANG Y, MENG T. Research on flux weakening characteristics of a negative salient pole permanent magnet synchronous motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(S2): 474-483.
- [10] ZHAO X K, KOU B Q, ZHANG L, et al. Design and analysis of permanent magnets in a negative-salient permanent magnet synchronous motor [J]. *IEEE ACCESS*, 2020, 8: 182249-182259.
- [11] MICHELE F, NICOLA B C. Design and analysis of normal saliency IPM spoke motor [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(4): 3625-3635.
- [12] 贾震. 新型反凸极永磁同步电机的电磁设计与控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- JIA Z. Electromagnetic design and control of a novel normal-saliency permanent magnet synchronous motor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [13] 郭飞, 李春艳, 初秋. 转子结构参数对新型反凸极永磁同步电机性能影响的研究[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(10): 45-50+70.
- GUO F, LI C Y, CHU Q. Research on influence of structural parameters on performance of new negative-salient PMSM [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(10): 45-50+70.
- [14] 孙阿芳. 电动汽车用变磁通永磁同步电机的设计和研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- SUN A F. Design and research on variable-flux permanent magnet synchronous machine used on electric vehicle [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [15] 沈亮, 袁春, 杨宗平. 基于 Taguchi-PSO 的永磁同步发电机空载气隙磁密波形优化[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(3): 42-48.
- SHEN L, YUAN C, YANG Z P. Optimization of no-load air gap flux density waveform of permanent magnet synchronous generator based on Taguchi-PSO [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(3): 42-48.
- [16] 宿泽达, 安跃军, 安辉, 等. 真空泵用定子永磁型与转子永磁型电机热性能对比[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(4): 58-64.
- SU Z D, AN Y J, AN H, et al. Comparison of thermal performance of stator permanent magnet motor and rotor permanent magnet motor for vacuum pumps [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(4): 58-64.

- [17] 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): 42-50.
LIANG Y P, LI W, WANG Z Y, et al. Calculation method and effect factors of eddy current losses in rotor of high speed induction motor [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(5): 42-50.
- [18] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG S M, TAO W Q. Heat Transfer [M]. 4th edition. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [19] 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): 50-54.
AN Y J, ZHANG Q, LI W R, et al. Eddy losses and temperature rise on shielded can in canned motor with new phase-shifted structure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(6): 50-54.
- [20] 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): 48-52.
AN Y J, ZHANG Z H, ZHANG Q, et al. Temperature field simulation and experiment of special motor for dry scroll vacuum pump [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(8): 48-52.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 13560-2017: 烧结钕铁硼永磁材料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 13560-2017: Sintered neodymium iron boron permanent magnets[S]. Beijing: Standard Press of China, 2017.

收稿日期:2023-12-27

收到修改稿日期:2024-02-04

作者简介:

田士强(1999-),男,硕士研究生,研究方向为电机及其控制,993795455@qq.com;

* 通信作者:齐丽君(1981-),男,硕士,高级工程师,研究方向为稀土永磁材料和真空装备的研制开发,lijun_qi@zmag.com。

Design and Performance Analysis of Negative Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motor for Vacuum Pump

TIAN Shiqiang¹, AN Hui¹, LU Yanjun², TIAN Yubao¹, DENG Wenyu³,
 QI Lijun^{3*}, AN Yuejun¹

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

2. KINGSEMI Co., Ltd., Shenyang 110169, China;

3. Shenyang General Magnetic Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

Key words: vacuum pump; negative salient pole permanent magnet synchronous motor; rotor magnetic barrier; rotor temperature rise

Due to the limitations of the working environment, the drive motor of vacuum pump often faces the engineering problem of high rotor temperature and difficult heat dissipation during operation. And elevated rotor temperatures can reduce motor efficiency and even more dangerous situations. Permanent magnet synchronous motor has no rotor winding, so there is no copper consumption in the rotor winding and the rotor temperature rise is far less than that of the asynchronous motor. As a new type of permanent magnet synchronous motor, the negative salient pole

permanent magnet synchronous motor can further reduce the rotor loss and improve the temperature rise by setting a magnetic barrier in the rotor.

In this paper, according to the actual requirements of vacuum pump driving conditions, a negative salient pole permanent magnet synchronous motor and a conventional permanent magnet synchronous motor are designed according to the same technical requirements. The two motors are identical except for the rotor structure, and the topological structures of two motors are shown in Fig.1.

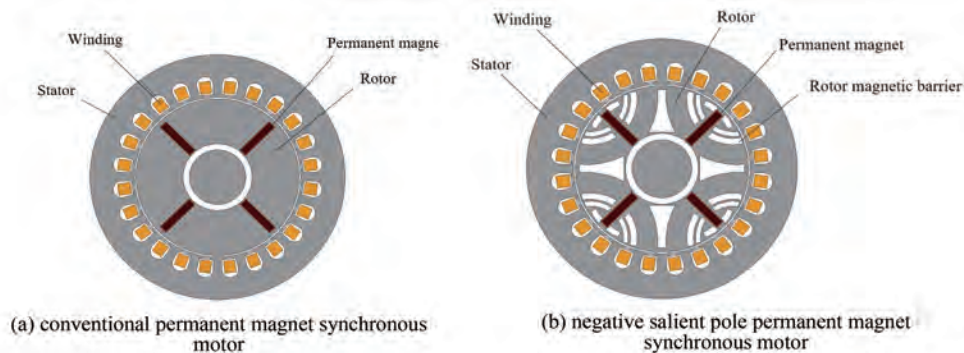


Fig. 1 Two-dimensional topology of two motors

Firstly, the influence of rotor barrier size on motor torque and torque ripple is analyzed by using finite element software, so that the range of values of rotor barrier size is obtained and the optimum value is selected. Secondly, the electromagnetic performance of the two motors is analyzed, and the harmonic contents and losses of the back electromotive force waveforms of the two motors are compared. Finally, the temperature fields of the two motors as well as the temperature rises at the rotors and shafts of the two motors are analyzed by

simulation comparison. The results show that the performance of the negative salient pole permanent magnet synchronous motor is better and the rotor temperature rise is smaller. Compared with conventional permanent magnet synchronous motor, the negative salient pole permanent magnet synchronous motor can better solve the engineering problems of high rotor temperature and difficult heat dissipation during operation, which provides a scientific reference for the development of new products.