

真空干泵用爪极永磁电机设计与分析^{*}

熊昱强, 安跃军, 安辉, 薛丽萍, 关恩禄

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 轴向分段式爪极电机具有转矩密度高、结构简单、制造成本低以及节约材料等优点。设计了一台 1.5 kW, 9 000 r/min 的轴向分段式爪极电机。对电机的电磁设计与温度分布进行分析, 验证设计的合理性。对于爪极参数的选取, 研究了爪极角与爪尖长度对电机转矩大小、转矩波动以及空载电动势的影响, 给出了合适的选取范围。分析结果为新型真空干泵驱动电机产品开发提供了参考依据。

关键词: 爪极电机; 电磁设计; 温度分布; 真空干泵

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)05-0048-06

doi: 10.12177/emca.2022.015

Design and Analysis of Claw Pole Permanent Magnet Motor for Vacuum Dry Pump^{*}

XIONG Yuqiang, AN Yuejun, AN Hui, XUE Liping, GUAN Enlu

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The axial segmented claw pole motor has the advantages of high torque density, simple structure, low manufacturing cost and material saving. A 1.5 kW, 9 000 r/min axial segmented claw pole motor is designed. The electromagnetic design and temperature distribution of the motor are analyzed to verify the rationality of the design. For the selection of claw pole parameters, the effects of claw pole angle and claw tip length on motor torque, torque ripple and no-load electromotive force are studied, and a suitable selection range is given. The analysis results provide a reference for the development of new products of the new vacuum dry pump drive motor.

Key words: claw pole motor; electromagnetic design; temperature distribution; vacuum dry pump

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, 真空干泵作为关键工艺设备获得了重点关注。轴向分段式爪极电机是一种多段式结构的永磁同步电机, 不仅有较高的转矩密度和功率密度, 并且具有传统爪极电机制造成本低、运行可靠性强等优点。文献[1]研究了爪极形状对轴向分段式外转子爪极电机漏磁、磁密以及波形的影响。文献[2]对轴向分段式外转子爪极电机的温度分布进行了研究。文献[3]

对轴向分段式外转子爪极电机在高速电机中的应用进行了较为全面的研究。文献[4]对爪极电机的空载特性进行研究并给出了改进方法。文献[5]提出了一种预测和优化爪极电机噪声的方法。

真空干泵用电机种类较多, 文献[6]比较详细地介绍了真空干泵用感应电机、永磁高效电机、开关磁阻电机和同步磁阻电机的特点, 对不同种类电机的应用领域进行了总结。

真空泵与驱动电机一体化能够实现更高的真空要求, 驱动电机可以利用屏蔽套提高真空干泵

收稿日期: 2022-01-23; 收到修改稿日期: 2022-04-11

*基金项目: 沈阳市重点技术攻关“揭榜挂帅”项目(22-101-0-04)

作者简介: 熊昱强(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机及其控制。

安跃军(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电机及其控制。

的密封性^[7]。工作在真空环境下,如何降低电机温度也是真空泵用电机应该考虑的问题,目前真空泵的冷却方式多为水冷散热。轴向分段式爪极电机主要的损耗在定子上,因此定子温度高。外转子结构的轴向分段式爪极电机定子热量不易散出,且不能适用已成型的一体化结构和屏蔽套密封技术。本文研究的真空干泵用轴向分段式爪极电机采用内转子结构。根据一台实际的真空干泵驱动电机的参数,设计了一台 1.5 kW、9 000 r/min 的内转子爪极电机,对其电磁性能和温度场进行仿真分析,分析结果可为研发新型真空干泵驱动电机提供参考依据。

1 电机模型与运行原理

本文设计的是三相爪极电机,因此电机为三段式结构,如图 1 所示。定子爪极由 6 个爪构成,定子材料使用软磁复合材料(SMC)^[8-10],该材料各向同性,特别适用于具有三维磁路的轴向分段式爪极电机^[11]。爪极电机的定子可以由软磁复合材料直接压铸成型,并且加工精度较高,有利于电机的大量生产,降低成本。定子槽内装入集中绕组,该结构的绕组无端部,提高绕组利用率,降低了铜耗。转子外表面粘贴 3 组 6 极永磁体。由于电机转速高,为防止永磁体脱落,在转子外安装采用 sus304 材料制作的保护套^[12]。

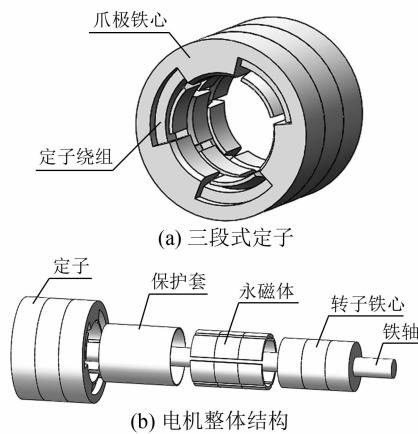


图 1 三段式爪极电机结构

三段爪极铁心沿轴向互差 40° 机械角度 (120° 电角度) 放置,使三段结构在电磁上解耦。在电机 3 个绕组内通入三相交流电,每段爪极便会产生随三相交流电变化的磁场。3 段定子产生

的磁场在空间叠加成旋转磁场,与转子永磁体励磁磁场相互作用,实现电机机电能量转换。

2 电磁设计

2.1 电机基本参数选择

轴向分段式爪极电机的各项参数与电机的电磁性能息息相关。由于爪极电机定子爪极参数较多,在电机设计时,除了要达到所要求的电磁性能外,还要考虑电机结构的合理性。电机主要尺寸和电机性能指标之间的关系为^[13]

$$\frac{D^2 l_e n_N}{P_N} = \frac{6.1}{K_{Nm} \alpha_p B_\delta Am} \quad (1)$$

式中: D 为爪极定子内径; l_e 为三段定子铁心长度; n_N 为电机额定转速; P_N 为电机额定功率; K_{Nm} 为气隙磁场的波形系数; α_p 为计算极弧系数; B_δ 为气隙磁通密度; A 为电流线负荷; m 为电机的相数。

本文开发的电机性能指标如表 1 所示。选择合适的气隙磁通密度与电流线负荷,将给定的电机参数代入式(1),可得粗略地计算出电机的主要尺寸。之后建立模型进行电磁仿真,结合技术指标对参数进行改进,最终得出电机的尺寸参数,如表 2 所示。

表 1 电机主要性能指标

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.5
额定电压/V	200
额定电流/A	≤8
额定转矩/(N·m)	1.59
额定转速/(r·min⁻¹)	9 000
极对数 p	3

表 2 电机主要尺寸参数

参数名称	参数值	mm
转子外径	53	
转子内径	18	
定子外径	97	
定子内径	57	
铁心长度	78	

2.2 爪极参数

在基本尺寸确定后,爪极电机的爪极形状与永磁体尺寸对电机电磁性能有很大的影响。许多文献研究了外转子爪极电机的外形尺寸对空载反电动势、漏磁系数、齿槽转矩的影响,并给出了相

应电机参数设计的建议^[14-15]。本文从爪极参数出发,研究爪极角对电机转矩和转矩波动的影响以及爪尖长度对电机空载电动势和转矩的影响。

2.2.1 爪极角选取

爪极角如图 2 所示。爪极角最大值为 $360^\circ/2p$, 此时对应爪极极弧系数为 1。考虑漏磁和齿槽转矩的影响, 爪极极弧系数一般在 0.7~0.9 之间, 故本文选取的爪极角范围为 $42^\circ\sim54^\circ$ 。



图 2 爪极角

在其他参数不变的情况下, 改变爪极角的度数, 对比其转矩与转矩波动的变化, 结果如图 3 和图 4 所示。

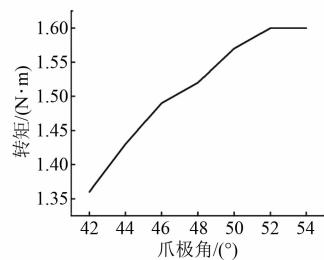


图 3 转矩与爪极角关系曲线

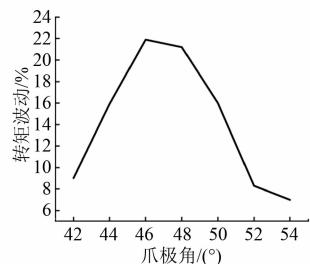


图 4 转矩波动与爪极角关系曲线

由图 3 可见, 爪极角为 $42^\circ\sim52^\circ$ 时, 电机转矩随着爪极角的增加而增大, 爪极角大于 52° 时, 转矩值趋于平稳。由图 4 可见, 爪极角为 $42^\circ\sim46^\circ$ 时, 转矩波动逐渐增加, 爪极角为 $48^\circ\sim54^\circ$ 时, 转矩波动逐渐减小。本文选取的电机爪极角为 52° , 此时电机转矩为 $1.60 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转矩波动为 8.3% 。

- 50 -

2.2.2 爪尖长度的选取

爪尖长度为定子根部到爪尖的距离, 如图 5 所示。爪尖长度的上限受铁心长度的影响, 最大长度为单段铁心长度与爪根厚度之差。本文电机最大爪尖长度为 19 mm , 对比了不同爪尖长度下电机的空载反电动势波形和转矩大小, 并对 A 相反电动势波形进行谐波分析。不同爪尖长度的空载反电动势如图 6 所示, 转矩值如表 3 所示, 谐波分析如表 4 所示。

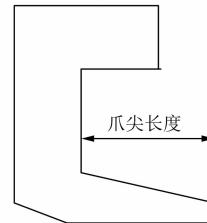


图 5 爪尖长度

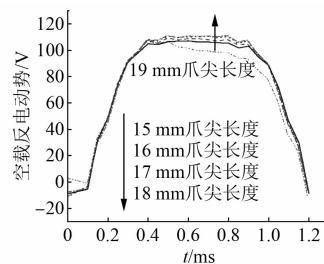


图 6 空载反电动势对比

表 3 不同爪尖长度转矩值

爪尖长度/mm	转矩/(N·m)
15	1.58
16	1.60
17	1.60
18	1.60
19	1.49

表 4 空载反电动势谐波分析

次数	不同爪尖长度时空载反电动势主要谐波幅值/V				
	15 mm	16 mm	17 mm	18 mm	19 mm
1	123.3	124.9	126.3	126.3	117.3
3	19.1	18.6	17.8	16.7	17.6
5	1.5	0.8	0.1	0.8	1.2
7	1.3	1.6	1.8	2.1	1.6
9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9

由图 6 可知, 爪尖长度为 19 mm 时空载反电动势幅值最小, 且波形顶端不平整。爪尖长度为 $15\sim18 \text{ mm}$ 时空载反电动势波形相近, 幅值随着爪尖长度的增加而增大。

由表 3 可知, 爪尖长度为 19 mm 时转矩最小, 爪尖长度为 16~18 mm 时转矩值相等, 爪尖长度为 15 mm 时转矩值略微降低。由表 4 可知, 19 mm 爪尖长度的基波含量最小, 17 mm 和 18 mm 爪尖长度的基波含量相同, 18 mm 爪尖长度的 3 次谐波含量最少。综合考虑, 本文电机爪尖长度选择 18 mm。

2.3 电磁场分析

电机空载运行时, 爪极电机气隙磁场由永磁体产生。图 7 为定子爪极磁密分布。由图 7 可见, 磁密主要集中在定子爪尖和定子膝部位置, 爪尖部分局部磁密较大, 膝部部分略有饱和。定子爪尖部分平均磁密约为 1.3 T, 定子膝部平均磁密约为 1.6 T; 与定子爪身相比, 定子轭部的磁密较小, 因此可以适当降低爪极定子轭部的厚度, 减少材料使用的同时也可以降低电机的成本。

图 8 为转子磁密分布, 可见转子磁密比定子低, 转子外围磁密约为 1 T, 永磁体间的磁密最大, 约为 1.2 T。

气隙磁密对电机性能有着重要的影响。爪极电机的 3D 磁路使电机气隙磁密波形在定子轴向不同位置有着不同的分布, 如图 9 所示。气隙中间处气隙磁场较强, 靠近两侧边缘处气隙磁密开始下降, 这是因为受到了边缘效应的影响, 电机内部气隙磁密分布合理。图 10~图 12 为 3 处不同位置的气隙磁密及其谐波含量。

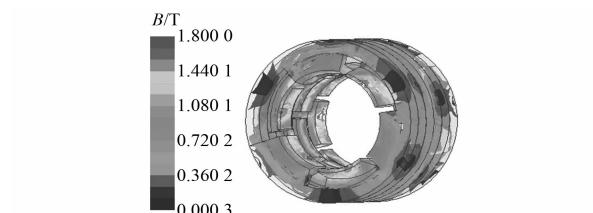


图 7 定子爪极磁密分布

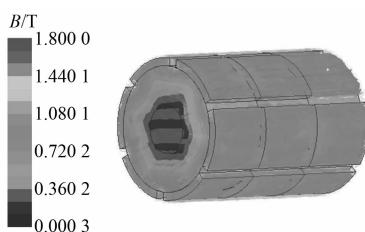


图 8 转子磁密分布

3 处位置为单段爪极电机首尾和中间位置,

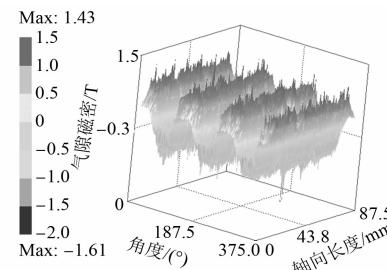


图 9 空载气隙磁密分布

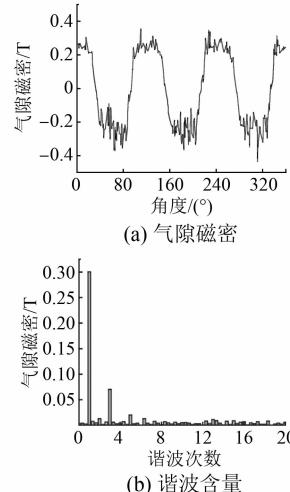


图 10 0 mm 处气隙磁密与谐波含量

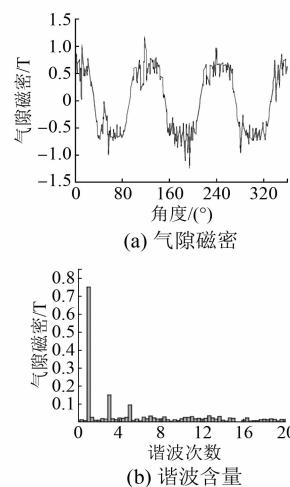


图 11 13 mm 处气隙磁密与谐波含量

依次为 0 mm、13 mm 和 26 mm, 如图 13 所示。3 个位置气隙内沿圆周方向分布的径向气隙磁场的正弦性畸变率分别为 24.7%、25.0%、21.4%。

3 温度场分析

电机稳定运行时会产生各种损耗, 使电机温

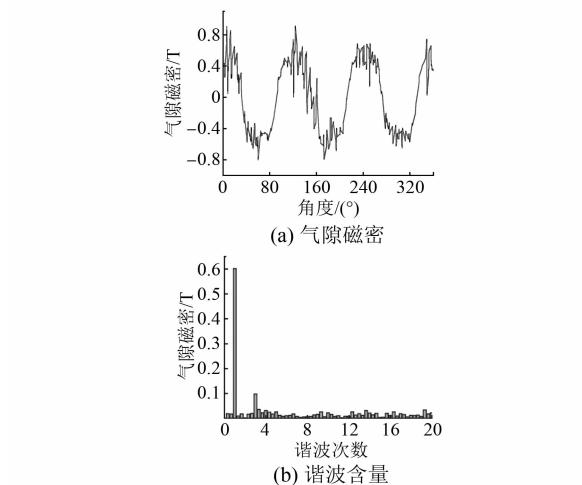


图 12 26 mm 处气隙磁密与谐波含量

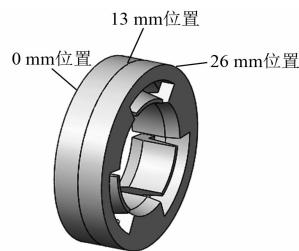


图 13 磁密选取位置示意图

度升高。电机温度对电机的性能有很大的影响,过高的温度会导致永磁体退磁,加速电机绝缘老化。真空泵电机工作在真空环境中,散热困难,电机温度是真空泵重点考虑的问题。真空干泵驱动电机趋于稳定时的三维温度场数学模型为^[16]

$$\left\{ \begin{array}{l} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_1} = 0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_2} = \alpha(T - T_{en}) \\ Q_{i-j} = A_i F_{ij} \varepsilon (T_i^4 - T_j^4) \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: T 为物体温度; q 为发热源密度; c 为材料的比热容; γ 为材料密度; t 为时间; S_1 为电动机绝热边界面; S_2 为电动机散热边界面; T_{en} 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 面法向导热系数; K_x, K_y, K_z 分别为电动机各介质 x, y, z 方向的导热系数; Q_{i-j} 是自平面 i 至平面 j 传递的热量; A_i 是平面 i 的表面积; F_{ij} 是两个平面的角系数; ε 是平面的总发射率; T_i 和 T_j 分别

为 i, j 两个平面的温度。

温度场仿真中的热源值是电机各部分损耗与其体积之比。本文主要的电机损耗是定转子铁耗、绕组铜耗以及保护套损耗,其值分别为 97.7、25.1、19.3 W。经联合仿真可以得到电机各部分温度图,如图 14~图 16 所示。

由温度分布图可知,电机定子平均温度为 121 °C,转轴平均温度为 60.3 °C。

永磁体使用的是 N38UH,最高工作温度为 180 °C,而电机稳定工作时永磁体最高温度为 61.4 °C,为运行在真空环境的永磁体预留了近三倍的安全裕度;真空泵电机转子主要通过转轴散热,转轴的温度也不宜过高^[17-18];由温度分布图可以看出,电机温度分布合理,定子温度高,可以通过水冷来降低电机温度^[19-20]。

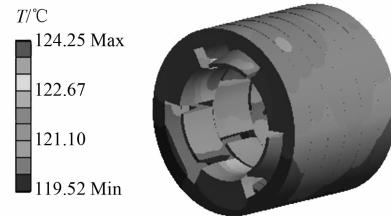


图 14 定子温度分布

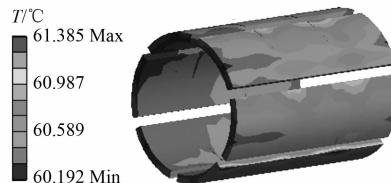


图 15 永磁体温度分布

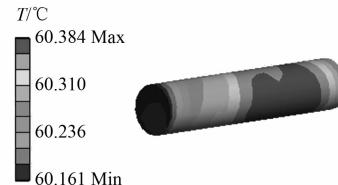


图 16 转轴温度分布

4 结语

本文设计了一款真空干泵用轴向分段式爪极电机,通过电磁与温度仿真分析了电机设计的可行性和合理性。通过算例电机仿真分析可知:

(1) 电机转矩会随爪极角增大而提高,因此在电机设计时可以考虑通过增加爪极角来提高转矩,有利于提高转矩密度。爪极角对转矩波动的影响较大,爪极角为 48° 时转矩波动为21.2%,而爪极角为 52° 时转矩波动为8.3%。从转矩和转矩波动角度出发,轴向分段式爪极电机爪极角应在爪极极弧系数为0.85附近取值。

(2) 爪尖长度不能取最大长度。爪尖长度取最大值时,其空载反电动势幅值与基波都明显低于其他爪尖长度。根据本文仿真结果,建议爪尖长度取最大长度的0.9~0.95倍。

(3) 轴向分段式爪极电机的永磁体最高温度为 61.4°C ,本文采用的永磁体最高工作温度为 180°C ,给永磁体预留了近3倍的安全裕度;最高温度在定子上,为 124.2°C ;转轴温度为 60.3°C 。电机温度设计合理,满足设计要求。

本文研究为轴向分段式爪极电机作为真空干泵驱动用电机提供了一定的参考依据。

【参考文献】

- [1] 白海军,张延华.永磁外转子爪极电机的爪极外形研究[J].微电机,2014,47(4): 6.
- [2] 白海军,张延华.新型永磁外转子爪极电机的发热分析[J].微电机,2014,47(9): 14.
- [3] 刘光伟.高速永磁外转子爪极电机研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2015.
- [4] OMRI R, LBALA A, MASMOUDI A. Characterization on the no- and on-load operations of an improved claw pole machine[C]//2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2018.
- [5] ZUO S, XIE C, WU X, et al. Numerical simulation and optimization of aerodynamic noise for claw pole alternator [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(3): 857.
- [6] 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.
- [7] 孙睿.光伏产业用真空泵屏蔽式电动机设计研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.
- [8] DU W, ZHAO S, ZHANG H, et al. A novel claw pole motor with soft magnetic composites [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(2): 8200904.
- [9] MA B, LEI G, ZHU J, et al. Design optimization of a permanent magnet claw pole motor with soft magnetic composite cores [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(3): 8102204.
- [10] LIU C, LU J, WANG Y, et al. Design issues for claw pole machines with soft magnetic composite cores [J]. Energies, 2018, 11(8): 1.
- [11] 韦福东,王建辉,刘朋鹏.基于软磁复合材料的超高速永磁同步电机电磁设计分析[J].电机与控制应用,2021,48(1): 78.
- [12] 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.
- [13] 刘宇.永磁外转子爪极调速电机设计方法研究与样机研制[D].沈阳:沈阳工业大学,2010.
- [14] 魏瀚阳.轴向多段式外永磁转子高速爪极电机电磁设计与损耗分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.
- [15] 刘光伟,滕伟彪,李庚午,等.高速爪极电机外永磁转子设计[J].电工技术学报,2015,30(14): 561.
- [16] 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.
- [17] 王宝,安跃军,王光玉,等.真空干泵驱动用电机转子热问题对比分析[J].电机与控制应用,2021,48 (5): 53.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.