

真空干泵用两种驱动电机热特性对比分析^{*}

李金龙¹, 安辉¹, 陆艳君², 胡玉勇¹, 邓文字³, 魏来¹, 尚华颖⁴, 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 110168;

3. 沈阳中北通磁科技股份有限公司, 辽宁 沈阳 110159;

4. 辽宁省节能监察服务中心, 辽宁 沈阳 110083)

摘要: 真空干泵驱动电机散热困难, 需要严格控制其的温升, 进而保证系统的长时间运行。以 30 kW 驱动电机为研究对象, 设计了一台异步电机和一台 18/12 极双凸极永磁电机。两种电机的外形尺寸和功率等级等条件相同。同时, 两种电机的冷却方式均采用机壳通有螺旋水道的水冷, 分别对两种电机进行了温度场分析。分析结果表明, 在额定运行时双凸极永磁电机具有更低的整体温升, 更加适用于真空干泵机组。

关键词: 真空干泵; 双凸极永磁电机; 异步电机; 温度场分析

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)06-0066-05

doi: 10.12177/emca.2023.054

Comparative Analysis of Thermal Characteristics of Two Kinds of Drive Motors for Vacuum Dry Pump^{*}

LI Jinlong¹, AN Hui¹, LU Yanjun², HU Yuyong¹, DENG Wenyu³, WEI Lai¹,
SHANG Huaying⁴, QI Lijun³, AN Yuejun¹

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

2. KINGSEMI Co., Ltd., Shenyang 110168, China;

3. Shenyang General Magnetic Co., Ltd., Shenyang 110159, China;

4. Liaoning Provincial Energy Conservation Supervision Service Center, Shenyang 110083, China)

Abstract: The heat dissipation of the vacuum dry pump drive motor is difficult, and it is necessary to strictly control its temperature rise to ensure the long-term operation of the system. Taking a 30 kW drive motor as the research object, an asynchronous motor and an 18/12 pole double salient permanent magnet motor are designed. The external dimensions and power levels of the two motors are the same. At the same time, the cooling mode of the two motors is water cooling with spiral water channel in the casing, and the temperature fields of the two motors are analyzed respectively. The analysis results show that the doubly salient permanent magnet motor has a lower overall temperature rise during the rated operation, which is more suitable for the vacuum dry pump units.

Key words: vacuum dry pump; double salient permanent magnet motor; asynchronous motor; temperature field analysis

收稿日期: 2023-01-20; 收到修改稿日期: 2023-03-01

^{*} 基金项目: 沈阳市重点技术攻关“揭榜挂帅”项目(22-316-1-02)

作者简介: 李金龙(1997—), 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

在很多企业中,真空泵是必不可少的设施^[1]。文献[2]总结了各种类电机的应用情况,并且介绍了真空泵驱动电机的种类。异步电机和永磁同步电机是真空干泵驱动用的主要电机。研究人员一直在研发新的电机拓扑结构。文献[3]采用永磁辅助同步磁阻电机作为真空泵驱动电机,研究稳态运行时的温度分布。文献[4]采用同步磁阻电机作为真空泵驱动电机,研究分析了稳态运行时的温度分布。文献[5]使用磁通切换电机作为真空泵驱动电机,研究其在稳态运行时的温度分布。真空泵的主流结构形式是电机与泵体一体化,因此驱动电机具有散热困难的问题。温升过高会造成驱动电机损坏,因此分析驱动电机整体温度分布情况是真空泵驱动电机研发的重点。文献[6]对电机各部分温度分布情况进行了仿真分析。文献[7]采用屏蔽式电机驱动真空泵,分析了屏蔽式电机的冷却和散热效果。

真空干泵驱动电机内部为真空状态,散热困难。减少转子的发热是解决真空干泵驱动电机散热问题的有效办法,双凸极永磁电机转子上不存在鼠笼,故双凸极永磁电机适用于驱动真空干泵。本文在仿真软件中建立了一台双凸极永磁电机模型,同时建立了一台具有相同功率和相同定子外径的异步电机模型。通过在这两台电机额定运行时进行有限元仿真分析,得到了异步电机和双凸极永磁电机的各部分损耗,经过相关计算得到了系统的内热源激励,然后在某商业软件中搭建两种电机的温度场仿真模型,两种电机的冷却方式完全相同,对电机进行了三维温度场仿真。

1 真空干泵驱动电机参数

本文分别设计了一台 18/12 极双凸极永磁电机和一台异步电机,并进行了温升对比。两种电机的使用场合、功率等级和冷却方式等均一致。两种电机的冷却方式均为水冷,以此保证真空干泵机组长时间安全稳定运行。两种真空干泵驱动电机的主要参数如表 1 所示。

2 电机损耗

根据表 1 中两种电机的结构参数,在某商业

软件中创建两种电机的仿真分析模型。通过仿真分析得到了电机损耗值,进而计算出热源值。两种电机各部分损耗值如表 2 所示。

表 1 两种电机主要参数

参数名称	双凸极永磁电机	异步电机
额定功率/kW	30	30
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000	3 000
额定电压/V	380	380
频率/Hz	600	50
相数	3	3
定子外径/mm	327	327
定子内径/mm	180	187
转子外径/mm	179	185
轴径/mm	58	72
铁心长度/mm	140	140

表 2 两种电机各部分损耗

参数名称	双凸极永磁电机	异步电机
转子铁心损耗	610	21
转子铜耗	0	961
定子铁心损耗	1 298	266
定子铜耗	106	988
永磁体损耗	88	0

由表 2 可知,双凸极永磁电机的总损耗比异步电机少,并且其转子上的损耗为 610 W,异步电机转子上的损耗为 982 W,可见双凸极永磁电机转子上的损耗更少。

3 电机温度场仿真分析

3.1 电机三维模型

真空干泵用两种驱动电机的三维模型分别如图 1 和图 2 所示。主要结构包括机壳、水道、环氧

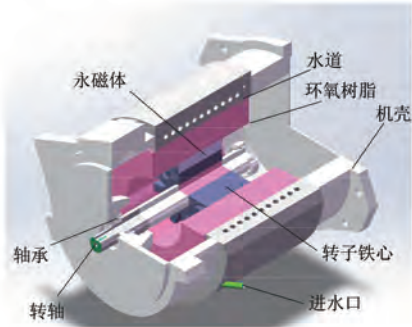


图 1 双凸极永磁电机结构图

树脂、转轴、轴承等。双凸极永磁电机和异步电机的机壳和水道均相同。

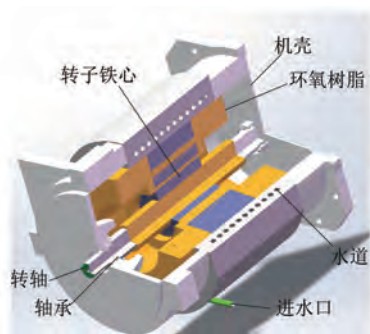


图2 异步电机结构图

3.2 温度场理论基础

在真空干泵运行时,电机的内部是真空条件,电机定、转子与真空接触面之间通过热辐射进行散热^[8-9]。真空干泵驱动电机的温度场可以用下式描述^[10]:

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \big|_{S_1} = 0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \big|_{S_2} = \alpha(T - T_e) \end{cases} \quad (1)$$

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 为温度; q 为热源密度; ρ 为密度; c 为比热容; t 为时间; S_1 为绝热边界面; S_2 为散热边界面; K 为 S_1 和 S_2 的法向导热系数; n 为边界法向量; β 为 S_2 的传热系数; T_e 为 S_2 周围的介质温度。

当电机达到动态热平衡后, $\partial T / \partial t = 0$, 可得到电机三维稳态温度场的数学模型^[11]。导热系数用下式描述^[12]:

$$K = K_0(1 + bT) \quad (2)$$

式中: K_0 为材料 0 °C 时的导热系数; b 为与材料属性相关的系数。

电机的冷却方式为机壳有螺旋水道的水冷,水道和机壳之间为强迫换流方式。根据传热学原理^[13]:

$$\begin{cases} Nu = \alpha d / \lambda_s \\ Pr = \mu c_p / \lambda_s \\ Re = \rho_f v_s d / \mu \end{cases} \quad (3)$$

式中: Nu 为努塞尔数; α 为流体与机壳表面的传热系数; d 为直径; λ_s 为流体的导热系数; Pr 为普朗特数; μ 为流体的动力黏度; c_p 为恒压比热容; Re 为雷诺数; ρ_f 为流体的密度; v_s 为流体的流速。

直径 d 的表达式如下:

$$d = 4 \frac{S}{P} \quad (4)$$

式中: S 为水道横截面积; P 为水道周长。

电机的努塞尔数可以用下式表示:

$$Nu = 0.116(Re^{2/3} - 125) \times Pr^{1/3} \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{2/3} \right] \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_\omega} \right)^{0.14} \quad (5)$$

式中: L 为水道长度; μ_f 为流体平均温度的动力黏度; μ_ω 为流体温度为 ω 时的动力黏度。

由式(3)~式(5)可知,冷却水的对流传热系数 α 的表达式如下:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_s}{d} \quad (6)$$

由经验可知机壳表面和端盖表面的传热系数分别如下所示^[14]:

$$\alpha_1 = 9.73 + 14v^{0.62} \quad (7)$$

$$\alpha_2 = \alpha_0(1 + 1.3\sqrt{v}) \quad (8)$$

式中: v 为电机表面空气流动速度,取 0; α_0 为静止空气中散热面的传热系数,取 14.2 W/(m²·K)。

电机机壳采用螺旋水道,环境的温度为 22 °C,水道半径为 4 mm,周向水道数为 11 周,进水口流速为 1.1×10⁻⁴ m³/s。

3.3 温度场热源设置

温度场仿真分析的目的是观察电机模型内部的温度分布情况和电机整体温升。根据电磁场仿真分析得到的电机损耗,确定温度场仿真中电机的热源值^[15]。在电机中进行热传导和热激励设置后,进行温度场仿真计算^[16]。在仿真计算时,两种电机采用相同的机壳和水道,选用的水道均为螺旋水道,冷却水的初始温度为 22 °C。

3.4 仿真结果分析

本文研究的电机采用浇注环氧树脂密封,以保证在真空干泵运行环境中的真空度。将电机模型导入仿真软件,将电机损耗与体积的比值作为热源值给入电机计算模型,计算电机温度分布。利用有限元软件得到两种电机的整体温度分布和关键部件的温度分布。双凸极永磁电机整体温度

分布如图 3 所示。

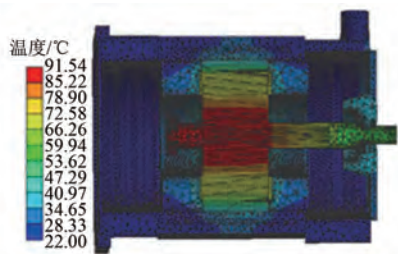


图 3 双凸极永磁电机整体温度分布图

由图 3 可以看出,双凸极永磁电机最高温度出现在转子,为 91.54 °C,最低温度出现在机壳,为 22.01 °C。这是因为双凸极永磁电机机壳上有螺旋水道,水与机壳之间通过热对流进行换热,散热效果好,机壳温度低,而电机内部通过辐射散热,散热效果差,转子温度高。双凸极永磁电机定、转子温度分布分别如图 4 和图 5 所示。

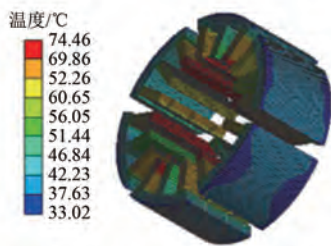


图 4 双凸极永磁电机定子温度分布图

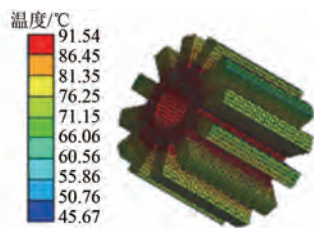


图 5 双凸极永磁电机转子温度分布图

由图 4 可知,双凸极永磁电机定子最高温度出现在定子齿部,为 74.46 °C,定子最低温度出现在定子轭部,为 33.02 °C。这是因为双凸极永磁电机定子齿部的散热方式为辐射散热,散热效果差,温度高,而定子轭部为对流散热,散热效果好,温度低。由图 5 可知,双凸极永磁电机转子最高温度在转子轭部,为 91.54 °C,转子最低温度在转子齿部,为 45.67 °C。原因是双凸极永磁电机转子的散热方式为辐射散热,散热效果差,转子温度

高。双凸极永磁电机绕组和永磁体温度分布分别如图 6 和图 7 所示。

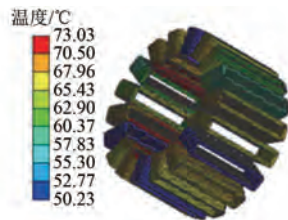


图 6 双凸极永磁电机绕组温度分布图



图 7 双凸极永磁电机永磁体温度分布图

由图 6 可知,双凸极永磁电机绕组最高温度出现在靠近转子侧,为 73.03 °C,最低温度出现在靠近机壳侧,为 50.23 °C。原因是双凸极永磁电机内部散热效果差,外部散热效果好。

由图 7 可知,双凸极永磁电机永磁体最高温度出现在永磁体内侧,为 53.15 °C,最低温度出现在永磁体外侧,为 33.33 °C。原因是双凸极永磁电机永磁体的散热方式为热传导,机壳上有水道,永磁体外侧离机壳近,散热效果好,温度低,而永磁体内侧离机壳远,散热效果差,温度高。

异步电机的整体温度分布如图 8 所示。

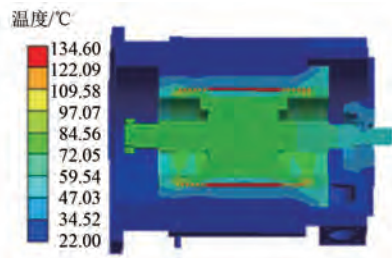


图 8 异步电机整体温度分布图

异步电机最高温度出现在绕组上,为 134.60 °C,最低温度出现在机壳上,为 22.00 °C。原因是异步电机机壳上有螺旋水道,水与机壳之间通过热对流进行散热,散热效果好,机壳温度

低,而绕组通过传导散热,散热效果差,绕组温度高。异步电机定、转子温度分布分别如图 9 和图 10 所示。

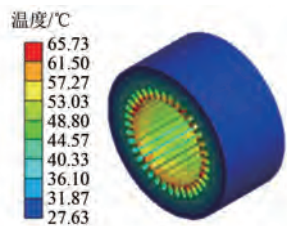


图 9 异步电机定子温度分布图

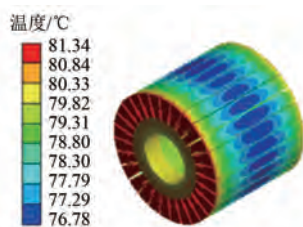


图 10 异步电机转子温度分布图

由图 9 可知,异步电机定子最高温度出现在定子齿部,为 65.73 °C,最低温度出现在定子轭部,为 27.63 °C。原因是异步电机定子的散热方式为传导散热,机壳中有水道,定子轭部离机壳近,散热效果好,温度低,而定子齿部离机壳远,散热效果差,温度高。

由图 10 可知,异步电机转子最高温度出现在转子端部,为 81.34 °C,最低温度出现在转子中部,为 76.78 °C。原因是异步电机转子端部与绕组端部通过传导散热,绕组上的热传递到转子端部,转子端部温度高,中部温度低。

异步电机鼠笼和绕组温度分布分别如图 11 和图 12 所示。

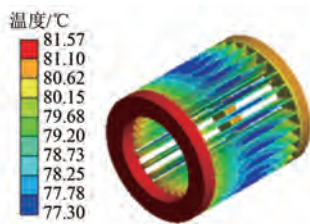


图 11 异步电机鼠笼温度分布图

由图 11 可知,异步电机鼠笼最高温度出现在鼠笼端部,为 81.57 °C,最低温度出现在鼠笼中部,为 77.31 °C。原因是鼠笼端部的散热方式为

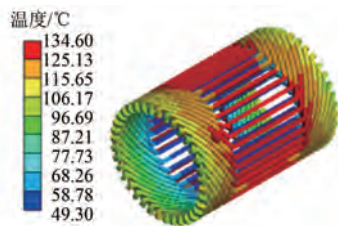


图 12 异步电机绕组温度分布图

辐射散热,散热效果差,端部温度高,而鼠笼条的散热方式为传导散热,散热效果好,温度低。

由图 12 可知,异步电机绕组最高温度出现在绕组外部,为 134.60 °C,最低温度出现在绕组内部,为 49.29 °C。原因是绕组的散热方式是传导散热,绕组外部散热效果差,温度高,绕组内部散热效果好,温度低。

4 结 语

本文以 30 kW 的真空干泵驱动电机为研究对象,在相同条件下设计了一台异步电机和一台双凸极永磁电机。利用仿真软件分析了两种电机的损耗和温度分布,得出以下结论。

(1) 本文设计的两种电机中,双凸极永磁电机定子铜耗为 106 W,异步电机定子铜耗为 988 W。在相同的条件下,双凸极永磁电机定子铜耗更低,发热量更少。

(2) 两种电机额定运行时,在冷却条件均为机壳带有螺旋冷却水道的水冷时,双凸极永磁电机的最高温度为 91.54 °C,异步电机的最高温度为 134.60 °C。电机在额定运行时双凸极永磁电机温升更低,更有利于真空干泵的长时间安全稳定运行。

【参考文献】

- [1] 姜燮昌. 适用于化工工业的真空泵[J]. 真空, 2020, 57(2): 1.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.

(下转第 87 页)

治理,可靠性强,容错性能好。

【参考文献】

- [1] 罗培,陈跃辉,罗隆福,等. 铁路电能质量控制系统容量优化设计[J]. 电工技术学报,2016,31(8): 181.
- [2] 唐宏伟,唐杰,林立. 基于 YNVD 平衡变压器的电气化铁路电能质量管理系统[J]. 电力自动化设备,2018,38(10): 197.
- [3] 王雅婷. 电气化铁路组合式同相供电经济性分析[J]. 铁道机车车辆,2018,38(2): 36.
- [4] SHU Z L, XIE S F, LU K, et al. Digital detection, control, and distribution system for co-phase traction power supply application[J]. IEEE Transaction on Power Electron,2013,60(5): 1831.
- [5] SHU Z L, XIE S F, LI Q Z. Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system[J]. IEEE Transaction Power Electron,2011,26(2): 334.
- [6] 李子欣,张航,雷鸣,等. 基于电力电子变压器的新型贯通式同相供电变流器[J]. 电工电能新技术,2018,37(5): 1.
- [7] 闫晗,舒泽亮,姚家焯,等. 基于三相-单相电力电子变压器的牵引供电系统负载不平衡、无功和谐波潮流分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(11): 159.
- [8] 常非. 新型牵引供电系统交直交变电所的 PET 结构研究[J]. 国网技术学院学报,2019,22(6): 1.
- [9] 常非,杨中平,林飞. 基于 MMC 的新型牵引供电系统研究(一)[J]. 铁道学报,2016,38(12): 41.
- [10] 常非,杨中平,林飞. 基于 MMC 的新型牵引供电系统研究(二)[J]. 铁道学报,2017,39(2): 39.
- [11] WU S, WU M L, WANG Y. A novel co-phase power-supply system based on modular multilevel converter for high-speed railway AT traction power-supply system[J]. Energies,2021,14(1): 253.
- [5] 宿泽达. 真空干泵用磁通切换电动机设计与分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2021.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 易龙芳,盛建明,顾菊平,等. 定子永磁型双凸极电机转子设计[J]. 微电机,2009,42(10): 12.
- [9] ZHU S, CHENG M, DONG J, et al. Core loss analysis and calculation of stator permanent-magnet machine considering DC-biased magnetic induction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2014,61(10): 5203.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 殷福久. 半导体装备用真空泵屏蔽电动机设计与分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2016.
- [13] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006.
- [14] XU X, ZHANG G, LI G, et al. Performance analysis and temperature field study of IPMSM for electric vehicles based on winding transformation strategy[J]. IET Electric Power Applications,2020,14(7): 1186.
- [15] DU G, XU W, ZHU J, et al. Power loss and thermal analysis for high power high speed permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2020,67(4): 2722.
- [16] 王宝. 真空干泵驱动用定子永磁型无刷电机设计与性能分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2021.

(上接第 70 页)