

真空干泵驱动用电机转子热问题对比分析*

王 宝¹, 安跃军¹, 王光玉², 孔祥玲², 安 辉¹, 韩 颖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: 针对真空干泵驱动用电机运行过程中转子热量不易散出, 使热量通过转轴传导至轴承引起轴承抱死的问题, 以 3.0 kW 驱动电机为例, 分别设计了异步电机(IM)、永磁同步电机(PMSM)和双凸极永磁电机(DSPM)3种方案。在保证3种电机外形尺寸、功率等级和额定转速相同的前提下确定了结构和电磁方案。同时, 基于相同的冷却条件分别对3种电机关键部件进行了温度场和应力场仿真。分析结果表明, 在额定运行时双凸极永磁电机的转子温升更低, 其轴承热形变量最小, 能够有效降低电机运行中轴承抱死的风险, 更有利于真空干泵机组的长时间稳定运行。

关键词: 驱动电机; 真空干泵; 温度场; 定子永磁; 热应力

中图分类号: TM 358 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)05-0053-07

doi: 10.12177/emca.2021.005

Comparative Analysis of Rotor Heat Problem of Drive Motor for Vacuum Dry Pump*

WANG Bao¹, AN Yuejun¹, WANG Guangyu², KONG Xiangling², AN Hui¹, HAN Ying¹

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

2. Vacuum Dry Pump Division, Shenyang Scientific Instrument Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168, China)

Abstract: Aiming at the problem that the rotor heat is difficult to dissipate during the operation of drive motor for vacuum dry pump, which causes the heat to be transferred to the bearing through the rotating shaft and the bearing to lock. Taking the 3.0 kW drive motor as an example, three schemes of induction motor (IM), permanent magnet synchronous motor (PMSM) and double salient permanent magnet motor (DSPMM) are designed respectively. The structure and electromagnetic scheme of the three motors are determined on the premise of ensuring that the three motors have the same size, power level, and rated speed. Based on the same cooling conditions, the temperature field and stress field of the key components of the three motors are simulated. The analysis results show that the rotor temperature rise of the DSPMM is lower during rated operation, and the bearing thermal deformation is the smallest, which can effectively reduce the risk of bearing lock during motor operation, and is more conducive to the long-term stable operation of the vacuum dry pump unit.

Key words: drive motor; vacuum dry pump; temperature field; stator permanent magnet; thermal stress

收稿日期: 2021-01-03; 收到修改稿日期: 2021-02-22

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

作者简介: 王 宝(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

随着真空技术应用在芯片制造、国防、医疗器械、精密仪器制造、食品生产和特殊材料制备等行业^[1],在半导体制造等一些领域,传统的油式真空泵已经难以满足工业生产条件。传统的真空泵在使生产空间获得真空环境的同时,因为泵油微粒的存在而污染环境,并且被抽介质可能会与泵油相互反应使泵油变质,影响真空泵的性能,所以在这些场合只能使用无油干式真空泵来获得洁净的真空环境^[2]。

真空干泵驱动电机的运行性能直接影响真空干泵机组的性能,选取合适的驱动电机类型对真空干泵机组安全运行具有重要的意义。电机额定运行时定子产生的热可以通过水冷带走,定子和转子之间为真空环境,真空环境下转子不易散热,因此对真空干泵驱动用电机的转子散热情况进行研究具有重要的意义。

真空干泵驱动电机转子温升过高会直接导致真空干泵机组无法正常运行。文献[3]分析了泵用电机温升过高导致的轴承抱死现象。文献[4]分析了电机运行过程中由于轴承温升过高导致轴承抱死进而引起输送介质燃烧事故。文献[5]利用转子温升进行温差发电并在转轴增加旋转热管散热器,降低了真空泵用异步电机转子温升。文献[6]设计了不同的冷却系统来降低异步电机温升。文献[7]对真空泵用永磁同步电机(PMSM)和异步电机转子温升进行了对比研究。文献[8-10]对双凸极永磁电机转子进行优化设计,降低了电机转子铁心损耗。目前,真空干泵机组使用的异步电机转子损耗较多,真空环境下转子产生的热量通过转轴传导至轴承,轴承内外套温差大并且膨胀不均匀,易使轴承抱死^[11],影响机组的安全运行。双凸极永磁电机具有效率高和低转子损耗的特点,适合在真空干泵机组上使用。

为了选用转子损耗更低的电机作为真空干泵驱动电机,本文分别在仿真软件中建立了双凸极永磁电机、PMSM、异步电机的二维有限元仿真模型,得到每种电机的各部分损耗;在理想情况下分别对3种电机进行三维温度场仿真;以电机的温升为输入对电机轴承进行了热形变和热应力的仿真。

1 真空干泵驱动电机结构模型及参数

1.1 电机三维模型

真空干泵驱动电机三维模型如图1所示。主要组成包括:机壳、螺旋型水路、环氧树脂、定子铁心、定子绕组、转子铁心、转轴和轴承等。双凸极永磁电机、PMSM和异步电机的机壳、端盖和水路均相同。

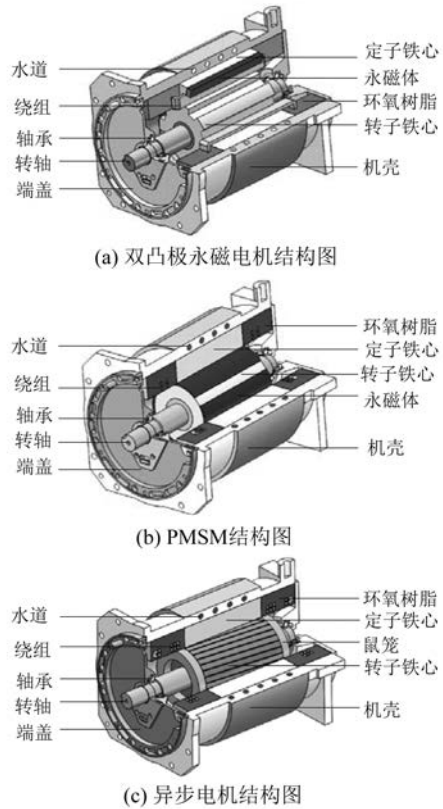


图1 3种真空干泵驱动电机三维结构图

1.2 电机结构参数

本文所设计的3种电机在适用场合、外形尺寸、功率等级、额定转速和冷却方式等方面均一致。根据电机设计的一般原理,分别计算出了3种电机的参数。表1所示为3种真空干泵驱动用电机的主要参数。

2 电机损耗分析

2.1 电机二维模型

Ansoft Maxwell 是一款电磁场有限元设计分析软件,经过多年的工程实践证明,该软件在电机设计方面具有足够的准确性和快捷性^[12]。

表 1 3种真空干泵驱动电机主要参数

参数名称	双凸极永磁电机	PMSM	异步电机
额定功率/kW	3	3	3
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000	3 000	3 000
额定电压/V	380	380	380
频率/Hz	400	100	52
相数	3	3	3
定子外径/mm	155	155	155
定子内径/mm	94	90	92
转子外径/mm	93	89	91
轴径/mm	40	45	28
铁心长度/mm	135	135	135

在3种电机外形尺寸相同的基础上,根据计算得到的电机参数在 Ansoft Maxwell 仿真软件中对3种电机建立了二维有限元仿真模型,如图2所示。

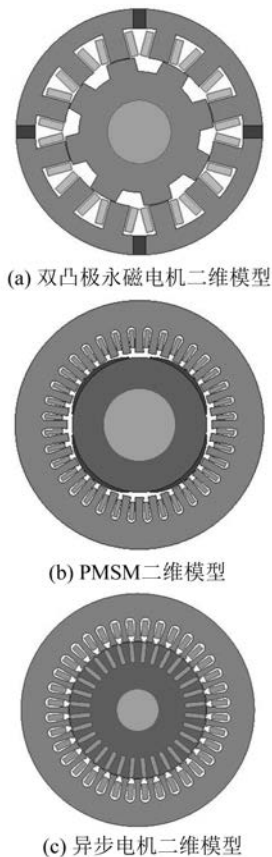


图 2 3种真空干泵驱动电机二维模型

2.2 电机损耗对比分析

通过 Ansoft Maxwell 仿真软件计算得到电机

额定运行状态的各部分损耗数值,电机损耗数值用于计算温度场仿真分析中电机各发热部件的热源输入值。3种电机各部分损耗如表2所示。

表 2 3种电机各部分损耗 W

参数名称	双凸极永磁电机	PMSM	异步电机
转子铁心损耗	29.66	0.06	4.06
转子铜耗	0	0	79.61
转子永磁体损耗	0	35.93	0
定子铁心损耗	70.05	73.69	32.67
定子铜损耗	86.53	137	240.64
定子永磁体损耗	1.52	0	0
转子总损耗	29.66	35.99	83.67

由表2可见,双凸极永磁电机转子损耗比PMSM降低了6.33 W,比异步电机降低了54.01 W。根据3种电机的损耗对比可知,本文设计的双凸极永磁电机、PMSM和异步电机中双凸极永磁电机转子损耗最低。

3 电机温度场仿真分析

3.1 温度场仿真实论基础

真空干泵驱动电机额定运行时电机内部为真空状态,转子热量的传递方式是热传导和热辐射,机壳与冷却介质之间热量传递方式是热对流,电机内部相邻模块之间以及机壳与外界空气之间是通过传导散热,电机定转子与真空接触面是通过辐射散热^[13-14]。电机冷却方式为水冷,根据热量传递的基本理论,真空干泵驱动电机的温度场数学模型^[15]可以表示为

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

式中: K_x 、 K_y 、 K_z 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_e 为 S_2 周围的介质温度。

当电机热平衡后, $\partial T / \partial t = 0$,可得到电机三维稳态温度场的数学模型^[16]。

导热系数可以近似看成随材料的温度线性变化^[17], 表示为

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

式中: K_0 为材料零度时的导热系数; b 为与材料属性相关的系数。

电机采用螺旋型水道冷却方式, 需要获得水道的散热系数, 水道与机壳之间的换流方式为强迫换流。通过流体相似理论^[18]有:

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

式中: Nu 是努塞尔数; α 为流体与机壳表面散热系数; d 为当前直径; λ_s 为流体的导热系数; Pr 是普朗特数; μ 为流体的动力黏度; c_p 为恒压比热容; Re 是雷诺数; ρ 为流体的密度; v_s 为流体流速。

当前直径 d 的表达式为

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

式中: S 为水道的截面积; P 为润湿周长。

电机螺旋型水道类似于圆管强迫对流换热模型, 努塞尔数可表示为

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

式中: L 为水道长度; μ_f 为流体平均温度下的动力黏度; μ_w 为流体在表面温度 ω 下的动力黏度。

由式(3)~式(5)可得, 冷却水的对流换热系数 α 的表达式为

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

由经验公式可得机壳与端盖表面散热系数^[19]。机壳表面散热系数为

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

端盖散热系数为

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

式中: ν 为电机表面空气流动速度, 仿真环境设定为静止空气, ν 取零; α_0 为静止空气中散热面的换热系数, 取 $14.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

所采用的冷却水路为螺旋水道, 冷却水进水口流速为 $6.5 \text{ L}/\text{min}$, 水道半径为 4 mm , 周向水道数为 4.5 周, 环境温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 电机热源及冷却水路设置

热力学分析的目的是计算电机模型内部的温度分布情况以及热流密度等。根据 Maxwell 电磁场仿真分析得到电机额定运行状态下各部分损耗确定温度场仿真中电机对应零件的热源输入值^[20-21]。电机在稳定运行时, 损耗在各热源内部均匀分布。在 Workbench 仿真软件中对电机各模块设置热源激励、热传导和热辐射等条件后进行温度场仿真^[22]。

根据热传导相关理论确定热源及导热条件。为了确保电机散热条件相同, 除了设置仿真环境温度一致外, 还需要保证 3 种电机冷却水路和水流速度相同。所选用水路为螺旋型水路, 冷却水初始温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 电机冷却系统模型如图 3 所示。

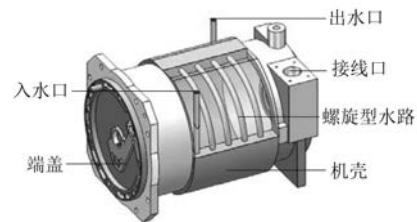


图 3 电机冷却系统结构模型

3.3 温度场仿真结果对比

利用 Workbench 有限元软件对电机进行三维温度场仿真分析, 得到 3 种电机转子温度分布云图如图 4 所示。

由图 4 可见, 双凸极永磁电机转子最高温度为 $45.60 \text{ }^\circ\text{C}$, PMSM 转子最高温度为 $55.78 \text{ }^\circ\text{C}$, 异步电机转子最高温度为 $67.32 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因为双凸极永磁电机转子上既没有鼠笼也没有永磁体, 所以电机额定运行时双凸极永磁电机比异步电机和 PMSM 的转子损耗更小, 在相同的冷却条件下双凸极永磁电机转子温度更低。在电机额定运行时双凸极永磁电机转子温升更低, 更有利于真空泵机组的安全运行。

3 种电机尾部轴承温度分布如图 5 所示。由图 5 可见, 双凸极永磁电机轴承最高温度为 $44.80 \text{ }^\circ\text{C}$, PMSM 轴承最高温度为 $53.67 \text{ }^\circ\text{C}$, 异步电机轴承最高温度为 $64.23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。3 种电机轴承温度分布均体现为轴承内套温度高于轴承外套温度, 原因是内套通过转轴与转子连接热量不易散

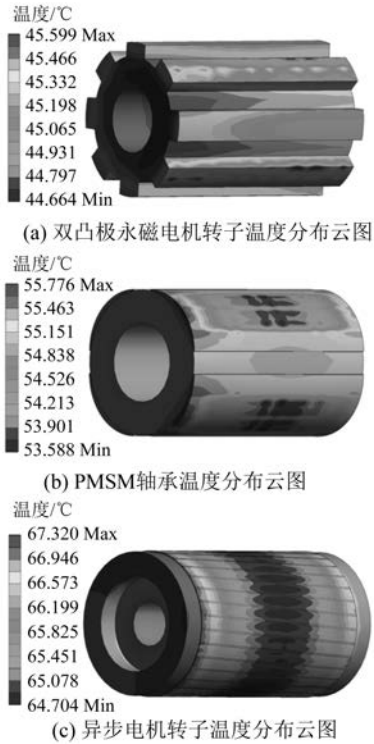


图4 3种电机转子温度分布云图

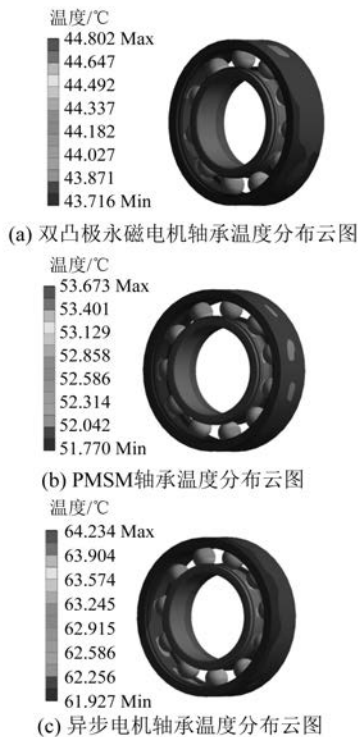


图5 3种电机轴承温度分布云图

出,外套与机壳连接散热效果相对较好。

4 轴承热形变与热应力分析

真空环境下转子热量不易散出,热量通过转轴传导至轴承,轴承内套温度高,外套温度相对较低,使轴承内套热膨胀比外套更加明显,容易出现轴承抱死现象^[23],因此真空泵用电机转子温升高会给真空泵机组带来安全隐患。为了更进一步了解真空泵机组长时间运行的稳定特性,有必要对驱动电机轴承进行热应力场仿真分析。由于电机尾部轴承易发生热膨胀抱死现象,分别对3种电机尾部轴承进行了热形变和热应力仿真。

4.1 热形变仿真实论基础

电机各模块在温度的影响下会热胀冷缩,由于物体具有体积随温度变化的特性,温升必然会使电机各部件产生膨胀。电机轴承外套与机壳接触,热量由机壳传导至轴承外套引起热形变;轴承内套与转轴接触,热量由转轴传导至轴承内套引起热形变;轴承内外套与滚珠之间通过热传导改变温度引起形变;轴承与真空腔体接触面只考虑热辐射引起的温升导致的形变;将温度场的最终分布结果作为热应力场的热负荷,电机尾部轴承室内表面设定为固定约束,进行仿真计算。在不受外力作用的情况下,电机部件的形变大小与温升的关系^[24]可以表示为

$$\Delta L = \alpha L_0 (t_1 - t_0) \quad (9)$$

式中: ΔL 为物体的膨胀量; α 为物体的热膨胀系数; L_0 为物体的初始长度; t_1 为物体升高后的温度; t_0 为物体的初始温度。

通过应力和温度变化量来表示应变的广义虎克定律^[25]为

$$\varepsilon_{xi} = \frac{1}{2G} \left(\sigma_{xi} - \frac{\nu}{1 + \nu} \Theta \right) + \alpha \Delta T \quad (10)$$

$$\gamma_{xixj} = \frac{\tau_{xixj}}{G}, i \neq j \quad (11)$$

式中: G 为剪切弹性模量, $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$; Θ 为物体的体积应力, $\Theta = \sum \sigma_{xi}$; ΔT 为温度差。

4.2 热应力仿真实论基础

物体随着温度变化会产生形变,温升不同,物体所产生的形变量也不相同。如果电机某些关键部位形变量过大则会影响电机正常运行^[26],因此需要对电机薄弱部件进行热应力场仿真。根据热

应力相关理论,将胡克定律推广到热应力问题上,得到真空干泵驱动电机的热应力场数学模型^[27]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \beta t \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] + \beta t \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] + \beta t \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 分别对应 x, y, z 方向上的应变; E 为物体的弹性模量; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别对应 x, y, z 方向上的应力; μ 为泊松比; β 为膨胀系数。

4.3 热形变和热应力仿真结果对比

在 Workbench 中以温度场仿真得到的轴承温度作为热应力场的输入对 3 种电机轴承进行热应力场仿真。3 种电机轴承热形变和热应力仿真结果如图 6 和图 7 所示。

根据图 6 可知,双凸极永磁电机轴承热形变最大值为 8.59×10^{-4} mm, PMSM 轴承热形变最大值为 1.19×10^{-3} mm, 异步电机轴承热形变最大值为 1.64×10^{-3} mm。3 种电机轴承热形变分布均体现为轴承内套热形变大于轴承外套热形变, 3 种电机轴承内套的温升大并且轴承材料相同, 因此产生了较大的热形变。由仿真结果可知, 双凸极

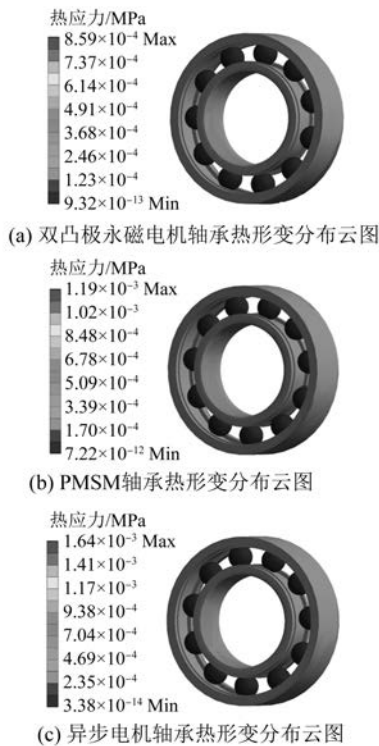


图 6 3 种电机轴承热形变分布云图

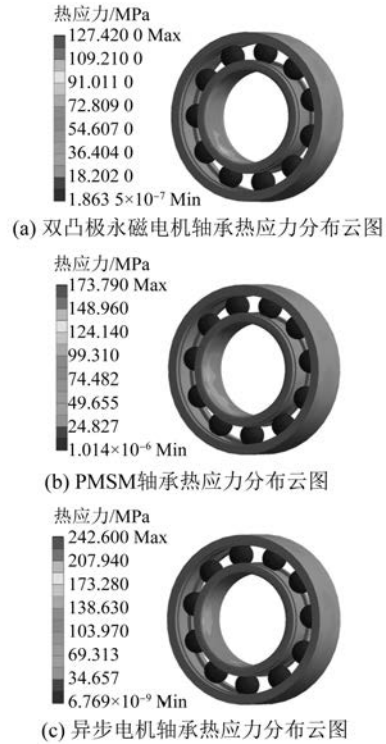


图 7 3 种电机轴承热应力分布云图

永磁电机轴承热形变最小,能够最大程度地降低轴承热膨胀引起的轴承抱死故障。

根据图 7 可知,双凸极永磁电机轴承热应力最大值为 127.42 MPa, PMSM 轴承热应力最大值为 173.79 MPa, 异步电机轴承热应力最大值为 242.60 MPa。3 种电机轴承热应力分布均体现为轴承内套热应力大于轴承外套热应力, 轴承内套热形变较大并且材料相同, 因此受到较大的热应力。可知, 双凸极永磁电机能够最大程度地降低轴承由于温度变化所承受的热应力。

根据图 6 和图 7 的仿真结果可知, 所设计的双凸极永磁电机轴承热应力和热形变均低于同工况下的异步电机和 PMSM, 减小了电机运行中轴承由于热膨胀导致抱死的几率。

5 结 语

本文针对同工况条件下的真空干泵驱动用 3 kW 电机进行了不同类型的电机设计, 通过有限元仿真软件对所设计的 3 种电机关键部件进行了损耗分析、温升对比、热应力和热形变对比。得出如下结论:

(1) 本文所设计的 3 种电机中,双凸极永磁电机转子损耗为 29.66 W, PMSM 转子损耗为 35.99 W,异步电机转子损耗为 83.67 W。相同工况下,双凸极永磁电机转子损耗更低,减小了转子发热量。

(2) 3 种电机额定运行时,在相同的冷却条件下,双凸极永磁电机转子温升为 20.60 K, PMSM 转子温升为 30.78 K,异步电机转子温升为 42.32 K,双凸极永磁电机转子温升更低。

(3) 对所设计的 3 种电机轴承进行热应力和热形变仿真,结果表明,双凸极永磁电机轴承热形变比异步电机降低了 47.62%,比 PMSM 降低了 27.82%。3 种电机中双凸极永磁电机轴承热形变最小,能明显降低真空干泵机组稳定运行中电机轴承抱死的风险,为真空干泵驱动用电动机新产品研发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.适用于化工工业的真空泵[J].真空,2020,57(2):1.
- [3] 李树文.液氨泵轴抱死原因分析及改造[J].内蒙古石油化工,2013,39(9):46.
- [4] 李和声.VP7/240/6L型液氧泵燃烧事故分析及教训[J].深冷技术,2006(1):57.
- [5] 杨维国.真空干泵用特种电机转子散热新方法 with 工程实施分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [6] 胡鑫.罗茨真空泵用异步电动机温度场和冷却系统分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [7] 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.
- [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] 马涛.12/8极双凸极永磁电机的分析与优化设计[D].天津:天津大学,2006.
- [11] 蒋东华.输油泵机组电机轴承抱死问题分析及处理对策[J].科技资讯,2016,14(21):47.
- [12] 安跃军,孟昭军.电机系统及其计算机仿真[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [13] 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.
- [14] CHEN S J, ZHANG Q, HE B, et al. Thermal analysis of high density permanent magnet synchronous motor based on multi physical domain coupling simulation [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology,2017,12(1):91.
- [15] 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.
- [16] 安跃军,张强,李文瑞.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] 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.
- [18] 姚望.永磁同步牵引电机热计算和冷却系统计算[D].沈阳:沈阳工业大学,2013.
- [19] 丁树业,朱敏,江欣.永磁同步电机三维全域温度场与温度应力耦合研究[J].电机与控制学报,2018,22(1):53.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 刘笑天. ANSYS Workbench 结构工程高级应用 [M].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [23] 张立心,巩方彬,吴艳花.一种防止电机轴承发热的新方法[J].电机技术,2013(6):60.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 秦鑫,安跃军,张志恒,等.化工泵用新型复合鼠笼结构屏蔽电机驱动性能及多物理场分析[J].电机与控制应用,2020,47(5):53.
- [27] 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.