

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-876-06

气悬浮离心式制冷压缩机电机冷却过程模拟

刘义腾 刘广彬 高一鸣 裴瑾泽

(青岛科技大学机电工程学院 青岛 266061)

【摘要】 离心式压缩机是离心式冷水机组的核心设备,气悬浮离心式制冷压缩机具有高速,无油,成本低等优点,是离心式压缩机的重要发展方向之一。气悬浮离心式制冷压缩机高速、紧凑的结构使其散热环境更加恶劣,需要更有效的冷却方式。建立了压缩机电机数学模型,数值模拟了不同进出口条件下制冷剂流场与电机温度场的分布。结果表明:绕组中心位置温度最高,靠近电机腔出口侧的端部冷却效果好于空腔侧,顺时针 45° - 180° 方向冷却效果最好;增大入口压力会增强冷却效果,入口压力每增大93kPa,绕组温度下降 2°C 左右;入口干度在0-0.6之间冷却效果变化较小,入口干度大于0.6时冷却效果明显下降;增大回气压力会降低冷却效果,回气压力每增大40kPa时绕组温度升高 3°C - 4°C 。通过研究压缩机电机轴向和周向的冷却差异,及不同进出口条件下压缩机电机的冷却情况,为不同工况下气悬浮离心式制冷压缩机电机冷却方案提供了思路。

【关键词】 气悬浮; 制冷压缩机; 数值模拟; 电机冷却

中图分类号 TB652 文献标识码 A

Simulation on Cooling Process of Motor for Centrifugal Refrigeration Compressor with Gas Bearing

Liu Yiteng Liu Guangbin Gao Yiming Pei Jinze

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, 266061)

【Abstract】 Centrifugal compressor is the core equipment of centrifugal chiller. Centrifugal refrigeration compressor with gas bearing has the advantages of high speed, oil-free and low cost. It is one of the important development directions of centrifugal compressor. The high speed and compact structure of centrifugal refrigeration compressor with gas bearing makes its heat dissipation environment worse, and requires more effective cooling methods. The mathematical model of compressor motor is established, and the distribution of refrigerant flow field and motor temperature field under different inlet and outlet conditions are numerically simulated. The results show that the temperature in the center of the winding is the highest, the cooling effect of the winding end near the outlet of the motor cavity is better than that of the winding end on the other side, and the cooling effect is the best in the direction of 45° - 180° clockwise with the outlet as the reference point in the circumferential direction; Increasing the inlet pressure will enhance the cooling effect. For every 93 kPa increase in the inlet pressure, the winding temperature will drop by about 2°C ; When the inlet dryness fraction is between 0 and 0.6, the cooling effect changes little. When the inlet dryness fraction is greater than 0.6, the cooling effect decreases significantly; Increasing the returning pressure will reduce the cooling effect, and the winding temperature will increase by 3°C - 4°C when the returning pressure increases by 40 kPa. By studying the axial and circumferential cooling difference of compressor motor and the cooling situation of compressor motor under different import and export conditions, an idea is provided for the cooling scheme of motor for centrifugal refrigeration compressor with gas bearing under different working conditions.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52176010)

作者简介: 刘义腾 (1996-), 男, 硕士, E-mail: 19651220@163.com

通讯作者: 刘广彬 (1983-), 男, 博士, 副教授, E-mail: lgbcomp@163.com

收稿日期: 2022-05-05

【Keywords】 Gas bearing; Refrigeration compressor; Numerical simulation; Motor cooling

0 引言

气悬浮离心式制冷压缩机是冷水机组的重要发展方向之一,其高速、无油、小型化的特点可以满足现代离心式制冷压缩机的发展需要^[1]。但另一方面,高速、紧凑的结构使气悬浮离心式制冷压缩机的电机散热环境更加恶劣,存在温度升高导致的电机效率和寿命降低等问题,压缩机和制冷系统的性能也会相应降低,因此相较于其他压缩机而言,气悬浮离心式制冷压缩机需要更加有效的冷却方式。

一般电机冷却的方式包含空气冷却、液体冷却、蒸发冷却^[2]等。空气冷却包含自然对流和强制风冷,自然对流冷却仅适用于发热量小的电机,强制风冷会增加电机的风磨损耗,降低电机效率。液体相较于气体,具有较高的比热容和导热系数,使液体冷却的效果优于气体冷却,但液体冷却需引入外部设备和冷却液。蒸发冷却包含浸润式与强迫内冷,是一种更加高效的冷却方式,利用制冷剂的相变可以吸收电机内部的热量,但对设备的要求更高,增加了设备的复杂性^[3]。

目前,针对电机温升、电机冷却方法及电机冷却过程对压缩机的影响的研究较多。Chen^[4]等人基于等效热路法建立了电机内部传热特性的集总参数模型和压缩机的部分负载模型,分析了部分负载条件下电机的冷却效果和压缩机的性能,结果表明当压缩机负荷因制冷剂吸入量变化或速度变化而下降时,电机温度上升,压缩机负荷因变频调速变化而下降时,电机温度下降。Duan^[5]等人基于二维有限元法对气悬浮离心式压缩机电机进行了稳态热分析,结果表明采用的蒸发冷却布置使电机具有相对较低的温升。Sim^[6]等人建立了一个使用气体轴承的高速永磁电机的三维热模型,结合电磁损耗分析,对电机内的传热进行了详细的研究,并预测了电机的损耗,结果表明模型预测结果与实验的误差小于12%。Bruckner^[7]针对使用气体轴承的高速电机,进行了实验研究,结果表明,随着气体轴承和电机腔内密度的增加,功率损耗呈指数增长。如果遵循传统的设计模式,这些损耗可能会大于系统总输出功率。He^[8]等人建立了描述半封闭双螺杆制冷压缩机电机内部流动和传热特性的综合数学模

型,预测了电机内部的温度分布并分析了冷却通道布置对电机内部温度分布的影响,结果表明定子冷却管的尺寸和形状对电机内部的温度影响较大,而转子冷却孔内径的影响较小。Branch^[9]基于电机结构建立了电机内部模型,通过数值模拟研究了吸入式制冷剂冷却电机的温度分布,结果表明电机内部吸入侧绕组温度最低,转子温度最高;电机内部的温度随着制冷剂质量流量的降低和功率的增加而显著升高。He^[10]等人基于热泵用半封闭双螺杆压缩机建立了电机内部制冷剂流道模型,数值模拟了高蒸发温度时的电机内部温度场与制冷剂速度场的分布,结果表明系统蒸发温度升高时,冷却电机效果减弱。目前针对汽车电机,传统压缩机电机冷却的研究较多,冷却方式多为空冷、水冷,且需引入外部设备与额外冷却介质,对于气悬浮离心式制冷压缩机电机冷却的研究较少。电机内部的温度决定了电机运行是否安全可靠,因此研究不同工况下电机内部温度分布对气悬浮离心式制冷压缩机安全经济运行具有重要意义。

本文针对冷水机组用气悬浮离心式压缩机,采用来自系统的制冷剂完成电机冷却。建立了气悬浮离心式压缩机电机的三维模型,通过CFD数值模拟了不同进出口条件下,电机内流场,温度场的分布,为制定不同工况下的最佳冷却方案提供理论基础。

1 冷却通道结构

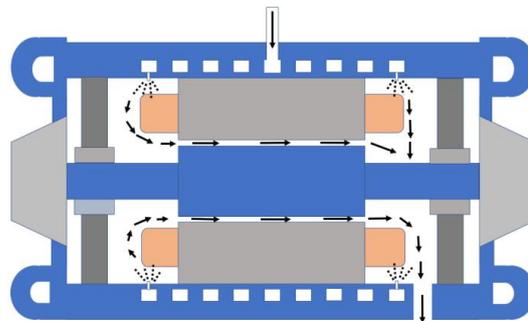


图1 电机冷却结构

Fig.1 Motor cooling structure

本文使用的冷却结构如图1所示,从冷凝器引出的制冷剂从电机外侧进入机壳夹层内,随后沿两侧螺旋流道向电机两端流动,螺旋流道两端封闭并

在电机绕组位置向心开有多个小孔,冷却定子后的制冷剂沿两端小孔喷出并进入电机腔,在电机腔内混合并冷却转子与绕组后,沿预留出口回到蒸发器。本文针对 R134a 为制冷剂的气悬浮离心式压缩机永磁电机,从制冷系统中引出部分制冷剂用于电机冷却,完成冷却后的制冷剂再次回到系统,无需外部设备即可完成电机冷却过程。

本文使用的压缩机电机为高速永磁电机,电机的主要参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数

Table 1 Main parameters of the motor

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|----------|-------|---------|-------|
| 额定功率/kW | 90 | 转子外径/mm | 113 |
| 额定转速/rpm | 25000 | 转子内径/mm | 71 |
| 额定电压/V | 380 | 定子外径/mm | 219.5 |
| 极数 | 4 | 定子内径/mm | 123 |

2 数学模型

2.1 定子损耗

定子损耗包括定子绕组铜耗和定子铁耗。

铜耗是电流通过电枢绕组造成的损耗,包括直流电阻产生的损耗和杂散损耗^[11]。选择合适的绕组导线尺寸,使集肤深度远大于导线半径,可以将集肤效应造成的杂散损耗降至最低^[12]。本文近似认为导线内部电流均匀分布,忽略杂散损耗。铜耗可根据下式计算^[13]:

$$P_{Cu} = mI^2R \quad (1)$$

式中, m 为电机的相数; I 为定子绕组电流的有效值, A; R 为每相绕组的电阻值, Ω 。

定子铁耗采用分离铁耗计算模型,将铁耗分为磁滞损耗、涡流损耗、附加损耗三部分^[14]。其中磁滞损耗是铁磁性导体反复磁化产生磁滞现象而消耗的能量,涡流损耗是定子铁芯受到交变磁场作用时,在其内部感应的循环电流产生的能量以热量的形式散失。铁耗可根据下式计算^[11]:

$$P_{Fe} = k_h f B^\alpha + k_c (Bf)^2 + k_e (Bf)^{1.5} \quad (2)$$

式中, k_h , α 为磁滞损耗系数; f 为频率, Hz; B 为磁通密度峰值, T; k_c 为涡流损耗系数; k_e 为附加损耗系数。

2.2 转子损耗

在永磁同步电机中,定子与转子磁场同步旋

转,转子的磁密波动不大,但定子齿槽效应、绕组磁动势的非正弦分布和绕组中的谐波电流所产生的谐波磁势也会引起涡流损耗^[15]。转子的涡流损耗相对于总损耗较小,可根据下式计算^[16]:

$$P_r = \int_z \frac{|J_z|^2}{\sigma} ds \quad (3)$$

式中, σ 为所求区域内的电导率, S/m; J_z 为电流密度的 z 方向分量, A/m²。

2.3 机械损耗

电机中的机械损耗一般包括摩擦损耗,风磨损耗,此外气隙中有冷却流体流动还会存在气体损失。电机运行过程中,轴承内部摩擦产生的损耗等称为摩擦损耗,转子在转动过程中与周围流体相互摩擦产生的损耗称为风磨损耗,风磨损耗与转子的转速有关,所以在高速电机中,风磨损耗是不可忽视的一部分。本文采用的气体轴承,摩擦损耗较小,可以忽略。风磨损耗可以根据下式计算^[15]:

$$P_f = kC_f \pi \rho \omega^3 r_1^4 \lambda \quad (4)$$

式中, k 为转子表面的粗糙程度,表面光滑时 $k=1$; C_D 为表面摩擦系数; ρ 为转子周围流体的密度, kg/m³; ω 为转子的角速度, rad/s; r_1 为转子的半径, m; λ 为转子的长度, m。

表面摩擦系数的计算公式为^[17]:

$$C_f = \frac{0.0152}{R_\delta} \left[1 + \left(\frac{8}{7} \right)^2 \left(\frac{4R_\alpha}{R_\delta} \right)^2 \right]^{0.38} \quad (5)$$

式中, R_δ 为径向雷诺系数; R_α 为切向雷诺系数。

对于流体损失^[17]:

$$P_g = \frac{2}{3} \pi \rho (r_2^3 - r_1^3) v_m u_m \omega \quad (6)$$

式中, r_1 为转子的半径, m; r_2 为气隙外侧半径, m; v_m 为气隙轴向速度, m/s; u_m 为气隙切向速度, m/s; ω 为转子的角速度, rad/s。

2.4 流动传热数学模型

压缩机电机内流场模型的建立主要遵循连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程,分别描述如下:

连续性方程^[18]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

式中, ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; μ 、 ν 、 w 为速度 u 在 x 、 y 、 z 方向上的投影。

动量守恒方程^[18]:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \rho F - \nabla p + \mu \nabla^2 u + \frac{u}{3} \nabla(\nabla \cdot u) \quad (8)$$

式中, ∇^2 为拉普拉斯算子; μ 为动力粘度,

$\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

能量守恒方程^[18]:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u T) = \nabla \cdot \left(\frac{K}{C_p} \text{grad} T \right) + s_T \quad (9)$$

式中, C_p 为比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为温度, K 。

电机内部主要通过导热、对流、辐射三种方式进行传热。

热传导^[19]: 电机固体内热量传递方式为导热, 利用微观粒子的热运动实现热能传递。

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \phi \quad (10)$$

式中, $\frac{\partial t}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial t}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial t}{\partial z}$ 为热流方向的温度梯度;

λ 为导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

对流换热^[19]: 电机内固体与流体换热的主要方式为对流换热, 是由流体各部分之间发生相对位移导致的热量传递过程, 通常伴随着热传导。

$$q = \alpha \Delta t \quad (11)$$

式中, α 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$; Δt 为换热两者之间的温差。

热辐射^[19]: 物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射, 因热的原因而发出的辐射能的现象称为热辐射, 当电机内温度场达到稳态时, 主要以导热和对流的方式传热, 辐射传热的影响忽略不计。

3 分析及讨论

本文基于气悬浮离心式制冷压缩机电机进行建模, 电机类型为高速永磁同步电机, 在建模时简化了部分对流动过程影响不大的部分缝隙和凹槽, 并假定电机各个部件紧密接触, 无接触热阻。电机冷却过程中, 不仅要考虑流体的流动情况, 还要考虑电机内部的温度场, 因此固体域与流体域都要进行网格划分, 采用流固耦合的方法进行计算, 使结果更加真实可靠。固体域包括电机的定子、转子、绕组, 轴、机壳, 流体域由机壳螺旋流道部分和电机内部流体部分组成。因电机结构较为复杂, 采用

四面体网格划分, 流体域边界部分采用 inflation 膨胀层, 总体网格数量为 6297223。

本文采用制冷剂冷却电机, 使用两相流模型, 入口边界条件为制冷剂进入电机外壳的温度、压力及干度, 出口边界条件为压力, 将损耗加载在固体上与流体进行流固耦合传热。

3.1 电机冷却过程分析

针对入口压力为 937kPa、温度为 37°C, 入口质量流量为 0.15kg/s, 电机转速为 25000rpm 工况, 通过数值模拟得到以出口侧绕组端面为基准面, 绕组的轴向不同位置处的截面温度云图, 如图 2 所示, 从图中可以看出: 轴向分布上, 绕组中心 $L=87\text{mm}$ 处温度最高, 出口侧绕组端部 $L=0\text{mm}$ 处温度最低, 出口侧温度要低于空腔侧; 周向分布上, 以出口方向为起始角度, $45^\circ - 180^\circ$ 方向冷却效果最好, 温差在 6°C 左右; 这是因为制冷剂由小孔以较高的速度喷到绕组上, 并且绕组端部与喷到电机腔的制冷剂接触比较充分, 所以换热好于绕组中心位置, 空腔侧制冷剂通过定转子间隙到达出口侧, 使出口侧绕组换热优于空腔侧。尽管小孔沿流道均匀分布, 但轴向位置随螺旋流道变化, 制冷剂喷出的方向和速度不同, 使得周向温度分布不同。

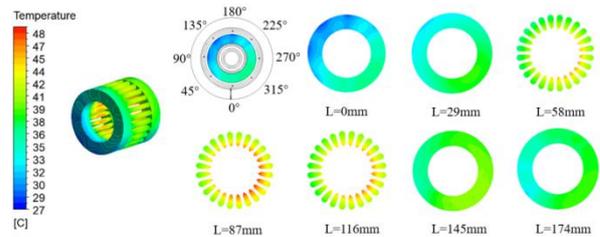


图 2 绕组温度云图

Fig.2 Winding temperature cloud map

如图 3 所示, 从图中可以看出绕组温度沿轴向先上升再下降, 同一周向角度在轴向的最大温差在 10°C 左右, 绕组整体最大温差可达 15°C; 靠近出口侧绕组在顺时针 315° 左右温度最高, 135° 左右温度最低, 靠近空腔侧绕组在 315° 左右温度最高, 45° 左右温度最低, 同一截面不同角度的最大温差为 4-6°C。这是因为中心位置换热差, 并且转子转动产生的风磨损耗会使绕组靠近中位置产生较大温升; 出口侧 45°、90° 方向的小孔靠近出口, 喷出的制冷剂有部分直接随出口流出电机腔, 所以靠近出口侧绕组在 135° 方向换热最好, 靠近空腔侧绕组在 45° 方向换热最好。

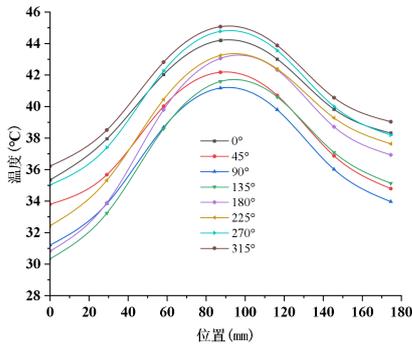


图3 不同位置处电机绕组温度

Fig.3 Motor winding temperature at different positions

3.2 入口压力对电机冷却的影响

为了研究进出口参数对气悬浮离心制冷压缩机冷却效果的影响,数值模拟了不同进出口条件下的电机内部温度场、流场分布。

图4是绕组温度、制冷剂质量流量随入口压力的变化。当入口压力由468kPa升至750kPa时,绕组平均温度逐渐下降,入口压力每提高93kPa,绕组温度下降2℃左右;当入口压力由750kPa升至937kPa时,绕组温度变化较小,温差小于1℃。这是因为不同的入口压力下,制冷剂的流量不同,随着入口压力提高,流量增加,换热量增大;虽然入口温度也有所上升,但换热主要发生在电机腔内,制冷剂在进入电机腔内时,急速膨胀,制冷剂温度主要由电机腔内压力决定,所以总体来说,随着入口压力的提高,绕组温度下降。当入口压力提高至750kPa以上时,随着流量的增加,冷却效果达到阈值,绕组温度变化较小。

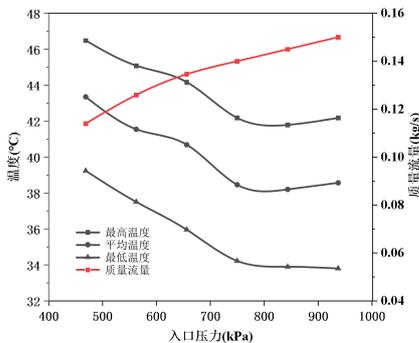


图4 绕组温度、质量流量随入口压力的变化

Fig.4 Variation of winding temperature and mass flow with inlet pressure

3.3 入口干度对电机冷却的影响

图5是绕组温度、制冷剂质量流量随入口干度的变化。在入口干度由0提高至0.6时,绕组的平

均温度变化较小,温差小于1℃,靠近绕组中心位置的温度先下降后上升,靠近绕组端部位置的温度逐渐上升;入口干度提升到0.6以上时,绕组的温度急速提升,入口干度为0.8时比入口干度在0-0.6时高了15℃左右。这是因为随着干度的提升,流量下降,同时,电机腔内制冷剂的密度随着干度的增加下降,也降低了风磨损耗,因此入口干度在0-0.6区间时,温度变化不明显,而由于端部与中心位置换热的差异,导致中心位置温度先下降后上升。图6表示电机螺旋流道中截面制冷剂干度分布,可以看出当入口干度提升到0.6以上时,制冷剂在螺旋流道内完全气化,进入电机腔内的为气态,由蒸发换热转变为单相换热,冷却效果急速下降,所以绕组温度明显升高。

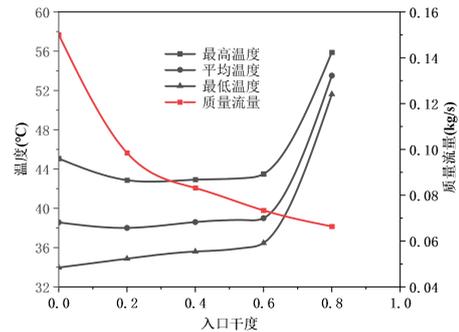


图5 绕组温度、质量流量随入口干度的变化

Fig.5 Variation of winding temperature and mass flow with inlet dryness

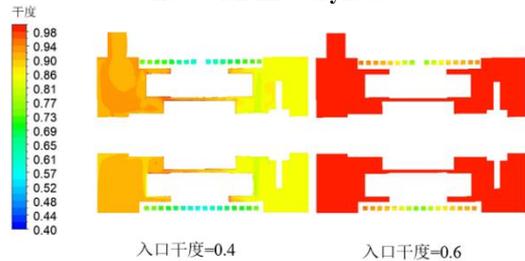


图6 制冷剂干度云图

Fig.6 Refrigerant dryness cloud map

3.4 回气压力对电机冷却的影响

图7是绕组温度、制冷剂质量流量随回气压力的变化。绕组温度随着回气压力的增加而升高,回气压力每提升40kPa,绕组温升3-4℃。空腔内的压力接近回气压力,回气压力的变化,对流量的影响较小,电机腔内的压力影响制冷剂进入电机腔时的状态,回气压力越高,电机腔内制冷剂的温度越高,换热效果越差,使得绕组的温度越高。并且因为换热主要发生在电机腔内,所以回气压力对电机冷却的影响也要大于入口压力和入口干度。

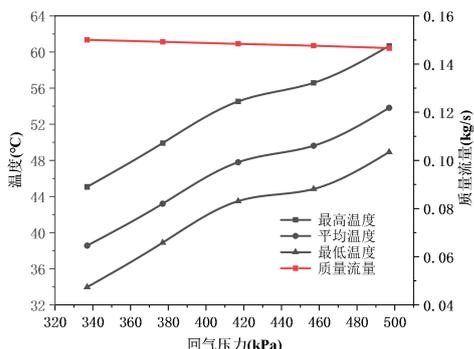


图7 绕组温度、质量流量随回气压力的变化

Fig.7 Changes of winding temperature and mass flow with returning pressure

4 结论

本文数值模拟了气悬浮离心式制冷压缩机电机冷却过程,分析了电机绕组温度分布规律及进出口条件对电机冷却效果的影响。轴向上绕组中心位置换热最差,靠近出口侧的端部换热较好,圆周方向上以出口方向为基准,沿顺时针 45° - 180° 方向换热最好,绕组整体最大温差为 15°C 。增大入口压力会增强冷却效果,入口压力每增大 93kPa ,绕组温度下降 2°C 左右,增大入口压力,会增加风磨损耗,进而影响冷却效果。入口制冷剂干度在 $0-0.6$ 之间时,绕组温度变化较小,而入口制冷剂干度大于 0.6 时,制冷剂在螺旋流道内的单相换热过程使得电机冷却效果急速下降。增加回气压力会削弱冷却效果,回气压力每增加 40kPa ,绕组温升 $3-4^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献:

- [1] 王春,赵远扬,滕斌,等.气悬浮离心式制冷压缩机轴承承载特性分析[J].机械制造,2021,59(1):34-38,51.
- [2] Gronwald P O, Kern T A. Traction motor cooling systems, a literature review and comparative study[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2021.
- [3] 王天煜,温福强,马振杰.高速永磁电机转子蒸发冷却系统数值模拟[J].大电机技术,2017(3):1-6.
- [4] Chen W, Xing Z, Shen J, et al. Thermal modeling for the motor in semi-hermetic screw refrigeration compressors under part-load conditions[J]. International journal of refrigeration, 2013,36(7):1874-1882.
- [5] Duan C, Guo H, Xing W, et al. Design and Analysis of a 120kW High-Speed Permanent Magnet Motor with a Novel Evaporative Cooling Configuration for Centrifugal Compressor[C]. 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2018:393-397.
- [6] Sim K, Lee Y B, Jang S M, et al. Thermal analysis of high-speed permanent magnet motor with cooling flows supported on gas foil bearings: part I-coupled thermal and loss modeling[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015,29(12):5469-5476.
- [7] Bruckner R J. Windage power loss in gas foil bearings and the rotor-stator clearance of high speed generators operating in high pressure environments[M]. 2009.
- [8] He Z, Xing Z, Chen W, et al. Thermal and hydraulic analysis on the flow around the motor in semi-hermetic twin screw refrigeration compressors[J]. Applied thermal engineering, 2013,58(1-2):114-124.
- [9] Branch S. A CFD study of Screw Compressor Motor Cooling Analysis[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2017,232(1): 012028.
- [10] 何永宁,金磊,邓文川,等.高温热泵用螺杆压缩机电机流场的数值研究[J].流体机械,2015,43(6):29-33.
- [11] 孔晓光,王凤翔,邢军强.高速永磁电机的损耗计算与温度场分析[J].电工技术学报,2012,27(9):166-173.
- [12] Aglen O. Loss calculation and thermal analysis of a high-speed generator[C]. IEMDC'03. IEEE, 2003,2: 1117-1123.
- [13] 林明耀,乐伟,林克曼,等.轴向永磁电机热设计及其研究发展综述[J].中国电机工程学报,2021,41(6):1914-1929.
- [14] Boglietti A, Lazzari M, Pastorelli M. A simplified method for the iron losses prediction in soft magnetic materials with arbitrary voltage supply[C].Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No. 00CH37129). IEEE, 2000,1:269-276.
- [15] 徐永向,胡建辉,邹继斌.表贴式永磁同步电机转子涡流损耗解析计算[J].电机与控制学报,2009,13(1):63-66, 72.
- [16] 徐云龙. 高速永磁电机损耗计算与热分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2009.
- [17] Saari J. Thermal analysis of high-speed induction machines[M]. Helsinki University of Technology, 1998.
- [18] 冯博琳.复杂型面螺杆转子结构及流场特性分析[D].汉中:陕西理工大学,2018.
- [19] 杨世铭,陶文铨.传热学(第四版)[M].北京:高等教育出版社,2006:4-9,42.