

双重水循环航空泵用屏蔽电机研究

朱 军^{1,2*}, 李宜飞¹, 刘瞳亮¹, 封海潮^{1,3}, 艾立旺^{1,3}, 胡龙浩¹

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003;

2. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室, 河南 焦作 454003;

3. 河南省智能装备直驱技术与控制国际联合实验室, 河南 焦作 454003)

Research on Shielded Motors for Dual Water Circulation Aviation Pumps

ZHU Jun^{1,2*}, LI Yifei¹, LIU Tongliang¹, FENG Haichao^{1,3}, AI Liwang^{1,3}, HU Longhao¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. He'nan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Mine Equipment, Jiaozuo 454003, China;

3. He'nan International Joint Laboratory of Direct Drive and Control of Intelligent Equipment,
Jiaozuo 454003, China)

Abstract: [**Objective**] In view of the operational requirements of the shielded motor for aviation pumps under special working conditions, as well as the issues of high loss, low efficiency, and complex structure in traditional shielded motors, this paper proposes a shielded motor for aviation pumps based on internal and external dual water circulation. [**Methods**] Through in-depth analysis of the structural characteristics and design index requirements of the shielded motor for aviation pumps, the water friction loss and shielded sleeve losses that affected the motor performance were analyzed and calculated in detail, and the performance differences of different shielded sleeve materials were compared. Starting from the key parameters such as air gap length and shielded sleeve thickness, a parametric scanning was performed to comprehensively analyze the effect mechanisms of these parameters on motor performance, which provided the basis for the selection of main electromagnetic parameters of the motor. In addition, regarding the variable load starting characteristics of the motor, the actual load carried by the motor was used as a reference to fit the starting characteristic curve for variable load starting analysis. Considering the fluid dynamics factors, the finite volume

method and finite element method were applied to analyze the stress distribution characteristics of the motor and shielded sleeve under different temperatures through the fluid-solid coupling. [**Results**] The multi-physical field coupling simulation and experimental results showed that the reasonable selection of the length-to-diameter ratio and air gap length of the motor could effectively reduce water friction losses. The poly-ether-ether-ketone was selected as the shielded sleeve material, and its internal stress could fully meet the strength requirements. Meanwhile, under the load condition, the error between the output torque of the prototype and the simulation results was 1.7%, and the maximum error in no-load rotational speed was 0.66%, proving that the motor could effectively meet the requirements of special operating conditions. [**Conclusion**] The experiment verifies the rationality and feasibility of the design, providing theoretical basis and practical reference for the optimization and design of shielded motors for aviation pumps.

Key words: internal and external dual water circulation; shielded motor; motor loss; starting characteristic; fluid-solid coupling

基金项目: 国家自然科学基金(52307050); 河南省科技攻关项目(202102210093, 212102210256); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2020GGJS055)

National Natural Science Foundation of China (52307050); Science and Technology Tackling Key Problems Project of He'nan Province (202102210093, 212102210256); Young Backbone Teacher Training Program of Higher Education Institutions in He'nan Province (2020GGJS055)

摘 要: [**目的**] 针对航空泵用屏蔽电机在特殊工况下的运行需求, 以及传统屏蔽电机存在的损耗高、效率低和结构复杂等问题, 本文提出一种基于内外双重水循环的航空泵用屏蔽电机。[**方法**] 通过对航空泵用屏蔽电机结构特点与设计指标要求进行深入剖析, 针对影响屏蔽电机性能的水摩损耗与屏蔽套损耗进行详细分析与计算, 并对比不同屏蔽套材料的性能差异, 从气隙长度、屏蔽套厚度等关键参数出发, 开展参数化扫描, 全面分析这些参数

对电机性能的影响机理,为电机主要电磁参数的选择提供依据。针对电机变负载启动特性,以电机所带真实负载为参考,拟合启动特性曲线进行变负载启动特性分析;虑及流体力学因素,采用有限体积法和有限元法,通过流固耦合分析电机及屏蔽套在不同温度工况下的应力分布特性。【结果】经多物理场耦合仿真与试验结果表明,合理选择电机的长径比与气隙长度能够有效降低水摩损耗,选用聚醚醚酮作为屏蔽套材料,其内部应力能够完全满足强度的需求。在负载工况下样机输出转矩与仿真结果相比误差为 1.7%,空负载转速最大误差为 0.66%,表明该电机能够很好满足特殊工况的要求。【结论】试验验证了该设计的合理性与可行性,为航空泵用屏蔽电机的优化设计提供理论依据与实践参考。

关键词: 内外双重水循环;屏蔽电机;电机损耗;启动特性;流固耦合

0 引言

在现代航空航天系统中,电机作为航空电气系统动力的核心部分,其重要性不言而喻。由于航空领域应用的特殊性,电机存在冲击、振动等工况,常规电机机械密封无法保证航空飞行器爬升、加速等特殊工作环境下电机的安全可靠运行。

为了实现液体的无泄露传输,上世纪以来各国专家学者研制了屏蔽电机,电机定、转子之间设置有屏蔽套,使得屏蔽电机具有无泄漏、冷却效果好以及安全可靠高等优点,被广泛应用于国防、化工和航天等重要领域^[1-5]。但是,屏蔽套多采用不锈钢和合金类材料,导致电机在正常工作时气隙磁场产生相对运动,在屏蔽套中产生涡流损耗,相比于传统电机的铜损和铁损占比更大,占电机总损耗的 5%~15%,使得屏蔽电机的效率降低^[6-9]。同时由于转子在水中运行,存在较大的水摩损耗,占电机机械损耗的 50%~90%^[10-13]。

关于屏蔽电机,国内外学者做了大量的研究工作。华中科技大学凌在汛^[14-15]等人以二维多层电磁场理论为基础,对等效电路电磁场进行解析求解,并推导转子与屏蔽套间耦合互感,得到了实心转子屏蔽感应电机实用等效电路模型;沈阳工业大学安跃军^[16]等人利用有限元分析研究了屏蔽套电阻率对于电机温升的影响,结果表明有限元分析法比经验公式得到的结果要更加精确;

合肥工业大学倪有源等^[17]采用三维瞬态有限元分析了屏蔽电机的电磁特性,考虑铁心饱和与趋肤效应的影响,分析电机内部磁场和涡流的分布,计算屏蔽套的涡流损耗;高莲莲等^[18]分析了不同屏蔽套材料对屏蔽式感应电机性能的影响;文献[19]对比屏蔽套材料为钛合金和碳纤维时转子应力的变化规律,并在极限工况下分析厚度和过盈量组合对应力的影响,为此类电机的设计提供了参考;文献[20]以一台兆瓦级高速永磁电机为例,采用三维有限元重点分析了影响电机转子强度的因素,总结归纳了设计原则和方法并得出结论,护套的厚度和过盈量都应该尽量的小。文献[21]建立转子应力解析模型,对几种不同材料的护套和永磁体的应力分布进行对比,得到了应力与电机转速、转子尺寸和温升的函数关系,进而确定了应力极限情况下的护套参数。

王灵沼^[22]在理论分析和大量试验的基础上,找到了影响水摩损耗的主要因素,并提出了水摩损耗修正系数,总结了水摩损耗的计算方法。文献[23]基于摩擦学和传热学理论对不同转速、不同表面粗糙度下的转子水摩损耗进行解析计算,并通过有限元分析验证解析计算的正确性。文献[24]通过优化参数拟合了水摩擦损耗和电磁损耗曲线,分析了不同参数对电机效率的影响。文献[25-26]探究了屏蔽电机在大雷诺数湍流状态下的流阻特性,研究了电机内部液体流速与转轴、雷诺数的关系,最终得出了摩擦损耗系数的经验方程,但该结果仅适用于部分情况,不具有普遍适用性。文献[27]探究了气隙中充满润滑油对电机机械损耗的影响,基于流体力学原理和电机摩擦损耗经验公式得到了损耗的精确计算方法,经过试验对比证明了方法的有效性。

本文设计一台 7 kW 的航空泵用屏蔽电机,针对屏蔽电机涡流损耗和水摩损耗进行理论分析;结合传统电机计算方法和有限元计算软件,对电机进行电磁设计,通过分析电机不同结构参数对屏蔽套损耗和水摩损耗的影响,确定电机的最优结构;针对本电机特有的频率、转速和电压等级对电机启动性能进行仿真分析;通过多物理场仿真分析得到电机不同温度下的应力分布,利用样机试验验证电机方案设计的合理性。

1 航空泵用屏蔽电机设计目标

1.1 电机结构与指标

以 7 kW 航空泵用屏蔽电机的研发为目标,本文所设计电机置于飞行器下方,通过特殊装置连接,工作时置于外界液体环境中。故结构上在定、转子之间设置屏蔽套,电机内部与外界可进行水循环,电机工作时带动外部水从后端盖进入,通过轴承和屏蔽套腔之后从前端盖流出,采用内外水循环方式进行冷却,显著降低电机的复杂程度,工作时屏蔽套腔内充满液体可起到润滑和冷却散热作用,电机结构图如图 1 所示。

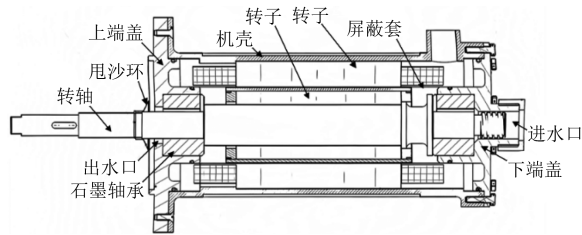


图 1 电机整体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of the motor

由于电机整体定转子结构与传统三相感应电机差别不大,故可参考传统感应电机电磁设计方法,所设计航空泵用屏蔽电机主要参数如表 1 所示。

表 1 电机基本设计参数

Tab.1 Basic design parameters of the motor

参数名称	参数值
输出功率/kW	7
额定电压/V	200
转速/(r·min ⁻¹)	5 700±100
频率/Hz	400
效率 η	≥75%
功率因数 $\cos\varphi$	≥0.75
起动转矩倍数	≥0.8

1.2 电机主要尺寸参数的确定

参考传统三相感应电机电磁设计,定子铁心内径和铁心有效长度为主要尺寸,在电机设计过程中主要根据式(1)确定电机主要尺寸。

$$D_i^2 l_{ef} = \frac{6.1P'}{\alpha_p' K_{Nm} K_{dp1} A B_\delta n} \quad (1)$$

$$P' = \frac{K_E P_N}{\eta_N \cos\varphi_N} \quad (2)$$

式中: D_i 为电枢外径; l_{ef} 为电枢长度; P_N 为电机

额定功率; P' 为电机的计算功率; α_p' 为电机计算极弧系数; K_{Nm} 为气隙磁场的波形系数; K_{dp1} 为基波绕组系数; A 为电机的线负荷; B_δ 为电机的气隙磁密; n 为电机转速; K_E 为额定负载时感应电势与端电压的比值; η_N 、 $\cos\varphi_N$ 分别为电机额定负载时的效率、功率因数。

根据式(1)和式(2),参考相似电机的结构尺寸得到电机初始结构参数如表 2 所示。由于屏蔽式潜水电机比较细长,以及屏蔽套的存在,导致电机气隙值较大,气隙磁密取值一般较低。而定、转子齿磁密取值又较高,励磁电流值相对较大,功率因数相对更低。同时电机转子浸在水中,冷却条件好,其定子电密和转子电密一般取值较高。

表 2 电机初始结构参数

Tab.2 Initial structural parameters of the motor

参数名称	参数值
极对数	4
定子外径/mm	110
定子内径/mm	77
轴向长度/mm	155
定子槽数	48
转子槽数	44
并联支路数	1

2 航空泵用屏蔽电机主要功率损耗

应用于水下的航空泵用屏蔽电机与传统电机相比结构特殊,由于其内部屏蔽套和内外水循环结构的存在,使得其水摩擦损耗和屏蔽套损耗在总损耗中占很大的比例。因此,本节针对电机性能影响较大的转子水摩擦损耗和屏蔽套损耗进行研究,重点分析转子水摩擦损耗和屏蔽套损耗对电机性能的影响。

2.1 转子水摩擦损耗

转子旋转过程中,定义转子两端圆盘部分所受阻力为 f ,则任意半径为 r 的微小环形面积 $2\pi r dr$ 所受摩擦阻力为 df ,如式(3)所示:

$$df = \lambda \gamma \frac{(r\omega)^2}{2g} 2\pi r dr \quad (3)$$

式中: λ 为转子两端圆盘部分摩擦系数; γ 为液体的密度; ω 为转子旋转角速度。

转子两端圆盘部分所受力矩 M_1 ($M_1 = f \times r$) 如式(4)所示:

$$M_1 = \int_{R_1}^{R_2} \lambda \gamma \frac{(r\omega)^2}{2g} 2\pi r dr \quad (4)$$

式中: R_1 、 R_2 分别为转子铁心内径、外径对应圆的半径。

同理可得转子外侧圆柱部分所受力矩 M_2 如式(5)所示:

$$M_2 = \lambda' \gamma \frac{(R_2 \omega)^2}{2g} \pi D_i \frac{D_i}{2} l_{ef} \quad (5)$$

转子表面所受力矩 $M = M_1 + M_2$, 如式(6)所示:

$$M = \lambda_m \frac{\pi}{20} \frac{\gamma}{g} n_1^2 D_i^3 \left(1 + 5 \frac{l_{ef}}{D_i} \right) \quad (6)$$

式中: λ_m 为转子表面的摩擦系数。

求得水摩损耗如式(7)所示:

$$P = K \gamma n_1^3 D_i^2 \left(1 + 5 \frac{l_{ef}}{D_i} \right) \quad (7)$$

$$n_1 = \frac{\pi D_i n}{60} \quad (8)$$

式中: K 为摩擦系数; n_1 为转子表面圆周转速。

由此可知摩擦系数 K 的取值决定了水摩损耗的计算结果。

根据流体力学可知液体的流动状态用雷诺数表示, 摩擦系数 K 的值随流体运动形态的雷诺数和泵腔宽度 B 和 D_i 之比变化而变化。确定流体运动形态的雷诺数和泵腔宽度 B 和 D_i 之比后可由文献[28]确定 K 的取值。

雷诺数计算式如式(9)所示:

$$Re = \frac{n R_2}{\nu} = \frac{\omega (D_i/2)^2}{\nu} \quad (9)$$

式中: ν 为液体的运动黏度。

最终可得水摩损耗如式(10)所示:

$$P = 0.143 5 K n^3 D_i^4 (D_i + 5 l_{ef}) \quad (10)$$

通过对水摩损耗进行理论分析, 可知航空泵用屏蔽电机的水摩损耗与电机转速、铁心长度和转子外径等有关, 具体影响在 3.1 节进行详细分析。

2.2 屏蔽套损耗

航空泵用屏蔽电机定子中间设有金属或合金屏蔽套, 当电机工作时, 屏蔽套在旋转磁场的作用下会产生涡流损耗, 相比于定子铁心, 虽然屏蔽套非常薄, 但由于感应电动势在屏蔽套中产生涡流, 会使该类电机的效率比常规普通电机更低。

非磁性屏蔽套损耗计算^[29]如式(11)所示:

$$P_c = K_1 D^3 l \Delta \gamma_1 B_g^2 \left(\frac{n_c}{10^3} \right)^2 \times 10^{-4} \quad (11)$$

式中: D 为屏蔽套直径; l 为定子铁心长度; Δ 为屏蔽套厚度; B_g 为气隙磁密; n_c 为同步转速; γ_1 为屏蔽套材料的电导率; K_1 为与定子铁心长度、磁场波形有关的系数, 常取 0.3~0.5。

由式(11)可知, 定子铁心长度、电机转速、气隙磁密、屏蔽套的材料和厚度都会影响屏蔽套损耗, 其中屏蔽套损耗与电机定子铁心长度三次方、气隙磁密平方和转速的平方成正比。所以在屏蔽电机设计过程中要根据不同电机的结构和性能要求, 选择最适合的屏蔽套, 尽可能减少屏蔽套损耗。

3 航空泵用屏蔽电机性能影响分析

3.1 航空泵用屏蔽电机水摩损耗分析

潜水电机水摩损耗的分析中要保证电机转子有效体积不变, 由式(1)可知 $D_i^2 l_{ef}$ 保持恒定, 在此基础上研究不同结构参数对电机水摩损耗和整体性能的影响。

3.1.1 不同长径比对电机各项损耗和性能的影响

长径比的变化意味着电机定子结构尺寸的变化, 为了得到更加准确的结果, 在保证电机有效体积不变的情况下, 需对不同长径比的模型调整其匝数和相关电机参数, 使电机输出功率和转速等条件保持一致。在此基础上, 电机不同长径比各项损耗分布如图 2 所示, 不同长径比对电机效率和功率因数、电机起动转矩倍数的影响分别如图 3、图 4 所示。

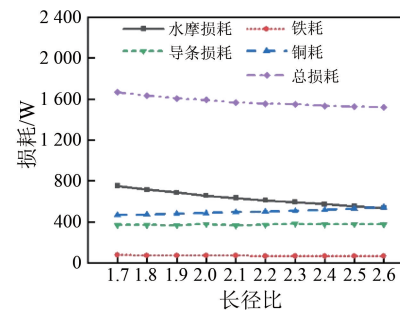


图 2 不同长径比时电机各项损耗变化

Fig. 2 Changes in various motor losses at different length-to-diameter ratios

由图 2 可知, 在保持电机其他参数不变的情况下, 随着电机长径比的增加, 铁耗和转子导条损耗基本不变, 电枢直径和铁心长度变化导致电机水摩

损耗逐渐降低,且减小幅度越来越平缓。铁心长度的增加导致转子电阻增加,铜耗呈增加趋势。水摩损耗的变化趋势要大于电机其他部分的损耗变化,电机总损耗随着长径比的增加逐渐降低。

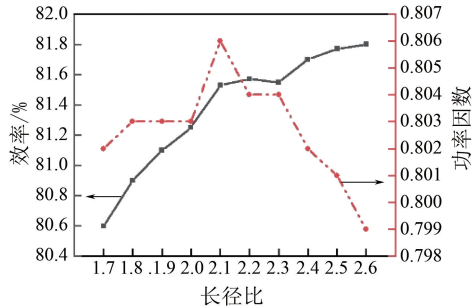


图3 不同长径比对电机效率和功率因数的影响

Fig. 3 Effect of different length-to-diameter ratios on the motor efficiency and power factor

由图3可知,随着长径比的增加,电机的效率呈现上升趋势,且上升趋势越来越平缓,这是由于长径比变化后,电机水摩损耗和总损耗降低使电机的效率提高。功率因数呈现先增加后减小的趋势,长径比的增加导致定子内径减小、铁心长度增加,使得电机端部漏抗下降、励磁电抗增大,导致功率因数升高,在长径比为2.1时功率因数达到最大值。若长径比进一步增加使定子内径减小,对电抗和槽漏抗的影响大于铁心长度增加对其产生的影响,功率因数开始降低。

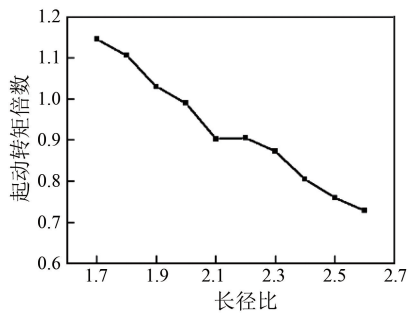


图4 不同长径比对电机起动转矩倍数的影响

Fig. 4 Effect of different length-to-diameter ratios on the multiple of the motor's starting torque

根据泵类负载的起动要求,起动转矩倍数需大于等于0.8。当其他参数一定时,感应电机起动转矩随频率和漏抗的升高而降低,且与电源电压平方成正比。本设计电机与常规电机相比频率更高,电压等级更低,所以探究其不同情况下的起动转矩倍数至关重要。如图4所示,随着长径比的

增加电机起动转矩倍数逐渐降低,超过2.4时起动转矩倍数已低于0.8,这是由于铁心长度的增加导致了转子导条长度增加,使得电机漏抗增加,起动转矩倍数降低。

综上分析,由于所设计电机工作环境、电压频率等因素的特殊性,为保证电机有较好的起动特性和最优的输出性能,长径比选为2.1。

3.1.2 不同气隙长度对电机损耗和性能的影响

气隙作为电机中重要的参数之一,很大程度上影响着电机性能指标。由于航空泵用屏蔽电机定转子之间屏蔽套的存在,对其进行水摩损耗分析时气隙的长度主要指有效气隙,即转子铁心外径和屏蔽套之间的气隙长度。气隙长度对各部分损耗的影响如图5所示。

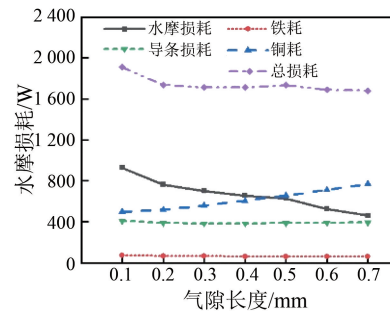


图5 气隙长度对各部分损耗的影响

Fig. 5 Effect of air gap length on losses in different parts

由图5可知,随着有效气隙长度的增加,导条损耗和铁耗基本不变,水摩损耗随着有效气隙的增加逐渐降低。气隙的增大使得转子摩擦液体雷诺数降低,导致摩擦系数降低,有效气隙的增大使得液体与转子表面的摩擦阻力减小,最终导致水摩损耗降低。

同时由于气隙的增加导致激磁电流增大,定子电流增加,因此定子铜耗有明显的上升趋势。气隙增加对水摩损耗的影响较大,水摩损耗降低的速度远大于其他损耗增加的速度,所以电机总损耗一开始有明显的降低。随着气隙对水摩损耗和定子铜损的影响趋于平衡,电机整体损耗逐渐趋于稳定。

气隙长度对功率因数和效率的影响如图6所示。由图6可知,有效气隙长度增大一方面使得电机磁阻增大,激磁电流上升,电机功率因数下降,且对功率因数的影响很大;另一方面,气隙的增加使得电机水摩损耗和总损耗降低,电机效率

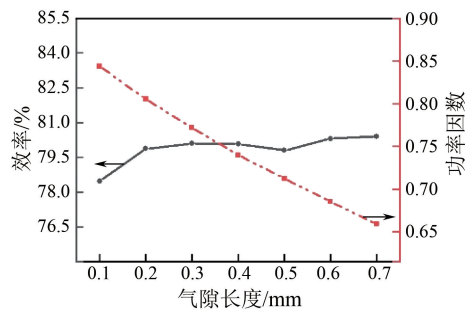


图 6 气隙长度对功率因数和效率的影响

Fig. 6 Effect of air gap length on power factor and efficiency

提高,但增长幅度变缓。

气隙长度对电机起动转矩倍数的影响如图 7 所示。由图 7 可知,气隙越大起动转矩倍数越大,与长径比的影响正好相反。气隙较小时,电机谐波磁场和漏抗较大,导致起动转矩和最大转矩都较小;气隙增大时,电机励磁电流增大,导致电机起动转矩增大。

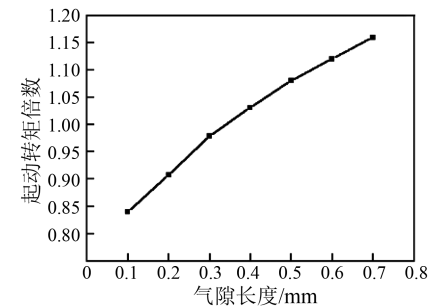


图 7 气隙长度对电机起动转矩倍数的影响

Fig. 7 Effect of air gap length on the multiple of the motor's starting torque

3.2 航空泵用屏蔽电机屏蔽套研究

对于屏蔽式电机来说,由于定转子之间屏蔽套的存在,使得定转子之间不仅存在磁路的耦合,也存在感应涡流的联系,涡流损耗的大小直接影响到电机的性能好坏。本节探究分析不同屏蔽套材料和尺寸对航空泵用屏蔽电机主要性能指标的影响。

3.2.1 屏蔽套材料和尺寸对损耗的影响

为了降低屏蔽套损耗,一般采用非磁性高电阻率材料制作,此时屏蔽套的损耗中仅包含涡流损耗,而不存在磁滞损耗。同时屏蔽套的厚度应该尽可能的薄,起到减小涡流损耗提高电机效率的作用。通过对现有屏蔽电机调查和总结,得到

目前常用的屏蔽套材料如表 3 所示。

表 3 各类型屏蔽套材料

Tab. 3 Various types of shielded sleeve materials

参数名称	碳纤维	不锈钢	哈式合金	聚醚醚酮
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 750	7 800	8 190	1 300
电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	0.3×10^5	1.2×10^6	8×10^5	绝缘
导磁性	不导磁	不导磁	不导磁	不导磁

保证电机其他参数不变,额定负载下运行时,选择不同屏蔽套材料和尺寸,以屏蔽套厚度为变量,选取厚度为 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm 和 0.5 mm,经有限元仿真得到其损耗分布如图 8 所示。

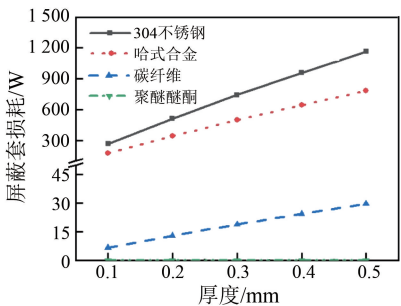


图 8 屏蔽套涡流损耗随厚度变化曲线

Fig. 8 Curves of eddy current loss variation with shielded sleeve thickness

由图 8 可知,随着屏蔽套厚度的增加,导致其等效电阻减小,屏蔽套感生电流增大,涡流损耗数值呈线性增加,且电导率大的材料损耗的增大趋势要大于电导率小的材料。304 不锈钢和哈式合金材料的涡流损耗要远大于其他两种材料,随着厚度的增加,304 不锈钢和哈式合金损耗最大值为 1 163 W 和 781 W,碳纤维损耗最大值为 29.7 W,聚醚醚酮材料由于绝缘,所以其内部涡流损耗数值为 0。

图 9 和图 10 分别展示了铜耗和总损耗随屏

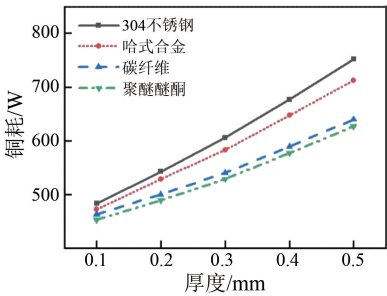


图 9 铜耗随屏蔽套厚度的变化

Fig. 9 Variation of copper loss with shielded sleeve thickness

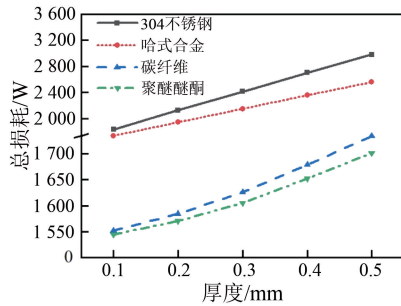


图 10 总损耗随屏蔽套厚度的变化

Fig. 10 Variation of total loss with shielded sleeve thickness

蔽套厚度的变化情况。由图 9 和 10 可知,屏蔽套厚度的增加导致电机机械气隙增大,使得定子相电流增加,造成了电机铜耗上升,总损耗随着各部分损耗的增加而增加。

3.2.2 屏蔽套对电机性能的影响

电机效率随着屏蔽套厚度的增加而降低,并且电导率大的材料屏蔽套厚度变化对于效率的影响要远大于电导率小的材料,其变化趋势如图 11 所示。

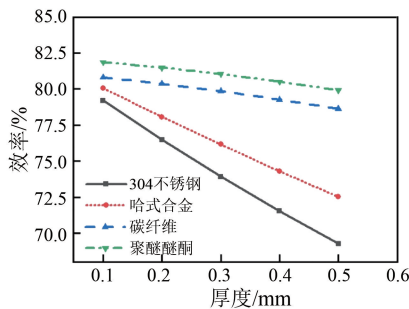


图 11 屏蔽套厚度对电机效率的影响

Fig. 11 Effect of shielded sleeve thickness on motor efficiency

给定交流磁路的磁通量与电压和频率有关,屏蔽套厚度增加相当于增大了电机的机械气隙长度,使得磁路中磁阻增大,励磁电流增大,使得定子相电流随着屏蔽套厚度的增加而增加,其变化趋势如图 12 所示。

图 13 展示了屏蔽套厚度对电机功率因数的影响。由图 13 可知,在电机绕组参数等不变的情况下,功率因数随着屏蔽套厚度的增加而降低。同时,当电机结构参数和绕组参数都一定时,在某一确定的屏蔽套厚度下,不同材料对电机功率因数的影响不同,电导率越大的材料如 304 不锈钢比电导率小的材料如碳纤维功率因数更高,并且这个趋势在屏蔽套厚度越大时越明显。

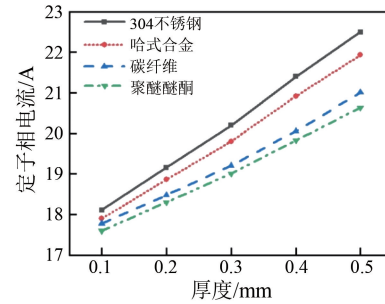


图 12 屏蔽套厚度对定子相电流的影响

Fig. 12 Effect of shielded sleeve thickness on stator phase current

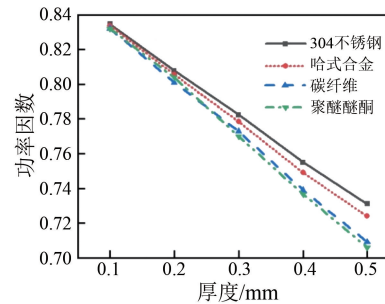


图 13 屏蔽套厚度对电机功率因数的影响

Fig. 13 Effect of shielded sleeve thickness on motor power factor

功率因数不同的主要原因在于金属屏蔽套内部产生的涡流损耗消耗了大量的有功功率,但是消耗的这部分有功并未有实际的出力。同时屏蔽套中涡流效应和集肤效应的存在使得电机气隙磁场受其影响越来越大,气隙中磁通量的分布发生变化,等效气隙长度降低,所以在同等厚度下高电导率材料的功率因数相比于电导率低材料更高。

综上所述,通过对电机屏蔽套损耗的分析和对电机性能的影响,考虑到实际加工公差等因素,本设计采用聚醚醚酮材质屏蔽套,屏蔽套厚度为 0.2 mm。电机主要结构参数如表 4 所示。

表 4 电机主要结构参数

Tab. 4 Motor main structural parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子外径/mm	112	轴向长度/mm	160
定子内径/mm	77.2	屏蔽套材料	聚醚醚酮
转子外径/mm	76.4	屏蔽套厚度/mm	0.2
有效气隙/mm	0.2	定、转子槽数	48、44

4 电机起动特性与多物理场特性分析

4.1 电机起动性能分析

根据所建立的有限元模型,对所设计屏蔽电

电机进行起动性能仿真。由于本设计电机为泵用电机,根据泵用电机变负载起动的特性和本设计电机所带负载的要求,得到负载随转速的变化情况如图 14 所示。

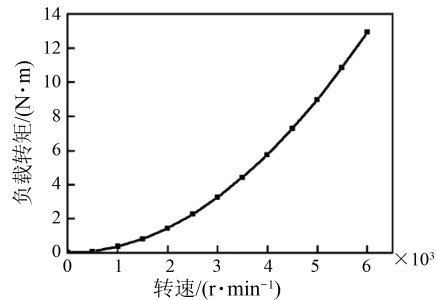


图 14 电机变负载特性曲线

Fig. 14 Motor characteristic curve under variable load
将负载特性曲线转化为函数输入至有限元分析软件中,通过有限元计算可得到电机在变负载情况下的起动特性,各项性能指标如图 15 所示。

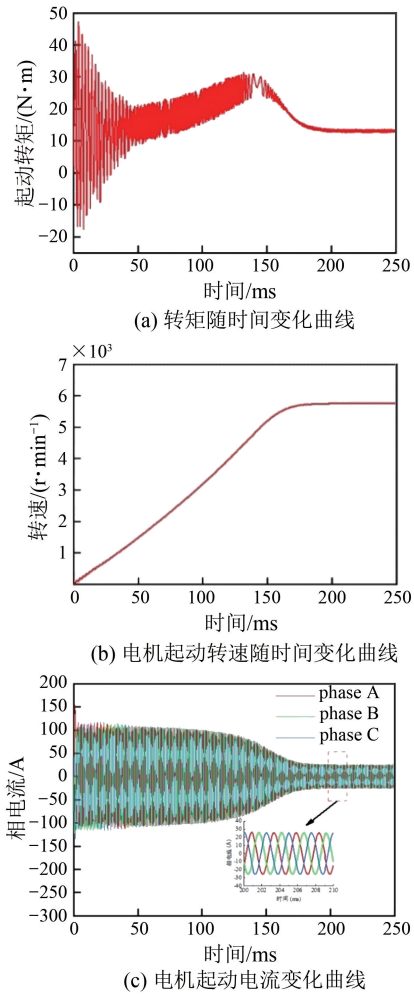


图 15 电机起动特性曲线

Fig. 15 Motor starting characteristic curves

由图 15 可知,电机在起动时刻转矩波动较大,150 ms 左右达到最大转矩,之后转矩逐渐稳定,起动转矩为 14.58 N·m,最大转矩为 31.4 N·m,起动转矩倍数为 1.24,满足电机设计要求。电机转速平稳上升,并未出现较大范围的波动和转速回落现象,150 ms 便可达到额定转速。随着电机加速,电机绕组相电流逐渐减小并趋于稳定,可以看出电流正弦性好,曲线平滑,没有毛刺和波形紊乱的现象。

4.2 流固耦合的应力分析

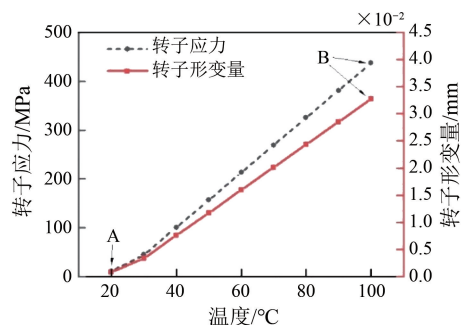
本文所设计电机屏蔽套固定在定子侧,不随电机转子旋转,所以无需考虑电机旋转时屏蔽套内部的离心应力分布。但是电机内部充满冷却水,转子旋转过程中会带动水对屏蔽套带来一定的冲击,对屏蔽套的冲击并不局限于单个方向而是综合的流体场问题。本节从多物理场入手将流体场与应力场结合起来,采用有限体积法和有限元法通过流固耦合分析不同温度时电机应力和形变量的大小。基于流固耦合的电机转子应力和形变量分布、屏蔽套各向应力分布分别如图 16、图 17 所示。

由图 16、图 17 可知,电机转子所受应力随着温度的升高而增大,在极限温度 100 ℃ 时最高应力为 437 MPa,并未超出硅钢片所能承受的极限。材料热膨胀系数的存在,使得屏蔽套所受各项应力随温度的变化而变化;电机在旋转过程中除了带动内部液体对屏蔽套有冲击之外,内部液体还具有向前流动的特性,屏蔽套前后所受应力不同,其径向应力总是要大于切向应力,符合电机工作时的实际情况。

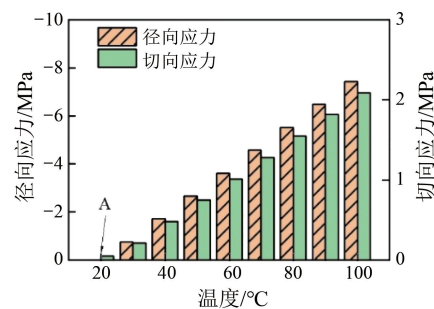
5 试验验证

为验证本文所设计电机的合理性,本节对设计 7 kW 电机进行了加工测试,屏蔽套位于电机定子组件内侧,电机整体结构及其测试平台配置如图 18 所示。

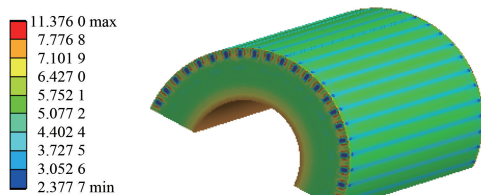
考虑到电机浸液后无法用测功机等设备直接测试电机输出性能,因此进行空负载测试时,将电机固定于测试平台上通过测功机模拟电机空负载情况进行测试。空负载测试结束将电机浸液,在水箱中测试航空泵用屏蔽电机带泵的水流量,电机额定负载状态下转速为 5 710 r/min,线电压为



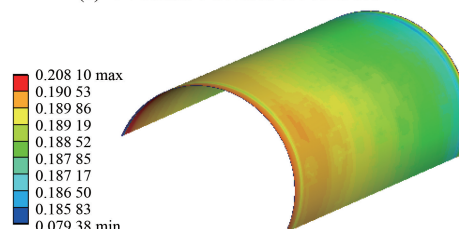
(a) 转子应力和形变量随温度的变化情况



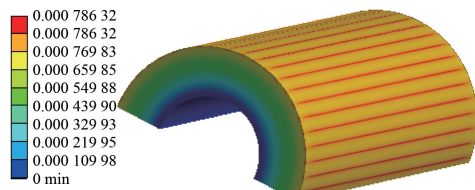
(a) 不同温度下屏蔽套各向应力分布



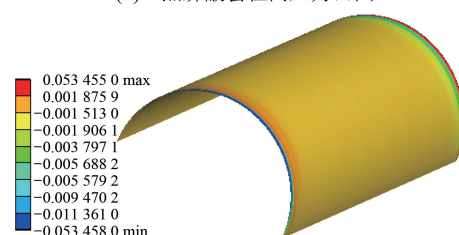
(b) A点应力云图



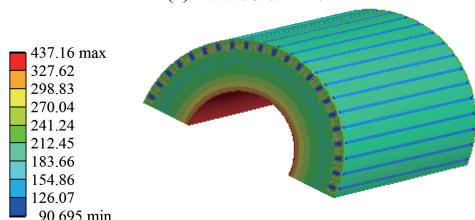
(b) A点屏蔽套径向应力云图



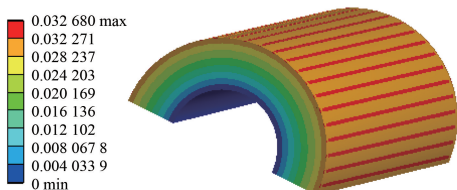
(c) A点形变量云图



(c) A点屏蔽套切向应力云图



(d) B点应力云图



(e) B点形变量云图

图 16 基于流固耦合的电机转子应力和形变量分布

Fig. 16 Stress and deformation distribution of the motor rotor based on fluid-solid coupling

200 V, 电机测试数据如表 5 所示。

由表 5 试验与仿真数据对比可知,各项指标基本一致,负载工况下样机输出转矩为 $11.7 \text{ N}\cdot\text{m}$,与仿真结果相比误差为 1.7%;转速实测与仿真略有差别的原因在于与电机采用水润滑石墨轴承相比,脂润滑类的轴承摩擦损耗略大;电机带泵浸水测试流量为 $210 \text{ m}^3/\text{h}$,表明电机能够满足设计指

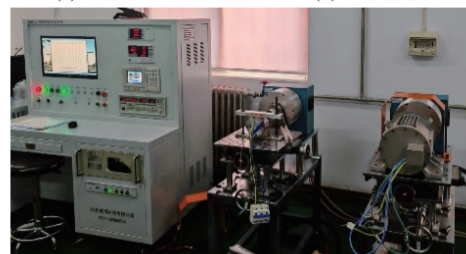
图 17 基于流固耦合的屏蔽套各向应力分布

Fig. 17 Stress distribution in various directions of the shielded sleeve based on fluid-solid coupling



(a) 屏蔽套结构

(b) 电机样机



(c) 电机测试平台

图 18 电机样机及测试平台

Fig. 18 Motor prototype and testing platform

标要求。

表 5 电机试验数据与仿真数据对比

Tab. 5 Comparison of motor test data and simulation data

测试参数	仿真数据	试验数据	误差/%
空载转速/(r·min ⁻¹)	5 980.30	5 953	0.4
负载转速/(r·min ⁻¹)	5 747.97	5 710	0.66
绕组电阻/mΩ	257.45	261.42	1.5
绕组电感/μH	832.07	848.30	1.9
电源频率/Hz	400	399.8	0.05
输出转矩/(N·m)	11.9	11.7	1.7
流量/(m ³ ·h ⁻¹)	—	210	—

6 结语

本文针对航空领域中频供电条件下潜水式屏蔽电机的特殊工况,提出了一种内外双重水循环的航空中频屏蔽式潜水电机。根据该类电机在损耗和起动性能方面的特殊性能要求,采用有限元法对不同影响因素进行了单目标优化选择,确定了最优电机方案,总结了影响航空泵用屏蔽电机性能的规律,并对电机起动性能进行仿真分析。通过制造样机进行各项试验,验证其设计的合理性,并得到如下结论:

(1) 提出一种内外双重水循环结构的屏蔽电机结构。可通过电机轴尾部螺纹进行液体循环,能够避免常规机械密封在冲击、振动工况下存在的安全隐患,可以保证在特殊工况下电机的可靠运行。

(2) 阐明了该类屏蔽电机的损耗机理。可知水磨损耗和屏蔽套损耗对屏蔽电机性能影响较大,且两者都与电机结构尺寸有关,故此类电机的设计需要先考虑水磨损对电机性能的影响,找到合适的长径比和气隙长度,在此基础上进行屏蔽套的选择。屏蔽套采用非金属材料,加工难度较高,因此厚度保持在 0.2 mm~0.5 mm 之间最优,既能有效降低气隙的大小,还保证加工工艺可行。

(3) 最终试验结果验证了所设计航空泵用屏蔽电机的合理性。其输出转矩与仿真结果相比误差为 1.7%,空负载转速最大误差为 0.66%,电机抽水流量为 210 m³/h,各项指标均满足指标要求,为此类电机的设计积累了重要的经验与参考依据。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

作者贡献

朱军、李宜飞进行了方案设计、内容总结与论文撰写,刘瞳亮进行了试验研究,封海潮、艾立旺、胡龙浩参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summarization, and paper writing were conducted by Zhu Jun and Li Yifei. The experimental research was performed by Liu Tongliang. The review and revision of the paper were involved by Feng Haichao, Ai Liwang, and Hu Longhao. All authors have read the final version of paper and consented for submission.

参考文献

[1] 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): 53-59+69.

QIN X, AN Y J, ZHANG Z H, et al. Driving performance and multiphysics analysis of new composite squirrel cage structure canned motor for chemical pumps [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(5): 53-59+69.

[2] 张文校,胡岩. 高速永磁屏蔽电机摩擦损耗分析与计算[J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3122-3129.

ZHANG W X, HU Y. Analysis and calculation of friction loss of high speed permanent magnetic shielding motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3122-3129.

[3] GIERAS J F. Design of permanent magnet brushless motors for high speed applications [C] // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems, 2014.

[4] 于添昊,李明,伦淑娴. 屏蔽套材料对屏蔽式永磁同步电机电磁场和温度场的影响研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 90-101.

YU T H, LI M, LUN S X. Study on the influence of can sleeve material on the electromagnetic field and

- temperature field of canned permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(4): 90-101.
- [5] ZHENG Y, ZHOU L, WANG J, et al. Dynamic startup characteristics analysis of single-winding pole changing line-start canned solid-rotor induction motor with squirrel-cage [C] // 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems, 2019.
- [6] 穆海琦, 周舒昊, 于添昊, 等. 真空泵用屏蔽式永磁同步电机电磁场-温度场互相迭代计算方法 [J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(2): 113-122.
- MU H Q, ZHOU S H, YU T H, et al. Electromagnetic field-temperature field iterative calculation method of canned permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(2): 113-122.
- [7] 张超, 朱建国, 韩雪岩. 高速表贴式永磁电机转子强度分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(17): 4719-4728.
- ZHANG C, ZHU J G, HAN X Y. Rotor strength analysis of high-speed surface mounted permanent magnet rotors [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(17): 4719-4728.
- [8] AHN J, HAN C, KIM C, et al. Rotor design of high-speed permanent magnet synchronous motors considering rotor magnet and sleeve materials [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(3): 1-4.
- [9] 褚赛. 屏蔽式永磁电机的屏蔽套效应及涡流分析 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- CHU S. Analysis of can effect and eddy current of canned permanent magnet motor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [10] LIU W, CHEN J, ZHANG C, et al. Ventilation system design and rotor air friction loss of high-speed permanent magnet machines [C] // 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Ningbo, 2017.
- [11] LIANG Y, BIAN X, YU H, et al. Finite-element evaluation and eddy-current loss decrease in stator end metallic parts of a large double-canned induction motor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(11): 6779-6785.
- [12] HUANG Z, FANG J, LIU X, et al. Loss calculation and thermal analysis of rotors supported by active magnetic bearings for high-speed permanent-magnet electrical machines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 63(4): 2027-2035.
- [13] 张忠明, 邓智泉, 孙权贵, 等. 铜屏蔽层对高速永磁无刷直流电机转子涡流损耗和应力的影响分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(8): 2476-2486.
- ZHANG Z M, DENG Z Q, SUN Q G, et al. Influences of copper shield on eddy-current loss and stress for a rotor of high-speed PM BLDC motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(8): 2476-2486.
- [14] 凌在汛, 周理兵, 张毅, 等. 笼型实心转子屏蔽感应电机电磁场及参数研究(一): 等效电路及其参数分析 [J]. *电工技术学报*, 2018, 33(15): 3518-3526.
- LING Z X, ZHOU L B, ZHANG Y, et al. Parameters determination and electromagnetic field analysis of canned solid-rotor induction motor (1): An overview of motor's equivalent circuit and its parameter analysis method [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(15): 3518-3526.
- [15] 凌在汛, 周理兵, 张毅, 等. 笼型实心转子屏蔽感应电机电磁场及参数研究(四): 等效电路参数有限元算法及验证 [J]. *电工技术学报*, 2018, 33(21): 4987-4997.
- LING Z X, ZHOU L B, ZHANG Y, et al. Parameters determination and electromagnetic field analysis of canned solid-rotor induction motor (4): Equivalent parameters calculation by finite element method and its verification [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(21): 4987-4997.
- [16] AN Y J, LIU G M, WEN H L, et al. Analysis and experiment of the eddy current losses for canned motor [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 383: 7521-7525.
- [17] 倪有源, 黄亚, 赵亮. 新型结构永磁屏蔽电机三维磁场分析和电感计算 [J]. *电工技术学报*, 2015, 30(1): 98-104.
- NI Y Y, HUANG Y, ZHAO L. Analysis of 3-Dimensional field and calculation of inductance for a

- new structure of a permanent magnet canned motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 98-104.
- [18] GAO L, WEI J, LI C, et al. Analyses on performances of megawatt double-canned induction motors with different can materials [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 32(2): 667-674.
- [19] 董传友, 金鹏飞, 杨子豪, 等. 低温高速永磁电机转子屏蔽套的设计及强度分析[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(7): 111-121.
- DONG C Y, JIN P F, YANG Z H, et al. Design and strength analysis of rotor shielding sleeve of low temperature and high speed permanent magnet motor [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(7): 111-121.
- [20] 王天煜, 温福强, 张凤阁, 等. 兆瓦级高速永磁电机转子多场耦合强度分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(19): 4508-4516.
- WANG T Y, WEN F Q, ZHANG F G, et al. Analysis of multi-field coupling strength for MW high-speed permanent magnet machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(19): 4508-4516.
- [21] FANG H Y, LI D W, QU R H, et al. Rotor design and eddy-current loss suppression for high-speed machines with a solid-PM rotor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 55(1): 448-457.
- [22] 王灵沼. 充水式潜水电机转子水磨耗的计算方法[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(4): 92-95.
- WANG L Z. Calculation method of water abrasion of the rotor in water-filled submersible motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(4): 92-95.
- [23] 王林森. 潜水泵用永磁同步电机的转子摩擦损耗研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- WANG L S. Research on rotor friction loss of permanent magnet synchronous motor for submersible pump [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [24] LI J, DI C, BAO X. Efficiency improvement for submersible motors by optimizing the ratio of diameter to shaft length [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 58(2): 1-6.
- [25] WANG S, YAO Z, SHEN H. Flow resistance modeling for coolant distribution within canned motor cooling loops [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33: 1-11.
- [26] YAMADA Y. Torque resistance of a flow between rotating co-axial cylinders having axial flow [J]. Bulletin of JSME, 1962, 5(20): 634-642.
- [27] 徐永明. 潜油电机机械损耗及隔磁段电磁参数计算分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008.
- XU Y M. Calculation and analysis of mechanical loss and electromagnetic parameters of magnetic separation section of submersible motor [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2008.
- [28] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- GUAN X F. Modern Pump Theory and Design [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2011.
- [29] WANG Z, LI X, LI Q. Calculation and analysis of eddy current loss in the shielding can of high temperature permanent magnet canned motor [C] // 2024 3rd International Conference on Energy and Electrical Power Systems, 2024.

收稿日期:2024-11-01

收到修改稿日期:2024-12-16

作者简介:

朱军(1984-),男,博士,教授,研究方向为特种电机驱动与控制、新能源发电和电力安全, zhujun@hpu.edu.cn;

*通信作者:朱军(1984-),男,博士,教授,研究方向为特种电机驱动与控制、新能源发电和电力安全, zhujun@hpu.edu.cn。