

核反应堆控制棒用驱动电机的优化设计

李思奇, 于思洋*, 徐英杰, 王凯冬

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Optimized Design of Drive Motors for Nuclear Reactor Control Rods

LI Siqi, YU Siyang*, XU Yingjie, WANG Kaidong

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

Abstract: [Objective] To address the challenges faced by drive motors for nuclear reactor control rods, including magnetic performance attenuation caused by the large air-gap structure, temperature rise limitation in high-temperature environments, and the complexity of multi-objective optimization, this paper proposes an optimization design method that balance efficiency and accuracy. This approach aims to enhance the output torque, operational stability, and thermal reliability of the motor. [Methods] Firstly, an electromagnetic design scheme was developed for the motor, determining the initial scheme of 24 slots and 4 poles pole-slot combination, radial "I" type rotor magnetic circuit and Recoma28 samarium-cobalt permanent magnet material. Secondly, seven key structural parameters were selected as optimization variables. Sample data were obtained based on maximum-minimum Latin hypercube sampling. Parameter sensitivity was analyzed using Pearson correlation coefficient, and a high-precision Kriging surrogate model was constructed to replace finite element simulation. Thirdly, the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) was employed to conduct multi-objective optimization targeting maximization of average torque and minimization of torque ripple. Finally, temperature field simulations were performed using Fluent software to validate the effectiveness of the designed cooling structure. [Results] After optimization, the average torque of the motor reached 17.074 N·m, which was 15.03% higher than the initial scheme, the torque ripple was reduced to 0.29%, with a decrease of 87.97%. The maximum temperature under rated working conditions was 117.8 °C, and the temperature rise was 58 K, meeting the

requirements of class F insulation and class B temperature rise limit. [Conclusion] The combination of Kriging surrogate model and NSGA-II effectively solves the problem of high computational complexity of multi-parameter optimization. On the premise of meeting structural and environmental constraints, the designed motor has significantly improved electromagnetic performance and thermal stability, which can provide reliable power support for the nuclear reactor control rod drive system.

Key words: large air-gap structure; multi-objective optimization; Kriging surrogate model; Pearson correlation coefficient; non-dominated sorting genetic algorithm II

摘要: [目的]针对核反应堆控制棒用驱动电机面临的大气隙结构导致的磁性能衰减、高温环境温升限制及多目标优化复杂等问题,本文提出了一种兼顾高效性与精度的优化设计方法,以提升电机的输出转矩、运行平稳性及热可靠性。[方法]首先,对电机进行电磁方案设计,确定 24 槽 4 极的极槽配合、径向“一”字型转子磁路及 Recoma28 钕钴永磁体材料的初始方案;然后,选取 7 项关键结构参数作为优化变量,基于最大最小拉丁超立方采样获取样本数据,通过 Pearson 相关系数分析参数灵敏度,构建高精度 Kriging 代理模型替代有限元仿真;其次,采用非支配排序遗传算法 II (NSGA-II) 开展以平均转矩最大化、转矩脉动最小化为目标的多目标优化;最后,通过 Fluent 软件进行温度场仿真,校核所设计的冷却结构的有效性。[结果]优化后电机平均转矩为 17.074 N·m,较初始方案提升 15.03%;转矩脉动降至 0.29%,降幅达 87.97%;额定工况下最高温度为 117.8 °C,温升 58 K,满足 F 级绝缘与 B 级温升限值要求。[结论]Kriging 代理模型与 NSGA-II 的结合有效解决了多参数优化的高计算复杂度问题,所设计的电机在满足结构与环境约束的前提下,电磁性能与热稳定性显著提升,可为核反应堆控制棒驱动系统提供可靠的动力支撑。

基金项目: 辽宁省自然科学基金联合基金(2023-MSLH-245)

Liaoning Provincial Natural Science Foundation Joint Fund (2023-MSLH-245)

关键词: 大气隙结构; 多目标优化; Kriging 代理模型; Pearson 相关系数; 非支配排序遗传算法

0 引言

核电作为我国实现“双碳”战略目标和优化能源结构的重要组成部分,具有发电稳定、能量密度高以及运行寿命长等显著优势^[1-2]。其中,控制棒驱动电机是核反应堆的核心设备之一,其主要功能是精确调节控制棒在堆芯中的位置,实现对反应堆功率的灵活调控以及紧急情况下的安全停堆^[3-5]。控制棒驱动电机的可靠性与控制精度直接关系到核电站的运行安全性、稳定性与可控性,因此设计一台高效可靠的驱动电机是保障核反应堆安全高效运行的重要基础。核反应堆用驱动电机的设计涉及到气隙磁场分布、磁路饱和以及温升限制等多重因素的制约,对其进行多目标优化设计成为国内外学者的研究重点^[6-8]。

文献[9]采用最大化改善期望准则,对基于永磁电机的代理模型优化方法进行了改进,通过更科学地引导采样点的选取,有效提升了优化效率与设计质量。文献[10]提出了一种搜索区域动态管理策略,通过限制每代优化过程中搜索空间的范围,将优化聚焦于更具潜力的设计区域,从而显著减少了目标函数的调用次数,提高了优化效率。文献[11]创新性地将遗传算法与粒子群优化算法相结合,并应用到永磁电机的优化设计中,充分发挥了全局探索与局部精细调节的优势,增强了算法的收敛性并提高了解的精度。

文献[12-15]采用田口法对不同永磁电机的设计参数进行优化并验证了优化结果的可行性。文献[16-18]通过遗传进化算法对永磁电机进行多目标优化,有效提升了电机的综合性能。文献[19]利用蚁群算法对外转子永磁同步电机进行了优化设计。文献[20-25]引入代理模型、改进布谷鸟算法和改进粒子群算法等,深入探索了电机结构参数与电磁性能之间的复杂非线性关系,在一定程度上实现了设计参数的优化与电机性能的提升。

尽管上述方法在提升优化效率、降低计算复杂度方面表现出良好效果,但其研究主要集中于单一或少数关键性能指标的优化,且目标函数通

常依赖高保真度的有限元分析,导致在多参数、多工况条件下优化过程计算量巨大。

本文针对核反应堆控制棒用驱动电机,提出一种 Kriging 代理模型和非支配排序遗传算法 II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)相结合的多目标优化设计方法。首先提出电机设计方案;其次通过 Kriging 代理模型和 NSGA-II 进行电机优化设计,得到电机设计参数与电磁性能的关系;然后通过有限元仿真进行方案校核并对电机的性能进行分析;最后进行温度场校核,验证本文设计的电机在一定温度下能够完好运行。

1 电磁设计

核反应堆控制棒用驱动电机工作于苛刻的高温环境中,其转子需在极端工况(345 °C,水介质)中具备密封功能,受到工作需求、环境温度、变频器及安装尺寸等多重因素的限制。电机的电磁性能需求及工作限制条件如表 1 所示。

表 1 核反应堆控制棒用驱动电机性能参数要求

Tab. 1 Performance parameter requirements of drive motor for nuclear reactor control rod

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定转矩/(N·m)	14	电机最大外径/mm	140
额定转速/(r·min ⁻¹)	217.5	护套+气隙厚度/mm	≥4.5
额定相电流/A	5	环境温度/°C	50±10

1.1 主要尺寸设计

核反应堆控制棒用驱动电机的设计难点有两点:其一是转子需要具有密封功能,即护套加气隙厚度需≥4.5 mm,这将导致其成为大气隙电机,主磁通路径变长、漏磁变多且电机性能严重下降;其二是电机温升受到严重限制,即限制热负荷 Q 小于 $1\ 100\ \text{A}^2/(\text{cm}\cdot\text{mm}^2)$ 。

进行电机设计时首先要确定其主要尺寸,即定子内径和铁心长度。对于功率和转速一定的电机,其主要尺寸基本由电负荷和磁负荷的大小来决定,主要尺寸满足式(1)^[26]:

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

式中: D_{il} 为电机定子的内径; l_{ef} 为等效铁心长度; P' 为计算功率; α_p' 为计算极弧系数; K_{Nm} 为气隙磁

场的波形系数; K_{dp} 为电枢的绕组系数; A 为电负荷; B_{δ} 为磁负荷,即最大气隙磁密; n 为电机转速。

对于同步电机, P' 为

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

式中: K_E 为额定负载时的感应电势与端电压的比值; P_N 、 η_N 和 $\cos \varphi_N$ 分别为额定负载时的功率、效率和功率因数。

电机的几何形状由其尺寸比 λ 决定, λ 表达式为

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{\tau} \quad (3)$$

式中: τ 为极距。

1.2 永磁体材料选择

核反应堆控制棒用驱动电机应用于核反应堆的高温环境中,虽然在转子内设计了 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温密封环境,但仍需考虑电机密封条件损毁、恒温环境失效等因素导致永磁体直面 $345\text{ }^{\circ}\text{C}$ 极端工作环境的情况。为避免突发的工作温度上升,导致永磁体退磁,需采用退磁温度较高的永磁材料。常用永磁体材料性能如表2所示。

表2 永磁体材料性能

Tab.2 Permanent magnet material properties

材料名称	磁能积/MGOe	退磁温度/ $^{\circ}\text{C}$
钕铁硼	27~50	80~220
钕钴	15~30	250~350

由表2可知,钕铁硼无法满足 $345\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温极端工况;而钕钴材料拥有高磁能积、抗腐蚀性良好等特点,且在高温环境中的磁性能相对稳定,因此选用磁能密度 225 kJ/m^3 、磁能积 28.3 MGOe 以及工作温度 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的钕钴材料 Recoma28 为本文设计电机的永磁体材料。

1.3 极槽配合

在永磁电机设计中,每极每相槽数 q 可表示为

$$q = \frac{Z}{2mp} \quad (4)$$

式中: Z 、 m 和 p 分别为电机槽数、相数和极对数。

$q < 0.5$ 时为分数槽集中绕组, q 为整数时为整数槽绕组。分数槽集中绕组具有端部短、转矩脉动小、相间耦合弱以及容错能力强等优点,在低速

大转矩电机领域应用广泛^[27-28],但也存在极距小、漏磁路径短和漏磁严重等缺点,在大气隙电机领域的发展前景受限。采用 $q = 2/5$ 极槽配比的分数槽集中绕组,其绕组系数更高、齿槽转矩更小,受到国内外学者的广泛使用。

分数槽集中绕组的漏磁情况如图1所示。极槽配比为 $2/5$ 时漏磁路径较短,而主磁通在气隙处走过的路径较长,磁阻较大,磁通路径在气隙内提前闭合变为漏磁,同时在转子内部的漏磁占比也很大。

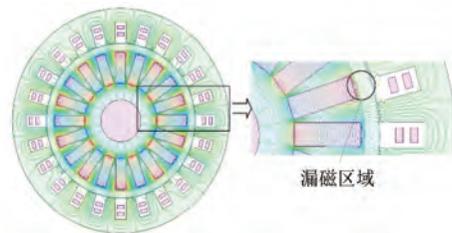


图1 分数槽集中绕组的漏磁现象

Fig.1 Leakage flux phenomenon of fractional-slot concentrated winding

整数槽绕组具有极距较大、漏磁路径较长以及绕组磁动势中低次谐波含量较小等优点,在大气隙电机中应用广泛。但其端部长、相绕组电阻大、铜耗等损耗大且电机效率较低,在低速大转矩电机中使用较少。整数槽绕组的极数极大地影响了电机的整体设计,极数增加使定子绕组电流频率与铁心中磁场的交变频率升高,电机端部长度减短,绕组损耗降低,电机效率升高。不同极数下整数槽绕组的转子漏磁对比如图2所示。

由图2可知,随着极数的增加,漏磁路径变短、磁阻减小,产生的漏磁通增加,电磁性能降低。因此需要根据实际需求选取合适的极数。

分数槽绕组与整数槽绕组的电磁性能对比如表3所示。由表3可知,只有24槽4极与36槽4极的极槽配合方案在转矩上达到了核反应堆控制棒用驱动电机的设计要求。由于电机的设计尺寸有限,使用36槽的槽利用率更低,在实际装机中也因槽更小而存在下线困难的问题,且24槽4极电机的转矩更高,在实际装机中更占优势,易于满足后续设计要求,因此选用整数槽分布绕组的24槽4极电机进行进一步的方案设计。

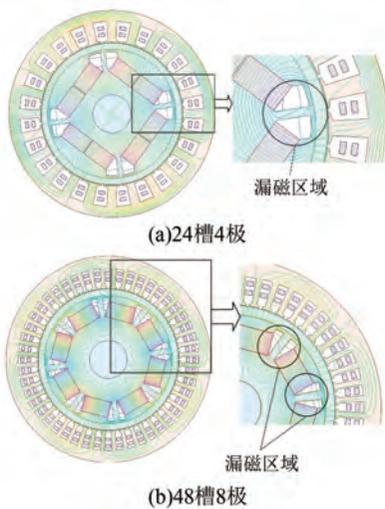


图 2 不同极数下整数槽绕组的转子漏磁对比
 Fig. 2 Comparison of rotor leakage flux in integer-slot windings under different pole numbers

表 3 分数槽与整数槽绕组的电磁性能对比

Tab. 3 Comparison of electromagnetic performance between fractional-slot and integer-slot windings

参数名称		转矩/(N·m)	转矩脉动/%
分数槽	12 槽 10 极	6.13	0.25
	24 槽 20 极	11.14	0.92
	24 槽 4 极	14.84	2.41
整数槽	36 槽 4 极	14.28	1.67
	36 槽 6 极	12.14	0.62

1.4 转子磁路设计

表贴式永磁电机的永磁体放置在气隙中, 主磁通路径较短、漏磁少、结构简单、转动惯量小且成本低。内置式永磁电机的永磁体嵌在转子内部, 为电机提供电磁转矩的同时改变了转子铁心的凸极比, 产生额外的磁阻转矩, 提高了电机功率密度, 但同时也增加了主磁通路径长度, 漏磁更多。由于核反应堆控制棒用驱动电机的转子需要密封, 且设计尺寸受限, 因此选用内置式永磁电机。

按永磁体放置的方式, 内置式永磁电机的转子磁路结构分为“一”字型、“U”型和“V”型。其中“一”字型永磁体根据磁化方向的不同, 分为径向式充磁与切向式充磁两种。径向“一”字型磁路结构的磁场分布更加均匀、设计简单、漏磁通较小、磁能利用率较高且电机运行更平稳。切向“一”字型磁路结构的两个相邻磁极并联提

供每极磁通, 提高了磁场强度, 同时交直流电感的差异较为显著, 磁阻转矩较高, 进一步提高了转矩密度。但转子内部漏磁严重, 制造工艺复杂、成本更高, 在低速运行时, 电机的电枢反应会导致永磁体出现局部退磁现象。“U”型磁路结构的磁极形成闭合磁路, 电枢反应磁场对永磁体的去磁作用减弱, 提高了电机的抗退磁能力, 同时使电机磁通路径更为集中, 气隙磁密幅值更大, 聚磁能力更加突出。但“U”型磁极间的漏磁路径复杂, 漏磁通较大, 对叠片工艺和永磁体成型精度要求较为苛刻, 加工困难。

在保证永磁体用量不变的情况下, 对径向“一”字型、切向“一”字型、“U”型和“V”型转子磁路结构的电机电磁性能进行对比, 如表 4 所示。

表 4 不同磁路结构的电机电磁性能对比

Tab. 4 Comparison of motor electromagnetic performance for different magnetic circuit structures

磁路结构	转矩/(N·m)	转矩脉动/%
径向“一”字型	14.84	2.41
切向“一”字型	14.00	5.27
“U”型	15.23	4.20
“V”型	15.19	7.47

由于核反应堆控制棒用驱动电机的气隙较大, 永磁体在转子内部的漏磁路径较长, 漏磁较为显著, 电机性能将会比预期低。由表 4 可知, 四种磁路结构的电机在转矩上均达到了设计要求, 但由于控制棒驱动系统对电机的控制精度要求较高, 因此电机的转矩脉动越小, 输出转矩越稳定, 控制效果越好。虽然径向“一”字型磁路电机的转矩比“U”型磁路降低了 2.6%, 但转矩脉动比“U”型磁路降低了 42.6%, 且径向结构的制造工艺相较于其他磁路结构更为简单。综上所述, 核反应堆控制棒用驱动电机选用径向“一”字型磁路结构的 24 槽 4 极电机。

1.5 初步设计方案

核反应堆控制棒用驱动电机的初步设计参数如表 5 所示, 电磁性能如表 6 所示, 二维拓扑结构如图 3 所示。

由表 6 可知, 初步设计方案的转矩满足了驱动电机的性能要求。但为了得到更好的设计方案, 下文对该方案进行优化处理。

表 5 电机初步设计参数

Tab. 5 Motor preliminary design parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定转矩/(N·m)	14	永磁体材料	Recoma28
额定转速/(r·min ⁻¹)	217.5	定子外径/mm	130
额定相电流/A	5	护套厚度/mm	4
额定功率/W	319	气隙厚度/mm	0.5
每槽导体数	44	轴向长度/mm	220
槽数	24	极数	4

表 6 电机电磁性能

Tab. 6 Electromagnetic performance of the motor

参数名称	参数值
转矩/(N·m)	14.84
转矩脉动/%	2.41



图 3 电机二维拓扑结构

Fig. 3 Two-dimensional topology of the motor

2 高精度代理模型的构建

代理模型是一种建立在电机内部动态行为基础上的数学模型,具有较高的准确性、可调节性和实时性。在某些情况下,电机代理模型可被视为一种将系统或过程看作是输入输出关系的“黑箱”模型,从而将复杂的电机系统简化为一个误差可控的数学模型,为电机的理论分析提供更加方便快捷的方法^[29]。

2.1 优化变量与目标的选取

控制棒用驱动电机运行时的输出转矩应尽可能大且平稳,因此选择平均转矩 T_{avg} 和转矩脉动 T_{mp} 作为优化目标。由于控制棒用驱动电机的设计条件中对输出转矩有明确的要求,因此将转矩大于 14 N·m 定为约束条件。在选取优化变量时,需要综合考虑优化目标、约束条件等多种因素。本文选择槽口宽 B_{s0} 、槽口高 H_{s0} 、磁障厚度 d_1 、磁

障夹角 α 、永磁体位置 h_1 、永磁体厚度 h_m 和永磁体宽度 b_m 作为优化变量,如图 4 所示。考虑电机的电磁与机械性能以及加工难度等多方面因素,各优化变量的初始值及设计空间如表 7 所示。

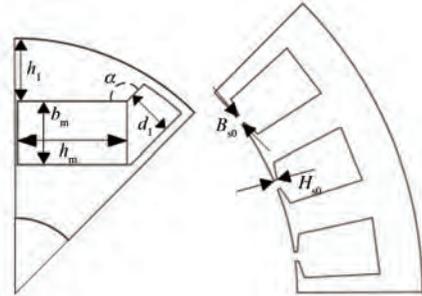


图 4 控制棒用驱动电机的优化变量

Fig. 4 Optimization variables of drive motor for control rod

表 7 优化变量的初始值和设计空间

Tab. 7 Initial values and design space of the optimization variables

参数名称	初始值	设计空间
槽口宽 B_{s0} /mm	1.5	1.2~1.8
槽口高 H_{s0} /mm	0.5	0.4~0.7
磁障厚度 d_1 /mm	7.5	7~8
磁障夹角 α /(°)	135	120~140
永磁体位置 h_1 /mm	10	7~13
永磁体厚度 h_m /mm	17.5	16~19
永磁体宽度 b_m /mm	10	7~12

为了缩短优化周期,使所选取的样本点能够更好地覆盖完整的样本空间,且样本点在每一维的投影较为均匀,采用最大最小拉丁超立方采样方法。

2.2 灵敏度分析

在确定优化变量与优化目标后,采用综合灵敏度分析法评价各设计参数对不同设计目标的影响。

在相关系数的选取方面,常用的有 Pearson、Spearman 和 Kendall 分析法。由于本文主要呈现的是设计参数与设计目标之间的线性关系,因此采用 Pearson 分析最合适。Pearson 相关系数如式 (5) 所示:

$$\rho_{X_i, Y_i} = \frac{N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \sqrt{N \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2}} \quad (5)$$

式中: Y_i 、 X_i 分别为第 i 个优化目标、优化变量; N 为样本量。

采用最大最小拉丁超立方采样方法生成 200 个样本, 这些样本能够覆盖整个设计空间的更多信息, 在此基础上, 计算各变量与优化目标的相关系数。因此, 得到的结果不会受到初始设计的影响。

根据式(5)计算平均转矩和转矩脉动与各设计参数之间的关系, 结果如图 5 所示。

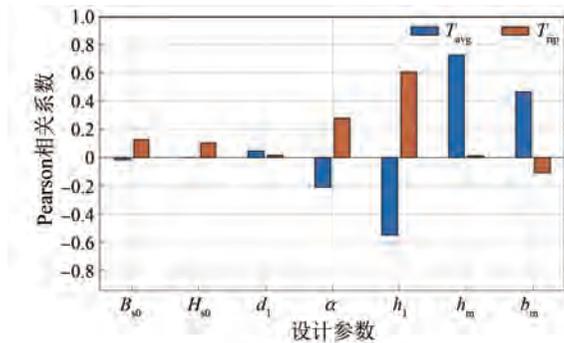


图 5 设计参数与性能指标的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between design parameters and performance indicators

由图 5 可知, 不同设计参数对平均转矩与转矩脉动的影响各不相同, 有些呈正相关, 有些呈负相关, 这意味着不同的优化目标间存在矛盾, 也说明了多目标优化的必要性。

2.3 Kriging 代理模型的构建

Kriging 模型是一种估计方差最小的无偏估计模型。协方差理论和函数回归理论是 Kriging 模型的基础, 对设计变量的整个设计空间进行无偏最优估计, 再选择合适的协方差函数实现对目标函数的近似估计, 从而构建 Kriging 代理模型。Kriging 代理模型基本表达式为

$$y_i(x) = f(x)^T \beta_i + z_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中: $f(x)$ 为关于 x 的二阶回归函数; β 为回归系数; $z(x)$ 为一个随机过程, 称为涨落, 其均值 $\mu = 0$, 方差为 σ^2 , 协方差不为 0。

Kriging 模型能够充分利用试验设计产生的样本点来拟合多维高阶复杂模型。样本点所需数量一般为变量数的 10 倍以上, 且需要对每一个输出执行一次优化, 故建立时间较长。当变量数大于 8 时, 模型精度下降。

采用相关系数 R^2 评估代理模型的精度, R^2

越接近于 1 表明代理模型精度越高。 R^2 表达式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

式中: n 为样本点总数; y_i 、 \hat{y}_i 分别为第 i 个样本点的真实响应值、预测值; \bar{y} 为样本平均值。

随机取出 30 个样本作为测试集, 其他样本作为训练集, 将测试集代入训练好的模型中, 对比预测值与有限元仿真实际值的误差。输出转矩、转矩脉动拟合曲线分别如图 6、图 7 所示。

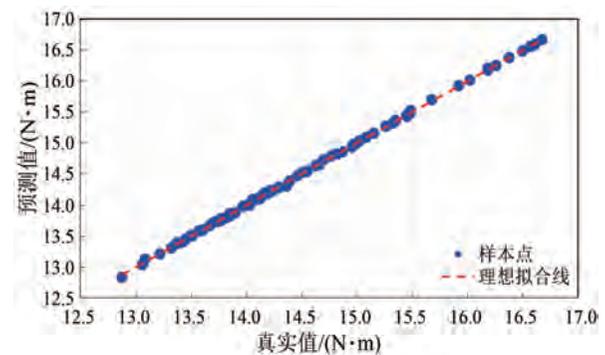


图 6 输出转矩拟合曲线

Fig. 6 Output torque fitting curve

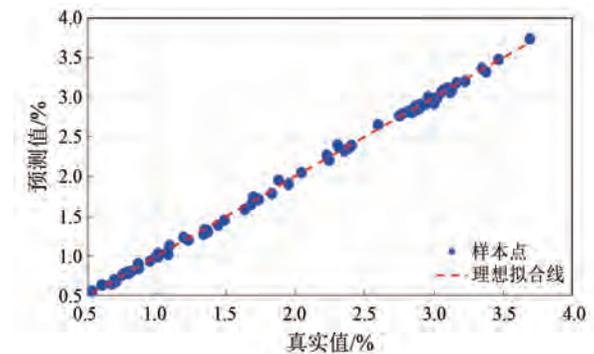


图 7 转矩脉动拟合曲线

Fig. 7 Torque ripple fitting curve

从图 6 和图 7 可知, Kriging 代理模型预测值和有限元仿真结果非常接近, 输出转矩拟合曲线和转矩脉动拟合曲线的 R^2 分别为 0.999 2 和 0.998 6, 平均绝对百分比误差分别为 0.09% 和 1.77%。一般 R^2 高于 0.95 便认为该近似模型具有较高精度, 因此本文所建立的 Kriging 代理模型可以替代有限元仿真模型, 用于后续的优化设计。

3 基于 NSGA-II 的电机优化

NSGA-II 是一种由遗传算法生成新样本群,并按照拥挤度排序机制进行选择保留的优化算法,其流程如图 8 所示。

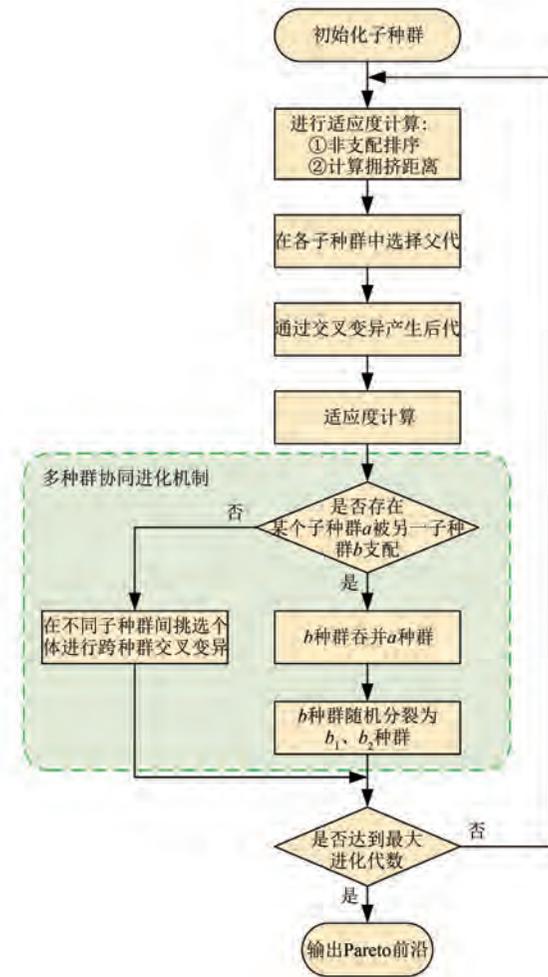


图 8 NSGA-II 流程图

Fig. 8 NSGA-II flowchart

与传统遗传算法相比,NSGA-II 具有以下特点:(1)采用非支配排序算法,能获得 Pareto 前沿;(2)在子种群并行进化的过程中引入包含合作算子、吞并算子以及分裂算子的协同进化机制;(3)采用拥挤距离对解集进行评价,有效提高了解集的多样性。

NSGA-II 主要分为遗传算法产生新种群、支配性分析以及拥挤度排序 3 个部分,基于这 3 个部分对电机设计方案进行生成与选择。根据图 8 编写相关程序,设置子种群数量为 6,子种群大小为 40,进化代数为 200。得到的 Pareto 前沿如图 9 所示。

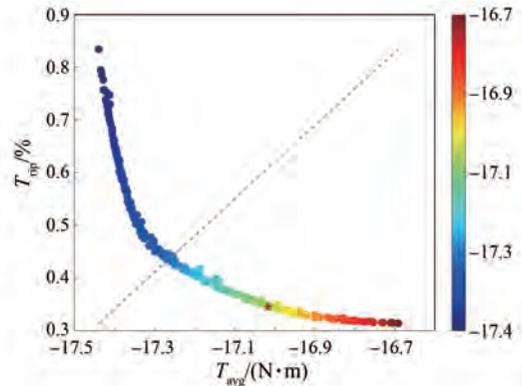


图 9 Pareto 前沿

Fig. 9 Pareto frontier

由图 9 可知,Pareto 前沿具有明显分段特性,说明子种群各自的进化方向具有一定独立性,这有利于提高非支配解的多样性。根据电机实际运用场景,应先尽可能降低电机的转矩脉动,以保证电机平稳运行,再考虑提高电机的转矩密度。在 Pareto 前沿解集中选取的最优个体如图 9 中红星标注所示,提取数据得到优化后的 7 个结构参数如表 8 所示。

表 8 优化后的结构参数及其近似值

Tab. 8 Optimized structural parameters and its approximate values

参数名称	优化后数值	近似值
B_{s0}/mm	1.202 521 916	1.20
H_{s0}/mm	0.400 038 031	0.40
d_1/mm	7.300 582 688	7.30
$\alpha/(\text{°})$	122.184 696 5	122
h_1/mm	7.845 814 925	7.8
h_m/mm	18.869 504 24	18.9
b_m/mm	11.243 711 29	11.2

根据 Kriging 代理模型,该方案下电机的 T_{avg} 为 17.016 N·m, T_{rip} 为 0.346%。将各结构参数代入有限元模型得到电机的输出转矩如图 10 所示。

由图 10 可知, T_{avg} 为 17.091 N·m, T_{rip} 为 0.34%。相较于 Kriging 代理模型, T_{avg} 误差为 0.44%、 T_{rip} 误差为 1.73%。可见,优化误差极小,预测十分精准。由于拉丁采样法所取参数为多位小数,在电机的实际制造中无法实现,因此,需对优化后的结构参数取近似值,如表 8 所示。图 11 为结构参数取近似值前后电机输出转矩的对比。

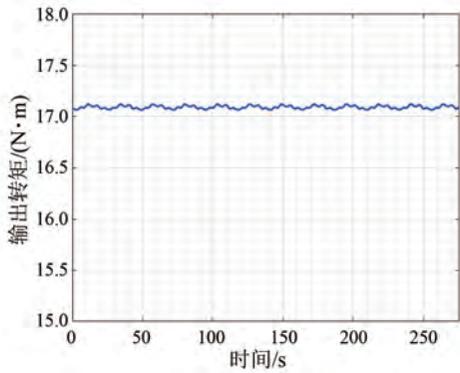


图 10 电机输出转矩

Fig. 10 Motor output torque

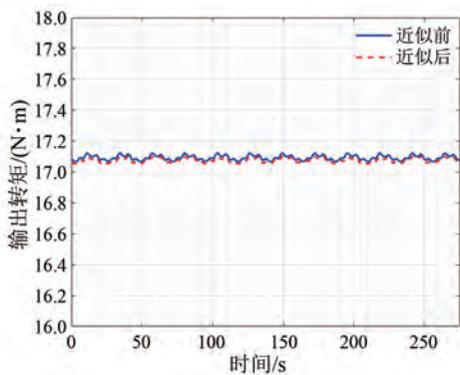


图 11 结构参数值近似前后输出转矩对比

Fig. 11 Comparison of output torque before and after approximation of structural parameter values

近似后电机的 T_{avg} 为 $17.074 \text{ N}\cdot\text{m}$, T_{rip} 为 0.29% 。

优化前后电机的输出转矩对比如图 12 所示。可见, 电机的 T_{avg} 提高了 15.03% , T_{rip} 的下降幅度高达 87.97% 。优化后电机的磁密和磁力线分布如图 13 所示。

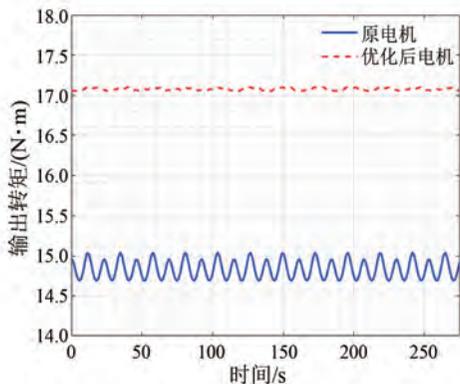


图 12 优化前后输出转矩对比

Fig. 12 Comparison of output torque before and after optimization

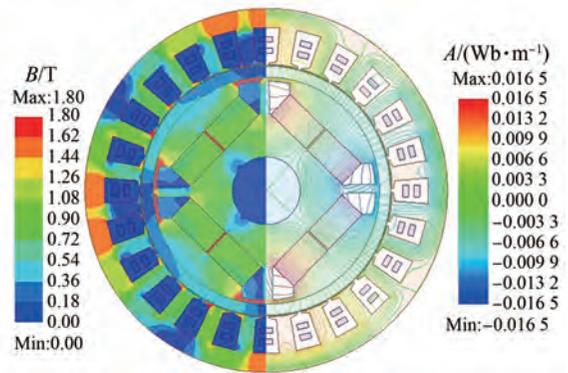


图 13 优化后电机的磁密和磁力线分布

Fig. 13 Magnetic flux density and magnetic field lines distribution of the motor after optimization

4 温度校核

基本传热方式有热传导、热对流以及热辐射三种。电机在运行过程中产生的热量首先通过热传导在电机部件内部传递, 然后通过热对流和热辐射散失到周围环境中。探究电机的散热路径对于设计高效的散热系统至关重要, 从而确保电机在运行过程中不会因过热而损坏。

额定工况下电机使用自然冷却的温升情况如图 14 所示。可见, 不加冷却结构时, 电机最高温度为 $232.46 \text{ }^\circ\text{C}$, 远高于绝缘耐热温度 $155 \text{ }^\circ\text{C}$; 温升 172.46 K , 高于温升限值 100 K , 因此需设计冷却结构。

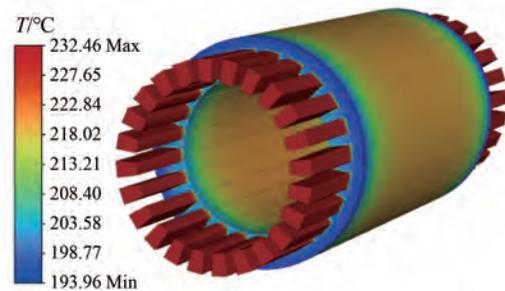


图 14 电机自然冷却的温升情况

Fig. 14 Temperature rise of the motor under natural cooling

4.1 冷却结构设计

采用强迫风冷方式对电机进行散热。目前, 最常见的风冷结构为在外壳上设计散热翅片, 外部空气与翅片、机壳表面发生对流换热, 从而带走电机运行所产生的热量。本文选用轴向直翅片作为散热翅片, 其优点在于加工方便、维护简单。对

于直翅片结构而言,需要确定翅片的厚度、高度以及周向数量。根据工艺情况,翅片厚度设计为 2 mm。翅片数量越多,总散热面积越大,但相邻翅片间的空间减小会导致翅片底部风速低,换热能力下降。翅片间隔通常为翅片厚度的 4~6 倍,本文取 8 mm,周向翅片数量为 42 片。由于电机的最大外径为 140 mm,机壳外径为 134 mm,翅片高度越高,理论上散热效果越好,因此取机壳表面散热翅片的高度为 3 mm。

综上所述,控制棒用驱动电机的冷却结构为翅片厚度为 2 mm、高度为 3 mm 且周向数量为 42 片的轴向直翅片,示意图如图 15 所示。

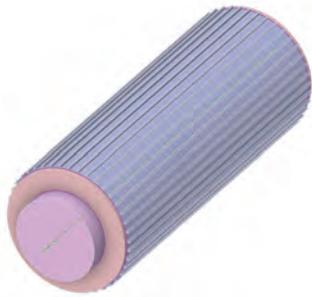


图 15 冷却结构示意图

Fig. 15 Schematic diagram of the cooling structure

4.2 仿真分析

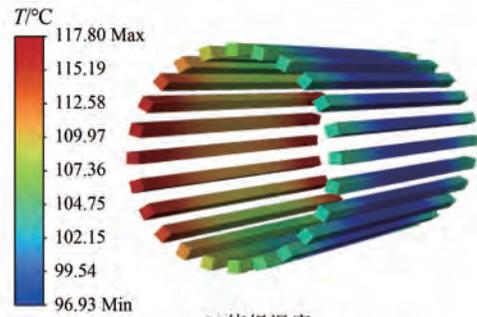
采用 Fluent 软件对所设计的风冷结构进行验证。电机在额定工况下的温度分布如图 16 所示。

由图 16 可知,电机最高温度位于背风面的绕组端部,这是因为绕组端部不与定子铁心直接接触,热量大部分只能先向槽内传递,再通过铁心传递到机壳被风带走。且背风面绕组端部温度达到 117.8 °C,温升 58 K,比迎风面绕组端部温度高 21 °C,这是因为电机背风面机壳冷却效果不如迎风面,导致背风面绕组端部冷却受到限制。由图 17 所示的风力迹线图也可以看出,电机背部并无风吹过,充分证实了这一结论。

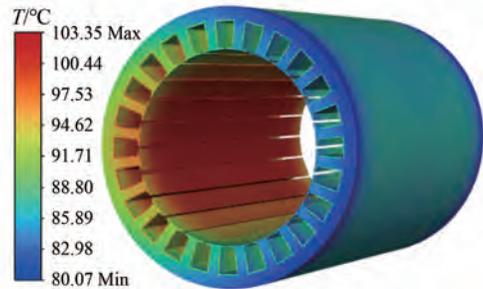
由于电机绝缘耐热等级为 F 级,温升等级为 B 级,电机最高温度 117.8 °C 低于绝缘耐热温度 155 °C,温升 58 K 小于温升限值 100 K。因此认为电机的冷却结构设计合理。

5 结语

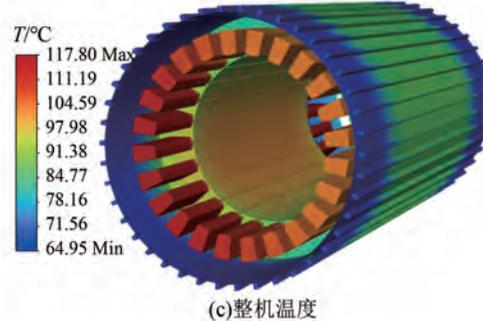
本文针对核反应堆控制棒驱动电机面临的大气隙永磁电机磁性能衰减、高温温升约束及多目



(a)绕组温度



(b)定子温度



(c)整机温度

图 16 电机热仿真温度分布结果

Fig. 16 Motor thermal simulation temperature distribution results

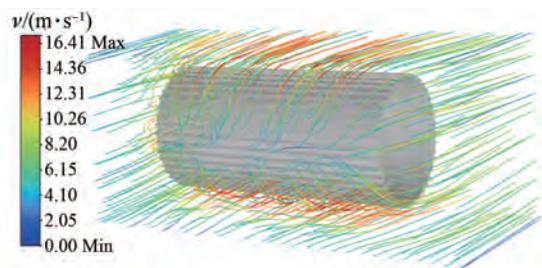


图 17 风力迹线图

Fig. 17 Wind track map

标优化计算复杂等核心难题,构建了电磁设计-代理建模-算法优化-热校核的系统化设计方案。具体而言,电磁设计阶段通过对比绕组类型、磁路结构及永磁材料特性,确定 24 槽 4 极的极槽配合、径向“一”字型磁路与 Recoma28 钕钴材料的初始方案;针对优化计算瓶颈,采用最大最小拉丁

超立方采样、Pearson 灵敏度分析构建 $R^2 > 0.998$ 的 Kriging 代理模型以降低计算成本;结合 NSGA-II 完成多目标优化,使电机平均转矩提升 15.03%、转矩脉动下降 87.97%,且有限元验证误差小于 2%;同时设计轴向直翅片冷却结构,Fluent 仿真显示其最高温度为 117.8 °C、温升为 58 K,满足绝缘与温升要求。本文所提 Kriging-NSGA-II 优化设计方法为大气隙特种电机设计提供了可推广范式,后续可进一步探索多物理场耦合优化与极端工况可靠性预测,为核岛设备升级提供支撑。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

李思奇进行了方案设计、试验研究、内容总结与论文撰写,徐英杰进行了技术指导,王凯冬进行了内容总结,于思洋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, experimental research, content summary, and paper writing were carried out by Li Siqi. The technical guidance was carried out by Xu Yingjie. The content summary was carried out by Wang Kaidong. The manuscript was reviewed and revised by Yu Siyang. All authors have read the last version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 荆春宁,高力,马佳鹏,等. “碳达峰、碳中和”背景下能源发展趋势与核能定位研判[J]. 核科学与工程, 2022, 42(1): 1-9.
Jing C N, Gao L, Ma J P, et al. Study and judgment on energy developing trend and nuclear energy positioning under the background of “carbon peaking and carbon neutrality” [J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 42(1): 1-9.
- [2] 朱传雨,吴健荣,韩长宇,等. 用于核电无损检测的小型直流电机控制器设计[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 95-99.
Zhu C Y, Wu J R, Han C Y, et al. Design of small

- DC motor controller for non-destructive testing in nuclear power plants [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(6): 95-99.
- [3] 谢卓泰,郝亮亮,王泽民,等. 大容量核电站偶数相环形无刷励磁旋转整流系统定子电流谐波特性分析[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(8): 857-868.
Xie Z T, Hao L L, Wang Z M, et al. Stator current harmonic characteristics in high-capacity nuclear power plants with even-phase toroidal brushless excitation rotating rectifier systems [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(8): 857-868.
- [4] 唐剑锋,姜凌岷. 某新型反应堆控制棒驱动机构结构设计[J]. 中国机械, 2025(21): 13-16.
Tang J F, Jiang L K. Structural design of a new type of reactor control rod drive mechanism [J]. Machine China, 2025(21): 13-16.
- [5] 王仁良,孙培伟,吴延群,等. 核反应堆控制棒驱动机构状态检测技术研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2025(1): 16-18+23.
Wang R L, Sun P W, Wu Y Q, et al. Research on state detection technology of nuclear reactor control rod drive mechanism [J]. Automation & Instrumentation, 2025(1): 16-18+23.
- [6] Zhao X L, Sun Z, Xu Y F. Multi-objective optimization design of permanent magnet synchronous motor based on genetic algorithm [C]//2020 2nd International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence, Taiyuan, China, 2020: 405-409.
- [7] 马志敏,齐晓刚,王少勃,等. 基于全域解析法的外转子轮毂永磁同步电机多目标优化[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(1): 44-54.
Ma Z M, Qi X G, Wang S B, et al. Multi-objective optimization of outer rotor hub permanent magnet synchronous motor based on global analytical method [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(1): 44-54.
- [8] Liu F, Wang X H, Xing Z Z, et al. Analysis and research on no-load air gap magnetic field and system optimization of interior PM motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 10915-10925.
- [9] 张邦富,程明,王飒飒,等. 基于改进型代理模型优化算法的磁通切换永磁直线电机优化设计[J].

- 电工技术学报, 2020, 35(5): 1013-1021.
- Zhang B F, Cheng M, Wang S S, et al. Optimal design of flux-switching permanent magnet linear machine based on improved surrogate-based optimization algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 1013-1021.
- [10] Lee T Y, Trung P X, Kim J W, et al. Search region management method for local search algorithm employing design optimization of brushless DC motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(3): 8200606.
- [11] Engevik E L, Rokke A, Nilssen R. Evaluating hybrid optimization algorithms for design of a permanent magnet generator [C]//2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics, 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems, Side, Turkey, 2015: 711-718.
- [12] 贾周, 郭陈, 聂阳光, 等. 磁通反向横向磁场永磁直线电机优化设计[J]. 电气工程学报, 2025, 20(6): 184-193.
- Jia Z, Guo C, Nie Y G, et al. Optimal design of flux reversal transverse flux permanent magnet linear motor [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(6): 184-193.
- [13] 戈宝军, 姜汉, 林鹏, 等. 并轴式双转子永磁同步电机齿槽转矩分析[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(8): 80-90.
- Ge B J, Jiang H, Lin P, et al. Cogging torque analysis of parallel shaft double rotor permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(8): 80-90.
- [14] Sun X D, Shi Z, Zhu J G. Multiobjective design optimization of an IPMSM for EVs based on fuzzy method and sequential Taguchi method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(11): 10592-10600.
- [15] 许东滢, 鲍晓华, 徐翌翔, 等. 同步磁阻电机转子结构优化设计[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(7): 44-50.
- Xu D Y, Bao X H, Xu Y X, et al. Rotor structure optimization design of synchronous reluctance motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(7): 44-50.
- [16] 谢颖, 耿高旭, 蔡蔚, 等. 隔磁孔转子结构永磁同步电机效率与振动噪声优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(2): 789-798.
- Xie Y, Geng G X, Cai W, et al. Optimized design of a permanent magnet synchronous motor efficiency and vibration noise with magnetic hole rotor structure [J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(2): 789-798.
- [17] Hu Y K, Lu H, Xu W. Bagging-GA-driven multi-objective optimization of MR fluid brake-integrated PMSM considering brake torque constraint [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2025, 61(9): 8202406.
- [18] 范庆锋, 王振. 基于遗传算法的车用永磁电机转子尺寸多目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(10): 97-102.
- Fan Q F, Wang Z. Multi-objective optimization design of rotor dimensions of vehicle permanent magnet motor based on genetic algorithm [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(10): 97-102.
- [19] Liu A, Huang X Y, Chen Z, et al. Nonlinear analytical model-embedded optimal design for ER-PMSM [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2023, 60(3): 8100305.
- [20] Wu L Q, Chen H, Mao Y D, et al. Robustness-oriented design optimization approach for cogging torque of batch production PMSM [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(3): 1711-1725.
- [21] 王晨, 黄健, 江明, 等. 聚磁式永磁轮毂电机多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 1173-1184.
- Wang C, Huang J, Jiang M, et al. Multi-objective optimization and design of flux-concentrating permanent magnet in-wheel motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 1173-1184.
- [22] 华逸舟, 刘奕辰, 潘伟, 等. 基于改进粒子群算法的无轴承永磁同步电机多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4443-4452.
- Hua Y Z, Liu Y C, Pan W, et al. Multi-objective optimization design of bearingless permanent magnet synchronous motor using improved particle swarm optimization algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4443-4452.
- [23] Bao J W, Xing J, Luo Y J, et al. Multi-objective shape optimization of permanent magnet synchronous

- motor based on Kriging surrogate model and design domain reduction [C]//2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems, Harbin, China, 2019: 1-4.
- [24] 乔路宽, 张炳义, 李岩, 等. 基于改进粒子群优化算法的外转子永磁同步电机的多目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(3): 81-87+94.
Qiao L K, Zhang B Y, Li Y, et al. Multi-objective optimization design of external rotor permanent magnet synchronous motor based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(3): 81-87+94.
- [25] 刘慧娟, 刘广冬, 易元元. 基于代理模型的 YASA AFPM 电机多目标分层优化设计[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(3): 59-73.
Liu H J, Liu G D, Yi Y Y. Multi-objective hierarchical optimization design of YASA AFPM motor based on surrogate models [J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(3): 59-73.
- [26] 陈世坤. 电机设计[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2018.
Chen S K. Design of electrical motor [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [27] 陈滨斐, 邢宁, 马宏忠, 等. 分数槽永磁电机永磁体谐波涡流损耗建模与分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(14): 3514-3527.
Chen Z F, Xing N, Ma H Z, et al. Analytical modeling and analysis of magnet harmonic loss in fractional slot permanent-magnet machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(14): 3514-3527.
- [28] 鲍晓华, 刘佳炜, 孙跃, 等. 低速大转矩永磁直驱电机研究综述与展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1148-1160.
Bao X H, Liu J W, Sun Y, et al. Review and prospect of low-speed high-torque permanent magnet machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1148-1160.
- [29] 谢冰川, 张岳, 徐振耀, 等. 基于代理模型的电机多学科优化关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(20): 5117-5143.
Xie B C, Zhang Y, Xu Z Y, et al. Review on multidisciplinary optimization key technology of electrical machine based on surrogate models [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(20): 5117-5143.

收稿日期:2025-12-01

收到修改稿日期:2025-12-23

作者简介:

李思奇(2001—),男,硕士研究生,研究方向为高品质永磁及特种电机,siqi1908@gmail.com;

*通信作者:于思洋(1988—),男,博士,副教授,研究方向为高品质永磁及特种电机系统,yusy@sut.edu.cn。