

定子永磁型双凸极电机多参数多目标优化设计

刘 晨, 郭凯凯, 张乃峰, 李 聪

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

摘要:目的 针对定子永磁型双凸极电机结构参数较多导致优化困难的问题, 提出一种基于改进非支配排序遗传算法 II 的多参数多目标优化方法。方法 根据多优化目标计算参数敏感度, 通过设定权重系数计算综合敏感度, 进而根据综合敏感度将定子永磁型电机结构参数分为 3 层, 其中, 第一层和第二层结构参数为高敏感度结构参数, 采用常量基函数和二次有理核函数拟合高斯过程回归模型进行优化, 第三层结构参数敏感度较低, 使用单参数扫描法进行优化, 并且建立 6 个方案以比较不同权重系数和阈值对系统优化目标的影响。结果 改进后的非支配排序遗传算法 II 相比传统算法具有更加优越的性能; 优化后的定子永磁型双凸极电机的电磁转矩比初始结构提升了 15.06%, 齿槽转矩减少了 50.9%, 转矩脉动则从 20.23% 降低至 9.45%。结论 最后通过有限元仿真结果验证了所提出多目标优化方法的可行性和有效性。

关键词:多参数多目标优化; 定子永磁型双凸极电机; 非支配排序遗传算法 II; 高斯过程回归模型

中图分类号:TM351 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2026.0001.019

Multi-parameter and Multi-objective Optimization Design of a Stator Permanent Magnet Doubly Salient Machine

LIU Chen, GUO Kaikai, ZHANG Naifeng, LI Cong

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China

Abstract: Objective To address the issue of optimization difficulties arising from the numerous structural parameters of the stator permanent magnet (PM) doubly salient machine, a multi-parameter and multi-objective optimization method based on the improved non-dominated sorting genetic algorithm II is proposed. **Methods** First, the parameter sensitivity was calculated according to multiple optimization objectives. Then, the comprehensive sensitivity was computed through the set weight coefficients. Finally, the structural parameters of the stator PM doubly salient machine were divided into three layers based on the comprehensive sensitivity. The structural parameters in the first and second layers were highly sensitive, and they were optimized by fitting a Gaussian process regression model with a constant basis function and a quadratic rational kernel function. The structural parameters in the third layer were of lower sensitivity and were optimized using the single-parameter scanning method. Six schemes were established to compare the effects of different weight coefficients and thresholds on the system optimization objectives. **Results** The improved non-dominated sorting genetic algorithm II outperforms the traditional algorithm. After optimization, the electromagnetic torque of the stator PM doubly salient machine increased by 15.06%, the cogging torque decreased by 50.9%, and the torque ripple reduced from

收稿日期:2024-01-06 修回日期:2024-03-26 文章编号:1672-058X(2026)01-0155-08

基金项目:安徽省教育厅基金重大项目(2022AH040110)资助;国家自然科学基金青年项目(51905003)资助;安徽省自然科学基金青年项目(1908085QE207)资助。

作者简介:刘晨(1998—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,从事永磁电机设计与优化研究。

通信作者:郭凯凯(1987—),男,山东东营人,副教授,从事永磁电机结构设计及其控制系统研究。Email:guokai0072000@gmail.com。

引用格式:刘晨,郭凯凯,张乃峰,等. 定子永磁型双凸极电机多参数多目标优化设计[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2026, 43(1): 155-162.

LIU Chen, GUO Kaikai, ZHANG Naifeng, et al. Multi-parameter and multi-objective optimization design of a stator permanent magnet doubly salient machine[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2026, 43(1): 155-162.

20.23% to 9.45%. **Conclusion** The feasibility and effectiveness of the proposed multi-objective optimization method are verified by the finite element simulation results.

Keywords: multi-parameter and multi-objective optimization; stator permanent magnet doubly salient machine; non-dominated sorting genetic algorithm II; Gaussian process regression model

近年来,永磁电机因功率密度大、效率高、体积小、重量轻等优点,被广泛应用在电动汽车、冶金、纺织、航空航天等领域。与转子型永磁电机相比,定子永磁型双凸极(Stator Permanent Magnet Doubly Salient, SPMDS)电机具有结构简单、可靠性高、适合高速运行等优点,因此获得国内外学者的广泛关注^[1-5]。与普通永磁电机相比,SPMDS 电机结构参数较多,且部分参数与优化目标之间相互影响,这就给电机的优化设计带来了困难。

在电机优化设计方面,学者们进行了深入的研究,提出了遗传算法^[6]、田口法^[7-10]、模拟退火算法^[11]、粒子群算法^[14-15]等。陈云云等^[6]为获得高转矩密度和低转矩脉动,利用遗传算法对双凸极永磁双转子电机的参数化模型进行优化。Qu 与兰志勇等^[7-8]利用田口法对永磁同步电机进行多目标优化,该方法虽然能快速得到优化结果,但参数取值受限,且相较其他方法,优化后的电磁性能仍有不足。Guo 和张玉峰等^[9-10]提出改进的田口法优化永磁同步电机,改进后的田口法虽比传统田口法更加有效,但优化步骤较为烦琐。孟大伟等^[11]使用模拟退火算法降低电机的有效材料用量。上述单一方法的使用存在一定的局限性,不能获得效果最佳的优化参数,需要多种方法进行联合优化^[12-13]。李哲和乔路宽等^[14-15]利用粒子群算法对电机进行优化,得到全局最优取值,但粒子群算法属于随机搜索算法,容易陷入局部最优解^[16]。李祥林与陈云云等^[17-18]采用参数敏感度分层并结合遗传算法确定了最优结构参数,但该方法只能将 3 个优化目标整合为一个目标函数来获取参数值,并不能更加直观地同时获得多个优化目标的参数值。从计算时间成本、普适性等方面考虑,代理模型是电机优化模型的最佳选择^[19]。刘洋等^[20]采用响应面模型和遗传算法对电机进行优化设计,响应面虽能快速拟合,但精度不足,可能会导致误差较大。综上所述,要快速获取理想的电机结构参数,实现电机的多目标优化存在较大挑战。

本文使用改进的非支配排序遗传算法 II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II) 对 SPMDS 电机进行多目标优化。通过综合敏感度分析将电机结构参数分层优化,可以节省优化时间;采用改进 NSGA-II 算法优化电机的方法使得结构参数在满足优化目标的前提下可以获得较为理想的结果;最后,采用有限元法验证该多目标优化方法的可行性和有效性。

1 基于改进 NSGA-II 算法的电机优化设计

1.1 SPMDS 电机结构

SPMDS 电机结构如图 1 所示。磁化方向相反的周向充磁永磁体嵌入定子轭中与定子齿的两侧平行,可以产生聚磁效应。相邻定子的永磁体充磁方向相反,永磁体两端分别存在弧形磁障和条形磁障。定子绕组采用集中绕组设计。

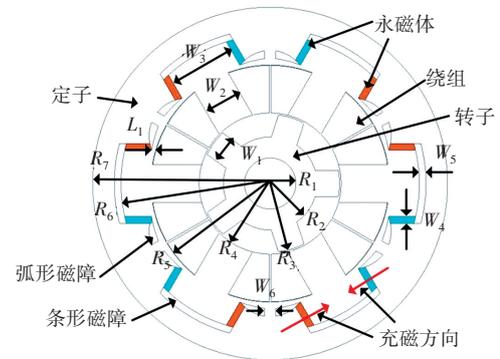


图 1 SPMDS 电机结构

Fig. 1 The structure of SPMDS machine

1.2 多目标优化初值和流程

根据图 1,定子轭中弧形磁障底部存在磁通桥,考虑到磁通桥的磁饱和,将 L_1 的下限设定为 1 mm,其他参数的初值和范围则根据文献^[18]和^[21]获得。参数的初值和范围如表 1 所示。

表 1 参数的初值和范围

Table 1 Initial values and ranges of parameters /mm

参数	初值	范围
转子内半径 R_1	10.2	8.0~12.0
转子轭外半径 R_2	16.0	15.0~19.0
转子外半径 R_3	27.0	—
定子内半径 R_4	27.6	—
定子轭内半径 R_5	47.5	44.0~48.0
条形磁障内半径 R_6	62.0	60.0~64.0
定子外半径 R_7	69.0	—
转子齿宽度 W_1	11.0	8.0~12.0
定子齿宽度 W_2	16.5	14.0~18.0
永磁体间距 W_3	25.0	24.0~28.0
永磁体宽度 W_4	4.0	3.0~6.0
条形磁障宽度 W_5	4.0	3.0~6.0
磁桥宽度 W_6	3.0	2.0~5.0
永磁体底部到定子轭内径的距离 L_1	1.3	1.0~2.0
轴向长度 L_a	80.0	—

该电机的气隙长度根据实际设定为 0.6 mm, 给定 SPMDs 电机的转子外半径、定子外半径和轴向长度, 在保证这 4 个参数不变的情况下对电机进行优化。由于 SPMDs 电机结构参数较多, 多个目标同时优化会相互影响, 所以利用综合敏感度分析, 将结构参数分层, 再采用改进 NSGA-II 算法和 GPR 模型相结合的方法来优化电机。多目标优化流程如图 2 所示。

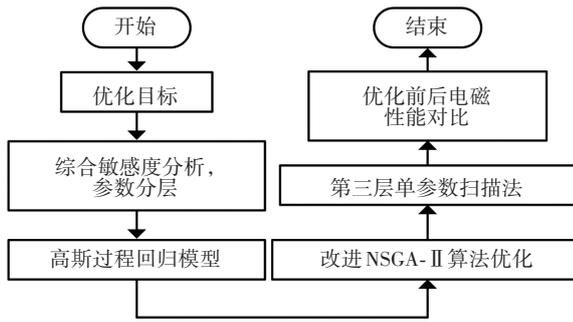


图 2 多目标优化流程

Fig. 2 Flow chart of multi-objective optimization

1.3 优化目标设计

电机的齿槽转矩和转矩脉动不仅会使电机产生振动和噪声, 降低电机运行的稳定性, 影响电机性能, 而且还会增加电机部件的磨损率, 减少电机的使用寿命。所以在考虑电磁转矩时, 转矩脉动和齿槽转矩也要同时考虑。本文以提高电磁转矩的平均值、降低转矩脉动和齿槽转矩峰值为优化目标, SPMDs 电机多目标优化模型的方程可以定义为

$$f(x_i) = \lambda_1 \frac{T_{a1}}{T_a(x_i)} + \lambda_2 \frac{T_r(x_i)}{T_{r1}} + \lambda_3 \frac{T_c(x_i)}{T_{c1}} \quad (1)$$

式(1)中, x_i 为第 i 个设计参数。 T_{a1} 、 T_{r1} 和 T_{c1} 分别为 SPMDs 电机优化前的电磁转矩、转矩脉动和齿槽转矩; $T_a(x_i)$ 、 $T_r(x_i)$ 和 $T_c(x_i)$ 分别表示电机结构参数取 x_i 时的电磁转矩、转矩脉动和齿槽转矩; λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分别表示 3 个优化目标的权重系数, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。为了实现在提升电磁转矩的同时, 兼顾降低转矩脉动和齿槽转矩的目标, 本文将 3 个权重系数分别设定为 0.35、0.35、0.3, 并将 0.4、0.3、0.3 的组合作为对比方案。

1.4 综合敏感度分析

通过调整定子齿宽度和转子齿宽度可以减小齿槽转矩和转矩脉动, 但它们又会影响电磁转矩的大小, 这增加了优化的复杂性。传统单目标优化已经不能满足要求, 需要多个目标同时进行优化。如果采用全因子三水平设计, 11 个结构参数需要 3^{11} 次有限元仿真实验, 不仅大大增加计算成本, 还导致优化过程耗时过长。因此, 需要综合考虑结构参数和优化目标之间的关系来降低计算成本。本文利用结构参数 x_i 对单个优化目标进行敏感度分析, 再结合权重系数, 计算得到各

个参数的综合敏感度, 以此来评定哪些结构参数对优化目标比较敏感, 进而将结构参数分层, 用较少的计算次数得到优化结果。参数 x_i 对电机总体优化目标的综合敏感度可以表示为

$$S(x_i) = \lambda_1 |G_{Ta}(x_i)| + \lambda_2 |G_{Tr}(x_i)| + \lambda_3 |G_{Tc}(x_i)| \quad (2)$$

式(2)中, $G_{Ta}(x_i)$ 、 $G_{Tr}(x_i)$ 和 $G_{Tc}(x_i)$ 分别表示结构参数 x_i 对电磁转矩、转矩脉动和齿槽转矩的敏感度。参数敏感度分析和具体结果分别如图 3 和表 2 所示。

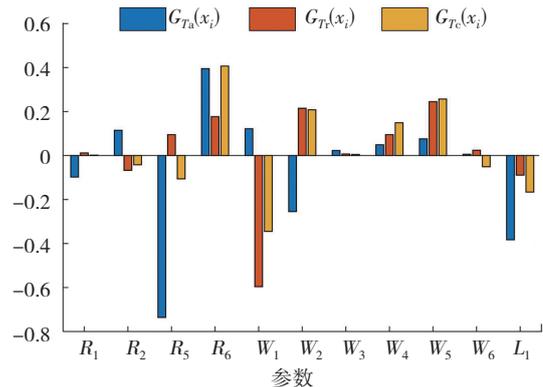


图 3 参数的敏感度分析

Fig. 3 Sensitivity analysis of parameters

表 2 敏感度分析结果

Table 2 Results of sensitivity analysis

x_i	$G_{Ta}(x_i)$	$G_{Tr}(x_i)$	$G_{Tc}(x_i)$	$S(x_i)$
R_1	-0.098	0.012	0.002	0.039
R_2	0.115	-0.067	-0.042	0.076
R_5	-0.736	0.095	-0.106	0.323
R_6	0.395	0.177	0.407	0.322
W_1	0.122	-0.596	-0.345	0.355
W_2	-0.255	0.215	0.208	0.227
W_3	0.023	0.007	0.005	0.012
W_4	0.049	0.095	0.169	0.101
W_5	0.076	0.245	0.257	0.189
W_6	0.006	0.023	-0.051	0.025
L_1	-0.283	-0.089	-0.166	0.180

根据表 2 结果, 对 SPMDs 电机的结构参数进行分层。在本文中, s_1 和 s_2 作为阈值, 将 $S(x_i) > s_1$ 的结构参数定义为强敏感型参数, $s_2 < S(x_i) \leq s_1$ 的结构参数定义为中等敏感型参数, 而 $S(x_i) \leq s_2$ 的结构参数被定义为弱敏感型参数。在考虑综合敏感度差异大小的基础上, 为降低分层后的计算成本, 将 11 个结构参数分布在 3 个层级。若采取全因子三水平设计, 选取 0.2 和 0.15 作为阈值, 则需要 333 次仿真运算; 选取 0.15 和 0.1 作为阈值, 则需要 813 次仿真运算; 选取 0.2 和 0.1 作为阈值, 则需要 183 次仿真运算, 不仅减少了仿真次数, 节省了优化时间, 而且结构参数分层较为均匀, 优

化效果较好。因此本文设定 s_1 和 s_2 分别为 0.2 和 0.1。为比较不同权重系数和参数阈值对系统目标优化性能的影响,建立了表 3 所示的组合方案。

表 3 组合方案
Table 3 Combination schemes

方案	权重系数			阈值	
1	0.35	0.35	0.3	0.2	0.1
2	0.35	0.35	0.3	0.2	0.15
3	0.35	0.35	0.3	0.15	0.1
4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1
5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.15
6	0.4	0.3	0.3	0.15	0.1

1.5 改进的 NSGA-II 算法

NSGA-II 是带有精英策略的非支配排序遗传算法,能够对多个目标同时进行优化。该算法的基本思想是利用遗传算法的选择、交叉和变异 3 个操作得到子代种群,然后将父代种群与子代种群合并,利用非支配排序和拥挤度距离来筛选合适的个体组成新的种群,并依次类推,最终得到优化目标的 Pareto 解集。本文采用改进的 NSGA-II 算法,其算法流程图如图 4 所示。

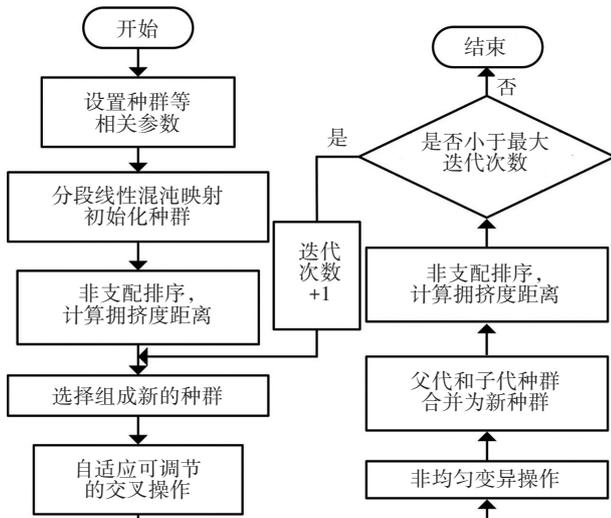


图 4 改进的 NSGA-II 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the improved NSGA-II algorithm

首先,对算法的初始化种群步骤进行改进。传统 NSGA-II 算法在种群初始化方面采用的是随机初始化方法。为了增加初始种群的随机性和多样性,本文采用分段线性混沌映射的初始化种群方法。这是一种具有非线性、随机性、遍历性的初始化种群方法,其数学模型为

$$x(t+1) = \begin{cases} x(t)/p, & 0 \leq x(t) < p \\ [x(t)-p]/(0.5-p), & p \leq x(t) < 0.5 \\ [1-p-x(t)]/(0.5-p), & 0.5 \leq x(t) < 1-p \\ [1-x(t)]/p, & 1-p \leq x(t) < 1 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $x(t)$ 是第 t 个初始种群个体; p 是变化范围指数,本文设定为 0.4。

算法的交叉和变异是产生新个体的主要途径,对于算法而言至关重要。传统遗传算法的交叉算子通常采用模拟二进制交叉,该交叉算子是单点交叉算子,一般采用固定的交叉分布指数,在局部优化搜索上表现较佳。但固定的分布指数不能兼顾全局搜索和局部搜索,本文引入自适应可调节反馈因子,对传统 NSGA-II 交叉算子分布指数进行改进。该反馈因子会随着迭代次数的增加,逐渐减小,可通过调节因子的大小来控制下降的速度。在算法迭代初期,电机结构参数分布较为分散,此时应该加快反馈因子的下降速度,减弱反馈关系,有利于提高算法的全局搜索能力。而在算法迭代后期,电机结构参数分布较为集中,此时保持较为平稳的反馈系数,有利于个体在局部搜索到最优解。自适应可调节反馈因子为

$$F = \left\{ \left[\exp\left(\frac{N_{\max} - N}{N_{\max}}\right) - 1 \right] / [\exp(1) - 1] \right\}^k \quad (4)$$

式(4)中, N 为当前迭代次数; N_{\max} 为最大迭代次数; k 为可调节因子,一般取值为 2~4,为了能够在前期和后期以不同的速度进行反馈, k 值应设定大一些,本文设定为 4。

传统遗传算法在变异操作采用的是多项式变异方式,该变异算子是利用随机数和用户自定义的变异分布指数来产生新的种群。多项式变异未能与迭代次数建立联系,在算法前期不能大范围进行搜索,随着迭代次数的增加,在算法后期也会缺乏局部搜索能力。为了将变异操作与迭代次数建立联系,本文引入非均匀变异算子,使算法在前期能进行较大范围搜索,而在后期对局部进行精细搜索,增加算法的微调能力。非均匀变异算子可表示为

$$f_i^{N+1} = \begin{cases} f_i^N + \Delta(N, U_{\max} - f_i^N), & r \leq 0.5 \\ f_i^N - \Delta(N, f_i^N - U_{\min}), & r > 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, f_i 表示产生的第 i 个个体, U_{\max} 和 U_{\min} 分别表示搜索空间的最大值和最小值, r 为区间 $[0, 1]$ 的随机数。 $\Delta(N, y)$ 可表示为

$$\Delta(N, y) = y \left(1 - r \left(\frac{1 - N}{N_{\max}}\right)^b\right) \quad (6)$$

式(6)中, b 为决定非均匀度的参数,该参数设置过大会使后期搜索范围过小只能得到局部最优解,设置过小会使搜索范围过大而无法及时得到最优解。为了能够在不同时期以不同的范围进行搜索, b 值应合理选择。图 5 展示了不同 b 值情况下的 GD (Generational Distance) 指标对比。根据图 5, b 值设定为 3 较为合适。

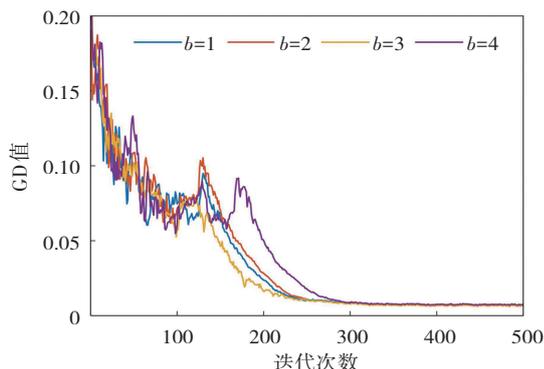


图 5 不同 b 值情况下的 GD 指标对比

Fig. 5 Comparison of GD indicators under different b values

改进后的 NSGA-II 比传统算法具有更加优越的性能,在 ZDT 函数测试集上比传统遗传算法更有优势。本文以 ZDT3 为例,用 GD 距离指标和 SP (Spacing) 分布性指标来评价算法的优劣。距离指标和分布性指标的对比分别如图 6、图 7 所示。从图 6 可以看出:改进后的 NSGA-II 能以更少的迭代次数获得相近的 GD 指标值,说明改进的算法在收敛性方面比传统算法更好。从图 7 可以看出:改进的算法能以更快的迭代速度获得相对稳定的 SP 指标值,说明改进的 NSGA-II 在分布性方面要好于传统的 NSGA-II。综上所述,改进的 NSGA-II 算法比传统算法更加有效。

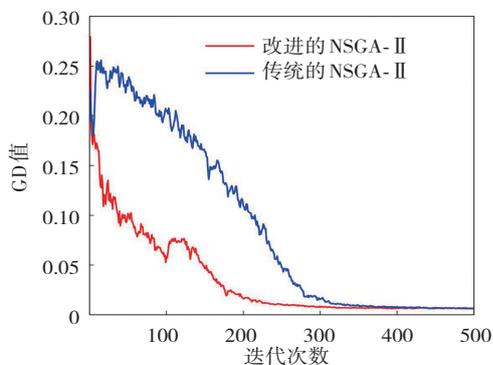


图 6 GD 指标对比

Fig. 6 Comparison of GD indicators

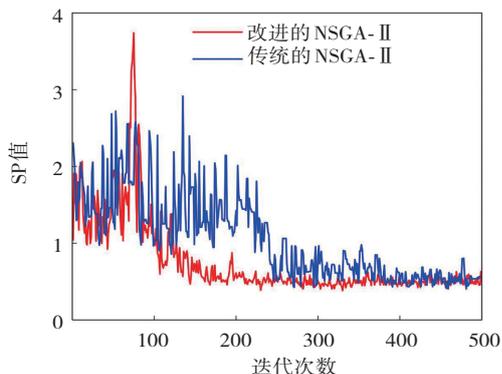


图 7 SP 指标对比

Fig. 7 Comparison of SP indicators

1.6 分层优化

根据表 2 的敏感度分析结果,将电机的结构参数分为 3 层。第一层的 4 个强敏感型参数和第二层的 3 个中等敏感型参数采用 GPR 模型和改进 NSGA-II 算法相结合的方法进行优化。GPR 是使用高斯过程对数据进行回归分析,通常被用于低维和小样本回归的机器学习算法。GPR 模型在非线性和小数据问题上具有明显的优势。本文的 GPR 模型采用常量基函数和非各向同性二次有理核函数,核尺度为 0.060 6,而其他设置则保持默认状态。在对第一层强敏感型结构参数和优化目标拟合 GPR 模型之前,需要先固定第二层和第三层参数,它们的具体数值见表 2 中的初值。利用 NSGA-II 算法能并列优化多个目标特性,寻找满足条件的结构参数。优化目标的 Pareto 解集如图 8 所示。

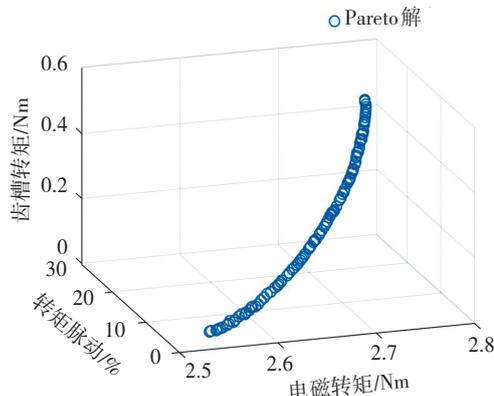


图 8 优化目标的 Pareto 解集

Fig. 8 Pareto solution set of optimization objectives

根据图 8 所得的 Pareto 解集,可以获得多组优化后的第一层结构参数数值。将得到的多组数值结合式(1)的权重系数,计算得到一组最优解并在表 4 中给出。对于第二层结构参数,采用同样的方法来获得参数值。在计算第二层结构参数的过程中,第一层结构参数与表 4 中的结构参数保持一致,第三层结构参数与前文中的参数保持一致。第一、二层结构参数的具体数值如表 4 所示。GPR 模型评价结果如表 5 所示。

表 4 第一层和第二层参数优化结果

Table 4 Optimization results of parameters of the first

		and second layers		/mm	
	参 数	数 值	参 数	数 值	
第一层	W_1	10.6	第二层	W_4	5.0
	W_2	17.9		W_5	3.5
	R_5	44.3		L_1	1.5
	R_6	61.5			

表 5 GPR 模型评价

Table 5 Evaluations of GPR models

	目 标	F_{RMSE}	R^2	F_{MAE}
第一层	T_a	0.021 3	0.99	0.023 5
	T_r	0.148 2	0.98	0.125 5
	T_c	0.031 1	0.98	0.034 7
第二层	T_a	0.019 8	0.99	0.014 3
	T_r	0.336 7	0.98	0.374 3
	T_c	0.061 7	0.94	0.041 1

表 5 中的 F_{RMSE} 、 R^2 和 F_{MAE} 分别表示均方根误差、决定系数和平均绝对百分比误差。决定系数 R^2 越接近 1, F_{RMSE} 和 F_{MAE} 数值越小, 说明模型拟合程度越好。表 5 中第一层和第二层结构参数的电磁转矩、转矩脉动和齿槽转矩 3 个目标模型的均方根误差和平均绝对百分比误差均小于 0.5, 说明这 3 个目标模型的拟合误差较小。而这 3 个目标模型的决定系数 R^2 都大于 0.9, 说明样本点利用该模型回归做出解释的离差平方和在总离差平方中所占比重较大。从表 5 中的评价结果可以看出: 第一层和第二层结构参数的 3 个目标回归模型的拟合程度都比较好, 可以用于统计运算; 对于第三层弱敏感型结构参数, 其数值变化对优化目标的影响非常小, 可采用单参数扫描法直接得到优化结果。经过优化后的第三层结构参数如表 6 所示。

表 6 第三层参数优化结果

Table 6 Optimization results of parameters of the third layer

参 数	数 值
R_1	10.0
R_2	17.0
W_3	26.0
W_6	3.0

2 有限元仿真验证

为增加算法优越性的说服力, 采用表 1 中相同的初始结构参数, 将文献[15]的改进粒子群优化算法作为对比方案 7。在 1 200 r/min 的转速下, SPMDs 电机的 A 相空载反电动势(Back electromotive force, EMF)对比如图 9 所示。SPMDs 电机初始结构和 7 种优化方案的 A 相空载反电动势幅值分别为 26.09 V、31.81 V、30.78 V、30.67 V、32.18 V、32.75 V、33.07 V、30.91 V。与优化前相比, 7 种方案优化后的空载反电动势幅值分别提高了 21.92%、17.98%、17.55%、23.34%、25.52%、26.75%、18.47%。

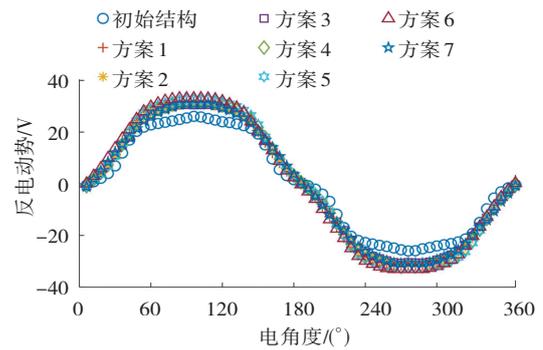


图 9 A 相空载反电动势对比

Fig. 9 Comparison of A phase no-load EMF

对图 9 中的空载反电动势进行傅里叶分解, 得到空载反电动势的前 7 次谐波, 如图 10 所示。从图 10 中可以看出: 该电机经 7 种方案优化后, 基波幅值有明显提高, 从 26.73 V 分别提升至 33.21 V、32.12 V、31.92 V、34.21 V、33.85 V、33.77 V、31.98 V。该电机的 A 相空载反电动势谐波畸变率也从优化前的 10.21% 分别降低至优化后的 5.32%、6.27%、4.51%、5.12%、7.12%、4.59%、3.76%。

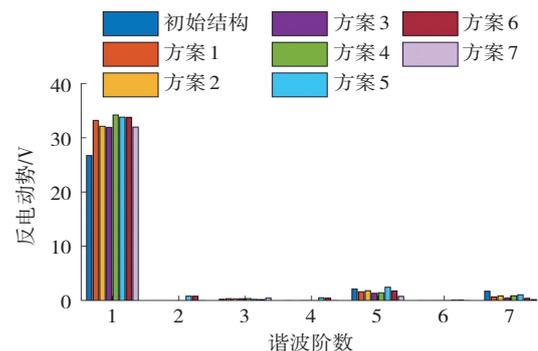


图 10 空载反电动势谐波分析

Fig. 10 Harmonic analysis of the no-load EMF

SPMDs 电机齿槽转矩波形对比如图 11 所示。SPMDs 电机初始结构和 7 种优化方案的齿槽转矩峰值分别为 0.51 Nm、0.23 Nm、0.25 Nm、0.24 Nm、0.28 Nm、0.31 Nm、0.33 Nm、0.25 Nm。与优化前相比, 优化后的 SPMDs 电机的齿槽转矩分别降低了 54.9%、50.98%、52.94%、45.01%、39.22%、35.29%、50.98%。

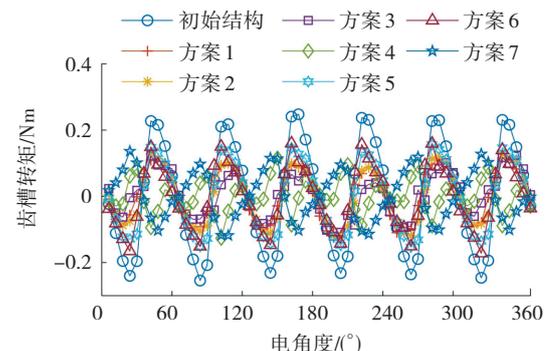


图 11 齿槽转矩波形对比

Fig. 11 Waveform comparison of cogging torque

SPMDS 电机电磁转矩波形对比如图 12 所示。在电流峰值为 7A 的条件下,SPMDS 电机初始结构和 7 种优化方案的电磁转矩平均值分别为 2.39 Nm、2.75 Nm、2.68 Nm、2.66 Nm、2.77 Nm、2.74 Nm、2.75 Nm、2.64 Nm。与优化前相比,优化后的电磁转矩平均值分别提升了 15.06%、12.13%、11.3%、15.9%、14.64%、15.06%、10.46%。转矩脉动是衡量转矩平稳性的重要指标之一,其数值等于转矩的峰值与平均值之比。SPMDS 电机的转矩脉动由优化前的 20.23% 分别降低至优化后的 9.45%、9.66%、8.99%、9.75%、13.78%、13.34%、10.29%。

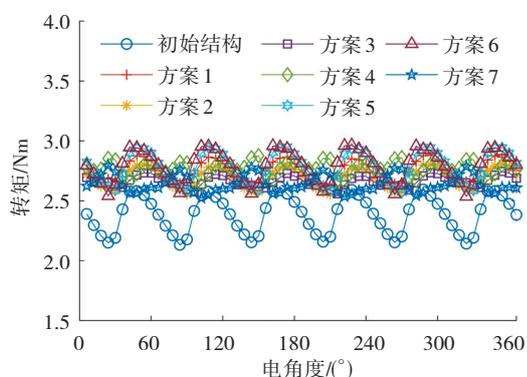


图 12 电磁转矩波形对比

Fig. 12 Waveform comparison of electromagnetic torque

由图 9—图 12 的对比结果可以看出:系统优化目标的结果会随着权重系数和阈值的改变而改变。本文提出的改进 NSGA-Ⅱ 算法比方案 7 中的算法在优化 SPMDS 电机方面更具有优势,其主要原因是方案 7 中的算法陷入了局部最优解,而本文对 NSGA-Ⅱ 算法进行改进,在收敛性和分布性方面性能更佳,能获得全局最优解。

3 结 论

为了解决 SPMDS 电机结构参数较多,难以进行优化的问题,提出一种基于改进 NSGA-Ⅱ 算法的多目标优化方法。通过综合敏感度分析,将电机结构参数分为 3 层:第一、二层结构参数利用 GPR 模型和改进的 NSGA-Ⅱ 算法得到;第三层结构参数通过单参数扫描法获得。与优化前相比,优化后的电磁转矩提升了 15.06%,齿槽转矩减小了 50.9%,转矩脉动由 20.23% 降至 9.45%。此外,优化后的空载反电动势幅值提升了 21.92%,空载反电动势的谐波畸变率也由 10.21% 降低至 5.32%。有限元仿真结果表明,所提出的多目标优化方法具有可行性和有效性,能有效改善电机的电磁性能。

参考文献(References):

- [1] 程明,张淦,花为. 定子永磁型无刷电机系统及其关键技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5204-5220.
CHENG Ming, ZHANG Gan, HUA Wei. Overview of stator permanent magnet brushless machine systems and their key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5204-5220.
- [2] 李永斌,江建中,邹国棠. 新型定子双馈双凸极永磁电机研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 119-123.
LI Yong-bin, JIANG Jian-zhong, ZOU Guo-tang. Study on a novel doubly salient permanent-magnet machine with the doubly-fed stator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 119-123.
- [3] CHENG H, CUI J Z, PENG C, et al. Electromagnetic characteristics analysis and torque ripple reduction for doubly salient PM machine [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(3): 1659-1668.
- [4] DU Y, MAO Y, XIAO F, et al. A pole-changing doubly salient permanent magnet motor [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(2): 2479-2489.
- [5] 龚宇,余创,邹国棠,等. 新型双凸极永磁记忆电机的特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(24): 67-72.
GONG Yu, YU Chuang, ZOU Guo-tang, et al. Characteristics analysis of a novel doubly salient permanent magnet memory motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(24): 67-72.
- [6] 陈云云,全力,朱孝勇,等. 双凸极永磁双转子电机优化设计与电磁特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1912-1921.
CHEN Yun-yun, QUAN Li, ZHU Xiao-yong, et al. Optimal design and electromagnetic performance analysis of double-salient permanent-magnet double-rotor motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1912-1921.
- [7] QU C Y, GUO Z Q, HU Y Z, et al. Multi-objective optimization design of a new permanent magnet synchronous motor based on the Taguchi method[J]. Energies, 2022, 15(19): 7347.
- [8] 兰志勇,杨向宇,王芳媛,等. Taguchi 方法在内嵌式正弦波永磁同步电机优化设计中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 37-42.
LAN Zhi-yong, YANG Xiang-yu, WANG Fang-yuan, et al. Application for optimal designing of sinusoidal interior permanent magnet synchronous motors by using the Taguchi method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 37-42.

- [9] GUO Y Q, SI J K, GAO C X, et al. Improved fuzzy-based Taguchi method for multi-objective optimization of direct-drive permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 1-4.
- [10] 张玉峰, 高文韬, 史乔宁, 等. 基于改进迭代田口法的双冗余永磁同步电机优化设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(10): 2637-2647.
ZHANG Yu-feng, GAO Wen-tao, SHI Qiao-ning, et al. Optimization design of dual-redundancy permanent magnet synchronous motor based on improved iterations Taguchi method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(10): 2637-2647.
- [11] 孟大伟, 周美兰. 模拟退火算法在电机设计中的应用[J]. 电机与控制学报, 2001, 5(3): 154-158, 162.
MENG Da-wei, ZHOU Mei-lan. The application of simulated annealing algorithm to electric machine design[J]. Electric Machines and Control, 2001, 5(3): 154-158, 162.
- [12] 曹永娟, 冯亮亮, 毛瑞, 等. 轴向磁场永磁记忆电机多目标分层优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 1983-1991.
CAO Yong-juan, FENG Liang-liang, MAO Rui, et al. Multi-objective stratified optimization design of axial-flux permanent magnet memory motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 1983-1991.
- [13] 刘国海, 王艳阳, 陈前. 非对称 V 型内置式永磁同步电机的多目标优化设计[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S2): 385-393.
LIU Guo-hai, WANG Yan-yang, CHEN Qian. Multi-objective optimization of an asymmetric V-shaped interior permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 385-393.
- [14] 李哲, 郑玲, 杨威, 等. 开关磁阻电机转矩脉动及结构优化设计研究[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(6): 11-21.
LI Zhe, ZHENG Ling, YANG Wei, et al. Research on torque ripple and structure optimization of switched reluctance motor[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(6): 11-21.
- [15] 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多目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(3): 81-87.
QIAO Lu-kuan, ZHANG Bing-yi, LI Yan, 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.
- [16] 樊英, 陈秋菊, 陈俊磊, 等. 基于无人配送车辆运行工况的交替极游标轮毂电机优化设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5142-5151.
FAN Ying, CHEN Qiu-shu, Chen Jun-lei, et al. Optimization design of consequent pole vernier wheel motor based on operating conditions of unmanned delivery vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5141-5151.
- [17] 李祥林, 李金阳, 杨光勇, 等. 电励磁双定子场调制电机的多目标优化设计分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 972-982.
LI Xiang-lin, LI Jin-yang, YANG Guang-yong, et al. Multi-objective optimization analysis of electric-excitation double-stator field-modulated machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 972-982.
- [18] 陈云云, 朱孝勇, 全力, 等. 基于参数敏感度的双凸极永磁型双定子电机的优化设计和性能分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 160-168.
CHEN Yun-yun, ZHU Xiao-yong, QUAN Li, et al. Parameter sensitivity optimization design and performance analysis of double-salient permanent-magnet double-stator machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 160-168.
- [19] 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 Bing-chuan, ZHANG Yue, XU Zhen-yao, 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.
- [20] 刘洋, 宋宝, 周向东, 等. 轮辐式游标永磁电机分析与多目标优化设计[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(9): 1-9.
LIU Yang, SONG Bao, ZHOU Xiang-dong. Analysis and multi-objective optimization of spoke type vernier permanent-magnet machine[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(9): 1-9.
- [21] 朱孝勇, 程明. 定子永磁型混合励磁双凸极电机设计、分析与控制[J]. 中国科学(技术科学), 2010, 40(9): 1061-1073.
ZHU Xiao-yong, CHENG Ming. Design, analysis and control of stator permanent magnet hybrid excitation doubly salient motor[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2010, 40(9): 1061-1073.

责任编辑:李翠薇