

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.3003

GA-SVM 结合 NSGA-III 对开关磁阻 电机多目标优化设计

周程涛, 陈刚, 邓琪, 柏恋凡

(湖南工业大学 交通与电气工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对开关磁阻电机驱动性能脉动大、效率低的问题, 提出了一种基于支持向量机优化的预测模型 (GA-SVM) 与第三代非支配遗传算法 (NSGA-III) 相结合的多目标优化策略。仿真结果表明, 该方法对开关磁阻电机的平均转矩和效率有较大提高, 同时降低了转矩脉动。通过建立一个开关磁阻电机仿真模型, 并运用灵敏度分析选取影响因数高的参数作为决策变量, 运用超拉丁方采样对开关磁阻电机进行数据采样, 以有限元法计算出响应值、GA-SVM 和 NSGA-III 算法相结合对电机进行多目标寻优, 优化后的数据加入权重系数权衡后得到最优解, 仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 开关磁阻电机; 灵敏度分析; 支持向量机; 多目标寻优; 第三代非支配排序遗传算法

中图分类号: TM352

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)03-0017-07

引文格式: 周程涛, 陈刚, 邓琪, 等. GA-SVM 结合 NSGA-III 对开关磁阻电机多目标优化设计 [J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(3): 17-23.

Multi-Objective Optimization Design of Switched Reluctance Motor Based on GA-SVM Combined with NSGA-III

ZHOU Chengtao, CHEN Gang, DENG Qi, BAI Lianfan

(School of Transportation and Electrical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the flaw of significant performance fluctuations and low efficiency found in switched reluctance motor drives, a multi-objective optimization strategy, which combines a prediction model optimized using support vector machines (GA-SVM) with the third-generation non-dominated genetic algorithm (NSGA-III), has thus been proposed. The simulation results show that the proposed method can significantly improve the average torque and efficiency of switched reluctance motors, with its torque ripple reduced. By establishing a simulation model of a switched reluctance motor, and using sensitivity analysis to select parameters with high influence factors as decision variables, the switched reluctance motor is sampled using hyper-Latin square sampling. The response values are calculated using finite element analysis, with the GA-SVM and NSGA-III algorithms combined to perform multi-objective optimization on the motor. The optimized data is weighted with weight coefficients, thus obtaining the optimal solution. The effectiveness of the proposed method can be verified by the simulation results.

Keywords: switched reluctance motor; sensitivity analysis; support vector machine (SVM); multi-objective optimization; third-generation non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-III)

收稿日期: 2025-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62173136); 国家重点研发计划基金资助项目 (2024YFE0111100)

作者简介: 周程涛, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为开关磁阻电机系统控制及其应用,

E-mail: 2469652441@qq.com

通信作者: 陈刚, 男, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为时滞系统鲁棒控制, E-mail: chengang@hut.edu.cn

1 研究背景

随着现代科技的不断进步,电机技术的开发与应用正加速推动多个领域的创新与升级,电机的可靠性性能也得到了显著提升。开关磁阻电机 (switched reluctance motor, SRM) 是一个双凸极结构,开关磁阻电机的定转子上通常没有永磁体,而它的鲁棒性又高,相对于其他电机制造成本较低,在通用机械、电动汽车、新能源以及家用电器等领域得到了广泛的应用^[1-5]。但 SRM 具有较大的转矩脉动,且运行时存在噪声大和振动强等问题^[6-9]。如何优化开关磁阻电机系统的综合性能,降低 SRM 电机的转矩脉动,是国内外学者们研究的焦点问题^[10-12]。

文献 [13] 用两种方法同时优化一台六相 12/10 极开关磁阻电机多目标优化模型,采用遗传算法对开关磁阻电机进行多目标寻优,运用连续田口法对电机系统进行鲁棒性优化分析设计,实验结果验证了鲁棒性优化设计的准确性和可行性,但连续田口法需要进行多次迭代,计算复杂且计算量比较大。文献 [14] 中采用帕累托多目标差分进化算法 (Pareto-based multi-objective differential evolution algorithm, PMODEA) 对开关磁阻电机的平均转矩和转矩脉动进行了优化,通过有限元法计算出电机的最佳尺寸,实现了对所选电机的分析,并将有限元分析结果与试验结果进行了比较分析,所得结果证明了该方法的可行性。文献 [15] 中运用一种遗传算法优化的支持向量机和 NSGA-II (nondominated sorting genetic algorithm II) 相结合的方法对永磁辅助开关磁阻电机的转矩脉动和平均转矩进行了优化,并运用田口实验设计和方差分析验证了该方法对平均转矩和转矩脉动的优化具有显著的效果,但只有两个优化目标,且未对效率进行优化,限制了优化的全面性。文献 [16] 通过灵敏度分析选择影响因数大的参数作为决策变量,再运用遗传算法优化的神经网络和 NSGA-II 相结合的方法进行多目标优化,并通过仿真结果验证了该方法具有明显的效果,优化后的转矩脉动显著降低,同时平均转矩有所提高,但效率增加不多。文献 [17] 中,作者通过建立 Kriging 模型,并利用改进的粒子群算法对开关磁阻电机的两个子空间参数进行了迭代寻优,实验结果表明其虽然对转矩脉动的降低效果明显,但对平均转矩的提高效果不足。

针对上述研究中存在的问题,以及开关磁阻电机存在的转矩脉动大、效率低的问题,本文首先在 Ansys Maxwell 有限元仿真软件中建立了一台六相 12/10 极的开关磁阻电机模型,并对模型进行参数化

设置。然后对模型进行灵敏度分析,利用灵敏度分析来减少计算量大的问题,选取具有高灵敏度的参数作为输入变量,通过灵敏度分析后再经过加权分析,把 5 个综合灵敏度强的参数当作决策变量,并将电机的效率、平均转矩和转矩脉动当作多目标算法的优化目标。其次,通过超拉丁方采样获取有限元分析计算的样本数据,并使用 GA-SVM (遗传算法优化的支持向量机) 建立回归预测模型,且结合非支配排序遗传算法 (NSGA-III) 的多目标算法进行优化,得到 Pareto 最优解集,再引入权重系数对最优解集进行权衡,得到一组最优解。最后,将优化后的最优解与优化前的结果进行比较分析,验证了该方法的有效性。

2 电机结构与多目标优化设计

2.1 开关磁阻电机初始参数与拓扑结构设计

开关磁阻电机是一个直流电机,结构上是一个双凸极结构电机,定子铁芯通常由硅钢片叠压形成,定子上绕有集中绕组,以减少涡流损耗和磁滞损耗,转子铁芯同样由硅钢片叠压而成,转子上既没有绕组也没有永磁体,这使得转子结构非常简单,能够适应高速旋转和恶劣的工作环境。

本文采用一台具有 6 个相位、定子极数为 12 极、转子极数为 10 极的开关磁阻电机,此电机的结构如图 1 所示。电机的初始参数设计如图 2 和表 1 所示,图 2 中的集中绕组分布采用 N 极和 S 极相间分布。

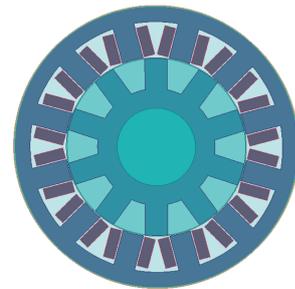


图 1 六相 12/10 极开关磁阻电机结构图

Fig.1 Structure diagram of six-phase 12/10 pole switched reluctance motor

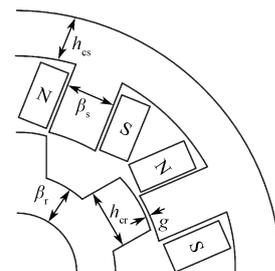


图 2 开关磁阻电机参数拓扑图

Fig.2 Switched reluctance motor parameter topology diagram

表1 开关磁阻电机参数初始设计表

Table 1 Initial design table of switched reluctance motor parameters

参数	取值	参数	取值
定子外径 D_s/mm	80	轴向长度 L/mm	75
定子轭高 h_{cs}/mm	4.5	绕组匝数 N	26
定子极弧系数 α_s	0.45	气隙 g/mm	0.4
定子极弧 β_s/mm	16.2	额定功率 P_N/W	220
转子外径 D_r/mm	50.2	额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	2 450
转子轭高 h_{cr}/mm	5.5	开通角 $\theta_{on}/(^{\circ})$	-1
转子极弧系数 α_r	0.4	关断角 $\theta_{off}/(^{\circ})$	10
转子极弧 β_r/mm	14.4		

表1中定转子极弧系数的表达式分别如下:

$$\alpha_s = \beta_s / (360^\circ / N_s), \quad (1)$$

$$\alpha_r = \beta_r / (360^\circ / N_r), \quad (2)$$

式中: N_s 和 N_r 分别为定、转子的相数。

2.2 电机优化流程设计

开关磁阻电机的优化设计, 首先通过有限元仿真取得电机的性能指标样本数据, 然后利用该样本数据搭建一个拟合模型对开关磁阻电机的性能进行预测。将建立的预测模型放入多目标优化算法中进行寻优, 寻优的结果通过加权分析得到最优解。具体的开关磁阻电机优化设计流程如图3所示。

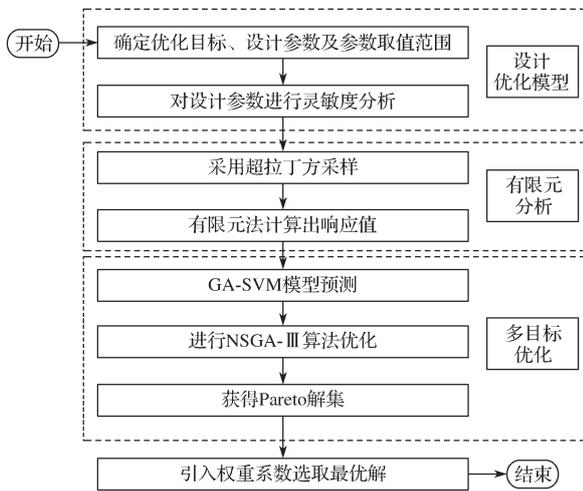


图3 开关磁阻电机的多目标优化设计流程图

Fig. 3 Multi-objective optimization design flowchart of switched reluctance motor

3 优化模型设计及灵敏度分析

3.1 电机优化模型设计

电机的优化设计有单目标优化和多目标优化两种方法, 单目标优化仅针对单一函数最值问题, 难以满足多变量、多维度复杂系统的优化需求。开关磁阻

电机优化设计过程中涉及多个耦合性参数, 这些参数对电机的性能指标均有影响, 且参数之间也相互影响。因此, 本文选择多目标优化方法, 此方法不仅能够提供多样化和多维度选择, 而且在多个性能指标之间进行权衡, 明确每个决策变量对目标值的影响。在开关磁阻电机的多目标优化中, 又会出现多个目标函数中的大小值之分, 其表达式如下:

$$\begin{aligned} \min: f(\mathbf{X}) &= [f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), \dots, f_m(\mathbf{X})]^T; \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} g_i(\mathbf{X}) \leq 0 (i=1, 2, \dots, p), \\ h_j(\mathbf{X}) = 0 (j=1, 2, \dots, q), \end{cases} \mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T. \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $f(\mathbf{X})$ 为多目标优化的目标函数; $g_i(\mathbf{X})$ 和 $h_j(\mathbf{X})$ 分别为不等式和等式的约束条件; \mathbf{X} 为决策变量; \mathbf{x} 为 k 维欧氏空间 \mathbf{R}^k 中的向量。

3.2 目标函数及约束条件

开关磁阻电机运行时最大的缺点就是转矩脉动大, 如何降低转矩脉动成为该领域国内外学者们研究的焦点问题, 但是转矩脉动的改变又对平均转矩和效率影响很大, 学者们都在研究如何在降低转矩脉动的情况下, 同时让平均转矩和效率增加或者维持不变。转矩脉动的表达式如下:

$$T_{\text{rip}} = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) / T_{\text{avg}}, \quad (4)$$

式中: T_{rip} 为转矩脉动 ($\text{N}\cdot\text{m}$); T_{max} 、 T_{min} 分别为最大转矩与最小转矩; T_{avg} 为平均转矩, 其公式为

$$T_{\text{avg}} = 9.55P/n, \quad (5)$$

式中: P 和 n 分别为额定功率和额定转速。

效率的计算式如下:

$$\eta = P_{\text{out}} / (P_{\text{out}} + P_{\text{loss}}), \quad (6)$$

式中: P_{out} 和 P_{loss} 分别为输出功率、铜损加铁损功率的和。

本文确定电机的效率、平均转矩和转矩脉动为优化目标, 目标优化完之后加入权重系数以权衡每个目标值的占比。当转矩脉动降低到最小值时, 平均转矩和效率有提升或者保持不变。本文设计的电机优化目标范围值如下:

$$\begin{cases} \eta \geq 80\%, \\ T_{\text{avg}} \geq 0.9, \\ T_{\text{rip}} \leq 0.25. \end{cases} \quad (7)$$

3.3 灵敏度分析

本文通过灵敏度分析解决计算量大和变量多的问题, 灵敏度分析能够评估每一个参数对优化目标值大小的影响, 从而筛选出对性能指标高度敏感的参数作为优化变量。此方法不仅能有效降低计算复杂度, 使优化的流程简化, 还能找出对开关磁阻电机优化目

标具有显著影响的参数。本文把初始模型设计的结构和控制参数都作为灵敏度分析的设计变量，设置的灵敏度初始值及范围如表 2 所示。

表 2 灵敏度分析参数的初始值和范围
Table 2 Initial values and ranges of sensitivity analysis parameters

参数	初始值	取值范围	参数	初始值	取值范围
定子外径 D_s/mm	80	78~83	定子极弧系数 α_s	0.45	0.39~0.5
定子内径 R_s/mm	51	48~56	气隙 g/mm	0.4	0.3~0.5
转子内径 R_r/mm	26	18~26	开通角 $\theta_{on}/(^\circ)$	-1	-3~0
定子轭高 h_{cs}/mm	4.5	4.3~5.3	关断角 $\theta_{off}/(^\circ)$	10	9~13
转子轭高 h_{cr}/mm	5.5	5.2~6.0	绕组匝数 N	26	25~32
转子极弧系数 α_r	0.4	0.35~0.50	轴向长度 L/mm	75	73~80

再通过超拉丁方 (Latin Hypercube Sampling, LHS) 采样方法选取 100 组数据样本，结合实验设计 (design of experiments, DOE) 方法构建一个总的设计参数值与目标值间的灵敏度分析模型，经过灵敏度分析后的结果如图 4 所示。

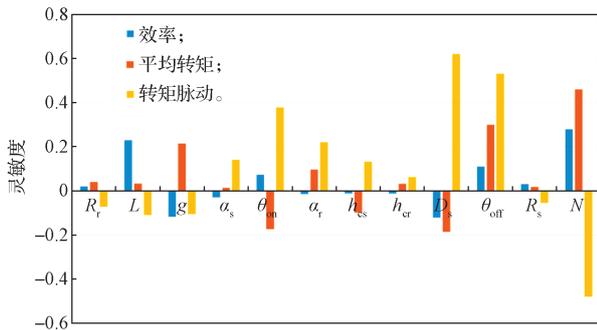


图 4 灵敏度分析结果
Fig. 4 Sensitivity analysis results

根据图 4，将各个参数的灵敏度结果进行加权分析计算，得到其综合灵敏度，然后将综合灵敏度结果不低于 0.15 的参数作为决策变量。综合灵敏度的计算式如下：

$$S_z(x_j) = \omega_1 |S_{T_{avg}}(x_j)| + \omega_2 |S_{T_{rip}}(x_j)| + \omega_3 |S_\eta(x_j)|, \quad (8)$$

式中： S_z 为每个设计参数进行加权分析之后的综合灵敏度系数； $S_{T_{avg}}$ 为电机的平均转矩灵敏度系数； $S_{T_{rip}}$ 为电机的转矩脉动灵敏度系数； S_η 为电机效率灵敏度系数； x_j 为多目标优化的设计参数； ω 为加权分析的权重系数，其取值为 0.15, 0.35, 0.50。

灵敏度分析计算获得的综合灵敏度指标系数如表 3 所示。最终确定气隙 g 、匝数 N 和定子外径 D_s 为电机结构参数，开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 为控制参数决策变量。

表 3 参数综合灵敏度系数分析结果

Table 3 Analysis results of comprehensive sensitivity coefficient of parameters

设计参数	S_η	$S_{T_{avg}}$	$S_{T_{rip}}$	S_z
R_r	0.020	0.040	-0.070	0.052
L	0.230	0.033	-0.110	0.101
g	-0.118	0.214	-0.106	0.150
α_s	-0.030	0.013	0.141	0.080
θ_{on}	0.073	-0.175	0.378	0.260
α_r	-0.015	0.096	0.220	0.140
h_{cs}	-0.012	-0.099	0.132	0.102
h_{cr}	-0.013	0.032	0.062	0.044
D_s	-0.122	-0.186	0.620	0.393
θ_{off}	0.110	0.300	0.531	0.380
R_s	0.030	0.018	-0.055	0.040
N	0.279	0.460	-0.480	0.440

4 多目标优化设计

4.1 GA-SVM 代理模型预测

支持向量机是一种由统计学习理论衍生的学习算法训练而成的学习系统，该算法在高维特征空间中使用线性函数的假设空间。使用 SVM 进行回归分析时，将数据样本从低维特征空间映射到高维特征空间，在此空间中进行回归分析。遗传算法 (GA) 作为一种全局搜索算法，具较好的泛化性和线性映射能力。通过 GA 优化支持向量机，影响 SVM 预测模型的主要为惩罚因子 C 和核参数 G ，GA 优化 SVM 流程见图 5，然后取 3 个目标值的最佳预测模型。

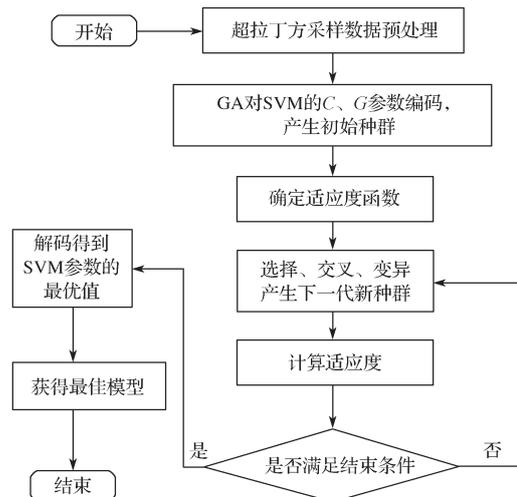


图 5 GA-SVM 流程图

Fig. 5 GA-SVM flowchart

借助灵敏度分析选定 5 个对开关磁阻电机影响显著的设计参数作为决策变量，运用超拉丁方采样法进行采样分析计算，获得 100 组数据样本。这 100 组数

据通过 GA-SVM 建立预测模型, 从这 100 组数据中挑选出 90 组数据充当样本训练集, 剩余 10 组数据则当作样本测试集。本文在搭建预测模型中设置了输入神经元和输出神经元, 它们之间通过隐含神经元取得

输入值与输出值之间的联系, 输入神经元分别为匝数、定子外径、气隙、开通角以及关断角; 输出神经元包括转矩脉动、效率和平均转矩。所得平均转矩、效率和转矩脉动的 GA-SVM 预测效果见图 6。

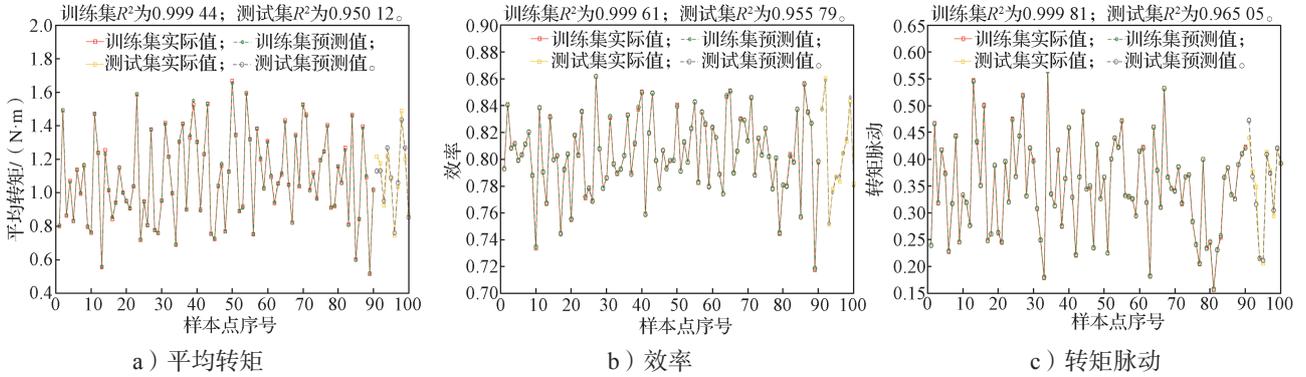


图 6 GA-SVM 预测效果曲线

Fig. 6 GA-SVM prediction performance curves

引入决定系数 R^2 作为衡量训练集和测试集的标准, 其取值范围为 0~1。通常训练集的取值比测试集大, 测试集 R^2 取值一般要大于 0.95 才能体现出拟合效果好。本文拟合精度测试集 R^2 如图 6 所示, 平均转矩的测试集 R^2 为 0.95012、效率的测试集 R^2 为 0.95579、转矩脉动的测试集 R^2 为 0.96505, 由此可得出该模型具有较高的精确度。

4.2 NSGA-III 多目标寻优

NSGA-III 具有多样性、高收敛性和高效率的特点, 它是在 NSGA-II 的基础上进行改进的, 主要是在种群的选择策略上进行改进, 同时加强了下一代种群的非支配排序速度, 引入了精英策略, 能够更好地把优秀个体基因传递到下一代, 更快地找出最优解。NSGA-III 的寻优流程如图 7 所示。

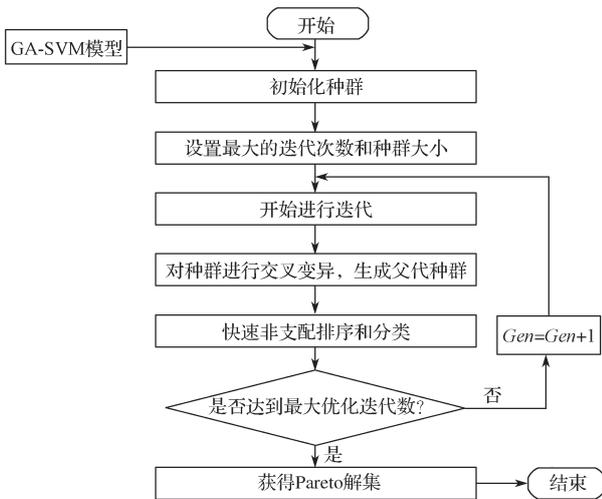


图 7 NSGA-III 算法流程图

Fig. 7 NSGA-III algorithm flowchart

将 GA-SVM 构建的预测模型加入 NSGA-III 多目标算法中进行优化, 寻优后得到的 Pareto 解集见图 8。

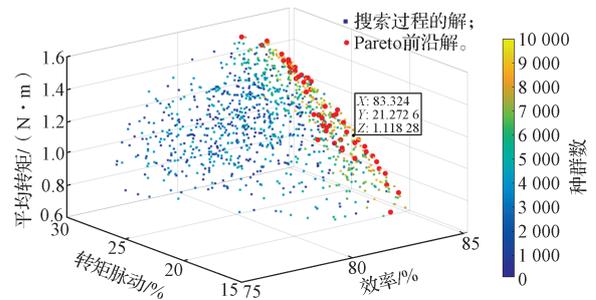


图 8 NSGA-III Pareto 解集分布图

Fig. 8 NSGA-III Pareto solution set distribution diagram

将优化后数据结果中的目标值设置为一组权重系数, 而开关磁阻电机的影响因素主要来自转矩脉动, 将效率的权重系数设置为 0.20, 平均转矩系数设置为 0.35; 转矩脉动权重系数设置为 0.45, Pareto 解集经过权重系数权衡后得到一组系统优化的最优解。从这一组数据中能够得到决策变量优化后的值, 匝数、开通角、关断角、定子外径、气隙值分别为 28、12.9°、-2.4°、80.3 mm、0.392 mm。

4.3 有限元分析及优化结果

首先, 利用 Maxwell 有限元软件搭建一个优化前后的电机模型, 再通过有限元软件仿真进行计算, 得到的结果见表 4。对比优化前后的数据之后, 再进行有限元仿真分析, 得到的转矩波形见图 9 和 10。

由表 4 可知, 电机优化前的平均转矩和效率值分别为 0.853 3 N·m 和 80.35%, 而优化后获得的数据分别提升到 1.118 N·m 和 83.32%, 平均转矩数据相比优化前的提升了约 31%, 效率提升不是很大, 但也提升了约 4%; 而转矩脉动由之前的 0.492 1 N·m 降到了 0.212 7 N·m, 转矩脉动降低了约 56.8%, 降低效果明显。优化后的数据结果也符合式 (7) 的目标值,

相较优化前的结果,优化后的结果平均转矩和效率值都有提高,转矩脉动也下降到了理想值。

表4 电机优化前后的数值分析结果

Table 4 Numerical analysis comparison table before and after motor optimization

参数	关断角/(°)	开通角/(°)	定子外径/mm	气隙/mm
优化前	10	-1	80	0.4
优化后	12.9	-2.4	80.3	0.392
参数	匝数	平均转矩/(N·m)	转矩脉动/(N·m)	效率/%
优化前	26	0.853 3	0.492 1	80.35
优化后	28	1.118	0.212 7	83.32

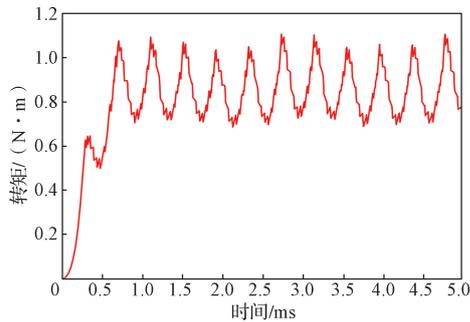


图9 额定转速下的转矩波形

Fig. 9 Torque waveform at rated speed

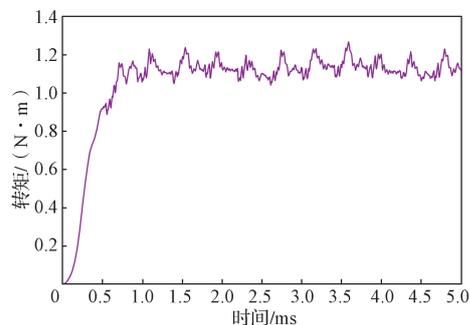


图10 NSGA-III多目标优化后的转矩波形

Fig. 10 NSGA-III multi-objective optimized torque waveform

图11为多目标优化前后的转矩对比图。

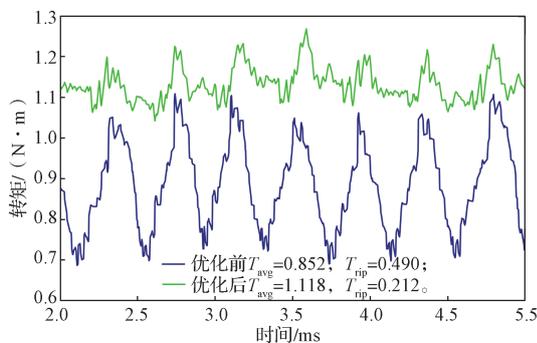


图11 多目标优化前后转矩对比图

Fig. 11 Torque comparison diagram before and after multi-objective optimization

由图11中一个周期2~5 ms时的转矩对比图,可以看出优化前的转矩脉动较大,平均转矩数值较低,

而通过优化后,得到的转矩脉动较小,同时平均转矩数值比优化前也有所提升。通过优化前后开关磁阻电机的综合性能对比,得知优化后的转矩综合性能明显提升,也有效验证了该设计方法优化开关磁阻电机驱动性能的可行性。

5 结论

本文针对一台六相12/10极双凸极开关磁阻电机的本体参数进行了优化,设计了一种将GA-SVM与NSGA-III相结合的多目标优化开关磁阻电机的方法,以降低开关磁阻电机的转矩脉动,同时提升电机的效率和平均转矩。

1) 利用有限元分析软件搭建电机模型,经过灵敏度加权分析之后,选择综合灵敏度高的电机参数作为多目标优化的5个决策变量。

2) 通过GA-SVM搭建了一个开关磁阻电机系统的决策变量和3个目标值相互联系的预测模型,通过决定系数 R^2 的值预测模型精度,再结合NSGA-III算法进行多目标寻优得到Pareto解集,引入权重系数权衡之后得出最优解。

3) 优化后的转矩脉动从优化前的0.492 1 N·m降低到了0.212 7 N·m;平均转矩和效率分别从优化前的0.853 3 N·m和80.35%提升到了1.118 N·m和83.32%。

4) 有限元软件仿真验证结果验证了GA-SVM和NSGA-III相结合的方法对开关磁阻电机系统综合性能的提升有显著的效果。

参考文献:

- [1] 周云红,王东,黄飞,等.基于定转子齿开槽的开关磁阻电机振动噪声抑制[J].振动与冲击,2023,42(9):312-321.
ZHOU Yunhong, WANG Dong, HUANG Fei, et al. Vibration and Noise Suppression of Switched Reluctance Motor Based on Stator and Rotor Slotted[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(9): 312-321.
- [2] SOVICKA P, RAFAJDUS P, VAVRUS V. Switched Reluctance Motor Drive with Low-Speed Performance Improvement[J]. Electrical Engineering, 2020, 102(1): 27-41.
- [3] 孙剑波,詹琼华,王双红,等.开关磁阻电机减振降噪和低转矩脉动控制策略[J].中国电机工程学报,2008,28(12):134-138.
SUN Jianbo, ZHAN Qionghua, WANG Shuanghong, et al. Control Strategy of Switched Reluctance Motor to Restrain Vibration, Acoustic Noise and Torque Ripple[J].

- Proceedings of the CSEE, 2008, 28(12): 134-138.
- [4] 朱曰莹, 杨传甜, 赵桂范, 等. 电动车用开关磁阻电机驱动系统多指标同步优化[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(10): 25-34.
ZHU Yueying, YANG Chuantian, ZHAO Guifan, et al. Optimization of the Switched Reluctance Motor Drive System in Electric Vehicles Application[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(10): 25-34.
- [5] KISHORE R D, SANTHOSHI K B, SRAVANI K. Multiport Bidirectional Converter for Solar Fed Hybrid Electric Vehicle Using Switched Reluctance Motor Drive[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1375(1): 012025.
- [6] 谭平, 瞿遂春, 马世伟. 开关磁阻电机减振降噪技术研究[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(3): 66-69.
TAN Ping, QU Suichun, MA Shiwei. Study on Noise Reduction and Vibration Damping of Switched Reluctance Motor[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(3): 66-69.
- [7] 井立兵, 成佳. 开关磁阻电机转矩脉动优化研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(21): 120-125.
JING Libing, CHENG Jia. Torque Ripple Optimization for a Switched Reluctance Motor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(21): 120-125.
- [8] 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.
- [9] 黄卓冕, 谭平, 瞿遂春. 开关磁阻电机的直接转矩控制技术[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(4): 88-91.
HUANG Zhuomian, TAN Ping, QU Suichun. Direct Torque Control Technology of Switched Reluctance Motor[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(4): 88-91.
- [10] 周云红, 陈泽楠, 李汉杰, 等. 结构优化与直接瞬时转矩控制下的开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(10): 76-87.
ZHOU Yunhong, CHEN Zenan, LI Hanjie, et al. Torque Ripple Suppression in Switched Reluctance Motors Under Structural Optimization and Direct Instantaneous Torque Control[J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(10): 76-87.
- [11] DIAO K K, SUN X D, BRAMERDORFER G, et al. Design Optimization of Switched Reluctance Machines for Performance and Reliability Enhancements: A Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 168: 112785.
- [12] 袁野, 叶腾, 杨帆, 等. 12/14 无轴承开关磁阻电机双系统性能统一优化策略[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-11. [2024-11-04]. <http://doi.org/10.13334/j.0258-8013.Pcsee.231829>.
YUAN Ye, YE Teng, YANG Fan, et al. Unified Optimization Strategy of Torque/Suspension System Performance for 12/14 Bearingless Switched Reluctance Motor[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-11. [2024-11-04]. <http://doi.org/10.13334/j.0258-8013.Pcsee.231829>.
- [13] 刁凯凯, 孙晓东, 杨泽斌. 开关磁阻电机系统级确定性与鲁棒性优化设计方法的对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3575-3586.
DIAO Kaikai, SUN Xiaodong, YANG Zebin. Comparative Analysis of System-Level Deterministic and Robust Optimization Design Methods for Switched Reluctance Motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3575-3586.
- [14] ÖKSÜZTEPE E. In-Wheel Switched Reluctance Motor Design for Electric Vehicles by Using a Pareto-Based Multiobjective Differential Evolution Algorithm[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6): 4706-4715.
- [15] 黄朝志, 原红卫, 耿永民. 运用 GASVM-NSGA-II 的永磁辅助开关磁阻电机多目标优化方法[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(4): 592-600.
HUANG Chaozhi, YUAN Hongwei, GENG Yongmin. Multi-Objective Optimization Method for Permanent Magnet-Assisted Switched Reluctance Motor with GASVM-NSGA-II[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025, 44(4): 592-600.
- [16] 陈刚, 邓琪. 基于 GABP-NSGA-II 的开关磁阻电机系统级多目标优化设计[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(3): 32-37.
CHEN Gang, DENG Qi. A System-Level Multi-Objective Optimization Design for Switched Reluctance Motors Based on GABP-NSGA-II[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2024, 38(3): 32-37.
- [17] 徐萌, 周玉祥, 徐海, 等. 基于改进粒子群算法的开关磁阻电机本体优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4): 131-141.
XU Meng, ZHOU Yuxiang, XU Hai, et al. Ontology Optimization of Switched Reluctance Motor Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 131-141.

(责任编辑: 廖友媛)