

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.03.005

基于 GABP-NSGA-II 的开关磁阻电机 系统级多目标优化设计

陈 刚, 邓 琪

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为提升开关磁阻电机 (SRM) 的系统驱动性能, 提出一种基于遗传算法 (GA) 优化反向传播 (BP) 神经网络和非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 相结合的多目标优化设计方法, 旨在降低其转矩脉动、提高其平均转矩和效率。通过灵敏度分析, 选择对开关磁阻电机优化目标影响较大的 3 个本体参数 (匝数、转子极弧系数、气隙) 和两个控制参数 (开通角、关断角) 作为决策变量, 采用有限元分析、GA-BP 法建模和 NSGA-II 算法进行多目标寻优, 得到最优解。仿真结果表明, 运用 GA-BP-NSGA-II 优化设计方法对提升开关磁阻电机的系统驱动性能有显著效果。

关键词: 开关磁阻电机; 多目标优化; 遗传算法优化反向传播神经网络; 非支配排序遗传算法 (NSGA-II)

中图分类号: TM352

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)03-0032-06

引文格式: 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.

A System-Level Multi-Objective Optimization Design for Switched Reluctance Motors Based on GABP-NSGA-II

CHEN Gang, DENG Qi

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of an improvement of the system driving performance of Switched Reluctance Motors (SRM), a multi-objective optimization design method has thus been proposed with a combination of a genetic algorithm (GA) optimized back propagation (BP) neural network and non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II), so as to reduce its torque ripple and improve its average torque and efficiency. Based on a sensitivity analysis, three ontology parameters (turns, rotor pole arc coefficient, air gap) and two control parameters (turn on angle, turn off angle), which have a significant impact on the optimization objectives of SRM (switched reluctance motors), are selected as decision variables, followed by an application of the finite element analysis, GA-BP modeling, and NSGA-II algorithm for a multi-objective optimization to obtain the optimal solution.

Keywords: switched reluctance motor; system-level multi-objective optimization; genetic algorithm optimized backpropagation neural network; non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II)

收稿日期: 2023-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62173136)

作者简介: 陈 刚, 男, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为时滞系统鲁棒控制, 网络控制, 机器人技术等,

E-mail: chengang@hut.edu.cn

1 研究背景

开关磁阻电机 (switched reluctance motors, SRM) 因其定转子无永磁体, 结构简单、鲁棒性强、成本低, 适用于高速运行等一系列优势和特点, 使其在电动汽车、通用机械、家用电器等领域得到了应用, 但因其运行过程中存在转矩脉动大、振动大、噪声明显等缺陷, 制约了其在不同领域的大量推广及应用, 为了提高开关磁阻电机的系统性能及竞争力, 国内外学者们对优化开关磁阻电机的转矩脉动、噪声、铁损耗等进行了大量研究^[1-4]。

开关磁阻电机属于强耦合、多变量控制的非线性系统, 其性能指标通常相互冲突, 因此在选择优化目标数量时, 需要多个目标同时优化, 才能确保输出最佳的系统性能^[5-7]。开关磁阻电机驱动系统 (switched reluctance motor drive, SRD), 主要由开关磁阻电机、功率变换器、位置检测器、控制器和电流检测器组成, 在选择设计参数时, 应同时选择其本体参数和控制参数协同的系统级优化方式, 以保证其最优的系统性能^[8]。

建立精确的开关磁阻电机模型是能准确分析和预测其性能的重要环节, 在实际工作中开关磁阻电机处在强耦合和非线性的状态, 其线性模型和准线模型存在的极大误差已经远远不能满足研究要求, 为此, 研究者们提出了响应面分析法 (response surface methodology, RSM)^[9-10]、克里金法 (Kriging)^[11]、BP (back propagation) 神经网络^[12] 以及支持向量机 (support vector machine, SVM)^[13] 等建模方法。这些方法建立的模型虽具有较好的非线性映射能力和泛化性, 但是其在无智能算法优化的情况下, 得到的模型预测误差仍然较大。随着智能算法的不断发展和更新, 差分进化算法 (differential evolution, DE)、遗传算法 (genetic algorithm, GA)、非支配排序遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 在电机优化设计中得到了广泛应用。但是, 差分进化算法存在收敛过早的问题, 遗传算法虽然具有全局搜索的能力, 但是难确保其种群的多样性。文献[14]将电机优化常用的3种智能算法 (差分进化算法、遗传算法及 NSGA-II 算法) 进行比较后得知, NSGA-II 具有更佳的优化效果。文献[15]采用 NSGA-II 算法对开关磁阻电机进行系统级确定性优化, 实验结果表明, 该算法对其转矩脉动有良好的抑制效果。

基于以上研究成果, 为提升开关磁阻电机的系统驱动性能, 本文拟对一台六相 12/10 极的开关磁阻电

机进行系统级多目标优化。通过灵敏度分析, 将本体参数中的转子极弧系数、匝数、气隙, 以及控制参数中的开通角、关断角作为决策变量, 将效率、转矩脉动、平均转矩作为优化目标。并在 Maxwell 仿真软件中建立电机模型, 通过超拉丁方采样后进行有限元分析得到样本数据。针对 BP 神经网络预测误差较大的问题, 采用遗传算法优化 BP 神经网络的方法建立模型, 并与 NSGA-II 算法相结合进行寻优, 得到最优解。且以优化前后的仿真结果验证该方法对提升开关磁阻系统性能的有效性。

2 开关磁阻电机优化设计

2.1 电机结构和基本参数

开关磁阻电机的定子和转子上均无永磁体, 定转子均由具有高导磁率的硅钢片叠压而成, 其运行遵循磁阻最小原理, 也就是磁通总是沿磁阻最小的路径闭合, 通过磁引力拉动转子旋转。本文研究的六相 12/10 极开关磁阻电动机拓扑结构及参数示意分别如图 1 和 2 所示。从图 1 可知, 开关磁阻电机的定子和转子皆为凸极结构, 转子凸极上无绕组, 定子凸极上有集中式绕组, 且空间相对的两个绕组串联构成一相绕组, 采用极性分布为 NSNSNSNSNSNS 的绕组联结方式。开关磁阻电机的基本参数如表 1 所示。

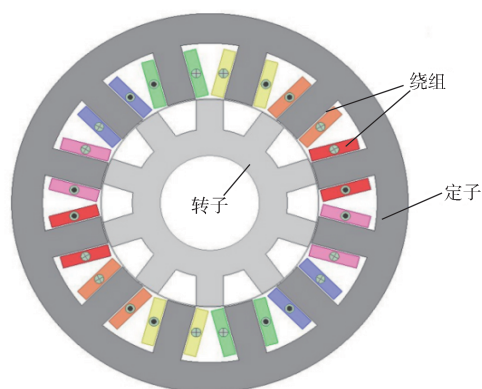


图 1 六相 12/10 极开关磁阻拓扑结构
Fig. 1 Topology of the six-phase 12/10 SRM

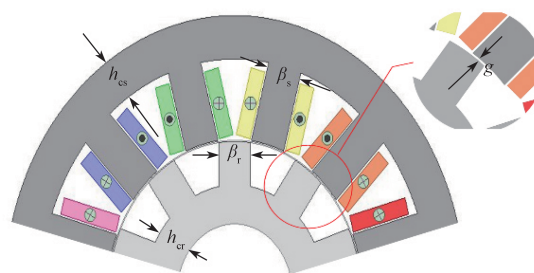


图 2 开关磁阻电机参数示意图
Fig. 2 Schematic diagram of SRM motor parameters

表 1 开关磁阻电机基本参数

Table 1 Basic parameters of SRM motors

参 数	取值	参 数	取值
定子外径 D_s/mm	87	轴向长度 L/mm	76
定子轭高 h_{cs}/mm	5	绕组匝数 N	22
定子极弧系数 α_s	0.4	轴径 D_{sh}/mm	30
定子极弧 $\beta_s/(\circ)$	13.5	气隙 g/mm	0.45
转子外径 D_r/mm	50	额定功率 P_N/W	300
转子轭高 h_{cr}/mm	4.4	额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	3 000
转子极弧系数 α_r	0.35	开通角 $\theta_{on}/(\circ)$	-3
转子极弧 $\beta_r/(\circ)$	12.6	关断角 $\theta_{off}/(\circ)$	12

2.2 多目标优化流程

开关磁阻电机系统级多目标优化设计流程如图 3 所示。其优化设计主要分为设计优化模型、有限元分析及多目标优化 3 个模块。首先，确定研究对象的优化目标、设计参数及取值范围，并对设计参数进行灵敏度分析，选取对优化目标影响较大的参数为决策变量；然后，通过超拉丁方采样法选取决策变量的样本点，通过 Maxwell 进行有限元计算，获得优化目标的响应值；最后，经 GA-BP 建立回归预测模型，并与 NSGA-II 算法结合寻优得到 pareto 解集，引入权重系数选取最优解，并进行仿真验证。

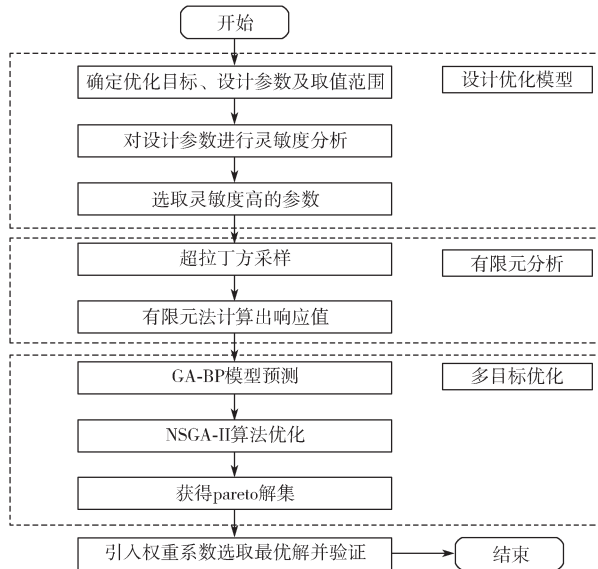


图 3 开关磁阻电机多目标优化流程图

Fig. 3 Multi-objective optimization flowchart of SRM

3 多目标优化模型

3.1 优化模型设计

开关磁阻电机的优化设计涉及多个相互关联的关键性性能指标，单一目标优化没有考虑多个性能指标之间的权衡，而多目标优化提供了一种有效的方法

来综合考虑和权衡不同性能指标之间的矛盾，因此开关磁阻电机需建立多目标优化模型，才能在设计中平衡多个关键性能指标，同时所选的决策变量必须制约每个优化目标。通常多目标优化模型包含目标函数、决策变量及变量约束条件，表达式如下：

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

式中： $f(\mathbf{X})$ 为目标函数； $g_i(\mathbf{X})$ 、 $h_j(\mathbf{X})$ 分别为不等式约束条件和等式约束条件； $\mathbf{X}$ 为决策变量，且

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T。$$

3.2 目标函数及约束条件

开关磁阻电机的转矩脉动大是其主要缺陷，国内外学者们大多将转矩脉动作为一个重要的优化目标，但在优化转矩脉动时，也不能舍弃电机的平均转矩和效率这两个重要性能指标，因此为了能获得良好的电机综合性能，本文将转矩脉动、效率及平均转矩作为开关磁阻电机的 3 个优化目标，并引入权重系数确定各目标所占比例，同时设置各优化目标的约束条件。优化旨在获得较高的平均转矩和效率的同时，转矩脉动最小。构建的多目标优化模型如下：

$$\min \begin{cases} T_{rip}, \\ -\eta, \\ -T_{avg}, \end{cases} \quad \text{s.t.} \begin{cases} g_1(\mathbf{x}) = T_{rip} - 0.25 \leq 0, \\ g_2(\mathbf{x}) = 0.81 - \eta \leq 0, \\ g_3(\mathbf{x}) = 0.9 - T_{avg} \leq 0, \\ \mathbf{x}_n \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_m \end{cases}$$

式中： T_{rip} 为系统稳定运行时的转矩脉动； η 为效率； T_{avg} 为系统稳定运行时合成的平均转矩； $\mathbf{x}$ 为设计参数矢量， $\mathbf{x}_n$ 、 $\mathbf{x}_m$ 分别为 $\mathbf{x}$ 的上下限。

转矩脉动和效率的计算式分别如下：

$$T_{rip} = (T_{max} - T_{min}) / T_{avg}, \quad \eta = P_{out} / (P_{out} + P_{loss})。$$

式中： T_{max} 、 T_{min} 分别为系统稳定运行时合成的瞬时最大转矩和最小转矩； P_{out} 为输出功率； P_{loss} 为铁损与铜损的和。

3.3 灵敏度分析

开关磁阻电机系统性能受到诸多参数的影响，其优化是包含了多个优化目标和多个参数的多维度优化问题。如果同时优化所有参数，将会出现巨大的计算量，因此多维度优化问题通常通过灵敏度分析来评估不同设计参数对电机系统优化目标的影响程度，最终选取对优化目标具有高灵敏度的参数作为决策变量。这样不仅能降低计算量、简化优化程序，同时能获得对优化目标影响较大的参数。本文选取了 6

个本体参数和 2 个控制参数为设计参数,利用超拉丁方采样选取了 80 组样本数据,根据实验设计 (design of experiment, DOE) 获得设计参数与优化目标之间的关系,即灵敏度。设计的参数和灵敏度分析结果分别如表 2 和图 4 所示。

表 2 设计参数初始值及取值范围

Table 2 Initial values and ranges of design parameters

参数名称	单位	初始值	取值范围
定子轭高 h_{cs}	mm	5	4.8~5.4
转子轭高 h_{cr}	mm	4.4	4.3~4.8
转子极弧系数 α_r	-	0.35	0.3~0.5
定子极弧系数 α_s	-	0.4	0.4~0.5
气隙 g	mm	0.45	0.25~0.6
开通角 θ_{on}	°	-3	-4~0
关断角 θ_{off}	°	12	9~15
绕组匝数 N	-	22	22~42

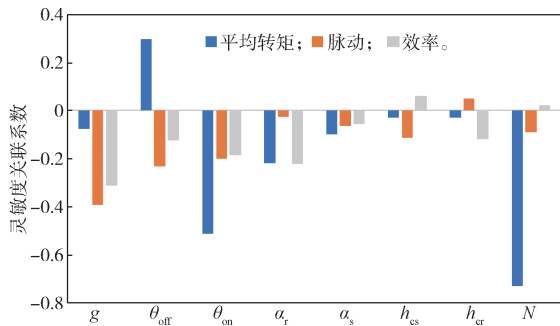
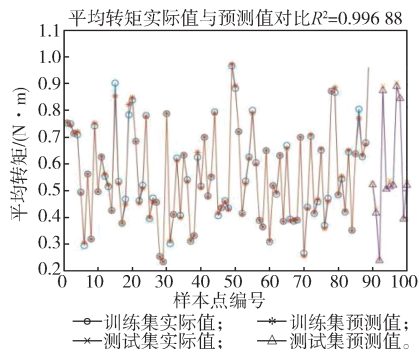


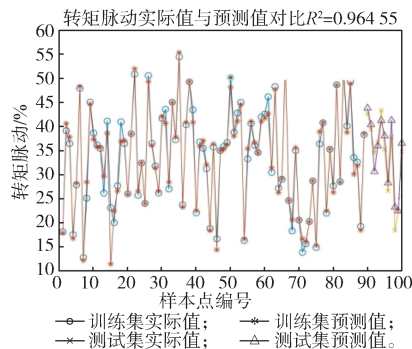
图 4 灵敏度分析结果图

Fig. 4 Sensitivity analysis result chart

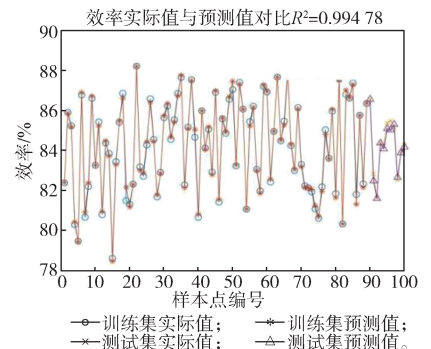
由灵敏度关联系数可知,匝数、气隙、转子极弧系数、导通角和关断角这 5 个设计参数对优化目标的影响较大,因此选取这 5 个设计参数作为决策变量,其余的参数保持初始值不变。



a) 平均转矩



b) 转矩脉动



c) 效率

图 6 GA-BP 预测效果

Fig. 6 GA-BP prediction effects

本研究通过灵敏度分析选择了 5 个决策变量,通过超拉丁方采样后进行有限元计算,得到 100 组样本数据。从样本数据中选取 90 组数据作为训练集,剩

4 基于 GA-BP 和 NSGA-II 算法相结合的多目标优化

4.1 遗传算法优化 BP 神经网络预测模型

BP 神经网络是多层前馈神经网络的一种,其有较好泛化性和非线性映射能力,在非线性系统建模中得到了广泛应用。但 BP 神经网络的初始权值和阈值是随机产生的,阈值和权值一旦选择不当会直接影响输出模型的精度。引入遗传 GA 算法是为了优化 BP 神经网络的初始权值和阈值,采用适应度函数训练个体的适应度值,通过遗传算法获得最佳的权值和阈值,使 BP 神经网络的训练速度更快,最终得到的回归预测模型精度更高。GA-BP 神经网络流程见图 5。

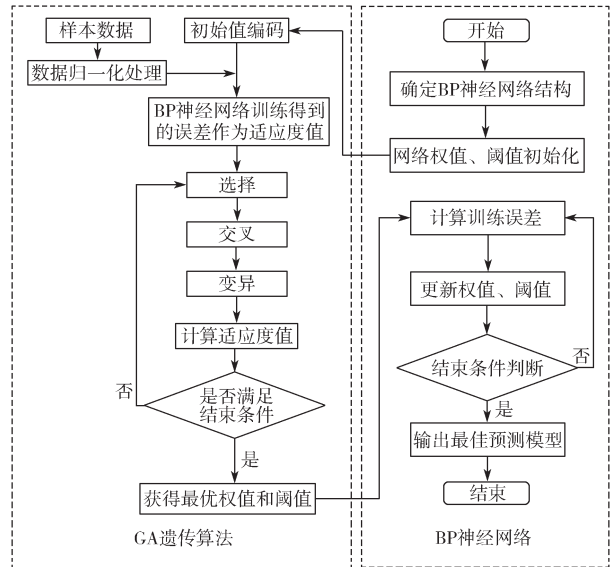


图 5 GA-BP 神经网络流程图

Fig. 5 GA-BP neural network flowchart

经 GA-BP 神经网络预测的训练集和测试集的平均转矩、转矩脉动及效率的效果图如图 6 所示。

下的 10 组数据作为测试集。设置了 5 个输入层神经元、8 个隐含层神经元和 3 个输出层神经元。采用开通角、关断角、转子极弧系数、气隙、匝数作为神经

网络的输入层神经元,以平均转矩、转矩脉动和效率作为输出层神经元。BP神经网络的决定系数 R^2 是拟合优劣的一个重要衡量指标,取值范围为0~1,数值越接近1,拟合效果越优,反之越差。图6中,平均转矩、转矩脉动和效率的决定系数 R^2 分别为0.996 88,0.964 55,0.994 78,可知该模型具较高精度。

4.2 NSGA-II 算法寻优

NSGA-II算法是在NSGA算法的基础上改进的,其采用的快速非支配排序使计算复杂度远低于NSGA算法。加入了精英保留策略和锦标赛机制的同时引进了拥挤度和拥挤度比较算子,这不仅提高了寻优的效率,还提高了优化结果的精确度。NSGA-II算法默认是寻找优化目标的最小值,因此优化目标中的平均转矩和效率需取负数后再寻优,NSGA-II算法流程见图7。将GA-BP建立的预测模型引入NSGA-II算法中进行寻优,经NSGA-II算法寻优后得到了200组pareto前沿解,pareto解集见图8。

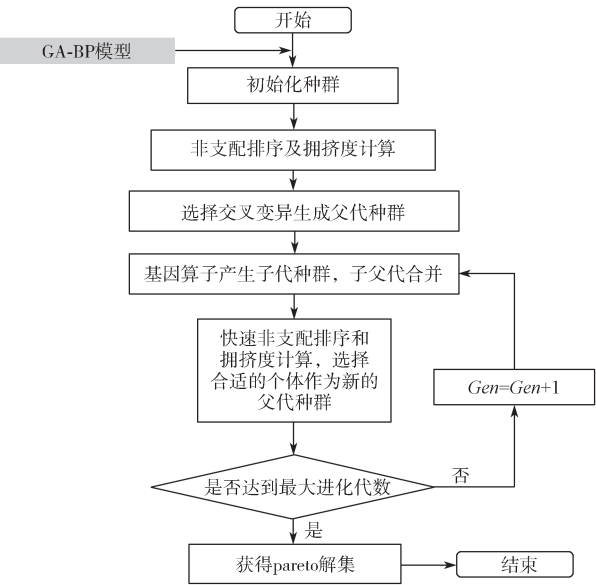


图 7 NSGA-II 算法流程图

Fig. 7 NSGA-II algorithm flowchart

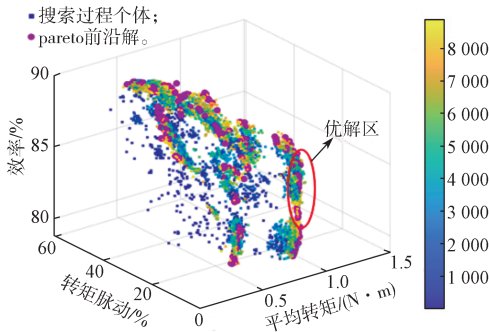


图 8 Pareto 解集

Fig. 8 Pareto solution set

通过式(3)的约束条件在优解区选择了18组数

据。将18组数据中的平均转矩、转矩脉动及效率分别设置权重系数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 ,由于开关磁阻电机的转矩脉动是影响其广泛应用的主要因素之一,为着重优化电机的转矩脉动,将权重系数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别设为3/9,4/9,2/9。pareto前沿解通过权重系数权衡后得到最优解,其决策变量(关断角、开通角、转子极弧系数、气隙、匝数)取值分别为14.6,−3.5,0.35,0.4,24,将最优解携带的决策变量信息导入有限元软件中进行仿真分析。

4.3 优化结果对比分析

在有限元软件中搭建优化前后的开关磁阻电机模型并进行有限元计算,优化前后的参数及优化目标结果对比如表3所示。由表3可知,开关磁阻电机运行稳定后,优化前的平均转矩为0.989 1 N·m,优化后的平均转矩为1.117 5 N·m,提高了12.98%;开关磁阻电机优化前的转矩脉动为0.417 6,优化后的转矩脉动为0.237 9,降低了43.03%;其优化前的效率为0.832 1,优化后的效率为0.837 8,约提高了0.69%。通过优化前后的数据对比可以看出,初始设计的转矩脉动过大,达不到设计要求,优化后的转矩脉动大幅度降低,同时效率和平均转矩也有所改善。

表 3 优化前后结果对比

Table 3 Comparison of results before and after optimization

参数名称	优化前	优化后
关断角/(°)	12	14.6
开通角/(°)	−3	−3.5
转子极弧系数	0.35	0.35
气隙/mm	0.45	0.4
匝数	22	24
平均转矩/(N·m)	0.989 1	1.117 5
转矩脉动	0.417 6	0.237 9
效率	0.832 1	0.837 8

优化前后的转矩对比曲线如图9所示。

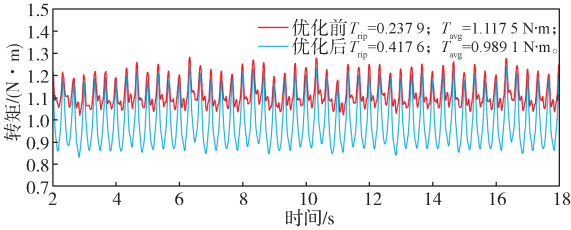


图 9 优化前后的转矩对比曲线

Fig. 9 Comparison curves of the torque before and after optimization

通过对比优化前后的转矩曲线,可以明显看出优化后的转矩脉动明显低于优化前的转矩脉动。且优化后曲线的波动较小,运行更平稳。开关磁阻电机综合性能的提高验证了该优化设计方法的有效性。

5 结语

本文研究了六相 12/10 极开关磁阻电机的优化问题,设计了一种基于 GA-BP 神经网络和 NSGA-II 相结合的电机多目标优化方法。经灵敏度分析,在电机的诸多参数中选取 2 个控制参数和 3 个本体参数为系统级优化的决策变量。通过 GA-BP 神经网络构建了决策变量与效率、平均转矩、脉动相对应的预测模型,并通过决定系数评估了模型的准确度。由 NSGA-II 算法寻找到了 3 个优化目标的 pareto 前沿解,并经权重系数权衡得到了最优解。经有限元仿真结果对比,优化后的平均转矩提高了 12.98%、转矩脉动降低了 43.03%、效率提高了 0.69%,仿真结果验证了该方法优化开关磁阻电机的系统性能有较好的应用性。

参考文献:

- [1] REDDY B P, VEMULA J R, KEERTHIPATI S. Torque Ripple Minimisation of Switched Reluctance Motor Using Sense Coils[J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(4): 614–621.
- [2] DIAO K K, SUN X D, LEI G, et al. System-Level Robust Design Optimization of a Switched Reluctance Motor Drive System Considering Multiple Driving Cycles[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 348–357.
- [3] 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.
- [4] SOVICKA P, RAFAJDUS P, VAVRUS V. Switched Reluctance Motor Drive with Low-Speed Performance Improvement[J]. Electrical Engineering, 2020, 102(1): 27–41.
- [5] 蔡辉, 王辉, 李孟秋, 等. 基于预测电流控制算法的开关磁阻电机转矩脉动抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4899–4909, 4992.
CAI Hui, WANG Hui, LI Mengqiu, et al. Predictive Current Control of Switched Reluctance Motor for Torque Ripples Minimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4899–4909, 4992.
- [6] ANVARI B, TOLIYAT H A, FAHIMI B. Simultaneous Optimization of Geometry and Firing Angles for In-Wheel Switched Reluctance Motor Drive[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 322–329.
- [7] XUE X D, CHENG K W E, NG T W, et al. Multi-Objective Optimization Design of In-Wheel Switched Reluctance Motors in Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(9): 2980–2987.
- [8] LEI G, WANG T S, GUO Y G, et al. System-Level Design Optimization Methods for Electrical Drive Systems: Deterministic Approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6591–6602.
- [9] MA C, QU L Y. Multiobjective Optimization of Switched Reluctance Motors Based on Design of Experiments and Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 1144–1153.
- [10] 刘勇智, 鄢成龙, 林博闻. 混合励磁开关磁阻电机转矩特性多目标优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(5): 9–16.
LIU Yongzhi, SHAN Chenglong, LIN Bowen. Multi-Objective Optimization for Torque Characteristics of Hybrid Excitation Switched Reluctance Motor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(5): 9–16.
- [11] DIAO K K, SUN X D, LEI G, et al. Multimode Optimization of Switched Reluctance Machines in Hybrid Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2217–2226.
- [12] ZHANG Z, RAO S H, ZHANG X P. Performance Prediction of Switched Reluctance Motor Using Improved Generalized Regression Neural Networks for Design Optimization[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2018, 2(4): 371–376.
- [13] 饶盛华, 张小平, 张铸, 等. 基于果蝇算法的开关磁阻电机多目标优化研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1152–1158.
RAO Shenghua, ZHANG Xiaoping, ZHANG Zhu, et al. Study on Multi-Objective Optimization of SRM Based on FOA[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7): 1152–1158.
- [14] MOHAMMED M S, VURAL R A. NSGA-II+FEM Based Loss Optimization of Three-Phase Transformer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9): 7417–7425.
- [15] 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.

(责任编辑: 廖友媛)