

# 基于改进的樽海鞘群算法的永磁同步电机 多目标优化设计

张宏<sup>1</sup>, 周大伟<sup>1\*</sup>, 陆丽<sup>2</sup>, 康小东<sup>2</sup>

[1. 上海电机学院附属科技学校(上海市临港科技学校), 上海 201306;

2. 上海电机学院 电气学院, 上海 201306]

## Multi-Objective Optimization Design of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Improved Salp Swarm Algorithm

ZHANG Hong<sup>1</sup>, ZHOU Dawei<sup>1\*</sup>, LU Li<sup>2</sup>, KANG Xiaodong<sup>2</sup>

(1. ShangHai LinGang Science and Technology School, Shanghai 201306, China;

2. School of Electrical Engineering, Shanghai DianJi University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** [Objective] To further improve the performance of automotive permanent magnet synchronous motors (PMSM) and address the inefficiency of traditional optimization methods for motors, a multi-objective optimization design method for automotive permanent magnet synchronous motors is proposed based on improved generalized regression neural network (GRNN) and improved salp swarm optimization algorithm. [Methods] Firstly, a parameterized motor model was constructed, and the motor was scanned through the finite element model to obtain sample data of the motor's structural parameters and corresponding performance. Then the model was built using GRNN. With the objectives of minimizing the peak-to-peak value of cogging torque, maximizing the rated average torque, and minimizing torque ripple, the structural parameters of the motor were optimized using the salp swarm algorithm. [Results] The optimized motor's average torque increased by 2%, the torque ripple decreased by 16%, and the cogging torque decreased by 60.58%. This demonstrates the efficiency and accuracy of the method. [Conclusion] The proposed method can fully utilize computing power resources for parallel computing. Compared to traditional optimization methods, it can achieve multi-objective optimization design of motors more quickly and effectively.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor; multi-objective optimization; generalized regression neural network; salp swarm algorithm

**摘要:** [目的] 为进一步提高车用永磁同步电机(PMSM)的性能,针对电机传统优化方法的低效率,提出一种基于改进广义回归神经网络(GRNN)和改进樽海鞘群优化算法的车用PMSM的多目标优化设计方法。【方法】首先搭建参数化电机模型,通过有限元模型对电机进行参数化扫描,从而获取电机结构参数和对应性能的样本数据,并通过GRNN进行模型搭建;其次以齿槽转矩峰值最小、额定平均转矩最大和转矩脉动最小为优化目标,采用樽海鞘群算法对电机的结构参数进行优化。【结果】优化后的电机平均转矩提高了2%,转矩脉动降低了16%,齿槽转矩降低了60.58%。【结论】本文所提出的方法能够充分利用算力资源进行并行计算,相比传统的优化方法,更快速有效地实现电机的多目标优化设计。

**关键词:** 永磁同步电机; 多目标优化; 广义回归神经网络; 樽海鞘群算法

## 0 引言

电机是工业设备中的驱动核心,在工业发展过程中受到了广泛关注<sup>[1-3]</sup>。和传统的电励磁电机和感应电机等相比,内置式永磁同步电机(Interior Permanent Magnet Synchronous Motors, IPMSM)具有结构简单、运行可靠、体积小、重量轻和效率高的优点,在航天航空和新能源汽车等领域中受到了广泛应用<sup>[4-5]</sup>。通过对电机结构参数进行多目标优化分析是提升电机性能的主要思路之一<sup>[6-13]</sup>。电机的结构参数众多,且与电机性能之间的关系错综复杂,无法简单的进行规律推

基金项目: 国家自然科学基金(42176194)

National Natural Science Foundation of China (42176194)

导。而为了使得电机的各项性能达到最优,单一目标的优化方法显然力不从心。需要引入多目标优化算法进行整体优化,从而更快速有效的完成电机的结构优化设计。目前电机优化设计大多利用优化算法与有限元软件交互计算,从而进行优化设计<sup>[14-18]</sup>。该方法在进行多目标优化过程中,需要不断地调用有限元仿真软件进行结果计算,且无法充分利用计算机算力进行并行计算,从而导致优化过程的时间过于漫长。在多目标的数量增多时,其效果更一般。为了解决此类方法的不足,基于非线性建模的多目标优化方法相继出现。

文献[19]在对电机参数进行分层灵敏度分析后,确定分层优化的参数,利用响应面建模方法构建了代理模型,并基于此模型以提升电机转矩密度、降低齿槽转矩和转矩脉动为目标,采用多目标遗传算法进行优化,通过有限元校核验证了所提出方法的有效性。文献[20]提出一种聚磁式永磁轮毂电机拓扑结构,分析转子关键参数对转矩密度、弱磁能力和转子强度的影响规律,确定电机初始优化目标;利用有限元及响应面法构建输出转矩、特征电流及转子应力的代理优化模型,并利用改进布谷鸟算法进行多目标优化设计;最后通过样机试验结果验证所提方法的有效性。文献[21]在参数敏感度分析的基础上,提出一种改进迭代田口法的多目标优化设计方法。以800 W双余度永磁同步电机为例,利用有限元仿真和样机试验测试,对比分析了优化前后的效率、转矩等关键性能参数,验证了所提优化方法的有效性。文献[22]在尺寸优化范围内均匀抽样训练样本,利用有限元计算对应方案的性能输出。基于反向传播神经网络建立电机设计代理模型,采用非支配排序遗传算法II进行全局优化,得到鲁棒优化方案,并验证了该方法的有效性。文献[23]提出一种基于响应面法和粒子群优化算法的内置式无轴承永磁同步电机多目标优化设计方法。按照灵敏度分析、响应面法建模和多目标粒子群优化的步骤对内置式无轴承永磁同步电机进行优化设计,并对优化后电机和初始电机的转矩和悬浮性能进行对比分析。最后,通过试验验证了所提方法的有效性。文献[24]通过从V型内嵌式永磁同步电机的内部磁密分布、气隙磁

密分布、反电动势、齿槽转矩及额定工况负载下的输出转矩、转矩脉动和电机损耗着手,利用拉丁超立方算法对电机进行多目标优化,通过仿真试验验证了所提方法的可行性。文献[25]提出基于响应面法和改进多目标粒子群优化算法的优化设计方法,通过参数灵敏度分析,将永磁体尺寸、气隙长度和槽口宽度等作为电机的优化参数,将永磁体成本、输出转矩和转矩脉动等作为优化目标,拟合出优化目标和参数之间的非线性关系,通过对比优化前后的方案结果,验证了所提方法的有效性。

基于以上研究,本文在此提出一种基于改进广义回归神经网络(Generalized Regression Neural Network, GRNN)的建模方法和一种基于改进樽海鞘群算法(Salp Swarm Algorithm, SSA)的多目标优化方法。GRNN<sup>[26]</sup>是一种径向基神经网络,具有很强的非线性映射能力和学习速度,在样本数据较少的情况下,输出数据也能收敛于最优回归面,同时还具备极高的容错性和稳定性,非常适合用于非线性建模。在确定了电机优化变量和优化目标的基础上,通过改进的GRNN建立电机优化变量和优化目标之间的映射关系。利用改进的樽海鞘算法根据设定的目标函数和约束条件进行多目标寻优计算,旨在获得电机最佳性能下的结构参数。

## 1 车用永磁同步电机

本文以一台新能源汽车用V型磁钢IPMSM为研究对象,其主要结构如图1所示、主要参数如表1所示。

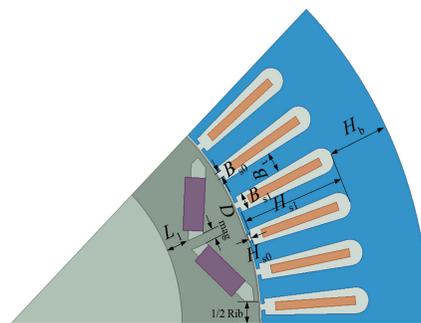


图1 电机基本结构

Fig. 1 Basic structure of motor

本文选取定子轭厚  $H_b$ 、定子齿宽  $B_1$ 、转子磁极间距  $R_b$ 、磁钢底部到转子内径距离  $L_1$  以及 V 型磁钢中间距  $D_{mag}$  作为该电机的优化变量参数。

以电机的平均转矩  $T_{avg}$ 、转矩脉动  $T_{pkavg}$ 、齿槽转矩峰峰值  $Coggt_{pk2pk}$  作为优化目标。其中, 定义转矩脉动和齿槽转矩峰峰值为

$$\begin{cases} T_{pkavg} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \\ Coggt_{pk2pk} = Coggt_{max} - Coggt_{min} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T_{max}$  为转矩最大值;  $T_{min}$  为转矩最小值;  $Coggt_{max}$  为齿槽转矩最大值;  $Coggt_{min}$  为齿槽转矩最小值。

表 1 电机基本参数

Tab. 1 Basic parameters of motor

参数名称	参数值
额定转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	3 000
定子槽数	48
转子极数	8
定子外径/mm	135
定子内径/mm	80.75
转子外径/mm	80
转子内径/mm	55
铁心材料	35JN300
永磁体材料	N38UH

考虑到样本取值的范围, 给出设计变量的优化范围, 如表 2 所示。

表 2 设计变量的优化范围

Tab. 2 Optimization range of design variables

参数名称	最小值	最大值
$H_b$ /mm	18	20
$B_l$ /mm	1.1	1.7
$R_{ib}$ /mm	11	17
$L_1$ /mm	6	9
$D_{mag}$ /mm	3.5	6.5

## 2 样本库建立

### 2.1 IPMSM 有限元模型

相比公式解析法建立的电机模型, 有限元计算的模型精度和泛用性均更高。本文利用有限元软件建立电机 2D 基础模型, 其中针对齿槽转矩的仿真计算, 特别地将气隙进行多层剖分、对齿部进行剖分加密, 如图 2 所示, 期望获得更加准确的齿槽转矩峰峰值。针对电机的 5 个优化参数和 3 个优化目标建立参数化扫描模型, 分析计算不同结构参数下的电机性能参数。因此得到电机结构参数与性能之间的映射关系, 为后续采用改进 GRNN 建模提供原始样本数据。

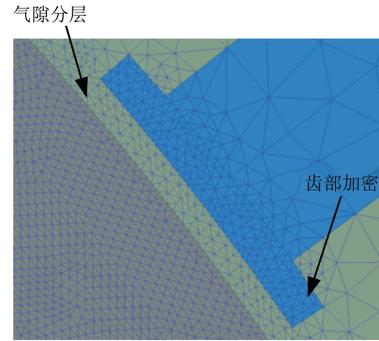


图 2 剖分设置

Fig. 2 Meshing setup

### 2.2 样本数据采集

根据表 2 给出的设计变量的优化范围, 得到水平变量表, 如表 3 所示。通过参数化扫描工具计算不同结构参数组合下的目标输出性能, 从而作为 GRNN 的输入和输出, 以此训练出不同性能的神经网络模型。

表 3 设计变量的取样区间

Tab. 3 Sampling interval for design variables

参数名称	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
$H_b$ /mm	18.5	19	19.5	20
$B_l$ /mm	1.1	1.3	1.5	1.7
$R_{ib}$ /mm	11	13	15	17
$L_1$ /mm	6	7	8	9
$D_{mag}$ /mm	3.5	4.5	5.5	6.5

## 3 改进 GRNN

### 3.1 GRNN

GRNN 是一种使用径向基函数作为激活函数的人工神经网络, 输入集在输入网络后通过输入层、模式层、求和层以及输出层后得到输出结果, 基础网络结构如图 3 所示。

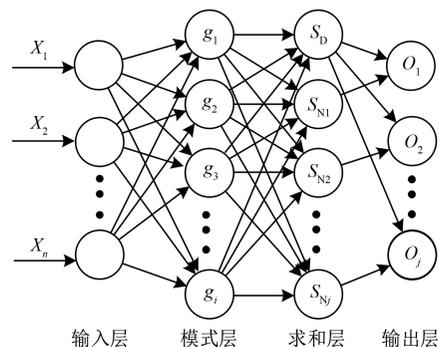


图 3 GRNN 的网络拓扑结构

Fig. 3 Network topology of GRNN

### 3.2 人工蜂群算法

GRNN 神经网络不需要进行网络训练,主要通过模型层的平滑因子进行优化以获得良好的输出结果。平滑因子过大或过小会导致网络出现欠拟合或过拟合的现象,故在此通过引入人工蜂群<sup>[27]</sup>(Artificial Bee Colony, ABC)算法对其平滑因子进行寻优,从而获得较好的网络拟合能力。

ABC 算法的原理机制源自于自然界的蜜蜂采蜜行为,主要应用于数值优化问题,分为蜂群初始化阶段、雇佣蜂阶段、跟随蜂阶段和探索蜂阶段。其主要优化流程如图 4 所示。

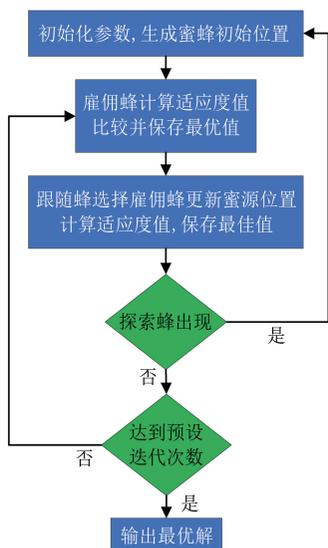


图 4 GRNN 的优化流程

Fig. 4 Optimization process of GRNN

本文中优化参数为 GRNN 的平滑因子,在此设计其适应度函数:

$$f = MSE[\text{predict}(\text{train})] + MSE[\text{predict}(\text{test})]$$

(2)

式中:  $MSE[\text{predict}(\text{train})]$  为预测训练集的误差值;  $MSE[\text{predict}(\text{test})]$  为预测测试集的误差值。

通过将预测训练集和预测测试集的误差值作为适应度值,从而使得最终优化输出为最佳的光滑因子,使得模型拟合程度更高。

### 3.3 ABC-GRNN 模型搭建

根据表 3 给出的共计 1 024 个组合数据,以电机的  $H_b$ 、 $B_t$ 、 $R_{ib}$ 、 $L_1$  以及  $D_{mag}$  作为 ABC-GRNN 的输入,以电机的  $T_{avg}$ 、 $T_{pkavg}$  和  $CoggT_{pk2pk}$  值作为输出目标,进行模型训练。训练主要流程如图 5 所示。

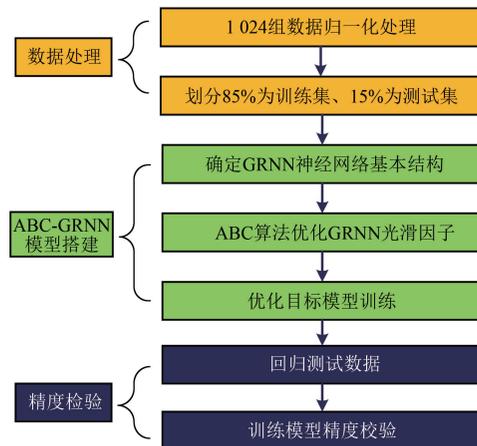


图 5 模型训练流程

Fig. 5 Training process of the model

(1) 将 1 024 组数据进行随机划分,85% 为训练集样本,15% 为测试集样本,并对样本数据进行归一化处理。

(2) 针对三个输出目标分别搭建 ABC-GRNN 模型,确定基本拓扑结构,利用 ABC 算法对 GRNN 的光滑因子进行优化。

(3) 对测试集样本进行回归测试,以决定系数  $R^2$  对训练模型的精度进行判断。 $R^2$  的值介于 0 到 1 之间,其越趋向于 1 代表模型精度越高,主要计算式为

$$\begin{cases} R^2 = 1 - \frac{E_{sse}}{E_{sst}} \\ E_{sse} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \\ E_{sst} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $E_{sse}$  为剩余平方和,是实际值与估计值之差的平方的总和;  $E_{sst}$  为离差平方和,是各项与平均项之差的平方的总和;  $n$  为测试样本个数;  $\hat{y}_i$  为预测值;  $\bar{y}_i$  为真实平均值;  $y_i$  为真实值。

### 3.4 模型精度检验

为了保证多目标优化结果的有效性,关键在于保证模型的精度。通过图 5 所示方法进行建模后,得到 3 个模型的决定系数如图 6 所示,数值均接近于 1。可见三个优化目标模型的预测误差均较低,模型精度较高,因此可以为后续的多目标优化计算提供良好的基础。

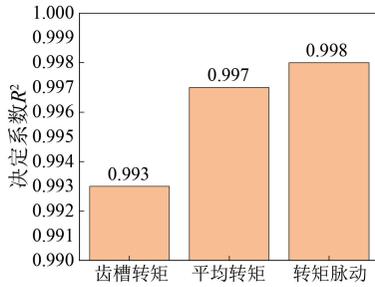


图 6 决定系数

Fig. 6 Coefficient of determination

## 4 基于改进 SSA 的电机性能多目标优化

### 4.1 多目标优化函数

表 2 已经给出设计变量及其限制条件, 为使电机各输出性能尽可能达到全局最优, 构建多目标优化函数:

$$f(x) = \left[ \frac{T_{\text{avg}0}}{T_{\text{avg}}(x_i)}, \frac{T_{\text{pkavg}}(x_i)}{T_{\text{pkavg}0}}, \frac{\text{Cogg}T_{\text{pk}2\text{pk}}(x_i)}{\text{Cogg}T_{\text{pk}2\text{pk}0}} \right] \quad (4)$$

式中:  $T_{\text{avg}0}$ 、 $T_{\text{pkavg}0}$ 、 $\text{Cogg}T_{\text{pk}2\text{pk}0}$  分别为电机设计对应性能的初始值。

由于平均转矩需要求解的是最大值, 而算法求解的是最小值, 故在此设计为求解平均转矩数值的最大值, 即对应平均转矩的最大值。

### 4.2 SSA

SSA 是由 MIRJALILI S 等<sup>[28]</sup>提出的一种新型仿生智能群算法。受到樽海鞘链式群聚觅食行为的启发, 将其类比为对目标函数的寻优过程。近年来被广泛应用于解决优化问题和预测问题<sup>[29-33]</sup>。

设定 SSA 的搜索空间为  $\mathbf{X}$ ,  $N \times d$  为樽海鞘数量,  $d$  为求解问题的决策变量数, 该搜索空间表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_d^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_d^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_1^N & x_2^N & \cdots & x_d^N \end{bmatrix} \quad (5)$$

樽海鞘群初始种群位置的生成式为

$$X^i = lb + (ub - lb)r \quad (6)$$

式中:  $r$  为搜索空间中的随机数;  $ub$ 、 $lb$  分别为搜索空间的上、下约束范围。

樽海鞘在觅食过程中多以链式群出现, 链群前端称为领导者, 在寻优过程中进行全局最优解的探索, 追随者进行渐进的运动, 从而避免陷入局部最优。算法采用链状群体模型, 其链头领导者的樽海鞘位置更新式为

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1[(ub_j - lb_j)c_2 + lb_j], & c_3 \geq 0 \\ [2ex]F_j - c_1[(ub_j - lb_j)c_2 + lb_j], & c_3 < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $x_j^1$  为樽海鞘群领导者的位置维度分量;  $F$  为当前最优解的位置向量;  $ub_j$ 、 $lb_j$  分别为搜索空间在  $j$  维度下的上、下约束范围;  $c_2$ 、 $c_3$  为 0 到 1 之间的随机变量;  $c_1$  为一个平衡算法全局寻优能力和局部寻优能力的参数, 定义为

$$c_1 = 2e^{-\left(\frac{4t}{L}\right)^2} \quad (8)$$

式中:  $t$  为当前迭代次数;  $L$  为最大迭代次数。

通过牛顿运动定律更新追随者的位置:

$$x_j^i = \frac{1}{2}a\Delta t^2 + v_0\Delta t \quad (9)$$

式中:  $x_j^i$  为第  $i$  个追随者在第  $j$  维度的位置。

### 4.3 Tent 混沌映射

由于改进算法初始种群的生成位置采用随机选择的方式, 故容易导致位置分布不均, 且对于整个求解空间覆盖不全, 对算法的寻优能力产生不利影响。在此引入一种 Tent 混沌映射, 使得初始种群的位置在整个求解空间中分布更均匀, 增强种群的多样性, 从而提高算法的寻优能力, 计算式为

$$x_{n+1} = f(x_n) = \begin{cases} x_n/\alpha, & x_n \in [0, \alpha) \\ (1 - x_n)/(1 - \alpha), & x_n \in [\alpha, 1] \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\alpha$  为 0 到 1 之间的随机数。

### 4.4 非支配排序

由于传统的 SSA 为单目标优化算法, 在多目标优化问题的处理上需要进一步改进。在此加入非支配排序, 使得算法更好地应用于多目标优化问题的求解中。非支配排序算法基于混合比较运算的二进制淘汰, 从而对种群进行排序挑选。根据个体之间的支配、非支配关系进行排序。假设种群中的某一个体  $X_i$  目标函数值至少有一个优于另一个个体  $X_j$ , 其余均不劣于该个体, 则称个体  $X_i$  支配个体  $X_j$ 。具体流程如图 7 所示。



图7 非支配排序流程

Fig. 7 Non-dominated sorting process

#### 4.5 改进的多目标 SSA

结合 Tent 混沌映射和非支配排序算法对传统 SSA 进行改进, 流程如图 8 所示。

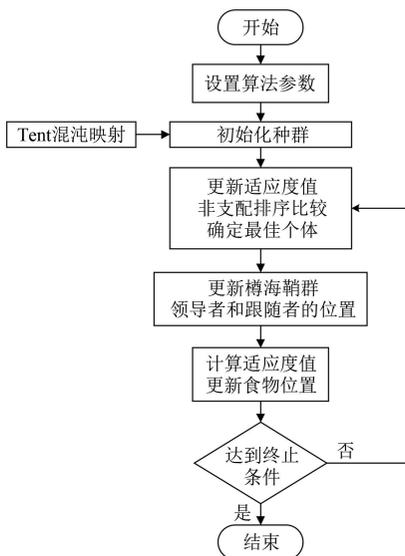


图8 改进的多目标 SSA 流程

Fig. 8 Process of improved multi-objective SSA

#### 4.6 多目标优化结果

利用改进后的多目标 SSA 结合所提出的多目标优化函数对电机进行优化设计, 结果如图 9 所示。

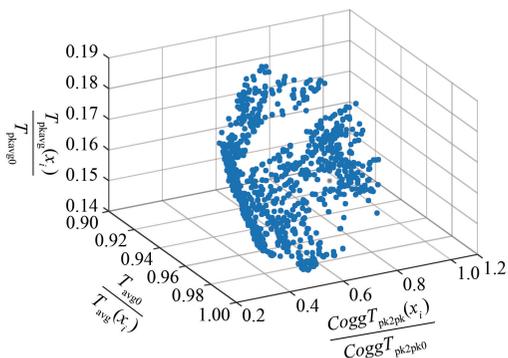


图9 优化方案解集

Fig. 9 Solution set of optimization plan

结合最优解集综合考虑电机的转矩脉动、总损耗等其他性能指标以及制造公差等因素, 选出

最优解。最优解的电机结构参数如表 4 所示, 优化前后的电机性能如表 5 所示。

表4 参数优化结果

Tab. 4 Result of parameter optimization

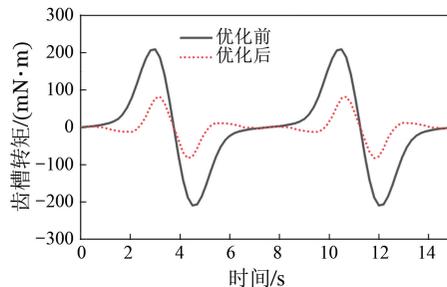
参数名称	优化前	优化后
$H_b/\text{mm}$	19	18.04
$B_1/\text{mm}$	1.5	1.39
$R_{ib}/\text{mm}$	14	11.934
$L_1/\text{mm}$	7.28	8.67
$D_{\text{mag}}/\text{mm}$	4.5	4.71

表5 性能优化结果

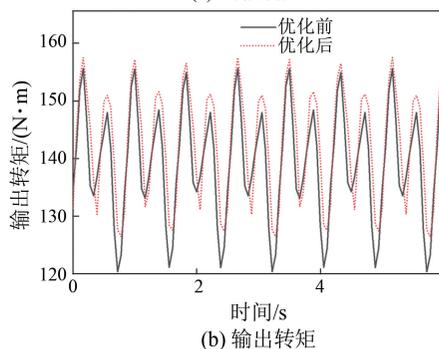
Tab. 5 The result of performance optimization

性能参数	初始值	GRNN	FEA-2D
齿槽转矩/(mN·m)	418.53	165.79	164.99
平均转矩/(N·m)	138.97	141.17	142.44
转矩脉动/%	0.25	0.213	0.21

由表 5 可知, 优化后的电机平均转矩提高了 2%, 转矩脉动降低了 16%, 齿槽转矩降低了 60.58%。且 GRNN 拟合数值与实际 FEA-2D 数值接近, 误差较小。优化前后齿槽转矩和输出转矩的对比如图 10 所示, 验证了所提优化方法的高效性和准确性。



(a) 齿槽转矩



(b) 输出转矩

图10 优化前后对比

Fig. 10 Comparison before and after optimization

优化前后的电机机械特性和效率 Map 图如图 11 所示。优化后的电机最大转矩提升了约 1%, 且在转速 3 000 rpm ~ 6 000 rpm 区间的转矩

输出得到了提升,效率在 93%~95% 之间。而在低速大转矩区间以及高速低转矩区间的效率相对较低,约在 67%~85% 之间。

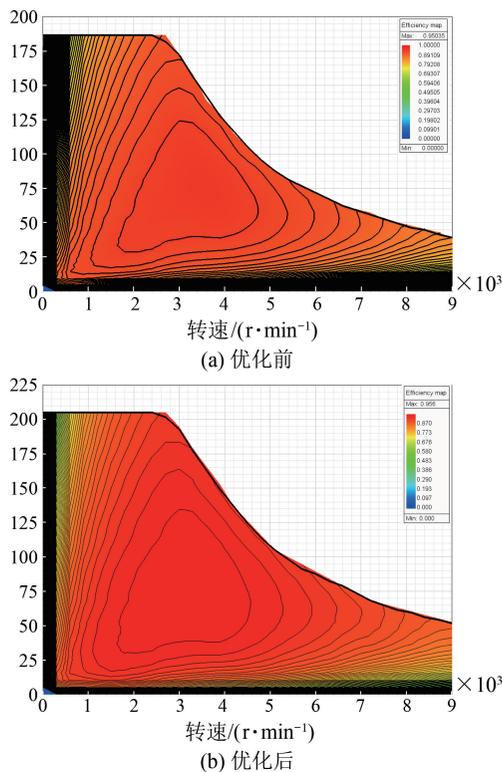


图 11 电机优化前后的效率 Map 图

Fig. 11 Efficiency Map chart before and after motor optimization

## 5 结语

本文研究了一种基于 ABC-GRNN 的永磁同步伺服电机模型建立的方法,在此基础上应用改进 SSA 对电机性能进行多目标优化,从而获得电机最优性能下对应的电机结构参数,实现电机的最佳性能。通过有限元仿真验证了所提优化方法的高效性和准确性。本文主要研究内容和结论如下。

(1) 研究了一种基于 ABC-GRNN 的电机模型建立方法,用于构建电机结构参数与电机性能之间的非线性映射关系,并验证了模型的准确性。相对常规优化过程中的漫长计算,极大地提高了效率。

(2) 在电机模型建立的基础上,引入改进的多目标 SSA 算法结合目标函数进行多目标问题求解,旨在获取最优性能下的电机结构参数组合。

(3) 齿槽转矩峰值减少了 60.58%,平均转矩提升了 2%,转矩脉动减少了 16%。在 3 000 rpm~6 000 rpm 转速区间的转矩输出得到了提升,且效率高达 93%~95%,验证了所提方法的高效性和准确性。

## 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

张宏进行了方案设计、内容总结和论文撰写,周大伟进行了试验研究,陆丽、康小东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 summary and paper writing were carried out by Zhang Hong. The experiment was conducted by Zhou Dawei. The manuscript was revised by Lu Li, Kang Xiaodong. All authors have read the final version of paper and consented for submission.

## 参考文献

- [1] 甘醇, 曲荣海, 石昊晨, 等. 宽调速永磁同步电机全域高效运行控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2496-2512.
  - [2] 王宇, 张成糕, 郝雯娟. 永磁电机及其驱动系统容错技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 351-372.
  - [3] 董剑宁, 黄允凯, 金龙, 等. 高速永磁电机设计与分析技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4640-4653.
- GAN C, QU R H, SHI H C, et al. Review of high-efficiency control strategy for permanent magnet synchronous motors under wide speed range [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2496-2512.
- WANG Y, ZHANG C G, HAO W J. Overview of fault-tolerant technologies of permanent magnet brushless machine and its control system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 351-372.
- DONG J N, HUANG Y K, JIN L, et al. Review on high speed permanent magnet machines including

- design and analysis technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4640-4653.
- [ 4 ] 王凯, 孙海阳, 张露锋, 等. 永磁同步电机转子磁极优化技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7304-7317.  
WANG K, SUN H Y, ZHANG L F, et al. An overview of rotor pole optimization techniques for permanent magnet synchronous machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7304-7317.
- [ 5 ] 陈少先, 丁树业, 申淑锋, 等. 船舶用表贴式永磁同步电机的电磁振动分析与抑制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1275-1286+1298.  
CHEN S X, DING S Y, SHEN S F, et al. Analysis and suppression of electromagnetic vibration of surface mounted permanent magnet synchronous motor for ships [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1275-1286+1298.
- [ 6 ] 马伟明, 王东, 程思为, 等. 高性能电机系统的共性基础科学问题与技术发展前沿[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2025-2035.  
MA W M, WANG D, CHENG S W, et al. Common basic scientific problems and development of leading-edge technology of high performance motor system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2025-2035.
- [ 7 ] 张国强, 杜锦华. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 1-13.  
ZHANG G Q, DU J H. Review of position sensorless control technology for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 1-13.
- [ 8 ] 戴睿, 张岳, 王惠军, 等. 基于多物理场近似模型的高速永磁电机多目标优化设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5414-5423.  
DAI R, ZHANG Y, WANG H J, et al. Multi-objective optimization design of high-speed permanent magnet machine based on multi-physics approximate model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5414-5423.
- [ 9 ] 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 X L, LI J Y, YANG G Y, et al. Analysis of multi-objective optimization analysis of electric-excitation double-stator field-modulated machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 972-982.
- [ 10 ] 赵玫, 于帅, 邹海林, 等. 聚磁式横向磁通永磁直线电机的多目标优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3730-3740.  
ZHAO M, YU S, ZOU H L, et al. Multi-objective optimization of transverse flux permanent magnet linear machine with the concentrated flux mover [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3730-3740.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 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(增刊 2): 385-393.  
LIU G H, WANG Y Y, CHEN Q. Multi-objective optimization of an asymmetric V-shaped interior permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 385-393.
- [ 13 ] 徐磊, 朱孝勇, 张超, 等. 磁极径向组合轴向磁场永磁电机转矩品质分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 1971-1983.  
XU L, ZHU X Y, ZHANG C, et al. Torque quality analysis and optimization design of axial field machine with radial combined permanent magnet poles [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 1971-1983.
- [ 14 ] 庞亮, 张闻东, 胡豁达, 等. 基于粒子群优化算法的 TMPS-HESM 联合仿真设计方法[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(1): 62-70.  
PANG L, ZHANG W D, HU H D, et al. TMPS-HESM co-simulation design method based on particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(1): 62-70.
- [ 15 ] 周大伟, 陆丽, 杨长青, 等. 基于遗传算法的高速永磁电机联合仿真优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023, (11): 69-73.  
ZHOU D W, LU L, YANG C Q, et al. Co-simulation

- optimization of high speed permanent magnet synchronous motor based on genetic algorithm and TOPSIS method [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2023, (11): 69-73.
- [16] 周云红, 胡洋, 蒋嘉豪, 等. 新型开关磁阻电机优化设计[J]. *微电机*, 2021, 54(12): 43-50+76.  
ZHOU Y H, HU P, JIANG J H, et al. Optimization design of new switched reluctance motor [J]. *Micromotors*, 2021, 54(12): 43-50+76.
- [17] 胡明珠, 刘怀举, 张秀华, 等. 空间机械臂关节双电机-行星齿轮传动系统的多目标优化[J]. *宇航学报*, 2024, 45(12): 2009-2023.  
HU M Z, LIU H J, ZHANG X H, et al. Multi-objective optimization of dual motor planetary gear transmission system for space manipulator joint [J]. *Journal of Astronautics*, 2024, 45(12): 2009-2023.
- [18] 白学森. 电动汽车驱动用分数槽永磁同步电机电磁噪声优化[J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(6): 60-65.  
BAI X S. Electromagnetic noise optimization of fractional-slot permanent magnet synchronous motor for electric vehicle [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(6): 60-65.
- [19] 刘洋, 宋宝, 周向东, 等. 辐条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 Y, SONG B, ZHOU X D, et al. Analysis and multi-objective optimization of spoke type vernier permanent-magnet machine [J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(9): 1-9.
- [20] 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.
- [21] 张玉峰, 高文韬, 史乔宁, 等. 基于改进迭代田口法的双余度永磁同步电机优化设计[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(10): 2637-2647+2685.  
ZHANG Y F, GAO W T, SHI Q N, 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+2685.
- [22] 龚夕霞, 李焱鑫, 卢琴芬. 模块化永磁直线同步电机考虑制造公差的推力鲁棒性优化[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(2): 465-474+513.  
GONG X X, LI Y X, LU Q F. Thrust robustness optimization of modular permanent magnet linear synchronous motor accounting for manufacture tolerance [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(2): 465-474+513.
- [23] 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.
- [24] 丁锦, 姜文刚. 基于拉丁超立方算法的永磁同步电机设计优化[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(8): 66-72.  
DING J, JIANG W G. Design optimization of permanent magnet synchronous motor based on Latin hypercube algorithm [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(8): 66-72.
- [25] 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 Applications*, 2023, 50(3): 81-87+94.
- [26] SPECHT D F. A general regression neural network [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1991, 2(6): 568-576.
- [27] WANG H, XIAO D, RAHNAMAYAN S, et al. Artificial bee colony algorithm based on multiple indicators for many-objective optimization with irregular Pareto fronts [J]. *Expert Systems With Applications*, 2025, 262, 125613.
- [28] MIRJALILI S, GANDOMI A H, MIRJALILI S Z, et al. Salp swarm algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems [J]. *Advances in Engineering Software*, 2017, 114: 163-191.
- [29] 张达敏, 陈忠云, 辛梓芸, 等. 基于疯狂自适应的

- 樽海鞘群算法[J]. 控制与决策, 2020, 35(9): 2112-2120.
- ZHANG D M, CHEN Z Y, XIN Z Y, et al. Salp swarm algorithm based on craziness and adaptive [J]. Control and Decision, 2020, 35(9): 2112-2120.
- [30] 陈涛,王梦馨,黄湘松. 基于樽海鞘群算法的无源时差定位[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(7): 1591-1597.
- CHEN T, WANG M X, HUANG X S. Time difference of arrival passive location based on salp swarm algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(7): 1591-1597.
- [31] 邢致恺,贾鹤鸣,宋文龙. 基于莱维飞行樽海鞘群优化算法的多阈值图像分割[J]. 自动化学报, 2021, 47(2): 363-377.
- XING Z K, JIA H M, SONG W L. Levy flight trajectory-based salp swarm algorithm for multilevel thresholding image segmentation [J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(2): 363-377.
- [32] 张严,秦亮曦. 基于 Levy 飞行策略的改进樽海鞘群算法[J]. 计算机科学, 2020, 47(7): 154-160.
- ZHANG Y, QIN L X. Improved salp swarm algorithm based on levy flight strategy [J]. Computer Science, 2020, 47(7): 154-160.
- [33] 刘景森,袁蒙蒙,左方. 面向全局搜索的自适应领导者樽海鞘群算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2152-2160.
- LIU J S, YUAN M M, ZUO F. Global search-oriented adaptive leader salp swarm algorithm [J]. Control and Decision, 2021, 36(9): 2152-2160.

收稿日期:2024-09-18

收到修改稿日期:2024-12-05

作者简介:

张宏(1978-),男,学士,讲师,研究方向为机械制造设计,zhanghnh@126.com;

\*通信作者:周大伟(1999-),男,硕士,助理讲师,研究方向为永磁同步电机优化设计,872512605@qq.com。