

基于改进蜘蛛猴算法的永磁同步电机参数辨识

郭成龙¹, 张可畏^{1*}, 韩旭¹, 丁庚鑫²
(1. 大连交通大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116028;
2. 大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116028)

Parameter Identification of PMSM Based on Improved Spider Monkey Optimization Algorithm

GUO Chenglong¹, ZHANG Kewei^{1*}, HAN Xu¹, DING Gengxin²

(1. College of Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;
2. College of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: [Objective] To address the issue of metaheuristic algorithms being prone to falling into local optima during the parameter identification process of permanent magnet synchronous motor (PMSM), an improved Spider Monkey optimization (SMO) algorithm based on Tent chaotic mapping and nonlinear dynamic adaptive weights is proposed. This algorithm aims to achieve accurate identification of internal parameters of PMSM. [Methods] By introducing Tent chaotic mapping in the initialization phase of the algorithm, the probability of finding the optimal solution in the early stage was increased. In the local leader stage, dynamic adaptive weights were introduced based on the population's fitness values in the current iteration to meet the next generation population's needs for global exploration and local optimization. [Results] Simulation results showed that the improved SMO algorithm based on Tent chaotic mapping and nonlinear dynamic adaptive weights had improved convergence speed and identification accuracy during the identification process, with errors controlled within approximately 0.5%. [Conclusion] The proposed improved SMO algorithm exhibits faster identification speed, higher accuracy, and good convergence characteristics.

Key words: permanent magnet synchronous motor; parameter identification; improved Spider Monkey optimization algorithm; Tent chaotic mapping; dynamic adaptive weights

摘要: [目的] 针对元启发式算法在永磁同步电机 (PMSM) 参数辨识过程中易陷入局部最优的问题, 提出一种基于 Tent 混沌映射和非线性动态自适应权重的改进蜘蛛猴优化 (SMO) 算法, 实现了 PMSM 内部参数的准确辨识。[方法] 通过在算法初始化阶段引入 Tent 混沌映射, 增加了前期搜寻到最优解的概率。在局部领导者阶段引入动态自适应权重, 根据当前迭代次数下种群适应度值来满足下一世代种群对于全局探索和局部寻优的需求。[结果] 仿真结果显示, 基于 Tent 混沌映射和非线性动态自适应权重的改进 SMO 在辨识过程中的收敛速度和辨识精度均有所提升, 且误差控制在 0.5% 左右。[结论] 本文提出的改进 SMO 具有更快的识别速度、更高的识别精度和良好的收敛特性。

关键词: 永磁同步电机; 参数辨识; 改进蜘蛛猴优化算法; Tent 混沌映射; 动态自适应权重

0 引言

永磁同步电动机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 相比异步电机具有更宽的调速范围、更快的动态响应以及更高的功率密度, 在高性能伺服系统、机器人及航空航天领域受到广泛关注^[1]。PMSM 参数易受温度、磁饱和及定子电流等因素影响从而导致转矩控制精度下降、磁链观测不准确和电机反电动势特性发生改变等问题。因此获取准确的电机参数对于 PMSM 的精准控制十分重要^[2-9]。

常用的辨识方法主要有改进最小二乘法^[10-11]、模型参考自适应法^[12-13]和扩展卡尔曼滤波法^[14-16]。最小二乘法的数学模型和算法相对

基金项目: 国家自然科学基金 (51477023); 辽宁省教育厅项目 (LJKMZ20220835)

National Natural Science Foundation of China (51477023);
Liaoning Provincial Department of Education Project (LJKMZ20220835)

简单,计算速度快,适用于实时或近实时系统。但对于非线性系统,需要进行线性化处理,这可能导致模型精度降低。相比于最小二乘法模型参考自适应法更适合非线性系统的参数辨识,模型参考自适应法能够根据实时反馈调整参数,适应系统的动态变化,但是算法实现相对困难,需要设计合适的自适应律,否则可能出现参数估计不收敛的问题。扩展卡尔曼滤波算法通过泰勒展开等线性化技术能够处理非线性系统的状态估计,并且能够在模型中直接考虑过程噪声和观测噪声,提高估计的鲁棒性。因扩展卡尔曼滤波法需要计算雅可比矩阵和协方差矩阵,所以该算法在参数辨识过程中计算量较大。智能化算法因具有较好的自适应能力、鲁棒性成为了近几年参数辨识领域的研究热点^[17-22],针对各种算法都存在自身的缺陷与不足,很多学者在原有算法的基础上进行优化。文献[23]提出基于改进粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法的辨识方法,该方法无需任何先验知识,辨识速度和精度较好。文献[24]提出一种改进花粉 PMSM 参数辨识的算法。

蜘蛛猴优化(Spider Monkey Optimization, SMO)算法是一种通过引入蜘蛛猴觅食过程中所产生的裂变融合社会结构(Fission-Fusion Social, FFS)的全局优化算法。该算法机制简单,适应不同问题的能力较强,但也存在对于复杂的优化问题,算法的收敛速度较慢、易陷入局部最优等缺点^[25-26]。针对这些问题,本文提出一种基于改进蜘蛛猴优化(Improved Spider Monkey Optimization, ISMO)算法的 PMSM 参数辨识方法,在标准 SMO 算法的基础上引入 Tent 混沌映射以及动态自适应权重,提高种群的多样性和寻优能力。最后使用 ISMO 算法对 PMSM 进行参数辨识。

1 PMSM 数学模型

忽略涡流损耗和铁损耗,PMSM 在 d - q 坐标系下的动态电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压分量; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流分量; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; R 为

定子电阻; ψ_f 为永磁体磁链; ω_e 为转子电角速度。

电机稳态运行时,定子电流 d 、 q 轴分量的微分值近似为 0,此时 PMSM 定子电压的离散方程为

$$\begin{cases} u_d(k) = Ri_d(k) - L_q \omega_e(k) i_q(k) \\ u_q(k) = Ri_q(k) - L_d \omega_e(k) i_d(k) + \psi_f \omega_e(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 分别为 d 、 q 轴电压分量在 k 次采样时的采样值; $i_d(k)$ 、 $i_q(k)$ 和 $\omega_e(k)$ 分别为 d 、 q 轴电流分量和转子电角速度在 k 次采样时的采样值。

由于在 $i_d=0$ 矢量控制时,待辨识参数个数大于方程的秩,无法得到唯一解,因此需要注入 $i_d < 0$ 的负序弱磁电流来形成满秩电压方程组,最终的 PMSM 的 d 、 q 轴参数辨识方程组为

$$\begin{cases} u_{d0}(k) = -L_d \omega_{e0}(k) i_{q0}(k) \\ u_{q0}(k) = Ri_{q0}(k) + L_d \omega_{e0}(k) i_{d0}(k) + \psi_f \omega_{e0}(k) \\ u_{d1}(k) = Ri_{d1}(k) - L_q \omega_{e1}(k) i_{q1}(k) \\ u_{q1}(k) = Ri_{q1}(k) + L_d \omega_{e1}(k) i_{d1}(k) + \psi_f \omega_{e1}(k) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u_{d1}(k)$ 、 $u_{q1}(k)$ 、 $i_{d1}(k)$ 、 $i_{q1}(k)$ 和 $\omega_{e1}(k)$ 分别为注入负序电流时的 d 、 q 轴电压分量、电流分量和转子电角速度在 k 次采样时的采样值。

从式(3)中可以看出,当 PMSM 温度、负载的波动导致参数变化时,在元启发式算法中可以看作待解方程组的解空间中出现了新的最优解,且最优解不会发生较大突变,仍然会在当前最优解附近,算法只需要跳出当前最优解,在周围重新搜索便可以完成对突变变量的跟踪。

PMSM 在 d - q 坐标系下的转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4)$$

根据式(4)可知,当对 d 轴注入负序电流时,转矩会产生一个大小为 ΔT 的波动,其中 ΔT 的大小为

$$\Delta T = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q \quad (5)$$

由于表贴式 PMSM 的 d 、 q 轴电感值大小相等,导致产生的波动转矩为 0,因此理想情况下注入负序电流对转矩脉动几乎没有影响。

由于向 d 轴注入负序电流,导致 PMSM 定子

电流 I_s 发生变化:

$$I_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (6)$$

由式(6)可知,注入负序电流会使得电机定子电流发生变化,进而导致电机的铜损增加,效率降低。为降低注入电流对电机性能的影响,应减小注入电流的大小,所以采用 $i_d = -0.01$ A 实际电流大小进行瞬时注入,大大降低了注入电流对电机性能的影响。

2 标准蜘蛛猴算法

蜘蛛猴基本原理为猴群在觅食过程中不断根据与食物的距离选择新的领导者,同时猴群的觅食方向总会受个体所在小组成员以及领导者影响。在觅食过程中猴群受领导人命令不断地分裂重组形成新的小组,不断循环。算法具体搜索流程如下:

(1) 种群初始化:根据辨识参数个数定义猴群个体可表征优化变量的维数为 j 。猴群初始化位置方程为

$$SM_{ij} = SM_{ij} + U(0,1) \times (SM_{\max j} - SM_{\min j}) \quad (7)$$

式中: i 为第 i 个个体; $U(0,1)$ 为 0 到 1 之间的随机数; $SM_{\max j}$ 、 $SM_{\min j}$ 分别为第 j 维方程解的最大值、最小值; SM_{ij} 为蜘蛛猴个体初始位置。

(2) 局部领导者阶段:所有个体根据个体所在组内领导者及组内其他个体更新位置,位置更新方程为

$$SM_{\text{new}ij} = SM_{ij} + U(0,1) \times (LL_{kj} - SM_{ij}) + U(-1,1) \times (SM_{rj} - SM_{ij}) \quad (8)$$

式中: LL_{kj} 为第 k 个小组领导者的第 j 维分量; SM_{rj} 为第 k 组内第 r 个个体($r \neq i$)的第 j 维分量。

(3) 全局领导者阶段:所有个体在 $prob$ 概率影响下根据全局领导者位置及组内其他个体位置进行位置更新,更新方程为

$$SM_{\text{new}ij} = SM_{ij} + U(0,1) \times (GL_j - SM_{ij}) + U(-1,1) \times (SM_{rj} - SM_{ij}) \quad (9)$$

式中: GL_j 为全局领导者 j 维分量。

基于个体当前适应度值的位置更新概率函数表达式为

$$prob_i = 0.9 \times \frac{fitness_i}{fitness_{\max}} + 0.1 \quad (10)$$

式中: $fitness_i$ 为第 i 个个体适应度值; $fitness_{\max}$ 为个体所在组内最大适应度值。

(4) 局部领导者学习阶段:根据组内适应度函数择优变更局部领导者,同时判定局部领导者位置是否改变,若更新前后位置不变,则局部领导者更新限制次数自增 1。

(5) 全局领导者学习阶段:根据所有个体适应度值重新选择全局领导者,同时判定全局领导者位置是否改变,若位置没有更新,则全局领导者更新限制次数自增 1。

(6) 局部领导者决策阶段:检测局部领导者更新限制次数是否达到设定阈值,如果达到设定阈值,为了防止局部领导者陷入局部最优问题,组内的所有个体会基于设定扰动率 pr 分别进行重新初始化和根据全局领导者位置及局部领导者位置进行更新,位置更新方程为

$$SM_{\text{new}ij} = SM_{ij} + U(0,1) \times (GL_j - SM_{ij}) + U(0,1) \times (SM_{ij} - LL_{kj}) \quad (11)$$

(7) 全局领导者决策阶段:检测全局领导者更新限制次数达到设定阈值,若达到阈值,所有小组进行融合并重新分组。否则,种群将会进一步分组寻优,直到种群数量达到初始设定最大值。新小组产生时会进行局部领导者学习阶段选择新的局部领导者。

3 ISMO 算法

3.1 Tent 混沌映射

增加种群初始化的随机性以及多样性有助于提高算法在前期获得最优解的概率,因此在初始化阶段添加 Tent 混沌映射。Tent 混沌映射可以产生 $[0,1]$ 内均匀随机的混沌序列,表达式为

$$h_{n+1} = f(h_n) = \begin{cases} \frac{h_n}{\alpha}, & h_n \in [0, \alpha) \\ \frac{1 - h_n}{1 - \alpha}, & h_n \in [\alpha, 1] \end{cases} \quad (12)$$

式中: α 为混沌参数,其取值范围为 0 到 1; h_n 为 $[0,1]$ 内的随机数; n 为变量序号。

加入 Tent 映射后种群初始化表达式为

$$SM_{ij} = SM_{\min j} + h_n \times (SM_{\max j} - SM_{\min j}) \quad (13)$$

为避免 Tent 混沌映射生成种群存在局部集中,使用随机反向学习策略,对种群位置进一步更新。最后,将 Tent 混沌映射和随机反向学习种群

$$SM_{\ddot{u}} = SM_{\max i} + SM_{\min i} - rSM_{\ddot{u}}d \quad (14)$$

3.2 动态自适应权重

为了能够快速找到全局最优点,适应度较高的个体进行位置更新时应适当降低惯性权重,从而加强其局部搜索能力。同理,对于适应度较低的个体,所在区域存在当前全局最优解的概率较低,应适当增大惯性权重,使其跳出当前区域,增加全局搜索能力^[27-29]。

$$\begin{cases} K(i) = 1, i = 1 \\ K(i) = \frac{StdFit(i)}{StdFit(i-1)}, i > 1 \end{cases} \quad (15)$$

非线性动态自适应权重更新方程为

$$\omega(i) = \omega_{\max} + \frac{(\omega_{\min} - \omega_{\max})}{1 + \exp\left[-10b\left(\frac{2i}{K(i) \cdot T_{\max}} - 1\right)\right]} \quad (16)$$

加入动态非线性自适应权重后,在局部领导者阶段种群个体位置更新方程为

$$SM_{newij} = \omega(i) \cdot SM_{ij} + U(0,1) \times (LL_{kj} - SM_{ij}) + U(-1,1) \times (SM_{ri} - SM_{ij}) \quad (17)$$

ISMO 算法的流程图如图 1 所示。本文将 $fitness(x)$ 函数作为 ISMO 算法的适应度函数, 则:

$$\begin{aligned} fitness(k) = & \omega_1 [u_{d0}(k) - \hat{u}_{d0}(k)]^2 + \\ & \omega_2 [u_{q0}(k) - \hat{u}_{q0}(k)]^2 + \omega_3 [u_{d1}(k) - \hat{u}_{d1}(k)]^2 + \\ & \omega_4 [u_{q1}(k) - \hat{u}_{q1}(k)]^2 \end{aligned} \quad (18)$$

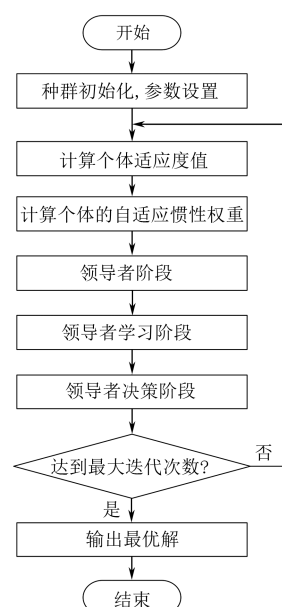


Fig. 1 Flowchart of ISMO algorithm

式中: ω 为权重系数; $\hat{u}_d(k)$ 、 $\hat{u}_q(k)$ 为电机模型测得的 d 、 q 轴电压。

4 基于 ISMO 的 PMSM 参数辨识

4.1 PMSM 参数辨识模型

基于 ISMO 算法的 PMSM 多参数辨识仿真模型如图 2 所示。

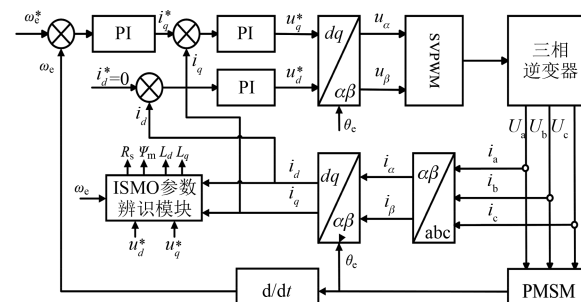


Fig. 2 Parameter identification model

4.2 仿真分析

4.2.1 标准测试函数性能测试

ISMO 算法的 4 种基本测试函数的收敛精度如图 3 所示。测试函数中的 Griewank 函数与 Rastrigin 函数因在解空间中具有大量的局部最优值,用于测试算法跳出局部的最优能力;Sphere 函数为单峰函数,极值唯一所以用于检测算法的寻优速度;Ackley 函数具有多个局部极小值和一个

全局最小值用于检测算法的收敛性。由图 3 可知, ISMO 在大部分情况下拥有更快的寻优速度以及更高的收敛精度。

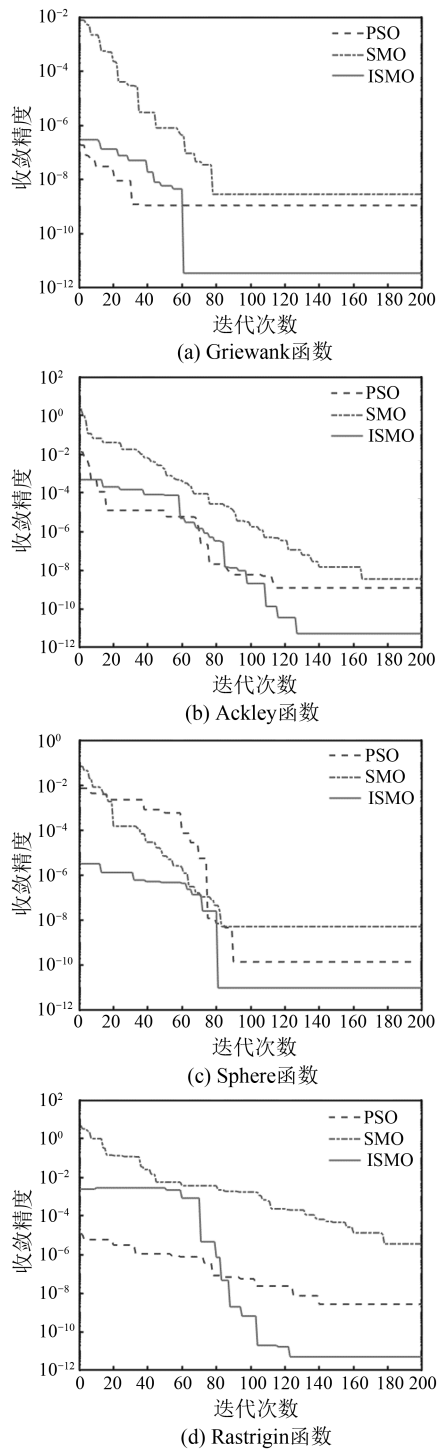


图 3 基本函数测试曲线

Fig. 3 Test curves of basic functions

4.2.2 优化方法测试

针对本文所提出的蜘蛛猴算法优化策略,通

过四种测试函数来分别验证 Tent 映射、自适应权重以及二者结合对于蜘蛛猴算法的提升。测试结果如表 1 所示, SMO_1 代表对 SMO 算法仅加入 Tent 映射, SMO_2 代表对 SMO 算法只进行自适应权重优化。结果表明, 二者结合能够进一步提高标准蜘蛛猴算法的优化效果。

表 1 不同优化方式对算法的影响

Tab. 1 Impact of different optimization methods on algorithm

函数名称	平均收敛迭代次数			
	SMO	SMO_1	SMO_2	ISMO
Griewank	82.7	78.1	63.8	59.4
Rastrigin	177.6	165.3	141.9	121.3
Sphere	93.2	90.4	83.4	76.7
Ackley	165.7	147.6	132.7	127.9

4.2.3 仿真结果

仿真中, 电机模型运行参数如表 2 所示。电机采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略, 在电机处于稳态时向 d 轴注入 $i_d=-0.01$ A 的负序电流, 注入电流周期为 0.2 s, 占空比为 0.5。

表 2 仿真模型参数

Tab. 2 Simulation model parameters

参数名称	参数值
定子电阻 R/Ω	1.35
直轴电感 L_d/mH	6.1
交轴电感 L_q/mH	6.1
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.268 5
极对数 P_n	4

为保证试验的科学性, 本文将 ISMO、SMO 与粒子群 PSO 算法进行对比。选定迭代次数为 200, 个体数量为 100, 通过重复试验 50 次, 结果取平均值保证最终试验结果的准确性, 最终辨识结果如表 3、表 4 所示。

结果表明, 基于 ISMO 的参数辨识速度以及辨识精度均取得了较好的效果。

5 试验与分析

搭建如图 4 所示的试验平台, 以欧姆龙 CK3M 运动控制器作为控制核心, 对电机的电压电流进行采样, 通过 Ethercat 通讯将数据传输至上位机, 并进行参数辨识。电机参数如表

5 所示。

表 3 电感参数仿真辨识结果

Tab.3 Simulation and identification results of inductance parameters				
算法	实际值	L_d/Ω	L_q/mH	
		6.1	6.1	
PSO	辨识值	6.071 32	6.007 67	
	误差/%	0.470 1	0.045 1	
SMO	辨识值	5.685 13	6.390 40	
	误差/%	6.801 1	3.585 8	
ISMO	辨识值	6.118 52	6.093 35	
	误差/%	0.303 6	0.020 8	

表 4 电阻、磁链参数仿真辨识结果

Tab.4 Simulation and identification results of resistance and flux linkage parameters				
算法	实际值	R/Ω	ψ_f/Wb	
		1.35	0.268 5	
PSO	辨识值	1.345 40	0.268 43	
	误差/%	0.340 7	0.022 9	
SMO	辨识值	1.213 74	0.258 86	
	误差/%	10.093 3	3.590 3	
ISMO	辨识值	1.348 39	0.268 54	
	误差/%	0.119 2	0.014 8	

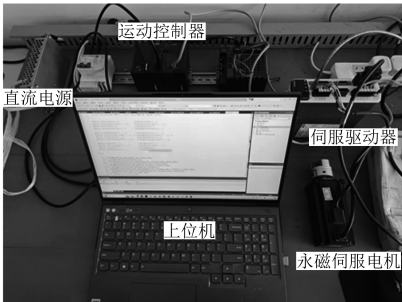


图 4 试验平台
Fig. 4 Experimental platform

表 5 电机参数

Tab.5 Motor parameters	
参数名称	参数值
定子电阻 R/Ω	3.93
直轴电感 L_d/mH	3.1
交轴电感 L_q/mH	3.1
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.057 0
极对数 P_n	5

试验电气参数辨识结果如图 5 所示,从图中可以看出,3 种算法最终都可以逼近真实值,且

都有较好的整体收敛能力。ISMO 相较于 SMO 与 PSO 而言,在辨识精度以及收敛速度上均有所提升。

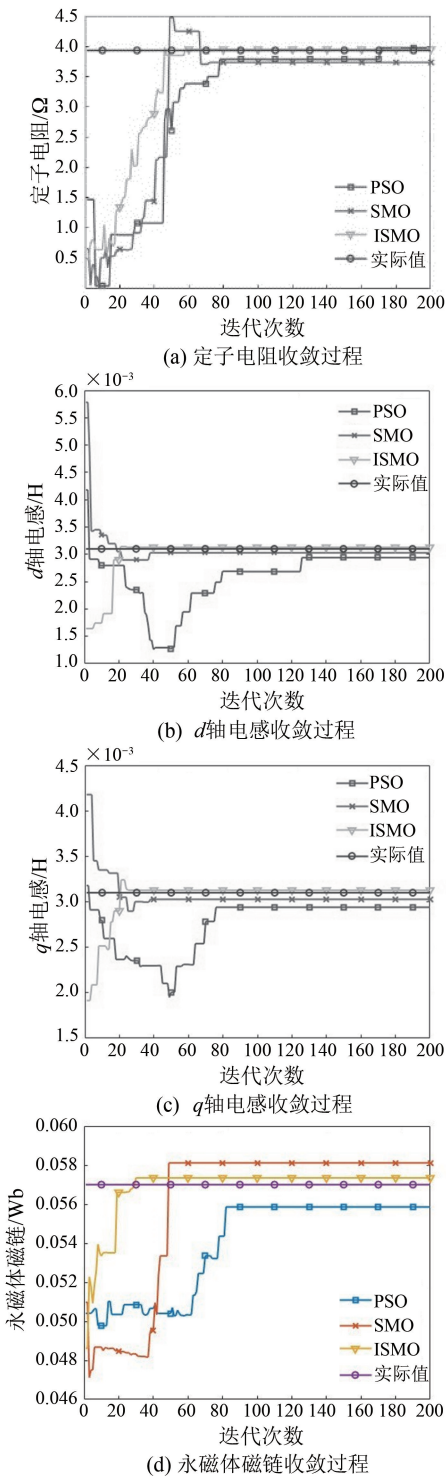


图 5 PMSM 各参数收敛曲线
Fig. 5 Convergence curves of various PMSM parameters

表 6 电感辨识结果

Tab. 6 Identification results of inductance

算法	实际值	L_d/mH	L_q/mH
		3.1	3.1
PSO	辨识值	3.030 5	2.939 7
	误差/%	2.241 9	5.171 0
SMO	辨识值	3.047 3	3.027 6
	误差/%	1.7	2.335 4
ISMO	辨识值	3.107 7	3.117 4
	误差/%	0.248 4	0.561 2

表 7 电阻、磁链辨识结果

Tab. 7 Identification results of resistance and flux linkage

算法	实际值	R/Ω	ψ_f/Wb
		3.93	0.057 0
PSO	辨识值	3.974 3	0.055 9
	误差/%	1.127 2	1.929 0
SMO	辨识值	3.731 3	0.057 9
	误差/%	5.055 9	1.578 0
ISMO	辨识值	3.946 3	0.057 3
	误差/%	0.414 7	0.526 3

6 结语

本文在 $d-q$ 坐标系下建立满秩参数辨识模型,结合引入 Tent 映射和动态自适应权重的蜘蛛猴算法对定子电阻、 d 和 q 轴电感、永磁体磁链进行多参数辨识。为验证算法的有效性,将 3 种算法进行基本测试函数对比试验,验证本文提出的 ISMO 算法在收敛速度以及辨识精度上均有所提升。参数辨识试验结果证明,本文提出的 ISMO 算法拥有较快的辨识速度以及较高的辨识精度,同时具有很好的收敛性。

参考文献

[1] 唐任远. 现代永磁电机: 理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
TANG R Y. Modern Permanent Magnet Motors: Theory and Design [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2016.
[2] 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.
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.
[3] ICHIKAWA S, TOMITA M, DOKI S, et al. Sensorless control of permanent-magnet synchronous motors using online parameter identification based on system identification theory [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 363-372.
[4] SHI Y, SUN K, HUANG L, et al. Online identification of permanent magnet flux based on extended Kalman filter for IPMSM drive with position sensorless control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 4169-4178.
[5] 马钦林, 袁浩, 尹威, 等. 考虑等效电磁损耗电阻偏移的永磁同步电机直流信号注入在线参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6015-6026.
MA Y L, YUAN H, YIN W, et al. DC-signal-injection-based online parameters identification for permanent magnet synchronous machine considering variation of equivalent electromagnetic loss resistance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6015-6026.
[6] 任建, 王淑红, 黄济文, 等. 基于参数辨识的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(1): 8-15.
REN J, WANG S H, HUANG J W, et al. Position sensorless control of permanent magnet synchronous motor with parameter identification [J]. Electric Machines & Control Applications, 2022, 49(1): 8-15.
[7] 石建飞, 戈宝军, 吕艳玲, 等. 永磁同步电机在线参数辨识方法研究[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(3): 17-24.
SHI J F, GE B J, LV Y L, et al. Research of parameter identification of permanent magnet synchronous motor online [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(3): 17-24.
[8] 姚绪梁, 黄乘齐, 王景芳, 等. 具有参数辨识功能的永磁同步电机双矢量模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9319-9330.
YAO X L, HUANG C Q, WANG J F. A two-vector-based model predictive current control with online parameter identification for PMSM drives [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9319-9330.
[9] 宋建国, 桓建文, 袁宇瑞. 新型分步式永磁同步电机参数辨识[J]. 电机与控制应用, 2022, 49

- (10): 34-39.
- SONG J G, HUAN J W, YUAN Y R. Parameter identification of new type step-by-step permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Applications*, 2022, 49(10): 34-39.
- [10] 宁佐权, 文定都, 石川东. 基于动态折息因子递推最小二乘法的永磁同步电机参数辨识[J]. *湖南工业大学学报*, 2023, 37(2): 23-30+96.
- NING Z Q, WEN D D, SHI C D. PMSM parameter identification based on the dynamic discount factor recursive least square method [J]. *Journal of Hu'nan University of Technology*, 2023, 37(2): 23-30+96.
- [11] 娄天浩, 杨家强, 高健, 等. 基于递推辅助变量最小二乘法的永磁电机参数在线辨识策略[J]. *电工技术*, 2022, (5): 96-100+104.
- LOU T H, YANG J Q, GAO J, et al. Online identification strategy of permanent magnet motor parameters based on RIVLS [J]. *Electric Engineering*, 2022, (5): 96-100+104.
- [12] 李垣江, 董鑫, 魏海峰, 等. 基于改进模型参考自适应系统的永磁同步电机参数辨识[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(9): 1983-1988.
- LI Y J, DONG X, WEI H F, et al. Parameter identification method of permanent magnet synchronous motor based on improved model reference adaptive system [J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(9): 1983-1988.
- [13] 杨公德, 王朋, 刘宝谨. 梯形波电流注入法的IPMSM多参数在线辨识[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(5): 96-103.
- YANG G D, WANG P, LIU B J. Multi-parameter online identification of IPMSM based on trapezoidal-wave current injection [J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(5): 96-103.
- [14] 张晓虎, 赵吉文, 王立俊, 等. 基于自适应互联扩展卡尔曼观测器的永磁同步直线电机高精度抗干扰在线多参数辨识[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(12): 4571-4581.
- ZHANG X H, ZHAO J W, WANG L J, et al. High-precision anti-interference online multi-parameter estimation of PMSLM with adaptive interconnected extend Kalman observer [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(12): 4571-4581.
- [15] 李洪凤, 徐浩博, 徐越. 扩展卡尔曼滤波参数辨识下永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(9): 19-30.
- LI H F, XU H B, XU Y. Model predictive torque control of PMSM based on extended Kalman filter parameter identification [J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(9): 19-30.
- [16] 李英春, 侯金明, 王培瑞. 基于改进扩展卡尔曼滤波的PMSM在线参数辨识[J]. *中国测试*, 2022, 48(11): 47-53.
- LI Y C, HOU J M, WANG P R. PMSM online parameter identification method based on improved extended Kalman filter [J]. *China Measurement and Testing Technology*, 2022, 48(11): 47-53.
- [17] 马兵, 吕彭民, 刘永刚, 等. 基于改进火烈鸟搜索算法的移动机器人路径规划[J]. *传感器与微系统*, 2023, 42(11): 123-126.
- MA B, LV P M, LIU Y G, et al. Path planning of mobile robot based on improved FSA [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2023, 42(11): 123-126.
- [18] 夏志禹, 徐正蓓, 李丹, 等. 变异哈里斯鹰优化算法在气体泄漏溯源中的应用[J]. *传感器与微系统*, 2023, 42(11): 160-164.
- XIA Z Y, XU Z Y, LI D, et al. Application of mutant Harris hawks optimization algorithm in traceability of gases leakage [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2023, 42(11): 160-164.
- [19] 李弘基, 简献忠, 汪祖俭. 基于混合变异RAO算法的永磁同步电机参数辨识[J]. *计量学报*, 2023, 44(9): 1325-1332.
- LI H J, JIAN X Z, WANG Z J. Parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on hybrid variation RAO algorithm [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2023, 44(9): 1325-1332.
- [20] 陈一涵, 曾成碧, 苗虹, 等. 增强改进麻雀算法的永磁同步电机多参数辨识[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2024, (11): 177-182.
- CHEN Y H, ZENG C B, MIAO H, et al. Enhancing improved Sparrow algorithm for multi-parameter identification of permanent magnet synchronous motor [J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2024, (11): 177-182.
- [21] 曹永娟, 陆壮壮, 蔡骏, 等. 改进海马优化算法的永磁同步电机多参数辨识[J]. *仪表技术与传感器*, 2024, (2): 79-85+92.
- CAO Y J, LU Z Z, CAI J, et al. Multi-parameter identification of permanent magnet synchronous motor

- with improved sea-horse optimization algorithm [J]. Instrument Technique and Sensor, 2024, (2): 79-85+92.
- [22] 边琦, 马建, 张梦寒, 等. 改进细菌觅食算法的永磁同步电机参数辨识[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(2): 174-181.
BIAN Q, MA J, ZHANG M H, et al. Parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on modified bacterial foraging algorithm [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28 (2): 174-181.
- [23] 陈强, 蔡琦盼, 邓博仁. 基于改进混沌粒子群优化算法的永磁同步电机参数辨识[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(4): 157-160.
CHEN Q, CAI Q P, DENG B R. Parameter identification of PMSM based on improved chaos PSO algorithm [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(4): 157-160.
- [24] 高森, 王康, 姜宏昌, 等. 基于改进花授粉算法的永磁同步电机参数辨识[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 97-105.
GAO S, WANG K, JIANG H C, et al. Parameter identification of PMSM based on improved flower pollination algorithm [J]. Electric Machines & Control Applications, 2024, 51(1): 97-105.
- [25] 梁昔明, 张洋, 龙文. 含有纵横交叉策略的蜘蛛猴优化算法[J]. 数学的实践与认识, 2022, 52(12): 144-158.
LIANG X M, ZHANG Y, LONG W. Spider monkey optimization algorithm with crisscross optimization [J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2022, 52(12): 144-158.
- [26] 单好民, 蔺守河. 一种基于改进蜘蛛猴算法的无线传感器网络节点定位方法[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2023, 33(3): 51-57.
SHAN H M, LIN S H. Strength and modal finite element analysis of flywheel energy storage rotor [J]. Journal of Hu'nan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2023, 33(3): 51-57.
- [27] 赵青杰, 李捷, 于俊洋, 等. 基于动态自适应权重和柯西变异的蝙蝠优化算法[J]. 计算机科学, 2019, 46(增刊1): 89-92.
ZHAO Q J, LI J, YU J Y, et al. Bat optimization algorithm based on dynamic adaptive weight and cauchy mutation [J]. Computer Science, 2019, 46 (S1): 89-92.
- [28] 展广涵, 王雨虹, 刘昊. 混合策略改进的哈里斯鹰优化算法及其应用[J]. 传感技术学报, 2022, 35(10): 1394-1403.
ZHAN G H, WANG Y H, LIU H. Improved harris hawks optimization algorithm with hybrid strategy and its application [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(10): 1394-1403.
- [29] 李军军, 黄有方, 杨斌, 等. 基于时变 Sigmoid 函数的鲁棒 PSO 算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(11): 1650-1654.
LI J J, HUANG Y F, YANG B, et al. Robust particle swarm optimization algorithm based on time-varying Sigmoid function [J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1650-1654.

收稿日期:2024-07-01

收到修改稿日期:2024-09-03

作者简介:

郭成龙(2000-),男,硕士研究生,研究方向为电机控制,gcl165957@163.com;

* 通信作者:张可畏(1975-),男,博士,副教授,研究方向为电机控制、电力电子和电气测量,11167416@qq.com。

Parameters Identification of PMSM Based on Improved Spider Monkey Optimization Algorithm

GUO Chenglong¹, ZHANG Kewei^{1*}, HAN Xu¹, DING Gengxin²

(1. College of Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. College of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Key words: permanent magnet synchronous motor; parameter identification; improved Spider Monkey optimization algorithm; Tent chaotic mapping; dynamic adaptive weights

The permanent magnet synchronous motor (PMSM) has a wider speed regulation range, faster dynamic response, and higher power density compared to asynchronous motors, making it widely accepted in high-performance servo systems, robotics, and aerospace fields. The parameters of PMSM are easily influenced by factors such as temperature, magnetic saturation, and stator current, leading to issues such as decreased torque control accuracy, inaccurate flux observation, and variations in characteristics of motor back electromotive force. Therefore, obtaining accurate motor parameters is crucial for precise control of PMSM.

This paper established a full-rank parameter identification model in the dq coordinate system, combining the Spider Monkey optimization (SMO) algorithm with Tent chaotic mapping and dynamic adaptive weights to identify multiple parameters such as stator resistance, dq -axis inductance, and permanent magnet flux linkage. The simulation model is illustrated in Fig.1.

During the initialization phase of the algorithm, Tent chaotic mapping was introduced to achieve a more uniform distribution of initial individuals in the solution space, thereby increasing the probability of finding the optimal solution in the early stages of identification. During the local leader phase, dynamic adaptive weights were introduced; individuals with higher fitness should appropriately reduce inertia weights when updated, to enhance their local search capabilities. Conversely, for

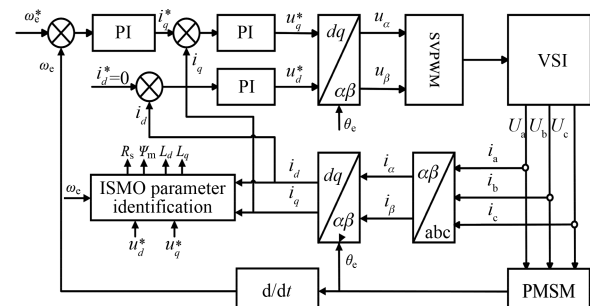


Fig.1 Block diagram of simulation model for parameter identification of PMSM based on ISMO algorithm

individuals with lower fitness, where the probability of the current global optimal solution was lower, inertia weights should be increased appropriately to help them escape from the current region and enhance global search capabilities.

To validate the effectiveness of the proposed algorithm, its identification error was compared with that of two other algorithms. The parameter identification error results are shown in Fig.2.

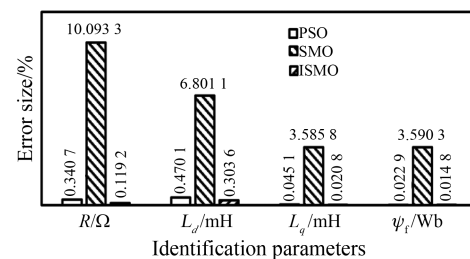


Fig.2 Parameter identification error results

The experiments demonstrate that the proposed improved SMO algorithm exhibits faster identification speed, higher identification accuracy, and good convergence characteristics.