

基于改进蜜獾算法的永磁同步电机 PI 控制参数优化仿真

陈欣¹, 胡涛², 蒋全²

[1. 上海电动工具研究所(集团)有限公司, 上海 200233;

2. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093]

摘要: 传统 PI 优化方法难以满足永磁同步电机(PMSM)在高速、高精度及负载变化中的应用, 因此以蜜獾算法(HBA)为基础, 结合帐篷映射与正态云设计了改进 HBA 来优化 PI 参数, 从而提高 PMSM 转速环及电流环控制精度和速度。利用帐篷映射在算法初始化阶段提高分布均匀性, 加强算法前期的全局开发能力; 利用正态云生成第二组蜜獾并在同代中更新最佳位置, 强化局部最优的跳出能力。寻优过程中动态改变正态云模型以改善局部搜索能力。利用 MATLAB/Simulink 进行仿真对比, 改进后的 HBA 在调节时间、稳定性等方面有一定优势, 是一种可以用于 PMSM 转速控制系统的新算法。

关键词: 永磁同步电机; 蜜獾算法; 正态云; PI 控制

中图分类号: TM341; TP273 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)08-0028-06

doi: 10.12177/emca.2022.078

PI Control Parameter Optimization Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Improved Honey Badger Algorithm

CHEN Xin¹, HU Tao², JIANG Quan²

[1. Shanghai Electric Tool Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200233, China;

2. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China]

Abstract: The traditional PI optimization method is difficult to meet the application of permanent magnet synchronous motor (PMSM) in high-speed, high-precision and load change. Therefore, based on the honey badger algorithm (HBA), combined with the tent map and normal cloud, an improved HBA is designed to optimize the PI parameters, so as to improve the control accuracy and speed of the PMSM speed loop and current loop control. The tent map is used to improve the distribution uniformity in the initialization stage of the algorithm and strengthen the global development ability in the early stage of the algorithm; The second group of honey badgers is generated by using the normal cloud to update the best position in the same generation, and strengthen the ability of jumping out of the local optimization. During the optimization process, the normal cloud model is dynamically changed to improve the local search ability. Using MATLAB/Simulink for simulation comparison, the improved HBA has certain advantages in adjustment time, stability and so on. It is a new algorithm that can be used in PMSM speed control system.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); honey badger algorithm; normal cloud; PI control

收稿日期: 2022-05-07; 收到修改稿日期: 2022-07-13

作者简介: 陈欣(1965—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为测量技术、电机及其控制技术、自动化。

胡涛(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机控制。(通信作者)

蒋全(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为永磁电机控制、参数辨识、电力电子与电力传动等。

0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有结构简单、效率高、控制种类多样、运行可靠等优点,广泛应用于电动汽车及航空工业等领域^[1]。随着电控技术的发展及产业升级,对PMSM的控制系统也提出了更高的要求。PI控制技术是工业领域最为主要的一种成熟稳定的控制方法,以PI控制为基础的控制方法的应用仍然非常广泛^[2]。该方法分为转速环及电流环两个部分,其中整个系统的优化效果是由对转速环的优化控制决定的。

PI的参数优化主要分为两类,一类是基于传统的优化方法进行的PI参数整定,如文献[3-4]的整定方法。另一类是将智能算法引入PI整定的智能优化算法,如遗传算法、粒子群算法模糊控制。传统优化方法具有结构简单、易于掌握的优点,适用于对精度要求不高的场合。但随着产业升级,该方法难以满足对控制精度要求越来越高的现状。文献[5]提出了一种基于蚁狮算法的分阶数PI的PMSM矢量控制,该方法比传统优化算法拥有更好的抗干扰能力,但存在计算量较大、收敛速度慢的缺点。文献[6]将粒子群与模糊控制器结合获得了新的PI速度控制方法,比传统优化算法具有更好的动态响应,能够对模糊逻辑控制器的隶属度函数进行自适应优化,但此分步优化方法存在模糊隶属度函数参数所需满足的条件多导致的搜索空间狭窄的问题。文献[7]提出了基于模型预测的PMSM速度环PI自整定控制。该方法可以获得更好的因参数变化引起的转速变化。但模型预测存在权重系数难以设计的问题,不同的权重系数会对最终控制结果产生较大影响。

本文将帐篷映射与正态云相结合提出了一种改进蜜獾算法(HBA)。相比于已有算法,该算法提高了系统的响应速度与控制精度,同时提高了优化过程中的稳定性与抗干扰能力,使PMSM转速控制系统能够有效应用于高精度场合。

1 基于帐篷映射的正态云模型的HBA

1.1 HBA基本原理

HBA^[8]是于2021年提出的一种新型智能优化算法,该算法主要通过模拟蜜獾智能觅食行为

进行寻优,具有寻优能力强、收敛速度快等特点。HBA将蜜獾的觅食行为分为两类,一类是自主沿心形线随强度信息挖掘蜂巢,另一类是跟随已有向导及其强度信息到达蜂巢。两种不同行为按50%概率随机选择。在挖掘阶段,蜜獾的动作类似于图1所示的心形。

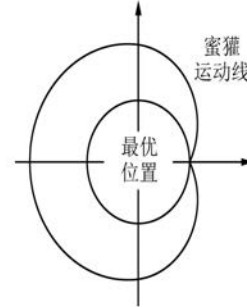


图1 蜜獾挖掘运动线

心形线运动可由下式表示:

$$x_{\text{new}} = x_{\text{prey}} + F \times \beta \times I_i \times x_{\text{prey}} + F \times r_1 \times \alpha \times d_i \times |\cos(2\pi r_2) \times [1 - \cos(2\pi r_3)]| \quad (1)$$

式中: x_{new} 为蜜獾的新位置; x_{prey} 表示猎物的位置,即全局最佳位置; $\beta \geq 1$ (默认=6)为蜜獾获得食物的能力; d_i 为猎物与第*i*只蜜獾之间的距离; I_i 为猎物的嗅觉强度; α 为时变搜索衰减因子; r_1 、 r_2 和 r_3 为0到1之间的3个不同的随机数; F 为改变搜索方向的标志,由式(2)确定:

$$F = \begin{cases} 1, & \text{if } r_4 \leq 0.5 \\ -1, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中: r_4 为0到1之间的随机数。

I_i 为猎物的嗅觉强度,如果气味强度高,则运动快,反之亦然。 I_i 由图2所示的平方反比定律^[9]给出:

$$I_i = r_5 \times \frac{S}{4\pi d_i^2} \quad (3)$$

$$S = (x_i - x_{i+1})^2 \quad (4)$$

$$d_i = x_{\text{prey}} - x_i \quad (5)$$

式中: r_5 为0和1之间的随机数; S 为源强度或浓度强度。

时变搜索衰减因子 α 表示搜索过程中随时间变化的随机性,用于确保从勘探到开采的平稳过渡。 α 的值随着迭代次数增加而减小:

$$\alpha = C \times \exp\left(\frac{-t}{t_{\text{max}}}\right) \quad (6)$$

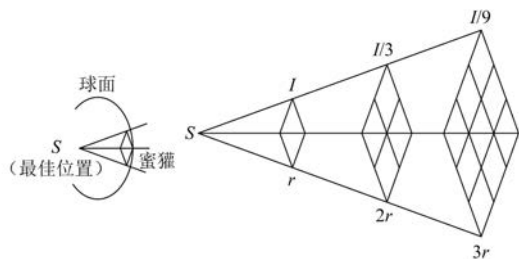


图2 蜜獾嗅觉强度

式中: C 为大于等于 1 的常数, 默认为 2; $t_{\max}$ 为迭代最大次数。

在挖掘阶段, 蜜獾主要受猎物的嗅觉强度 I_i 、距离 d_i 和时变搜索衰减因子 α 的影响。此外, 在挖掘活动中, 由于干扰项 F 的存在, 蜜獾将在多种方向干扰的影响下向最佳位置靠拢。

蜜獾跟随蜜导鸟到达蜂巢的情况可模拟为

$$x_{\text{new}} = x_{\text{prey}} + F \times r_6 \times \alpha \times d_i \quad (7)$$

式中: r_6 为 0 到 1 之间的随机数。

由式(7)可以看出, 蜜獾在距离信息 d_i 的基础上, 对目前发现的接近猎物的位置进行搜索。在这一阶段, 搜索受到时变搜索衰减因子 α 及 F 的干扰。

1.2 帐篷映射的种群初始化

为了提高算法的速度和求解精度, 首先应当提高初始种群分布的均匀程度。由于混沌序列比随机生成拥有更好的随机性和遍历性且存在规律性, 利用映射关系使用混沌序列, 在 (0, 1) 之间随机生成混沌序列, 再通过对应的公式转换到搜索空间内。由于帐篷映射能获得分布更均匀的序列^[10], 本文将帐篷映射作为初始粒子群位置的映射。帐篷映射的公式如下:

$$y_{j+1}^i = \begin{cases} \mu y_j^i, & y_j^i < 0.5 \\ \mu(1 - y_j^i), & y_j^i \geq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

式中: y_j^i 为种群编号为 i 、混沌变量序号为 j 的混沌数; $\mu \in (0, 2]$ 为混沌参数; i 为种群编号; j 为混沌变量序号。

由于帐篷映射对初值的选取具有很高的敏感性, 式(8)中选用多种不同的初始值, 可得到其对应的混沌序列, 按照对应关系转换至每个个体的搜索空间中, 有:

$$x_j^i = l_{b_i} + (u_{b_i} - l_{b_i}) y_j^i \quad (9)$$

式中: l_{b_i} 、 u_{b_i} 分别为 x_j^i 的下限和上限。

1.3 正态云模型

在 HBA 中引入云模型^[11]的概念, 进而实现对数据模糊性和随机性的描述和处理。云模型使用 3 种关键的数字特征。

期望 (E_x): 在定量论域 U 中最能够代表定性概念 A 的点, 即 E_x 。

熵 (En): En 是 E_x 的不确定性, 表现为在数域空间中能够被 E_x 所接受的云滴群的分布范围, 或模糊程度或不确定性。通常情况下 En 越大, 在定量论域 U 中的分布就越大, 模糊性和随机性也就越大。

超熵 (He): He 是 En 的不确定性的度量, 是 En 的分布范围, 即熵的熵。

若 $u_A(x)$ 为正态分布, 则模型称为正态云模型。正态云的数字特征如图 3 所示。

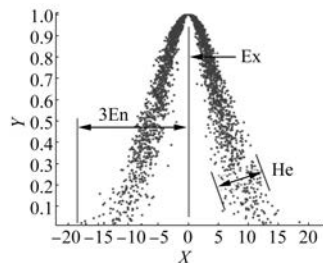


图3 正态云

1.4 改进 HBA

为了使 HBA 在面对复杂优化问题时, 强化搜索阶段随机性, 避免陷入局部最优, 同时一定程度加强算法在开发阶段的收敛精度, 将帐篷映射与正态云模型映入 HBA, 在新算法中, 以迭代过程中的最佳位置为基础, 将其作为正态云模型中的期望值生成第二组蜜獾。通过调节熵的取值控制新蜜獾的生成范围。通过超熵控制新蜜獾的密集程度。

在搜索过程前期需要扩大第二批蜜獾生成范围, 以提高算法在开发阶段的随机性。而在算法迭代后期需要降低蜜獾更新范围, 提高算法搜索精度。为此熵与超熵需要自适应调整, 如下式所示:

$$En = \omega \times \left(\frac{t_{\max} - t}{t_{\max}} \right)^{\tau} \quad (10)$$

$$He = En \times 10^{-\xi} \quad (11)$$

综上, 改进后的算法步骤可总结为:

步骤 1: 生成参数 $t_{\max}$, 蜜獾数量 N, β, C 。

步骤 2: 利用式(8)和式(9)采用帐篷映射初始化蜜獾种群。

步骤 3: 使用目标函数计算蜜獾个体适应度值, 保存最佳位置及适应度值。

步骤 4: 使用式(6)更新衰减因子 α 。

步骤 5: 以标准 HBA 更新蜜獾位置, 并计算新的适应度值确定最佳位置记为 x_1 及其适应度值 F_1 。

步骤 6: 按照正态云算法以最佳位置为期望生成第二组蜜獾, 并获得新蜜獾的最佳位置 x_2 及其适应度值 F_2 。

步骤 7: 将 F_1 与 F_2 进行对比, 更新得到两组中的最佳参数, 视为本代最佳。如果 $t < t_{\max}$, 则令 $t = t + 1$, 返回步骤 3, 否则算法结束。

2 数学模型

基于两相同步旋转坐标系, 建立 PMSM 的数学模型。首先进行以下假设: (1) 电机的内部没有磁滞损耗及涡流损耗; (2) 电机转子的三相绕组按照完全对称的 120° 排列, 所产生的感应电动势为理想感应电动势; (3) 电机铁心不会饱和。

基本电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + P(L_d i_d + \Psi_f) - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + P L_q i_q - \omega(L_d i_d + \Psi_f) \end{cases} \quad (12)$$

式中: u_d, u_q 为定子电压的 d, q 轴分量; R_s 为定子绕组电阻; P 为微分算子; ω 为转子旋转的角速

度; L_d, L_q 为定子的 d, q 轴电感; i_d, i_q 为定子电流的 d, q 轴分量; Ψ_f 为永磁体磁链。

转矩方程和机械方程分别为

$$T_e = 1.5 p_n (\Psi_f i_q - \Psi_q i_d) \quad (13)$$

$$T_e - T_L = (J/p_n) (d\omega/dt) \quad (14)$$

式中: p_n 为电机的极对数; J 为转动惯量; Ψ_d, Ψ_q 为定子磁链的 d, q 轴分量; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩。

采用 $i_d = 0$ 控制策略的三相 PMSM 双闭环矢量控制框图如图 4 所示。

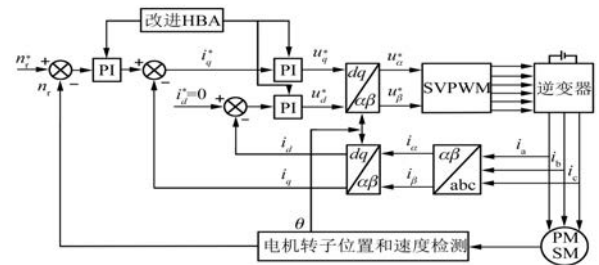


图 4 PMSM 双闭环矢量控制框图

3 仿真分析

3.1 仿真模型与适应度函数

在 MATLAB/Simulink 中搭建 PMSM 双闭环调速系统控制的仿真模型, 以验证该控制方案的正确性和有效性, 如图 5 所示。图 5 主要包括 PMSM 模块、基于改进 HBA 的速度环与电流环 PI 控制器、空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 模块等, 利用基于改进 HBA 获得速度环及电流环 PI 控制器

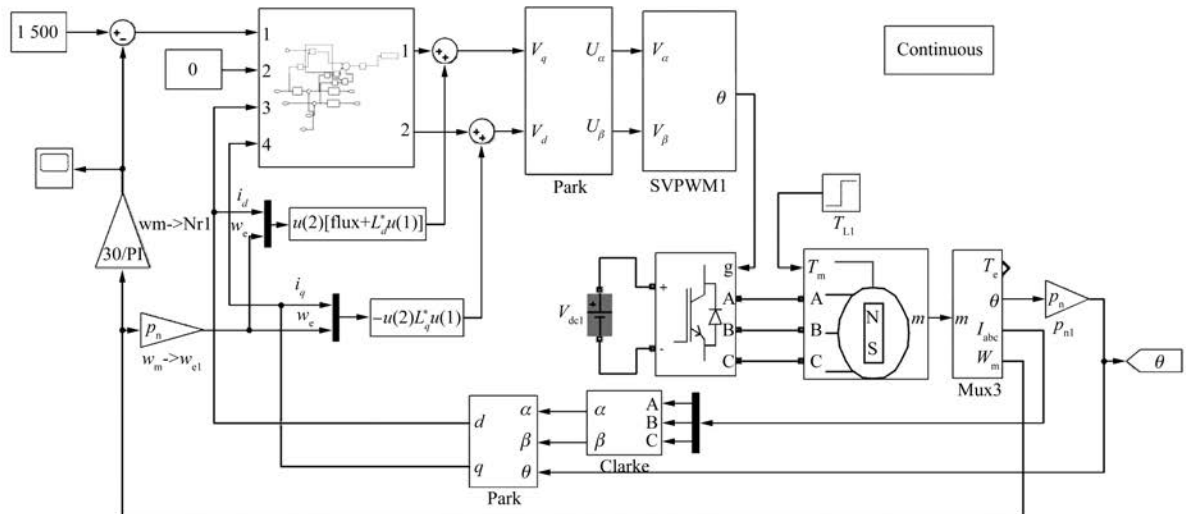


图 5 仿真模型

所需的 K_p 和 K_i 。

在适应度函数的选择上,当前大多数研究采用时间绝对偏差乘积分函数 (ITAE) 计算适应度值,如下^[12-23]:

$$ITAE = \int t |e_s(t)| dt$$

(15)

式中: $e(t)$ 为系统偏差。

ITAE 虽能较好地兼顾电机运行过程中的超调量、调节时间等参数,但无法根据不同系统要求对优化结果进行自定义^[16]。所以提出如下适应度函数实现对超调量、调节时间、稳态误差等参数的调节:

$$Fitness = (1 - e^{-\gamma})(c_1 M_p + e_s) + e^{-\gamma}(c_2 t_s - t_r)$$

(16)

式中: M_p 为超调量; e_s 为系统稳态误差; t_s 为调节时间; t_r 为系统上升时间; c_1 、 c_2 、 γ 为权重系数,可根据需要达到的动态特性进行修改。如果 γ 大于 0.7 则调节结果偏重于超调量与稳态误差,反之则偏重于调节时间及系统上升时间。

3.2 仿真结果

本文对比了传统 PI 参数优化方法^[20]、标准 HBA、改进 HBA 及标准粒子群算法 (PSO)^[23]。维数设置为 6,对应速度环电流环 PI 控制器的 6 个参数,种群设置为 20,迭代次数为 50。PMSM 仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 PMSM 参数	
参数名称	参数值
转速 $n_r/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 500
定子相电阻 R/Ω	2.875
极对数 p_n	4
电感 L/mH	8.5
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{cm}^2)$	0.003
黏滞阻尼 $/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2})$	0.008

将 PMSM 的起动负载设置为 2 N,3 种优化方法的相应曲线如图 6 所示。由图 6 可知,在起动过程中,改进 HBA 比传统 PI 调节方法具有更小的超调量,且相比于 HBA 与 PSO,改进 HBA 可以更快进入稳态。

在时间到达 0.4 s 时加入 5 N 负载,3 种优化方法在 0.4 s 前都已到达稳态,测试负载变化下 3 种优化方法的恢复能力如图 7 所示。由图 7 可

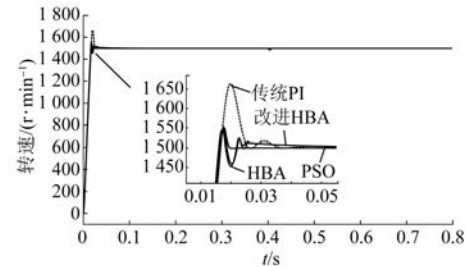


图 6 起动优化效果

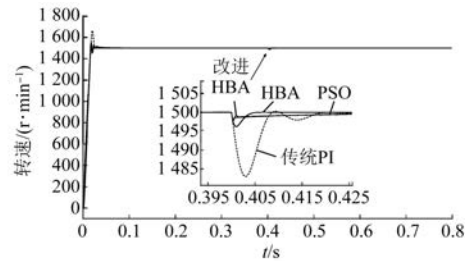


图 7 负载突变优化效果

知,面对负载突变,改进 HBA 具有超调量小、对应突变小的优点。改进 HBA 仿真转矩及电流波形如图 8 所示。

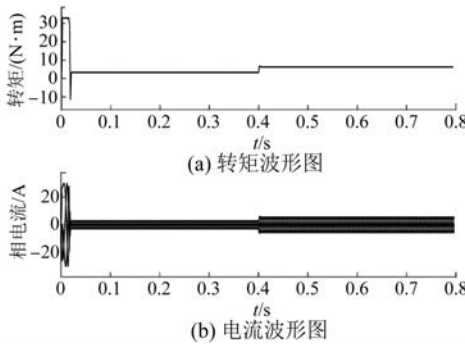


图 8 改进控制算法转矩与电流波形图

不同优化方法的主要控制指标参数对比如表 2 所示。

整定方法	性能指标		
	超调量/%	调节时间/s	稳态误差 $/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
传统 PI	12.43	0.032	0.2
PSO	3.72	0.025	0.1
标准 HBA	3.67	0.021	0.1
改进 HBA	3.71	0.017	0

不同算法的适应度函数值随搜索迭代次数的变化曲线如图 9 所示。

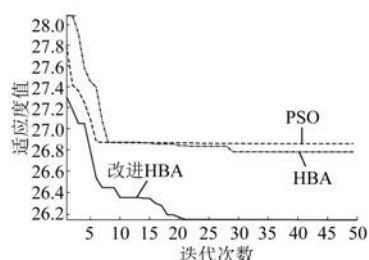


图9 适应度值对比图

从表2可以看出,相较于传统PI和标准HBA方法,改进HBA的PMSM控制系统具有响应速度快、超调量小的优点,同时抗转矩突变能力更好。由图9可知,相比于PSO,改进HBA具有更好的局部最优跳出能力,且该算法适应度值在寻优后期要小于标准HBA。综上,改进HBA在PMSM的PI参数优化中寻优精度更高。

4 结 语

针对PMSM的PI参数调节的优化问题,首先对PMSM及其控制系统建立了数学模型,然后以HBA为基础,将种群初始化过程与帐篷映射相结合,利用云自适应技术确定产生新的最佳位置,获得了改进HBA。利用MATLAB仿真,比较改进后的算法与标准算法,所提出的改进HBA比已有的标准HBA,具有更快的转速响应速度和更高的寻优精度,实现了改进HBA与PMSM控制系统的结合。

【参考文献】

- [1] 胡庆波,孙春媛. 永磁同步电机全速范围无速度传感器控制[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(9): 73.
- [2] 成海全,邱子桢,陈勇,等. 基于永磁同步电机转子位置变化的混合开关频率调制技术[J]. 电气传动, 2021, 51(17): 3.
- [3] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum settings for automatic controllers [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1993, 115(2B): 220.
- [4] COHEN G H, COON G A. Theoretical consideration of retarded control [J]. Trans. ASME, 1953, 75(5): 827.
- [5] 曾国辉,杜涛,黄勃,等. 基于蚁狮优化算法分数阶PI的PMSM矢量控制[J]. 电力电子技术, 2021, 55(5): 120.
- [6] 耿文波,周子昂. 改进粒子群算法优化的BLDCM调速系统研究[J]. 控制工程, 2019, 26(9): 1636.
- [7] 彭颖涛,陆可. 基于模型预测的PMSM速度环PI自整定控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 37.
- [8] HASHIM F A, HOUSSEIN E H, HUSSAIN K, et al. Honey badger algorithm: new metaheuristic algorithm for solving optimization problems [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2022, 192: 84.
- [9] KAPNER D J, COOK T S, ADELBERGER E G, et al. Tests of the gravitational inverse-square law below the dark-energy length scale [J]. Physical Review Letters, 2007, 98(2): 021101.
- [10] 单梁,强浩,李军,等. 基于Tent映射的混沌优化算法[J]. 控制与决策, 2005(2): 179.
- [11] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995(6): 15.
- [12] KOMMULA B N, KOTA V R. Design of MFA-PSO based fractional order PID controller for effective torque controlled BLDC motor [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 49(1): 101644.
- [13] ZHU M, YANG C, LI W. Autotuning algorithm of particle swarm PID parameter based on D-Tent chaotic model [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24(5): 828.
- [14] 符慧. 永磁同步电机转速环PI控制策略研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- [15] CALVINI M, CARPITA M, FORMENTINI A, et al. PSO-based self-commissioning of electrical motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 768.
- [16] 蒋捷,张兴华. 基于改进差分进化算法的PMSM转速PI参数整定[J]. 电力电子技术, 2020, 54(9): 39.
- [17] 王介生,王金城,王伟. 基于粒子群算法的PID控制器参数自整定[J]. 控制与决策, 2005(1): 73.
- [18] 杨智,陈颖. 改进粒子群算法及其在PID整定中的应用[J]. 控制工程, 2016, 23(2): 161.
- [19] 张继荣,张天. 基于改进粒子群算法的PID控制参数优化[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(4): 1035.
- [20] 唐京川. 永磁同步电机FOC算法参数整定与应用[D]. 苏州:苏州大学, 2020.

(下转第92页)