

基于改进鲸鱼优化 PID 的无刷 直流电机转速控制算法

兰淼淼, 胡黄水, 王婷婷, 王宏志

(长春工业大学 计算机科学与工程学院, 长春 130012)

摘要: 针对鲸鱼优化算法易陷入局部最优以及无刷直流电机 (brushless DC motor, BLDCM) 速度控制响应慢、超调量大等缺点, 提出一种改进鲸鱼优化算法 (improve whale optimization algorithm, IWOA) 优化 PID (proportional integral derivative) 参数的无刷直流电机速度控制算法。该算法采用高斯变异因子、自适应权重因子和动态阈值相结合对鲸鱼优化算法进行优化。仿真实验结果表明, 改进鲸鱼优化 PID 的无刷直流电机转速控制算法具有更快的收敛速度以及较小的超调现象, 鲁棒性也更好。

关键词: PID 控制; 改进鲸鱼优化算法; 转速控制; 无刷直流电机

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2024)03-0704-09

Speed Control Algorithm of Brushless DC Motor Based on Improved Whale Optimization PID

LAN Miaomiao, HU Huangshui, WANG Tingting, WANG Hongzhi

(School of Computer Science & Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Aiming at the problems that the whale optimization algorithm was prone to getting stuck in local optima and had drawbacks such as slow speed control response and large overshoot of brushless DC motor, we proposed an improved whale optimization algorithm (IWOA) for optimizing proportional integral derivative (PID) parameters in brushless DC motor speed control. The algorithm combined Gaussian mutation factor, adaptive weight factor, and dynamic threshold to optimize the whale optimization algorithm. The simulation experiment results show that the improved whale optimization PID speed control algorithm of brushless DC motor has faster convergence rate, smaller overshoot phenomenon, and better robustness.

Keywords: PID control; improved whale optimization algorithm; speed control; brushless DC motor

电机转速控制中常见的传统控制算法主要有滑模控制算法 (sliding mode control, SMC)^[1-4]、比例-积分-微分算法 (proportional integral derivative, PID)^[5-6] 和智能优化算法等。滑模控制算法受实际限制的影响, 抖动较大、鲁棒性较差, 而 PID 算法存在较差的准确估计等缺点。智能算法在无刷直流电机中应用广泛, 常见的智能算法包括粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法、狼群算法 (wolf pack algorithm, WPA) 和鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm, WOA)。针对粒子

收稿日期: 2023-06-12.

第一作者简介: 兰淼淼(1998—), 女, 汉族, 硕士研究生, 从事电机控制的研究, E-mail: 1580424330@qq.com. **通信作者简介:** 胡黄水(1971—), 男, 汉族, 博士, 教授, 从事无线传感器网络及轨道车辆动力学的研究, E-mail: huhs08@163.com.

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(批准号: 20210201051GX).

群优化算法存在的迭代次数多以及易陷入局部最优并无法找到最优值的缺点,艾福强等^[7]提出了将粒子群优化算法与模糊PID控制器结合,对其进行优化.针对灰狼算法的缺点,Sun等^[8]提出了一种无轴承永磁同步电机(bearingless permanent magnet synchronous motor, BPMSM)驱动器的优化控制策略和基于灰狼优化算法的状态反馈控制(status feedback control, SFC),两种策略可以更快地响应并无超调.Vesović等^[9]提出将元启发算法(meta-heuristics)的反馈线性化与灰狼优化技术相结合控制直流电机,有效提高了电机的非线性控制和鲁棒性.张铸等^[10]提出基于正太云模型的灰狼优化算法,有效提高了精确性、收敛性和稳定性.相比于前面两种智能优化算法,鲸鱼优化算法具有更好的全局探索能力.Chen等^[11]将Lévy飞行和混沌局部搜索两种策略同步引入鲸鱼优化算法,增强了算法在复杂环境下的优化能力.吴坤等^[12]和刘景森等^[13]提出了将改进智能结合算法引入鲸鱼优化算法,增强了鲸鱼优化算法的开发、搜索和跳出局部最优解的能力.黄清宝等^[14]将余弦控制因子和多项式变异的两种算法引入鲸鱼优化算法,增强了算法的寻优性能,并利用鲸鱼优化算法对自适应PID控制算法的学习率进行优化.冯增喜等^[15]提出了一种融合多策略改进鲸鱼优化算法,有效提高了鲸鱼优化算法的局部开发能力.

针对WOA优化PID算法存在的不足,本文提出采用非线性衰减的高斯变异方法、自适应惯性权重以及动态阈值改进鲸鱼优化算法对PID参数进行调节.改进的鲸鱼优化算法相比其他智能算法在调节PID算法时有较小的超调现象,且能更快到达所设定的转速,有效提高了PID算法的鲁棒性.

1 无刷直流电机数学模型

无刷直流电机控制系统通过采用半导体开关器件组成的电子转换器取代传统的机械换向电刷的方式,实现对电机转速和转向的精确控制.主要组成部分包括功率控制器、电机本体、位置传感器和控制器.

理想电机的数学模型假设电机体满足以下条件^[16]:

- 1) 忽略电机铁芯的饱和;
- 2) 忽略电机内的涡流和磁滞损耗;
- 3) 电机内电流为三相对称正弦电流;
- 4) 不考虑温度、频率变化和绕组阻尼对电阻产生的负面影响.

三相绕组电压方程可表示为

$$u_x = Ri_x + (L - M) \frac{di}{dt} - e_x, \quad (1)$$

其中 u_x 表示定子绕组的相电压, i_x ($x = u, v, w$) 表示定子绕组的相电流, e_x ($x = u, v, w$) 表示定子绕组的反电动势, R 表示相阻抗, L 表示三相绕组的自感, M 表示对互感. 定子绕组产生的电磁转矩为

$$T_e = \frac{e_u i_u + e_v i_v + e_w i_w}{\omega_m}, \quad (2)$$

其中: ω_m 表示无刷直流电机的机械角速度; T_e 表示无刷直流电机的电磁转矩. 电机运动方程^[17-18]为

$$T_e - T_m = B \frac{d\omega_m}{dt} + J\omega_m, \quad (3)$$

其中 T_m, B, J 分别为负载转矩、阻尼系数、转动惯量.

2 改进鲸鱼优化算法

2.1 鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法是受鲸群螺旋收缩式捕食路线的启发而提出的仿生智能算法^[19]. 鲸鱼优化算法主要是参考座头鲸攻击猎物的方式而提出的,座头鲸因为无牙齿,所以进化后通过气泡网攻击猎物,其气泡网攻击原理是通过向上采用螺旋式路径进行收缩包围并向猎物移动.因此将鲸鱼优化PID算法分为3种更新机制:收缩包围猎物、气泡网捕食猎物和搜寻猎物.

包围猎物用计算公式可表示为

$$x(t+1) = x^*(t) - A \cdot D, \quad (4)$$

$$D = |cx^*(t) - x(t)|, \quad (5)$$

$$A = 2a \times r - a, \quad (6)$$

$$C = 2 \times r, \quad (7)$$

$$a = 2 - 2 \frac{t}{T_{\max}}, \quad (8)$$

其中: p, r 为在 $[0, 1]$ 内选取的随机数; a 为鲸鱼优化算法的收敛因子, 迭代次数与其减少存在负相关; T_{\max} 为最大迭代次数; A, D 表示游走方向控制用字母, A 受收敛因子 a 的影响, D 表示猎物与鲸鱼群体中最优个体与猎物的距离, $x^*(t)$ 表示搜索至第 t 代时种群内取得全局最优解的鲸鱼个体位置; $x(t+1)$ 表示搜索至第 $(t+1)$ 代时种群内鲸鱼个体位置; C 表示鲸鱼群包围食物的包围步长.

气泡网捕食的计算公式为

$$x(t+1) = d_1 \times e^{b_i} \times \cos(2\pi l) + x^*(t), \quad (9)$$

$$d_1 = |x^*(t) - x(t)|, \quad (10)$$

其中 d_1 表示鲸鱼群个体与目标食物之间的距离, b_i 表示鲸鱼群螺旋收缩形状常数, l 为 $[-1, 1]$ 内选取的随机数值, π 表示圆周率.

搜寻猎物的计算公式为

$$x(t+1) = x_{\text{rand}}(t) - AD_2, \quad (11)$$

$$D_2 = |Cx_{\text{rand}}(t) - x(t)|, \quad (12)$$

其中 x_{rand} 表示当前种群随机选择的一个个体位置, D_2 表示座头鲸群体中随机一个鲸鱼个体与目标猎物的距离. 鲸鱼种群进行全局探索时, 是根据随机选择的一条鲸鱼进行位置更新, 有效增加了搜索范围并保持了种群的多样性^[20].

尽管 WOA 具有强大的全局搜索能力, 但其自身存在一些缺陷, 它的局部搜索能力和收敛速度相对较弱, 因此易陷入局部最优解, 并且收敛精度不高.

2.2 改进鲸鱼优化算法

对 WOA 中存在的问题进行分析可知, 影响其收敛速度和收敛精度的主要因素是位置更新策略和预防陷入局部最优. 在 WOA 中, 线性变化的收敛因子 a 对调节全局收敛能力和局部开发能力贡献较差, 因此本文提出非线性收敛因子 a 定义为

$$a = 1 - 2\cos\left(\frac{\pi t}{2T_{\max}}\right). \quad (13)$$

随着迭代次数的增加, WOA 在局部寻找最优解时无法正常跳出, 导致过早结束寻找最优解. 针对 WOA 无法正确跳出局部最优解的缺点, 本文将自适应权重策略因子和高斯变异因子引入到 WOA 中. 高斯变异策略因子和自适应权重因子的数学表达式分别为

$$k = 1 - r^{(1-t/T_{\max})^2}, \quad (14)$$

$$w = \sin\left(\frac{\pi t}{2T_{\max}} + \pi\right) + 1, \quad (15)$$

其中 T_{\max} 为最大迭代次数, r 为 $[0, 1]$ 内的随机数, k 为高斯变异的方差, w 为适应权重因子, r 服从均值为 0、方差为 k 的高斯变异因子. 根据高斯分布特征可知, 大多数变异算子都分布在最初始位置的周围, 可有效提升算法的局部搜索能力并优化算法的寻优精度, 解决算法易陷入局部最优问题.

为使鲸鱼优化 PID 算法方便选取更新机制, 将 P 与概率阈值进行比较, 当 $P < 0.5$, 且 $|A| < 1$ 时, 鲸鱼采用包围收缩猎物方式更新位置; 当 $P \geq 0.5$ 时, 采用气泡网捕食和螺旋收缩方式更新位置, 当 $|A| \geq 1$ 时, 采用随机游走搜索猎物方式更新位置.

随着算法运行, 与固定阈值进行比较, 易陷入局部最优解, 因此本文提出一个动态阈值 Q , 能平衡全局搜索和局部开发的能力, 动态阈值和改进后的包围搜索公式分别为

$$Q = 1 + 0.3 \times \left(1 - \frac{t}{T_{\max}}\right), \quad (16)$$

$$x^*(t+1) = \omega x_i(t) + knx_i(t), \tag{17}$$

其中 $x^*(t+1)$ 表示搜索至第 $(t+1)$ 代时种群内鲸鱼群中的最优个体位置。

在实际应用中需要结合适应度函数实现 PID 控制器参数优化, 均方误差和积分绝对值误差是最常用的适应度函数, 本文采用积分绝对值误差作为适应度函数, 以 PID 参数的偏差绝对值与时间乘积的积分作为 PID 参数整定目标函数, 用公式表示为

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt. \tag{18}$$

鲸鱼优化算法的适应度计算公式为

$$fit = \frac{1}{1 + J}. \tag{19}$$

改进的鲸鱼优化算法(IWOA)步骤如下。

步骤 1) 初始化相关参数: 初始化种群规模 number、当前迭代次数、最大迭代次数 T_{max} 、维数 dim。

步骤 2) 计算鲸鱼个体的最优适应度。

步骤 3) 位置更新: 根据式(12)~(14)计算出 k, ω, A, C 等。

步骤 4) 比较 P 值和 Q 值, 选择哪一种更新机制进行位置更新: 当 $P < Q$, 且 $|A| < 1$ 时, 鲸鱼采用包围收缩猎物方式更新位置; 当 $P \geq Q$ 时, 采用气泡网捕食和螺旋收缩方式更新位置; 当 $|A| \geq 1$ 时, 采用随机游走搜索猎物方式更新位置。

步骤 5) 终止判断: 判断位置更新最优值是否优于前一次迭代最佳位置, 若此时迭代次数达到最大迭代次数, 则结束算法; 若未达到要求, 则继续执行步骤 2)~4)。

改进鲸鱼优化 PID 控制算法的流程如图 1 所示, 无刷直流电机控制系统结构如图 2 所示。

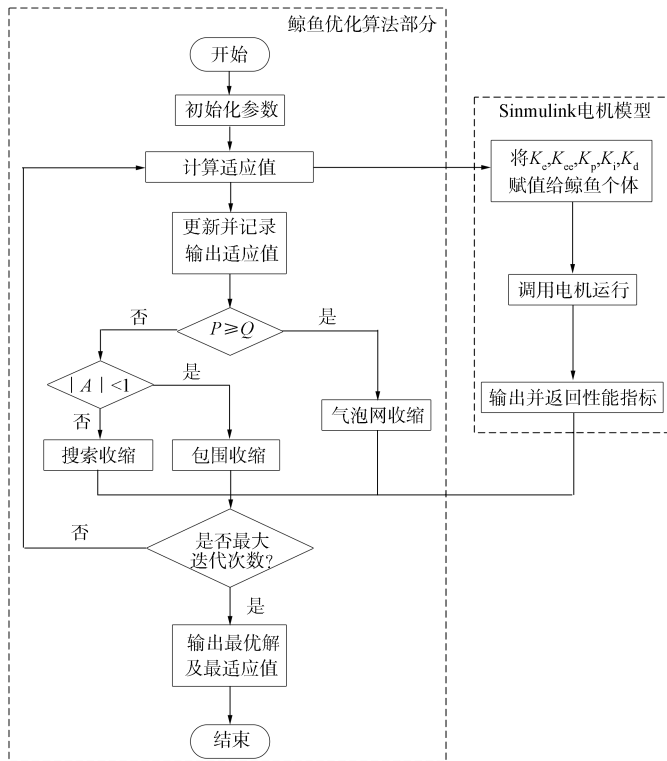


图 1 改进鲸鱼优化 PID 控制算法流程

Fig. 1 Flow chart of improved whale optimization PID control algorithm

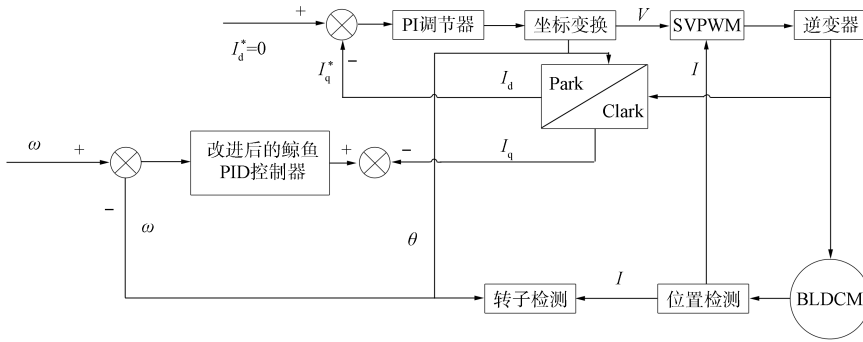


图 2 BLDCM 控制系统结构

Fig. 2 Structure of BLDCM control system

3 仿真实验

本文无刷直流电机模型选用 Matlab/Simulink 平台自带无刷直流电机, 无刷直流电机相关参数如下: 定子相电阻为 2.875Ω , 定子相电感为 8.5 mH , 转动惯量为 $8 \times 10^{-4} (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$, 反电动势常数为 $0.175 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min})$, 阻尼系数为 $1.73 \times 10^{-3} (\text{N} \cdot \text{m})/\text{s}$.

本文提出 3 种转速对比情况, 分别是阶跃无负载、固定负载的恒定转速和阶跃有负载的转速情况. 在每种转速下, 对比 IWOA 与樽海鞘算法 (salp swarm algorithm, SSA)、量子遗传算法 (quantum genetic algorithm, QGA)、免疫遗传算法 (immune genetic algorithm, IGA)^[21]、改进粒子群优化算法 (improve particle swarm arithmetic, IPOS)^[22] 优化 PID 控制无刷直流电机的转速输出图像波形特点.

3.1 有负载的恒定转速

在恒定转速 (1200 rad/s)、 0.2 s 时加入 $5 (\text{N} \cdot \text{m})$ 的负载扰动条件下, 5 种优化 PID 控制的无刷直流电机输出转速对比结果以及抗干扰情况如图 3 所示, 有负载恒定转速时 5 种算法优化 PID 控制的 K_p, K_i, K_d 值及达到平稳时间列于表 1.

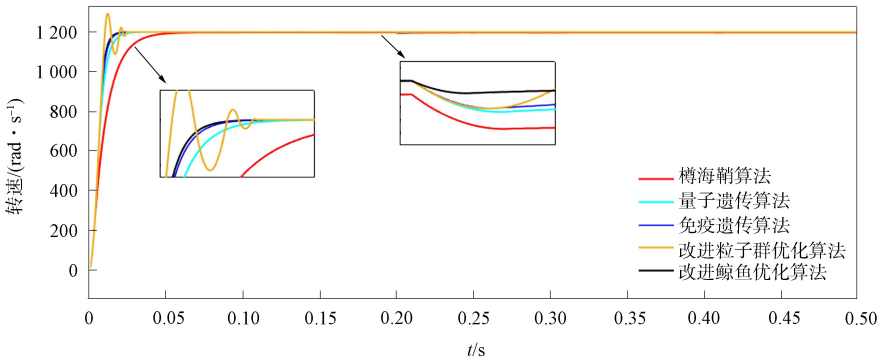


图 3 有负载时不同算法的转速结果

Fig. 3 Speed results of different algorithms under load

表 1 有负载恒定转速时 5 种算法的 K_p, K_i, K_d 值及平稳时间

Table 1 K_p, K_i, K_d values and stationary time of five algorithms under load and constant speed

算 法	K_p	K_i	K_d	平稳时间/s
樽海鞘算法	87.870 0	5.050 0	0.800 0	0.080 0
量子遗传算法	37.100 0	5.070 0	0.150 0	0.026 0
免疫遗传算法	34.500 0	3.010 0	0.100 0	0.250 0
改进粒子群优化算法	100.000 0	1.140 0	0.020 0	0.035 0
改进鲸鱼优化算法	95.160 0	9.060 0	0.250 0	0.020 0

由图 3 和表 1 可见, 在恒定值 1200 rad/s 时, 从 SSA, QGA, IGA, IPSO 和 IWOA 输出的波形图中, 加入高斯变异算子和收敛因子可以使改进鲸鱼优化算法动态地调整搜索波形以加强局部搜索能

力, 改进后的鲸鱼优化算法控制电机输出波形降低了超调现象的出现, 增强了收敛速度. 除 IPSO 优化 PID 控制算法出现超调现象, 其余 4 种优化 PID 控制算法未出现明显超调现象. 与动态阈值相结合的改进鲸鱼优化算法, 随着迭代次数的增加, 前期的收敛速度受影响较小, 到达平稳的时间会更短, 非等概率选择包围方式可使鲸鱼个体在不同搜索时期有更大的概率选择适合当前种群的觅食行为. 因此, 在加入 0.2 s 固定扰动负载时, 改进鲸鱼优化 PID 控制算法抵抗干扰的能力更强, 其他 4 种优化 PID 控制算法抵抗干扰的能力相对较弱.

图 4 和图 5 分别给出了加入负载前、后转速达到平稳状态的稳态误差跟踪曲线. 由图 4 可见, 在 0.15 s 前后, 可变权重的加入可以扰动最优解位置, 靠近搜索领域更容易获得最优解. IWOA 优化 PID 控制算法的误差为 0.01 rad/s, QGA, IGA, SSA 和 IPSO 这 4 种优化 PID 控制的误差分别为 0.03, 0.02, 0.2, 0.1 rad/s, 其不仅存在抗稳定性差的缺点, 而且误差较大. 由图 5 可见, 在 0.45 s 前后, 加入负载后 5 种算法均没有抖动, IPSO 优化 PID 控制算法误差较小. 但 IWOA 优化 PID 控制算法不存在超调现象和抖动现象, 且抵抗干扰的能力更好.

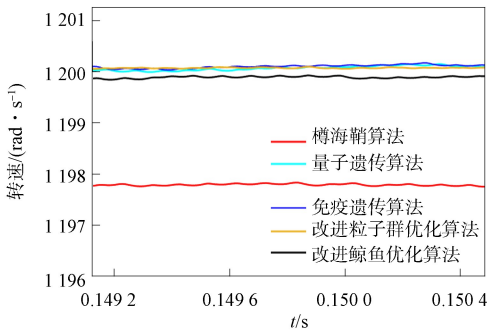


图 4 加入负载前不同算法的输出误差对比

Fig. 4 Comparison of output errors of different algorithms before adding load

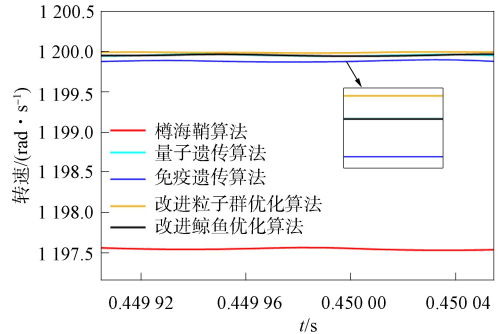


图 5 加入负载后不同算法的输出误差对比

Fig. 5 Comparison of output errors of different algorithms after adding load

3.2 阶跃无负载转速响应对比

将初始转速设为 800 rad/s, 在 0.25 s 时, 将转速提高到 1 200 rad/s. 比较 SSA, QGA, IGA, IPSO 及 IWOA 的转速输出波形图, 结果如图 6 所示. 表 2 列出了阶跃无负载时 5 种算法优化 PID 控制算法的 K_p, K_i, K_d 值及平稳时间.

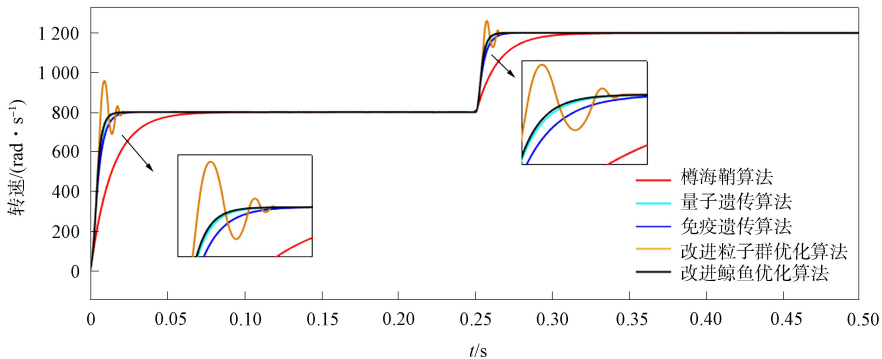


图 6 阶跃无负载时不同算法的转速对比

Fig. 6 Comparison of speed of different algorithms without step load

由图 6 和表 2 可见, 将初始转速设为 800 rad/s, 可变权重可以在前期以较大权重扰动并靠近最优解, 所以改进鲸鱼优化 PID 控制算法能更快达到指定转速. IGA 优化 PID 控制稍差, 而 QGA 和 IPSO 优化 PID 控制算法几乎同时到达指定无刷直流电机转速, 但相对于 IWOA, 优化 PID 控制算法的时间更慢. 在 0.25 s 时, 将转速提高到 1 200 rad/s, IWOA 优化 PID 控制算法到达平稳时间最快, 其次是 IPSO 优化 PID 控制算法, 最后是 SSA 优化 PID 控制算法.

表 2 阶跃无负载时 5 种算法的 K_p, K_i, K_d 值及平稳时间Table 2 K_p, K_i, K_d values and stationary time of five algorithms without step load

算 法	K_p	K_i	K_d	平稳时间/s
樽海鞘算法	23.850 0	3.160 0	0.334 9	0.070 0/0.300 0
量子遗传算法	37.100 0	5.070 0	0.150 0	0.030 0/0.270 0
免疫遗传算法	34.500 0	3.010 0	0.100 0	0.026 0/0.266 0
改进粒子群优化算法	100.000 0	1.140 0	0.020 0	0.030 0/0.265 0
改进鲸鱼优化算法	26.830 0	3.710 0	0.004 5	0.015 0/0.260 0

3.3 阶跃有负载的转速响应对比

仿真时间设定为 0.5 s, 给定初始速度 800 rad/s, 在 0.2 s 时加入 $5(N \cdot m)$ 的负载扰动, 在 0.25 s 时将转速提高到 1 200 rad/s. 比较 SSA, QGA, IGA, IPSO, IWOA 5 种优化 PID 控制算法的无刷直流电机转速输出波形, 结果如图 7 所示. 表 3 列出了阶跃有负载时 5 种算法优化 PID 控制算法的 K_p, K_i, K_d 值及系统平稳时间.

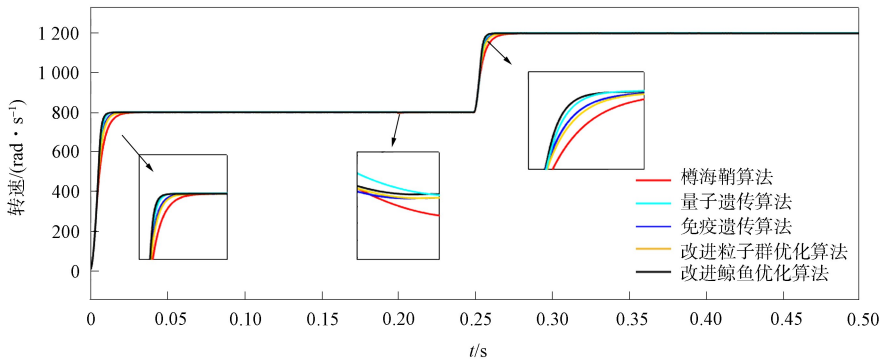


图 7 阶跃有负载时不同算法的转速对比

Fig. 7 Comparison of speed of different algorithms with step load

表 3 阶跃有负载时 5 种算法的 K_p, K_i, K_d 值及平稳时间Table 3 K_p, K_i, K_d values and stationary time of five algorithms with step load

算 法	K_p	K_i	K_d	平稳时间/s
樽海鞘算法	55.330 0	7.470 0	0.230 0	0.020 0/0.270 0
量子遗传算法	26.390 0	17.330 0	0.004 8	0.026 0/0.267 0
免疫遗传算法	97.680 0	3.480 0	0.250 0	0.235 0/0.265 0
改进粒子群优化算法	34.500 0	3.010 0	0.100 0	0.250 0/0.266 0
改进鲸鱼优化算法	41.070 0	6.630 0	0.006 2	0.018 0/0.260 0

由图 7 和表 3 可见, 将初始转速设为 800 rad/s 时, 高斯变异因子和自适应权重因子可以在前期提供较大的值削弱电机超调现象, 平衡全局搜索和局部搜索能力, 缩短搜索时间, 自适应阈值随着迭代次数的增加, 会使个体采用更合适的觅食方式, 增大抗干扰能力, 所以在 0.018 s 达到 800 rad/s. 在 0.2 s 加入负载时, 改进鲸鱼优化算法的抗干扰能力较强. 在 0.25 s 时将电机转速提高到 1 200 rad/s, IWOA 在 0.26 s 达到 1 200 rad/s 且没有超调和震荡现象; IPSO, QGA, IGA 和 SSA 均未出现震荡现象, 但存在收敛速度慢的问题.

图 8 和图 9 分别为加入负载前后转速达到平稳状态的稳态误差跟踪曲线. 由图 8 可见, 各算法均无较大波动, 但 IWOA 优化 PID 控制算法输出转速更靠近 800 rad/s, 而其余优化 PID 控制算法的误差较大. 由图 9 可见, 0.25 s 将转速调整到 1 200 rad/s 且各优化 PID 控制的算法达到平稳后, 观察 0.45 s 前后输出波形图像, 发现这 5 种优化 PID 控制算法均存在抖动现象, 但 IWOA 优化 PID 控制输出误差为 0.4 rad/s, 抖动幅度几乎为 0, 而其他几种优化 PID 控制的算法误差约为 0.15 rad/s, 量子遗传算法的误差约为 2 rad/s.

综上所述, 针对 PID 算法在无刷直流电机转速控制问题上存在的超调和震荡以及抗干扰能力差的

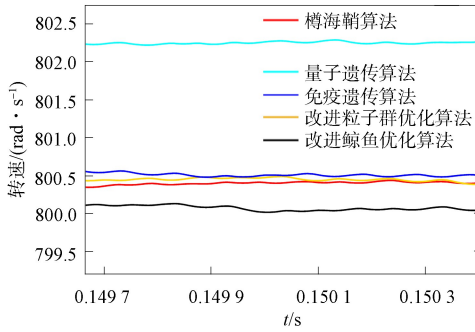


图 8 800 rad/s 平稳后不同算法的误差对比

Fig. 8 Error comparison of different algorithms after stability at 800 rad/s

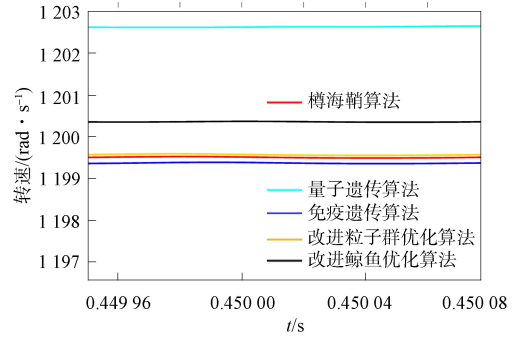


图 9 1200 rad/s 平稳后不同算法的的误差对比

Fig. 9 Error comparison of different algorithms after stability at 1200 rad/s

问题, 结合鲸鱼优化算法全局搜索能力强的优点, 本文提出了一种结合高斯变异、自适应权重和动态阈值的鲸鱼优化 PID 算法, 并采用仿真实验测试了算法的控制性能. 仿真实验结果表明, 本文算法不仅提高了电机转速控制系统的抗干扰能力和鲁棒性, 且克服了鲸鱼优化算法易陷入局部最优解和收敛速度慢的缺点, 更高效和稳定.

参 考 文 献

- [1] QIAN J B, JI C K, PAN N, et al. Improved Sliding Mode Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Regulation System [J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2491-1-2491-10.
- [2] LAYADI N, DJERIOUI A, ZEGHLACHE S, et al. Fault-Tolerant Control Based on Sliding Mode Controller for Double-Star Induction Machine [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(3): 1615-1627.
- [3] KARAMI-MOLLAEE A. A New Structure of Sliding Mode Observer in Dynamic Sliding Mode Control of Generator Torque Wind Turbine [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(12): 5681-5687.
- [4] DIVANDARI M, REZAIE B, RANJBAR NOEI A. Speed Control of Switched Reluctance Motor via Fuzzy Fast Terminal Sliding-Mode Control [J]. Computers & Electrical Engineering, 2019, 80: 106472-1-106472-16.
- [5] 沙林秀, 王凯. 基于 PSO 的钻机快速自适应 PID 控制 [J]. 控制工程, 2021, 28(3): 519-523. (SHA L X, WANG K. A Fast Self-adaptive PID Control Method for Drilling Rig Based on PSO [J]. Control Engineering of China, 2021, 28(3): 519-523.)
- [6] 徐佳雄, 张明, 王阳, 等. 基于 BP 神经网络 PID 控制的恒流充电控制系统 [J]. 控制工程, 2021, 28(5): 851-855. (XU J X, ZHANG M, WANG Y, et al. Energy Storage Capacitor Constant Current Charging Control System Based on BP Neural PID [J]. Control Engineering of China, 2021, 28(5): 851-855.)
- [7] 艾福强, 包建东, 刘正权. 基于粒子群优化模糊 PID 控制的多足式真空吸附机器人控制方案设计 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(2): 67-72. (AI F Q, BAO J D, LIU Z Q. Design of Multi-legged Vacuum Adsorption Robot Control Scheme Based on PSO-Fuzzy PID Control [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(2): 67-72.)
- [8] SUN X D, JIN Z J, CAI Y F, et al. Grey Wolf Optimization Algorithm Based State Feedback Control for a Bearingless Permanent Magnet Synchronous Machine [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 13631-13640.)
- [9] VESOVIĆ M, JOVANOVIĆ R, TRIŠVIĆ N. Control of a DC Motor Using Feedback Linearization and Gray Wolf Optimization Algorithm [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(3): 1-16.
- [10] 张铸, 姜金美, 张小平. 改进灰狼优化算法的永磁同步电机多参数辨识 [J]. 电机与控制学报, 2022, 26(10): 119-129. (ZHANG Z, JIANG J M, ZHANG X P. Multi-parameter Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Improved Grey Wolf Optimization Algorithm [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(10): 119-129.)
- [11] CHEN H L, XU Y T, WANG M J, et al. A Balanced Whale Optimization Algorithm for Constrained Engineering Design Problems [J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 71: 45-59.

- [12] 吴坤, 谭劲昌. 基于改进鲸鱼优化算法的无人机航路规划 [J]. 航空学报, 2020, 41(增刊2): 107-114. (WU K, TAN S C. Path Planning of UAVs Based on Improved Whale Optimization Algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(Suppl 2): 107-114.)
- [13] 刘景森, 马义想, 李煜. 改进鲸鱼优化算法求解工程设计优化问题 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(7): 1884-1897. (LIU J S, MA Y X, LI Y. Improved Whale Algorithm for Solving Engineering Design Optimization Problems [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(7): 1884-1897.)
- [14] 黄清宝, 李俊兴, 宋春宁, 等. 基于余弦控制因子和多项式变异的鲸鱼优化算法 [J]. 控制与决策, 2020, 35(3): 559-568. (HUANG Q B, LI J X, SONG C N, et al. Whale Optimization Algorithm Based on Cosine Control Factor and Polynomial Mutation [J]. Control and Decision, 2020, 35(3): 559-568.)
- [15] 冯增喜, 李嘉乐, 葛珣, 等. 融合多策略改进鲸鱼优化算法及其应用 [J/OL]. 计算机集成制造系统, (2023-01-05) [2023-03-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/111.5946.tp.20230104.1215.014.html>. (FENG Z X, LI J L, GE X, et al. Integrating Multi-strategy Improved Whale Optimization Algorithm and Its Application [J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, (2023-01-05) [2023-03-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/111.5946.tp.20230104.1215.014.html>.)
- [16] SHEN Y, ZHANG C, SOLEIMANIAN G F, et al. An Improved Whale Optimization Algorithm Based on Multi-population Evolution for Global Optimization and Engineering Design Problems [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 215: 119269-1-119269-34.)
- [17] 杨明晖, 李生权, 李喆, 等. 基于超螺旋算法的永磁同步电动机直接转矩自抗扰控制 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(6): 680-684. (YANG M H, LI S Q, LI Z, et al. Active Disturbance Rejection Controller of Direct Torque for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Super-Twisting Sliding Mode [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43(6): 680-684.)
- [18] 梁军, 赵磊, 盘朝奉, 等. 基于灰狼优化算法的茶园拖拉机转角控制器 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 539-546. (LIANG J, ZHAO L, PAN C F, et al. Steering Controller of Tea Garden Tractor Based on Grey Wolf Optimization Algorithm [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43(5): 539-546.)
- [19] 徐航, 张达敏, 王依柔, 等. 混合策略改进鲸鱼优化算法 [J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(12): 3397-3404. (XU H, ZHANG D M, WANG Y R, et al. Hybrid Strategy to Improve Whale Optimization Algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(12): 3397-3404.)
- [20] 许德刚, 王再庆, 郭奕欣, 等. 鲸鱼优化算法研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2023, 40(2): 328-336. (XU D G, WANG Z Q, GUO Y X, et al. Review of Whale Optimization Algorithm [J]. Application Research of Computers, 2023, 40(2): 328-336.)
- [21] HU H S, WANG T T, ZHAO S Y, et al. Speed Control of Brushless Direct Current Motor Using a Genetic Algorithm: Optimized Fuzzy Proportional Integral Differential Controller [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(11): 1-13.
- [22] XU L, ZHAO S, LI N, et al. Application of QGA-BP for Fault Detection of Liquid Rocket Engines [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(5): 2464-2472.

(责任编辑: 韩 啸)