

负载突变下矿用电机车永磁同步电机控制研究^{*}赵婷婷¹ 王爽^{1,2,3} 杨宇豪^{1,3} 许谨辉^{1,3} 刘子强^{1,3}

(1.安徽理工大学煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室 淮南 232001;2.安徽理工大学矿山智能技术与装备省部共建协同创新中心 淮南 232001;3.安徽理工大学机电工程学院 淮南 232001)

摘要:为针对煤矿电机车井下复杂工况导致的永磁同步电机控制抗干扰能力不足、系统精度差与收敛速度慢的问题,提出一种基于改进蜣螂-鱼鹰算法的BP神经网络PID的智能控制方法。首先,将改进蜣螂算法与鱼鹰算法结合起来,设计一种改进蜣螂-鱼鹰算法,鱼鹰算法的全局搜索策略替代蜣螂算法的滚球阶段;其次,再引入正弦学习因子提高算法勘探能力,动态螺旋搜索提高算法的全局搜索性能,自适应 t 分布扰动和分段函数方法跳出局部最优,提高解的质量。该算法对BP神经网络的学习因子和惯性因子进行优化,使得神经网络更加快速输出PID最佳参数;最后,添加电压前馈解耦来抵消永磁同步电机耦合项,提高永磁同步电机动态响应。通过Matlab/Simulink仿真和RT-LAB半实物平台的实验,对改进蜣螂-鱼鹰算法BP神经网络PID控制器与传统PID控制器进行对比分析,仿真结果表明:当负载转矩发生突变后,目标转速为1200 r/min时,改进蜣螂-鱼鹰算法BP神经网络PID控制器相较于传统PID控制恢复时间以及超调量分别减少约98.3%、66%,实验结果表明:负载突增和转速突变时,相对于PID控制、PSO控制、BAS-PID控制,IDBO-OOA-PID转速控制转速波动更小、转速回到设定值时间更短、电流响应更平稳,验证了IDBO-OOA-PID转速控制器具有较好的抗干扰能力、稳定性、鲁棒性。

关键词: 煤矿井下电机车;永磁同步电机;蜣螂算法;BP神经网络**中图分类号:** TM351;TN830 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 440.65

Research on permanent magnet synchronous motor control of mining locomotive under load mutation

Zhao Tingting¹ Wang Shuang^{1,2,3} Yang Yuhao^{1,3} Xu Jinhui^{1,3} Liu Ziqiang^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Digital and Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Collaborative Innovation Center for Mining Intelligent Technology and Equipment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to solve the problems of insufficient anti-interference ability, poor system accuracy and slow convergence speed of permanent magnet synchronous motor control caused by complex underground working conditions of coal mine electric locomotive, an intelligent control method of BP neural network PID based on improved dung beetle-ospree algorithm was proposed. Firstly, the improved dung beetle algorithm and the ospree algorithm were combined to design an improved dung beetle-ospree algorithm, and the global search strategy of the ospree algorithm replaced the rolling ball stage of the dung beetle algorithm. Secondly, the sinusoidal learning factor is introduced to improve the exploration ability of the algorithm, the dynamic spiral search improves the global search performance of the algorithm, and the adaptive t -distribution perturbation and piecewise function methods jump out of the local optimal to improve the quality of the solution. The algorithm optimizes the learning factor and inertia factor of the BP neural network, so that the neural network can output the best PID parameters more quickly. Finally, the voltage feedforward decoupling is added to offset the coupling term of the permanent magnet synchronous motor and improve the dynamic response of the permanent magnet synchronous motor. Through Matlab/Simulink simulation and RT-LAB experiments on the semi-physical platform, the BP neural network PID controller of the improved dung beetle-ospree algorithm is compared with the traditional PID controller, and the results show that when the target speed is 1200 r/min after the load torque is abrupt, the recovery time and overshoot of the improved dung beetle-ospree algorithm BP neural network PID controller are reduced by about 98.3% and 66%, respectively, compared with the traditional PID control. The experimental results show that compared with PID control, PSO control and BAS-PID control, the IDBO-OOA-PID speed control speed fluctuation is smaller, the speed return time to the set value is shorter, and the current response is more stable when the load burst and speed are abrupt. It is verified that the IDBO-OOA-PID speed controller has good anti-interference ability, stability and robustness.

Keywords: underground coal mine electric locomotive; PMSM; dung beetle algorithm; BP neural network

0 引言

煤矿井下电机车是井下巷道运输的重要设备,它承担

着生产设备、煤矸、人员等重要运输任务^[1]。与传统异步电机相比,永磁同步电机具有体积小、效率高、可靠性强和损耗低等优点,适用于井下巷道狭窄、行驶路面不平整等复杂

收稿日期:2024-12-23

^{*} 基金项目:国家自然科学基金面上项目(52274152)、安徽省高校杰出青年科研项目(2022AH020056)、安徽省自然科学基金优秀青年科研基金(2308085Y37)项目资助

环境^[2],但永磁同步电机控制存在因控制算法简单和参数设置不当导致响应速度慢和过度振荡的问题。

永磁同步电机控制技术可分为传统控制策略、现代控制策略和智能控制策略等。传统控制是以比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制为代表的电机控制技术, PID 控制因易于实现控制被广泛应用在实际生活中。永磁同步电机现代控制包括模糊 PID 控制、滑膜变结构控制和自抗扰控制,模糊 PID 控制具有较高控制精度但依赖于专家经验^[3],滑膜控制具有良好的抗扰动性但系统会有高频震荡^[4],自抗扰控制拥有优越的抗干扰能力但其参数较多且调整时依赖较多的实验和经验^[5]。近些年来,以神经网络结合 PID 控制为代表的智能控制方法成为了研究热点,群智能算法的应用于 PID 参数整定,克服了传统 PID 参数整定方法在快速调整参数和动态变化适应差的局限性。Pham 等^[6]针对 PMSM 转速变化问题,采用模糊 PI 控制器提高系统响应能力。张肖江等^[7]设计一款引入动量项的神经网络结合 PID 控制器应用在永磁同步电机上,相较于传统 PID 控制器,减少了曲线局部震荡。王同旭等^[8]将反向传播(back propagation, BP)神经网络与 PID 控制结合起来,运用在电梯的永磁同步电机中,电机的控制性得到大幅提升,满足电梯高精度的控制要求。汪旭东等^[9]提出一种粒子群参数全局寻优的在线自整定 PID 控制器,比传统 PID 控制器具有更好的鲁棒性和动态响应。郑瑞等^[10]提出一种 BP 神经网络与智能 PID 滑模观测器相结合控制,提高了永磁同步电机速度控制的动态性能。高宇星等^[11]提出鲸鱼优化算法结合小波神经网络与 PID 控制器结合,引用 Morlet 函数替代神经网络中的 Sigmoid 函数,改善了永磁同步电机动态性能和稳态精度。乔维德等^[12]设计出一种融合算法,将果蝇算法和蛙跳算法结合在一起,利用模糊神经网络输出 PID 最优参数,实现更精确的永磁直线同步电机速度控制。Arshad 等^[13]引入人工蜂群算法对 PID 控制器参数进行优化,提高了速度跟踪性能。Schenke 等^[14]提出了一种综合的超参数优化算法,解决了 Deep Q-Network 算法的多自由度问题,应用在 PMSM 的转矩控制。Wang 等^[15]将深度确定性策略梯度算法与粒子群算法相结合来确定 PID 控制器的参数,该方法提高了电机的速度控制性能。群体智能算法优化的 PID 控制器设计,广泛应用于永磁同步电机控制系统中。虽然群体智能算法优化 PID 控制广泛应用在电机控制中,但依然存在一些问题,粒子群算法面对复杂环境时自适应能力差, BP 神经网络算法参数调整困难,天牛须算法动态响应速度慢。尽管现有研究在永磁同步电动机的速度控制方面取得了显著进展,但在 PID 控制策略中,群体智能算法的潜力仍有待进一步开发。

基于以上研究,为提高 PMSM 动态响应速度和控制精度,本文以永磁同步电机转速控制为研究对象,在传统 PID 算法的基础上加入改进蜣螂-鱼鹰算法,优化 BP 神经网络,

并通过 MATLAB/Simulink 仿真实验证明,本文基于改进蜣螂-鱼鹰算法优化 BP 神经网络 PID 算法的矢量控制系统,具有较好的动态响应速度和控制精度,验证改进后电机调速控制系统应用于煤矿井下电机车用 PMSM 调速系统具有有效性和正确性。

1 煤矿电机车永磁同步电机数学模型

三相永磁同步电机是一个强耦合且复杂的非线性系统,为了简化设计,在不影响控制性能的前提下,假设三相永磁同步电机是理想电机,不计电机中涡流和磁滞损耗,且不考虑外界因素对绕组电阻的影响,设定电机中产生对称的三相正弦电流。根据假设,为符合实际工况,同步旋转坐标系 d - q 轴下的考虑磁饱和和永磁同步电机定子电压方程如下^[16]:

$$\begin{cases} U_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + L_{dq1} \frac{di_q}{dt} - \omega_r (L_q i_q + L_{qd1} i_d) \\ U_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_{qd1} \frac{di_d}{dt} + \omega_r (L_d i_d + L_{dq1} i_q + \varphi_f) \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d I_d + L_{dq1} i_q + \psi_f \\ \psi_q = L_q I_q + L_{qd1} i_d \end{cases} \quad (2)$$

此时电磁转矩方程可写为:

$$T_e = 3/2 p_n (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q + L_{dq1} i_q^2 - L_{qd1} i_d^2) \quad (3)$$

式中: I_d 、 I_q 为两相同步旋转坐标系下的 d 轴、 q 轴的定子电流, U_d 、 U_q 为两相同步旋转坐标系下的 d 轴、 q 轴的定子电压, R 是定子的电阻, φ_d 、 φ_q 是定子磁链在 d - q 的分量, ω_r 是旋转坐标系下电机转子角速度, L_d 和 L_q 是 d 轴、 q 轴的等效电枢电感, L_{dq1} 和 L_{qd1} 是 d 轴、 q 轴的不对称电感, T_e 是永磁同步电机电磁转矩, p_n 是电机极对数, ψ_f 是永磁体磁链。

从永磁同步电机的数学模型可以看到 d 轴电压和 q 轴电压存在耦合关系,为消除 d - q 轴电流耦合,本文添加了电压前馈解耦来抵消耦合项。加入电压前馈的电压方程为:

$$\begin{cases} U'_d = U_d + \omega_r L_q i_q \\ U'_q = U_q - \omega_r L_d i_d - \omega_r \varphi_f \end{cases} \quad (4)$$

综上, PMSM 矢量控制框图如图 1 所示。

2 改进蜣螂-鱼鹰算法优化 BP 神经网络 PID 控制

2.1 改进蜣螂-鱼鹰算法

受到蜣螂的行为过程的启发, Xue 等^[17]于 2022 年提出的一种新型群体智能优化算法,命名为蜣螂优化算法(dung beetle optimizer, DBO)。相对于其他群体智能优化算法,蜣螂优化算法根据蜣螂职责把种群分为滚球蜣螂、繁育蜣螂、觅食小蜣螂、偷窃蜣螂 4 种,分别有搜索移动、传递信

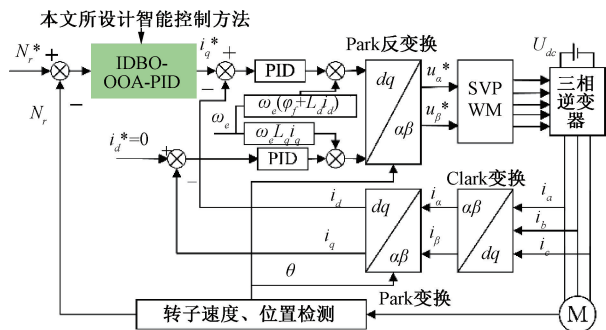


图 1 PMSM 矢量控制框图

Fig. 1 The vector control block diagram of PMSM

息、跳出局部最优解以及引入新策略的作用。蜣螂优化算法在优化问题和收敛速度上比其他算法优秀,但它存在容易陷入局部最优和全局探索能力较弱的缺点^[18]。

Dehghani 等^[19]提出的一种鱼鹰优化算法(osprey optimization algorithm, OOA),是一种新型群体智能优化算法,具有全局优化能力,可以有效探索搜索空间,避免陷入局部最优。鱼鹰优化算法包括两个阶段,探索阶段和开发阶段,在探索阶段中达到高效搜索、充分利用局部信息和灵活动态调整的效果。鱼鹰优化算法的探索阶段公式为如下:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + r_{i,j} (SF_{i,j} - I_{i,j} x_i^t) \quad (5)$$

式中: x_i^{t+1} 表示探索阶段第 $t+1$ 次迭代时第 i 个鱼鹰位置信息, $r_{i,j}$ 表示区间为 $[0,1]$ 的随机数; $SF_{i,j}$ 表示第 i 个鱼鹰在鱼群中随机选定鱼的位置; $I_{i,j}$ 表示为集合 $\{1,2\}$ 的随机整数。

结合 DBO 与 OOA 优点,本文提出改进蜣螂-鱼鹰算法,鉴于 OOA 具有较强的空间搜索能力,将 OOA 的探索阶段引入蜣螂算法的滚球蜣螂阶段,作为 DBO-OOA 算法的全局搜索机制。DBO 算法在算法运行后期能够快速收敛,保持多样性,可以提高蜣螂-鱼鹰算法收敛速度和鲁棒性。为改进 DBO-OOA 算法,本文使用正弦学习因子、动态螺旋搜索、自适应 t 分布扰动和分段函数方法,进一步提升 DBO-OOA 算法的综合能力。

1) 正弦学习因子策略

遇到障碍物的滚球蜣螂通过跳舞获得新的路线,蜣螂优化算法中移动方向由正切函数确定,这种方式在滚球蜣螂位置更新上存在缺陷,本文将正弦学习因子结合到遇到障碍物的滚球蜣螂的位置中,这样可以提升算法的搜索精度,提高了勘探能力。原始滚球蜣螂遇到障碍时公式如下:

$$X_i^{t+1} = x_i^t + \tan(\theta) \times |x_i^t - x_i^{t-1}| \quad (6)$$

式中: $\theta \in [0, \pi]$ 。

加入正弦学习因子的遇到障碍物的滚球蜣螂的公式如下:

$$\begin{cases} X_i^{t+1} = w \times x_i^t + (1-w) \times \tan(\theta) \times |x_i^t - x_i^{t-1}| \\ w = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \times \sin(i \times \pi / \text{Max}_{i-t}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: w 是正弦学习因子, $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$ 分别为学习因子的最

大值 1 和最小值 0, Max_{i-t} 是为迭代的最大次数。

2) 动态螺旋搜索策略

蜣螂在繁育阶段选择一个产卵区域进行产卵,蜣螂卵的位置被严格限制在特定范围内,这导致蜣螂优化算法会快速收敛和降低种群多样性,容易陷入局部最优。在蜣螂繁育阶段加入动态螺旋搜索策略,使得蜣螂提升了探索未知区域的能力,帮助算法跳出局部最优,从而提高算法的全局搜索性能。原始蜣螂繁育公式为如下:

$$X_i^{t+1} = X^* + b_1 \times (B_i^t - Lb^*) + b_2 \times (B_i^t - Ub^*) \quad (8)$$

式中: X^* 是当前局部最佳位置, X_i^{t+1} 是卵球的位置, b_1 和 b_2 是独立随机向量, Lb^* 和 Ub^* 是最佳受食位置的下界和上界。

动态螺旋搜索思想来源于鲸鱼算法,通过螺旋搜索围捕猎物^[20],在动态螺旋搜索引入控制螺旋形状的搜索形状参数 r ,调整螺旋形状,使得螺旋线随着迭代次数增加其形状由大变小,提升算法的全局搜索性能,公式如下:

$$\begin{cases} X_i^{t+1} = X^* + e^{rt} \times \cos(2\pi t) \times (B_i^t - Lb^*) \times \\ b_1 + e^{rt} \times \cos(2\pi t) \times b_2 \times (B_i^t - Ub^*) \\ r = e^{\cos(\frac{\pi \times t}{\text{Max}_{i-t} \times \text{iteration}})} \end{cases} \quad (9)$$

3) 自适应 t 分布扰动策略

蜣螂优化算法在迭代后期逐渐趋于收敛,种群搜索能力大幅减弱,很容易陷入局部最优值,为使算法跳出局部最优,本文采用自适应 t 分布扰动提高算法的全局搜索能力和算法收敛速度^[21]。自适应 t 分布扰动又称学生分布,标准高斯分布和柯西分布构成了 t 分布的两个边界。自适应 t 分布结合了柯西变异较强的全局搜索能力,还拥有高斯分布较强的局部开发能力。原始小蜣螂觅食公式为如下:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + C_1(x_i^t - Lb^b) + C_2 |x_i^t - Ub^b| \quad (10)$$

式中: x_i^{t+1} 是小蜣螂位置信息, C_1 服从正态分布的随机数, C_2 是一个 $0 \sim 1$ 的随机向量, Lb^b 和 Ub^b 是最优受食区域的下界和上界。

自适应 t 分布扰动优化小蜣螂觅食后的位置更新公式如下:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + x_i^t \times t(\text{iter}) \quad (11)$$

式中: $t(\text{iter})$ 表示以迭代次数 iter 作为自由度的 t 分布。

4) 分段函数方法

小偷蜣螂将其他蜣螂最优值更新成自己位置最优值,提高搜索效率。为增强小偷蜣螂全局探索能力,采用分段函数改进,在迭代前期扰动幅值较大,产生大步长跳出当前位置,迭代后期扰动值变小,在全局最优位置进行局部扰动。

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^t + \sin z \times S \times g \times \{|x_i^t - X^*| + |x_i^t - X^b|\}, t \leq \frac{T_{\max}}{2} \\ X^b + \sin z \times S \times g \times \{|x_i^t - X^*| + |x_i^t - X^b|\}, t > \frac{T_{\max}}{2} \end{cases} \quad (12)$$

$$z = \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{3} \times (1 - \frac{t}{T_{\max}}) \quad (13)$$

2.2 改进蜣螂-鱼鹰算法优化 BP 神经网络 PID 控制设计

PID 控制不能满足 PMSM 高精度速度控制和快速响应的要求,本文将 IDBO-OOA 算法与 BP 神经网络 PID 控制相结合,运用 IDBO-OOA 算法的优秀全局探索能力,结合神经网络学习能力,得到最优的控制效果。

1) PID 控制

PID 控制是一种最常用的闭环控制方法,本文选用误差对系统影响较小的增量式 PID,其公式如下:

$$\Delta u(k) = K_p(e(k) - e(k-1)) + K_I e(k) + K_D(e(k) + 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (14)$$

式中: $u(k)$ 是输出控制量, $\Delta u(k)$ 是 $u(k)$ 与 $u(k-1)$ 的偏差, $e(k)$ 期望值与实际值的偏差值。

2) BP 神经网络

本文设计 BP 神经网络的输入层由期望值 $rin(k)$ 、实际值 $y(k)$ 和系统偏差 $e(i)$ 组成,输出层输出 K_p 、 K_I 和 K_D 。图 2 为 BP 神经网络结构图,BP 神经网络是 3-8-3 的 3 层网络结构。

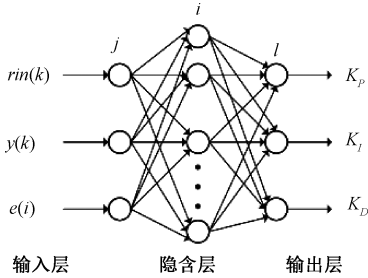


图 2 BP 神经网络结构图

Fig. 2 The structure diagram of BP neural network

为加快 BP 神经网络收敛速度和抑制震荡,在网络连接权的迭代关系式中增加一个全局极小的惯性值 α ,权值修正公式为:

$$\Delta w_{ii}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial \Delta w_{ii}^{(3)}} + \alpha \Delta w_{ii}^{(3)}(k-1) \quad (15)$$

式中: η 是学习因子, α 为惯性因子, $E(k)$ 是输出性能指标函数。

3) IDBO-OOA 算法优化 BP 神经网络

初始化种群后,个体随机分布于解空间内。将 IDBO-OOA 算法引入 BP-PID 控制器中,由于在迭代过程神经网络的学习因子 η 和惯性因子 α 的取值影响算法性能^[22],利用 IDBO-OOA 算法对 η 和 α 进行全局寻找最优参数,保证算法收敛于全局最优解。计算个体在作为 BP 神经网络学习因子和惯性因子配置时的适应度值。根据适应度值,对蜣螂的位置进行更新,使其逐步向最优解靠近。该过程将持续迭代,直至满足结束条件。

4) IDBO-OOA 算法优化 BP 神经网络应用于 PID 控制

将改进蜣螂-鱼鹰算法优化 BP 神经网络作为前馈网络,利用输出结果作为 PID 控制器的参数,包括比例系数 K_p 、积分系数 K_I 和微分系数 K_D 。整个控制环节主要由 3 个部分组成:(1)PID 控制器。由图 3 可知,需要调节的参数包括 PID 控制器的参数。(2)BP 神经网络。将 BP 神经网络和 PID 控制相结合,当整个学习过程完成,最终可得到 PID 参数。(3)改进蜣螂-鱼鹰算法。图 3 是 IDBO-OOA-PID 控制器原理方框图。

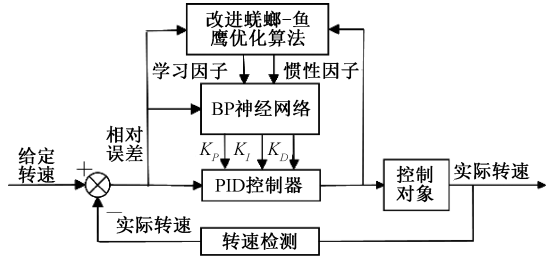


图 3 IDBO-BP-PID 控制器结构

Fig. 3 Structure of BP neural network PID controller

2.3 IDBO-OOA-PID 控制器执行步骤

图 4 是 IDBO-OOA-PID 算法执行步骤图。

3 永磁同步电机调速系统仿真与实验

3.1 参数设置

为验证文中所述策略的有效性与优越性在 MATLAB/SIMULINK 下搭建仿真模型,其中仿真中电机参数具体如下:极对数 $P_n=4$,定子电阻 $R=0.958 \Omega$,磁链 $\Psi_f=0.1827 \text{ Wb}$,定子 d 轴电感 $L_d=5.25 \text{ mH}$,定子 q 轴电感 $L_q=12 \text{ mH}$,转动惯量 $J=0.003 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,阻尼系数 $B=0.008 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ 。在 IDBO-OOA 算法参数设置中,群规模 N 为 20、维度 dim 为 5、迭代次数为 10。BP 神经网络的结构为 3-8-3。仿真条件设置为:直流侧电压 $U_{dc}=311 \text{ V}$,PWM 开关频率 $f_{\text{pwm}}=10 \text{ kHz}$,采样周期 $T_s=10 \mu\text{s}$ 。图 5 为学习因子和惯性因子最优参数,图 6 为算法最优个体适应值。

如图 5 所示, IDBO-OOA 算法得出的最优参数为: $x_{\text{ite}}=0.4231$, $\alpha=0.05697$, IDBO-OOA 算法在第 4 次迭代后快速收敛。

如图 6 所示,最优个体适应值在 3 次迭代快速收敛,并保持较低的适应值,最优个体适应值为 0.03126。

3.2 仿真实验

本文模拟井下矿井车无负载启动、突加负载和转速突变 3 种情况,将 PID 控制、智能 BP-PID 控制、群体智能天牛须(beetle antennae search algorithm, BAS)优化 PID 控制、群体智能粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)优化 PID 控制和 IDBO-OOA-PID 控制的永磁同步电机调速系统进行仿真比较。

1) 无负载启动工况

设定仿真时间 0.4 s,分别给定永磁同步电机转速 800、

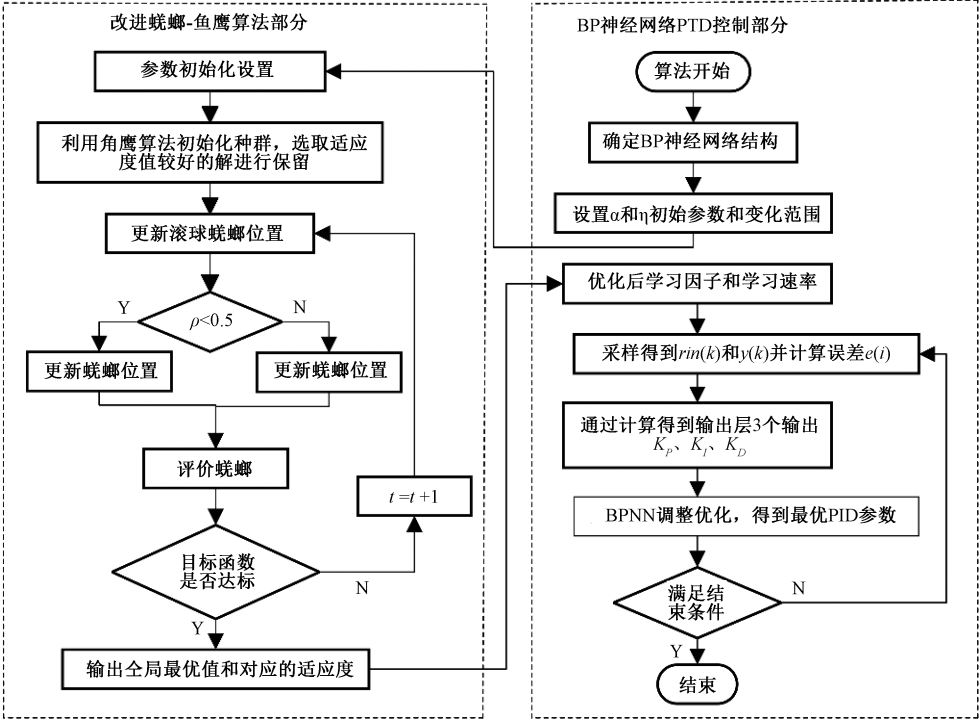


图 4 IDBO-OOA-PID 算法执行步骤

Fig. 4 IDBO-OOA-PID algorithm execution procedure

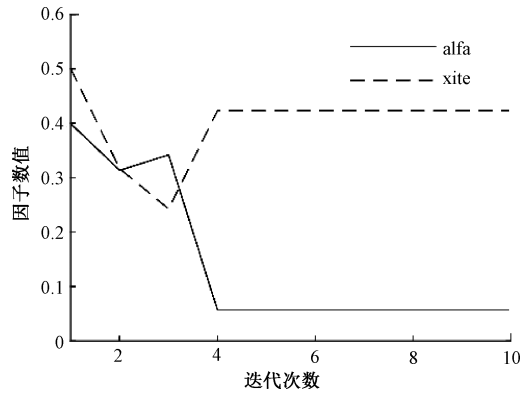


图 5 学习因子和惯性因子最优参数

Fig. 5 Optimal parameters of learning and inertia factors

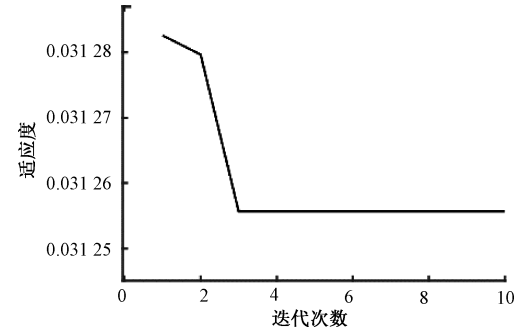


图 6 最优个体适应值

Fig. 6 Optimal individual fitness value

1 000 和 1 200 r/min,对 5 种控制器进行对比试验,得到 5 种不同转速下的电机转速响应曲线,图 7 为空载条件下永磁同步电机输出响应对比图,图 8 为空载条件下 800 r/min 永磁同步电机转矩图,图 9 为空载条件下 1 000 r/min 永磁同步电机转矩图,图 10 为空载条件下 1 200 r/min 永磁同步电机转矩图。空载条件下 5 种 PID 控制永磁同步电机起动性能指标对比如表 1 所示。

由图 7 可知,在 800、1 000 和 1 200 r/min 3 种转速下,采用的 IDBO-OOA-PID 控制器比 PID 控制、BP-PID 控制、BAS-PID 控制和 PSO-PID 控制超调量更小,恢复时间更短,电机起动速度下,IDBO-OOA-PID 控制器具有更好的速度响应,且抖振更为轻微。

由图 8~10 可知,在 800、1 000 和 1 200 r/min 3 种转速下,相比于 PID 控制、BP-PID 控制、PSO-PID 控制,IDBO-OOA-PID 控制的电机转矩响应更快,恢复速度更快,转矩波动范围更小,稳定运行时转动脉动更小,相较于 BAS-PID 控制,IDBO-OOA-PID 控制虽然恢复速度较慢,但转矩波动范围更小。

如表 1 所示,当目标转速为 800 r/min 时,相比于传统 PID 控制、BP-PID 控制、群体智能控制 BAS-PID 和 PSO-PID,采用 IDBO-OOA-PID 控制器的电机速度调节时间分别降低了 0.045、0.016、0.062 和 0.002 s,超调量分别降低了 16.86%、12.46%、10.19% 和 7.64%。当转速为 1 000 r/min 时,相比于 PID 和 BP-PID、BAS-PID 和 PSO-

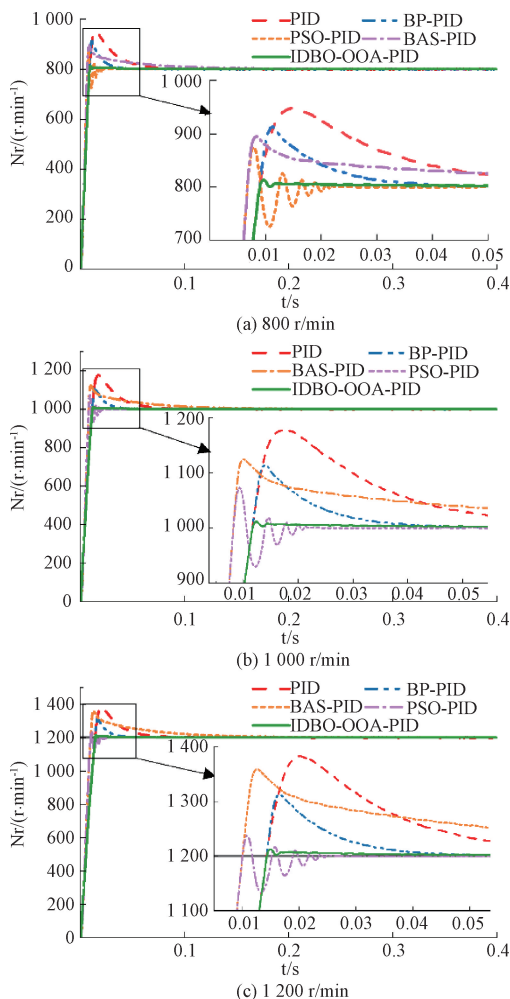


图7 空载条件下永磁同步电机输出响应对比
Fig.7 Comparison of output response of PMSM under no-load condition

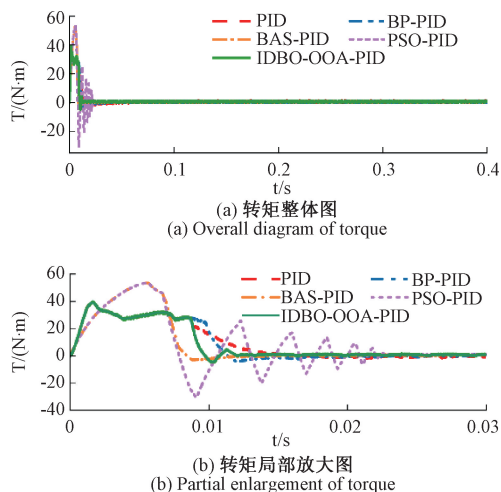


图8 空载条件下800 r/min 永磁同步电机转矩图
Fig.8 Torque diagram of PMSM at 800 r/min under no-load conditions

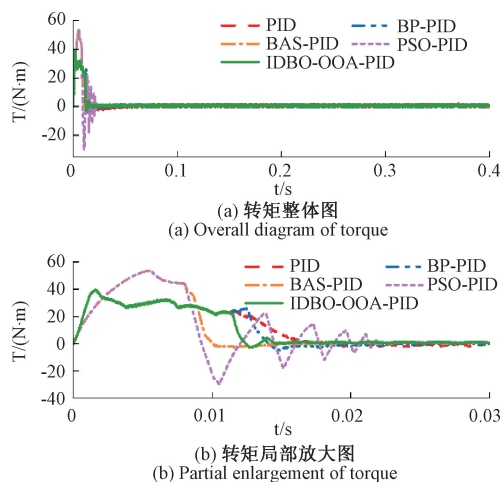


图9 空载条件下1000 r/min 永磁同步电机转矩图
Fig.9 Torque diagram of PMSM at 1000 r/min under no-load conditions

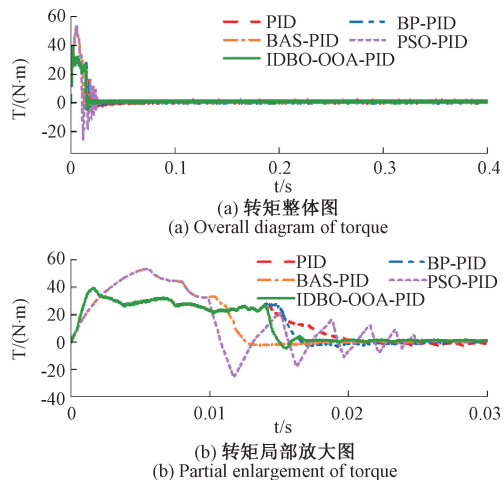


图10 空载条件下1200 r/min 永磁同步电机转矩图
Fig.10 Torque diagram of PMSM at 1200 r/min under no-load conditions

PID控制,采用IDBO-OOA-PID控制的电机速度调节时间分别降低了0.103、0.016、0.071和0 s,超调量分别降低了16.6%、10.3%、11.3%和6.2%。当转速为1200 r/min时,相比于PID、BP-PID、BAS-PID和PSO-PID控制,采用IDBO-OOA-PID控制器的电机速度调节时间降低了0.039、0.013、0.075和0.001 s,超调量分别降低了14.17%、8.34%、12.17%、2.09%。相较于其他4种控制,IDBO-OOA-PID控制器达到稳定时间和超调量都更小。

2) 突加负载工况

为了进一步验证IDBO-OOA-PID算法的控制效果,进行了突加负载实验。设定仿真时间0.4 s,分别给定永磁同步电机转速800、1000和1200 r/min,在0.2 s突加负载转矩10 N·m。分别采用PID控制、BP-PID控制、BAS-

表 1 空载条件下永磁同步电机起动性能指标

Table 1 Starting performance index of PMSM under no-load condition

目标转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	控制器	峰值 时间/s	调节 时间/s	超调量/ %
800	PID	0.015	0.057	18.52
	BP-PID	0.011	0.028	14.12
	BAS-PID	0.008	0.074	11.85
	PSO-PID	0.008	0.014	9.30
	IDBO-OOA-PID	0.010	0.012	1.66
1 000	PID	0.017	0.057	17.7
	BP-PID	0.014	0.030	11.4
	BAS-PID	0.010	0.085	12.4
	PSO-PID	0.009	0.014	7.3
	IDBO-OOA-PID	0.012	0.014	1.1
1 200	PID	0.02	0.056	15.25
	BP-PID	0.016	0.030	9.42
	BAS-PID	0.012	0.092	13.25
	PSO-PID	0.011	0.018	3.17
	IDBO-OOA-PID	0.015	0.017	1.08

PID 控制、PSO-PID 控制和 IDBO-OOA-PID 控制永磁同步电机,图 11 为负载条件下永磁同步电机输出响应对比图,图 12 负载条件下 800 r/min 永磁同步电机转矩图,图 13 负载条件下 1 000 r/min 永磁同步电机转矩图,图 14 负载条件下 1 200 r/min 永磁同步电机转矩图,表 2 为负载条件下 5 种 PID 控制永磁同步电机起动性能指标对比。

由图 11 可知,在 800、1 000 和 1 200 r/min 3 种转速下,当电机在 0.2 s 突加负载时,除了 PSO-PID 控制在 1 000 r/min 时的调节时间比 IDBO-OOA-PID 控制时间短 0.001 s,其他情况下 IDBO-OOA-PID 控制突加负载后最先达到目标值,调节时间最短,超调量最小。

由图 12~14 可知,在 800、1 000 和 1 200 r/min 3 种转速下,当 0.2 s 转矩突增为时 10 N·m, PID 控制、BP-PID 控制、BAS-PID 控制过度到稳定状态较慢, PSO-PID 控制超调量大且震荡明显, IDBO-OOA-PID 控制整体震荡较小且转矩恢复速度更快,降低了转矩脉动。

由表 2 可知,当电机转速在 800 r/min 时,在 0.2 s 突加负载转矩 10 N·m,相比于 PID 控制、BP-PID 控制、BAS-PID 控制和 PSO-PID 控制,采用 IDBO-OOA-PID 控制器的电机动态降落分别降低了 4.7%、0.3%、0.2%、0,恢复时间分别降低 0.066、0.003、0.024、0 s。当目标转速为 1 000 r/min 时,相比于 PID、BP-PID、BAS-PID 和 PSO-PID 控制,采用 IDBO-OOA-PID 控制器的电机速度动态降落分别降低了 3.9%、0.3%、0.2%、0.1%,恢复时间分别降低 0.065、0.026、0.013 s 和升高 0.001 s。当目标转速为 1200 r/min 时,相比于 PID、BP-PID、BAS-PID 和 PSO-

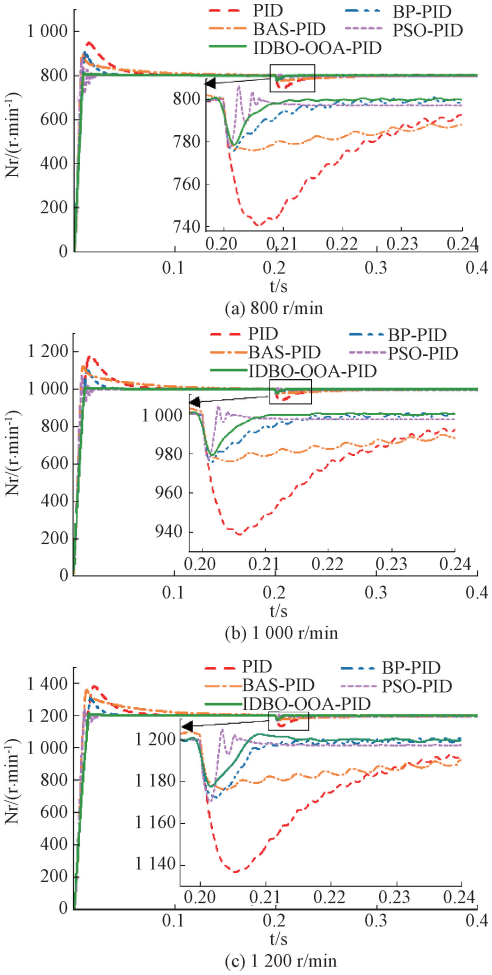


图 11 负载条件下永磁同步电机输出响应对比图
Fig. 11 Comparison of output response of PMSM under load condition

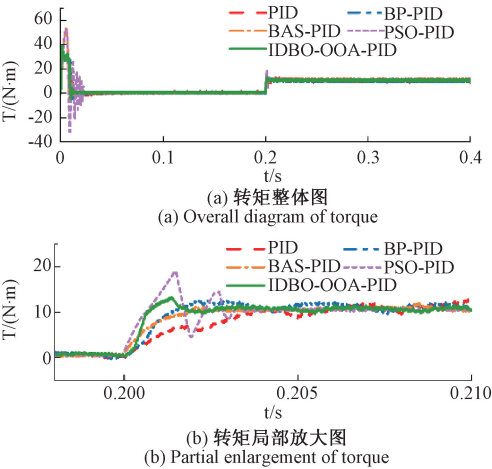


图 12 负载条件下 800 r/min 永磁同步电机转矩图
Fig. 12 Torque diagram of PMSM at 800 r/min under load conditions

PID 控制,采用 IDBO-OOA-PID 控制器的电机速度动态

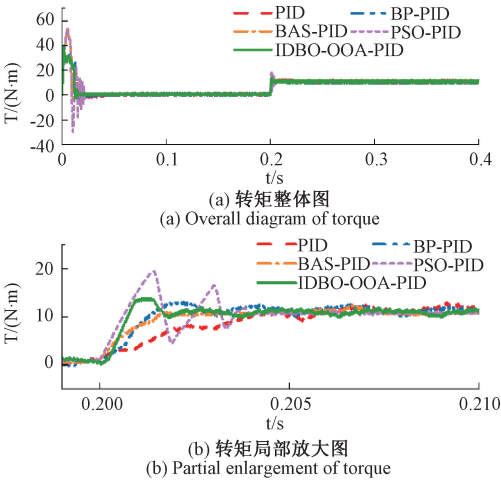


图 13 负载条件下 1 000 r/min 永磁同步电机转矩图
Fig. 13 Torque diagram of PMSM at 1 000 r/min under load conditions

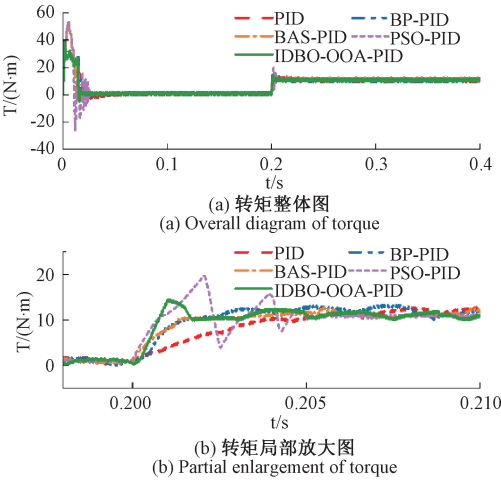


图 14 负载条件下 1 200 r/min 永磁同步电机转矩图
Fig. 14 Torque diagram of PMSM at 1 200 r/min under load conditions

降落分别降低了 3.5%、0.5%、0.2%、0.7%，恢复时间分别降低 0.050、0.013、0.003、0.001 s。

3)转速突变工况

为了模拟井下矿用电机车遇到障碍物紧急刹车的工况,进行了转速突变实验。设定仿真时间 0.4 s,在启动分别给定永磁同步电机转速 800、1 000 和 1 200 r/min,在 0.2 s 转速突变为 0 r/min。分别采用 PID 控制、BP-PID 控制、BAS-PID 控制、PSO-PID 控制和 IDBO-OOA-PID 控制永磁同步电机,图 15 为转速突变下永磁同步电机输出响应对比图,图 16 为转速突变下 800 r/min 永磁同步电机转矩图,图 17 为转速突变下 1 000 r/min 永磁同步电机转矩图,表 3 为转速突变下永磁同步电机起动性能指标。

如图 15 所示,当电机转速在 800 r/min 时,在 0.2 s 速度降至 0 r/min,相比于 PID 控制、BP-PID 控制、BAS-PID

表 2 负载条件下永磁同步电机起动性能指标

Table 2 Starting performance index of PMSM under load condition

目标转速/ (r·min ⁻¹)	控制器	动态降落/ %	恢复 时间/s
800	PID	7.5	0.068
	BP-PID	3.1	0.005
	BAS-PID	3.0	0.026
	PSO-PID	2.8	0.002
	IDBO-OOA-PID	2.8	0.002
1 000	PID	6.1	0.067
	BP-PID	2.5	0.028
	BAS-PID	2.4	0.015
	PSO-PID	2.3	0.001
	IDBO-OOA-PID	2.2	0.002
1 200	PID	5.3	0.059
	BP-PID	2.3	0.014
	BAS-PID	2.0	0.003
	PSO-PID	2.5	0.002
	IDBO-OOA-PID	1.8	0.001

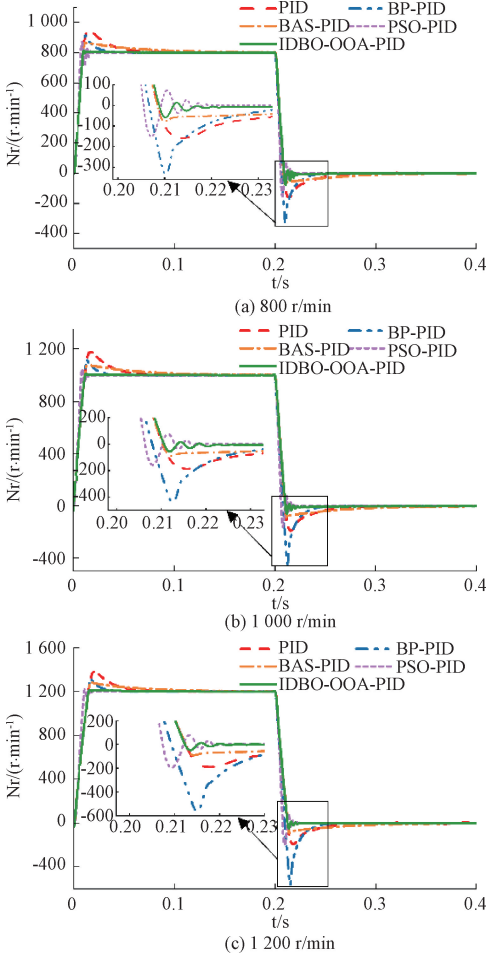
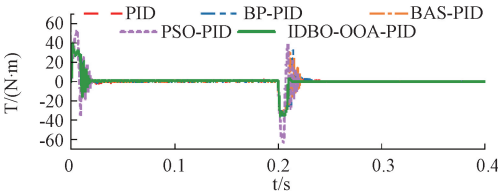
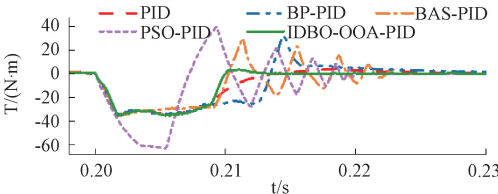


图 15 转速突变下永磁同步电机输出响应对比图
Fig. 15 Comparison of output response of PMSM under the sudden change of speed



(a) 转矩整体图

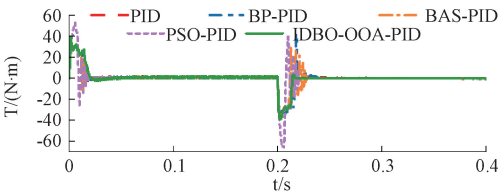


(b) 转矩局部放大图

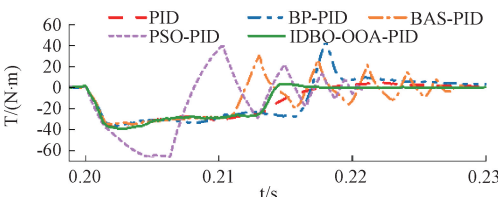
(b) Partial enlargement of torque

图 16 转速突变下 800 r/min 永磁同步电机转矩图

Fig. 16 Torque diagram of PMSM at 800 r/min under the sudden change of speed



(a) 转矩整体图



(b) 转矩局部放大图

(b) Partial enlargement of torque

图 17 转速突变下 1 000 r/min 永磁同步电机转矩图

Fig. 17 Torque diagram of PMSM at 1 000 r/min under the sudden change of speed

控制和 PSO-PID 控制,采用 IDBO-OOA-PID 控制器的电机速度最大速度均小于其他控制算法,转速波动小,超调量最小。

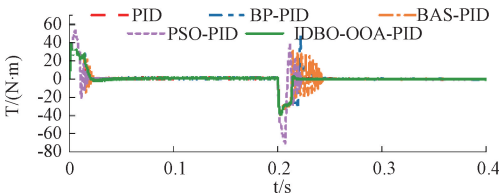
由图 16~18 可知,在 800、1 000 和 1 200 r/min 3 种转速下,当 0.2 s 速度为 0 r/min 时,IDBO-OOA-PID 控制整体震荡较小且转矩恢复速度更快,转矩更加平稳,性能表现优于其他的控制算法。

由表 3 可知,当电机转速在 800 r/min 时,在 0.2 s 转速突变为 0 r/min,相比于 PID 控制、BP-PID 控制、BAS-PID 控制和 PSO-PID 控制,采用 IDBO-OOA-PID 控制器的电机急停最大转速分别降低了 90.5、258.4、2.7、78 r/min,急停最大转矩分别增加 1.3、3.9、0.1、27.3 N·m。当目标转速为 1 000 r/min 时,相比于 PID、BP-PID、BAS-PID 和 PSO-PID 控制,采用 IDBO-OOA-PID 控制器的电

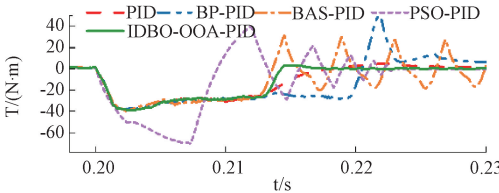
表 3 转速突变下永磁同步电机起动性能指标

Table 3 Starting performance index of PMSM under the sudden change of speed

目标转速/ (r·min ⁻¹)	控制器	急停最大转 速/(r·min ⁻¹)	急停最大转 距/(N·m)
800	PID	164.7	34.3
	BP-PID	332.6	31.7
	BAS-PID	76.9	35.5
	PSO-PID	152.2	62.9
	IDBO-OOA-PID	74.2	35.6
1 000	PID	187.8	39.0
	BP-PID	434.7	43.0
	BAS-PID	90.7	34.2
	PSO-PID	155.6	65.5
	IDBO-OOA-PID	73.4	39.0
1 200	PID	191.2	39.1
	BP-PID	563.1	57.6
	BAS-PID	92.2	39.3
	PSO-PID	197.1	70.1
	IDBO-OOA-PID	67.5	38.7



(a) 转矩整体图



(b) 转矩局部放大图

(b) Partial enlargement of torque

图 18 转速突变下 1 200 r/min 永磁同步电机转矩图

Fig. 18 Torque diagram of PMSM at 1 200 r/min under the sudden change of speed

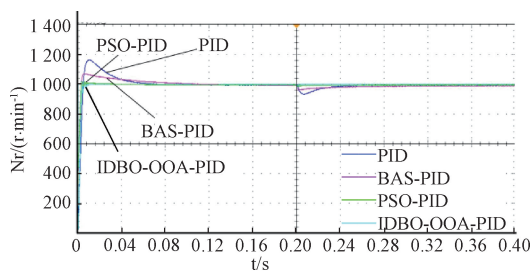
机速度急停最大转速分别降低了 114.4、361.3、17.3、82.2 r/min,急停最大转矩分别降低 0 N·m、降低 4 N·m、增加 4.80 N·m、降低 26.5 N·m。当目标转速为 1 200 r/min 时,相比于 PID、BP-PID、BAS-PID 和 PSO-PID 控制,采用 IDBO-OOA-PID 控制器的电机速度急停最大转速分别降低了 123.7、495.6、24.7、129.6 r/min,急停最大转矩分别降低 0.4、18.9、0.6、31.4 N·m。

由此得出,相较于 PID 控制、智能 BP-PID 控制、群体智能 BAS-PID 控制和 PSO-PID 控制,IDBO-OOA-PID 控

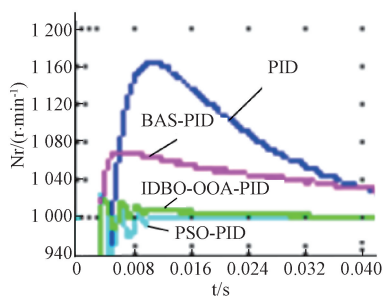
制转速突变为0时速度调节能力更好,整体性能更佳,虽然在急停时最大转矩表现不佳,但转矩恢复稳态最快。总体上IDBO-OOA-PID控制抗干扰能力更强,提高了系统的鲁棒性。

3.3 实验验证

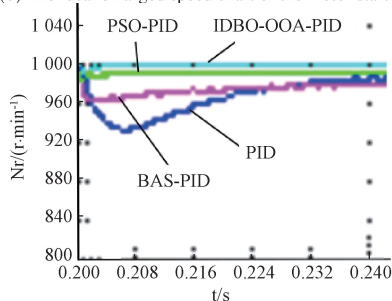
为验证所提出IDBO-OOA-PID控制在现实工程中的有效性,在RT-Lab半实物仿真平台进行实验。图19为负载突变下1000 r/min永磁同步电机示波器图像,图20为转速突变下1000 r/min永磁同步电机示波器图像。



(a) 电机突加负载转速整体图
(a) The overall diagram of the speed of the motor with sudden load



(b) 电机起动局部放大转速图
(b) The local enlarged speed chart of the motor starting



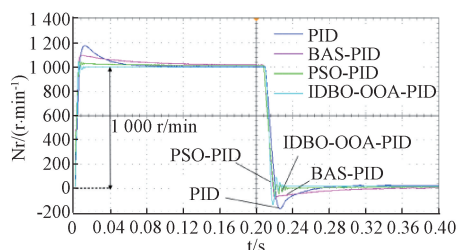
(c) 电机突加负载局部放大图
(c) Partial enlargement of the sudden load of the motor

图19 负载突变下1000 r/min永磁同步电机示波器图

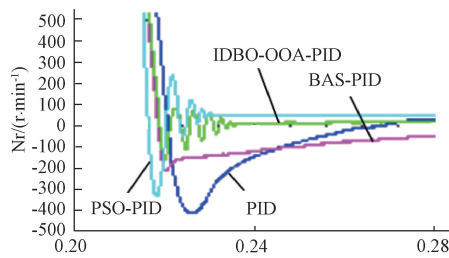
Fig. 19 Oscilloscope diagram of 1000 r/min PMSM under sudden load change

如图19所示,突加负载下PID控制、BAS-PID控制和PSO-PID控制和IDBO-OOA-PID控制下负载由0 N·m突变为10 N·m, IDBO-OOA-PID控制启动时更好的速度响应和更小超调量,突加负载时转速超调量最小,转矩脉动较低。

如图20所示,PID控制、BAS-PID控制和PSO-PID控制和IDBO-OOA-PID控制下在0.2 s时转速由1000 r/min突变为0 r/min,由图20可知,IDBO-OOA-PID控制在0.2 s



(a) 电机转速突变整体图
(a) Overall diagram of sudden change in motor speed



(b) 电机转速突变局部放大图
(b) Local enlarged diagram of sudden change in motor speed

图20 转速突变下1000 r/min永磁同步电机示波器图

Fig. 20 Oscilloscope diagram of 1000 r/min PMSM under sudden speed change

转速突变下,速度超出量最小,转矩抖振更轻微。

通过对比仿真图和实验图,可以观察到总体实验控制效果与仿真效果相一致。因此,IDBO-OOA-PID控制在启动、突加负载和转速突变3种工况下具有更好的控制性能。

4 结论

针对矿用电机车的永磁同步电机控制在不确定扰动下总体控制性能不佳的问题,本文提出一种改进蜣螂-鱼鹰算法优化PID控制方法,在不同工况下进行实验验证,得出以下结论:1)本文针对蜣螂算法易陷入局部最优的不足,提出了多策略增强的改进蜣螂-鱼鹰算法(IDBO-OOA),首先用鱼鹰算法的全局搜索策略替代蜣螂算法的滚球阶段,提高探索空间的能力;其次,再引入具有周期性和对称性的正弦学习因子提高收敛速度,动态螺旋搜索调整算法的步长和方向,自适应 t 分布扰动能根据情况进行自适应扰动,分段函数方法跳出局部最优,使得算法具有灵活性;2)针对井下巷道狭窄、行驶路面不平整等复杂环境导致矿用电机车永磁同步电机控制抗干扰能力不足、系统精度差与收敛速度慢的问题,提出一种改进蜣螂-鱼鹰算法优化PID控制。实验结果表明,IDBO-OOA-PID控制方法在800、1000、1200 r/min目标转速下,启动后比传统PID控制超调量减少91%、93.8%、92.9%,调节时间分别提高了78.9%、75.4%、69.6%,当突加负载情况下启动后比PID控制超调量减少62.7%、63.9%、62.3%,恢复时间分别提高了97.1%、97%、94.9%,当转速突变情况下比

PID 超出最大转速减少 90.525、114.4、123.7 r/min。与现有的智能控制方法 BP-PID、BAS-PID、PSO-PID 相比, IDBO-OOA-PID 控制具有更强的综合性能, 速度调节能力、抗干扰能力更强, 提高系统的鲁棒性。较好地提升了永磁同步电机的响应速度, 降低了起动和突加负载时超调量, 提高了矿用电机在负载扰动和转速突变下的控制性能, 具有较好控制精度; 3) 相比于 PID、BP-PID、BAS-PID 与 PSO-PID 控制, IDBO-OOA-PID 控制能抑制抖振, 转矩恢复更快, 降低了转矩脉动。

参考文献

- [1] 冯爱军. 中国城市轨道交通 2021 年数据统计与发展分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(2): 336-341.
FENG AI J. Statistical data and development analysis of urban rail transit in China in 2021[J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2022, 42(2): 336-341.
- [2] 吕从鑫, 汪波, 陈静波, 等. 永磁同步电机控制策略综述与展望[J]. 电气传动自动化, 2022, 44(4): 1-10.
LYU C X, WANG B, CHEN J B, et al. Review and prospects of control strategies for permanent magnet synchronous motors[J]. Electrical Drive Automation, 2022, 44(4): 1-10.
- [3] 禹聪, 康尔良. 永磁同步电机模糊滑模无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(1): 87-94.
YU C, KANG ER L. Sensorless fuzzy sliding mode control of permanent magnet synchronous motors[J]. Journal of Electric Machines and Control, 2024, 28(1): 87-94.
- [4] 李昂, 袁佳俊, 赵峰, 等. 永磁同步电机改进滑模观测器矢量控制[J]. 电子测量技术, 2023, 46(6): 37-43.
LI ANG, YUAN J J, ZHAO F, et al. Improved sliding mode observer vector control for permanent magnet synchronous motors [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(6): 37-43.
- [5] 邱建琪, 留若宸. 永磁同步电机位置伺服系统改进自抗扰控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(11): 42-50.
QIU J Q, LIU R CH. Improved active disturbance rejection control for position servo system of permanent magnet synchronous motors[J]. Journal of Electric Machines and Control, 2019, 23(11): 42-50.
- [6] PHAM Q K, HO P H A. Advanced PMSM speed control using fuzzy PI method for hybrid power control technique[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2023, DOI: 10.1016/j.asej.2023.102222.
- [7] 张肖江, 周春桂, 王志军, 等. 基于 BP 神经网络 PID 的水下无人航行器舵机驱动智能控制系统[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(2): 109-114.
ZHANG X J, ZHOU CH G, WANG ZH J, et al. Intelligent control system for servo drive of underwater unmanned vehicles based on BP neural network PID[J]. Journal of Detection and Control, 2023, 45(2): 109-114.
- [8] 王同旭, 马鸿雁, 聂沐晗. 电梯用永磁同步电机 BP 神经网络 PID 调速控制方法的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 43-47.
WANG T X, MA H Y, NIE M H. Research on BP neural network PID speed control method for permanent magnet synchronous motors used in elevators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 43-47.
- [9] 汪旭东, 夏涛, 许孝卓, 等. 永磁同步直线电机的粒子群 PID 空间矢量控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 655-661.
WANG X D, XIA T, XU X ZH, et al. Particle swarm PID space vector control for permanent magnet synchronous linear motors[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(5): 655-661.
- [10] 郑瑞, 张继祥, 董学松, 等. 永磁同步电机 BP 神经网络-智能 PID 滑模观测矢量控制算法[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(5): 124-131.
ZHENG R, ZHANG J X, DONG X S, et al. BP neural network-intelligent PID sliding mode observation vector control algorithm for permanent magnet synchronous motors[J]. Journal of Detection and Control, 2024, 46(5): 124-131.
- [11] 高宇星, 景会成, 葛超, 等. 基于鲸鱼算法小波神经网络 PID 的 PMSM 转速控制[J]. 电子测量技术, 2023, 46(23): 161-167.
GAO Y X, JING H CH, GE CH, et al. Speed control of PMSM based on whale optimization algorithm and wavelet neural network PID [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(23): 161-167.
- [12] 乔维德. 基于果蝇-蛙跳模糊神经网络 PID 的永磁直线同步电机控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(11): 55-60, 71.
QIAO W D. Control of permanent magnet linear synchronous motors based on fruit fly-frog jump fuzzy neural network PID[J]. Application of Electric Motor and Control, 2017, 44(11): 55-60, 71.
- [13] ARSHAD M H, ELSAYED A H, et al. Artificial bee colony optimized self-tuning PI speed controller for FCS-MPCC of permanent magnet synchronous machines[C]. 2020 First International Conference of Smart Systems and Emerging Technologies (SMARTTECH), 2020: 220-226.
- [14] SCHENKE M, WALLSCHEID O. A deep q-learning direct torque controller for permanent magnet

- synchronous motors[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2021, 2: 388-400.
- [15] WANG C S, GUO C W C, TSAY D M, et al. PMSM speed control based on particle swarm optimization and deep deterministic policy gradient under load disturbance[J]. Machines, 2021, 9(12): 343-361.
- [16] 陈瀚. 基于全速度范围的永磁同步电机无传感器控制研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2020.
- CHEN H. Research on sensorless control of PMSM at full speed range[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology,2020.
- [17] XUE J K, SHEN B. Dung beetle optimizer: A new metaheuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79 (7): 7305-7336.
- [18] 赵鑫,王东丽,彭泓,等. 基于多策略改进蜣螂算法优化的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制,2024, 52(6):120-130.
- ZHAO X, WANG D L, PENG H, et al. Transformer fault diagnosis optimized by multi-strategy improved dung beetle algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 120-130.
- [19] DEHGHANI M, TROJOVSKY P. Osprey optimization algorithm: A new bio-inspired metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems [J]. Frontiers in Mechanical Engineering,2023,8:1126450.
- [20] 罗潇远,刘杰,杨斌,等. 基于改进鱼鹰优化算法与 VMD-LSTM 的超短期风电功率预测[J/OL]. 太阳能学报,1-9[2025-03-21]. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1942>.
- LUO X Y, LIU J, YANG B, et al. Ultra-short-term wind power prediction based on improved osprey optimization algorithm and VMD-LSTM [J/OL]. Journal of Solar Energy, 1-9[2025-03-21]. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1942>.
- [21] 王梓辰,窦震海,董军,等. 多策略改进的自适应动态鲸鱼优化算法[J]. 计算机工程与设计,2022,43(9): 2638-2645.
- WANG Z CH, DOU ZH H, DONG J, et al. Multi-strategy improved adaptive dynamic whale optimization algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2022, 43(9): 2638-2645.
- [22] 陈炫儒,吴立飞,杨晓忠. 基于改进麻雀搜索算法的分数阶 PID 参数整定[J]. 控制与决策,2024,39(4): 1177-1184.
- CHEN X R, WU L F, YANG X ZH. Fractional order PID parameter tuning based on improved sparrow search algorithm [J]. Control and Decision, 2024, 39(4): 1177-1184.

作者简介

赵婷婷,硕士研究生,主要研究方向为辅助运输。

E-mail:1789857133@qq.com

王爽(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为煤矿机器人。

E-mail:shuangw094@126.com