

引用格式:安世硕,高海,李维军,等.基于改进鲸鱼算法的收卷张力PID控制的性能优化[J].辽宁石油化工大学学报,2024,44(4):91-96.

AN Shishuo, GAO Hai, LI Weijun, et al. Performance Optimization of Winding Tension PID Control Based on Improved Whale Algorithm[J].Journal of Liaoning Petrochemical University, 2024, 44(4):91-96.

基于改进鲸鱼算法的收卷张力PID控制的性能优化

安世硕¹, 高海², 李维军¹, 唐静¹, 张文才¹

(1.辽宁石油化工大学机械工程学院,辽宁抚顺113001; 2.中煤科工集团沈阳研究院有限公司煤矿安全技术国家重点实验室,辽宁抚顺113122)

摘要: PID控制器的参数决定张力控制系统的稳定性和速度,因此研究收卷张力控制中经典PID控制器参数整定优化问题具有重要意义。以卷绕张力系统为切入点,结合PID和改进的鲸鱼优化算法,设计了基于改进鲸鱼算法(L-WOA)的PID张力控制器;为了提高PID整定参数方法的收敛精度和速度,在进行整定时结合了改进鲸鱼算法;建立数学模型和动态转矩平衡方程,分析了线速度和卷径对卷材张力的影响;分别使用改进鲸鱼算法和其他多种算法进行了参数优化。仿真结果表明,采用改进鲸鱼算法优化PID的控制策略具有响应速度快、控制输出稳定、抗干扰能力强、鲁棒性好等优点。

关键词: 恒张力控制; PID参数整定; 改进鲸鱼优化算法

中图分类号:TH122

文献标志码:A

doi:10.12422/j.issn.1672-6952.2024.04.012

Performance Optimization of Winding Tension PID Control Based on Improved Whale Algorithm

AN Shishuo¹, GAO Hai², LI Weijun¹, TANG Jing¹, ZHANG Wencai¹

(1.School of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning 113001, China;

2.State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, China Coal Technology & Engineering Group Shenyang Research Institute, Fushun Liaoning 113122, China)

Abstract: The parameters of PID controller determine the stability and speed of tension control system, so it is important to study the parameter tuning optimization of classical PID controller in winding tension control. The PID tension controller based on the modified whale algorithm is designed by combining PID and modified whale optimization algorithm with winding tension control as an entry point. The improved whale algorithm (L-WOA) is combined with PID in order to improve its convergence speed and convergence accuracy when rectifying the PID parameters. A mathematical model and a dynamic torque balance equation are developed to analyze the effect of wire speed and web diameter on web tension. The parameters are optimized using the modified whale algorithm and various other algorithms, respectively, and the results show that the PID controller optimized by the improved whale algorithm proposed in this paper has the advantages of rapid response, more steady output, sturdy anti-interference ability and better robustness when the PID controller is controlled.

Keywords: Constant tension control; PID parameter tuning; Improved whale optimization algorithm

随着工业的高速发展,收卷设备在工业生产中占据了很大一部分比重。在收卷过程中,为了保证收卷效果的稳定性和准确性,多数采用电机主动收卷的方式。因为随着收卷的运行,卷材的卷径会逐

渐增大,因此需要实时调整电机转动的角速度,同时确保线速度恒定不变,这样才能在收卷的过程中始终保持稳定的张力。为了提高精度和准确性,多数都采用PID控制器进行控制,而控制系统的性能

收稿日期:2023-05-18 修回日期:2023-06-20

基金项目:辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220739)。

第一作者:安世硕(1998-),男,硕士研究生,从事机电控制方面的研究;E-mail:1015747032@qq.com。

通信作者:李维军(1977-),男,硕士,副教授,从事机电控制方面的研究;E-mail:lwjxs@163.com。

完全取决于PID的 K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数的设定值^[1], (K_p 为比例系数, K_i 为积分时间常数, K_d 为微分时间常数)。在参数优化方面, 很多学者进行了研究和实验。陈永庆^[2]采用Z-N算法进行了参数优化。结果表明, 该方法较为简单, 适配性强, 但是优化的参数不够理想。梁入云等^[3]采用模糊神经网络进行了参数优化, 计算精度有了进一步的提升。之后, 在PID参数优化中结合了越来越多的智能优化算法。F.L.CAO^[4]基于遗传算法对参数进行了整定优化, 计算速度和稳定性有了进一步的提升。郭鹏程等^[5]基于改进蚁群算法对PID参数进行优化, 使控制系统具有更快的响应速度和更好的稳定性。B.A.KOUASSI等^[6]基于人工鱼群算法对参数进行优化, 增加了整定机制的动态性并改善了其基本行为, 同时优化算法有更快的响应速度、更短的调整时间、更小的超调量。这些算法在整定计算上的精度有了极大的提升, 但是存在部分容易陷入过早收敛和陷入局部最优等缺点。

由于鲸鱼算法(WOA)^[7]具有机制简单、参数较少、寻优能力强等优点, 因此加入鲸鱼算法可实现对PID参数的最优整定, 智能算法的引入可以极大地缩短参数调试的时间。但是, 基础的WOA算法存在一定的弊端, 其收敛速度较慢, 并且容易陷入局部最优, 因此基于此需要对基础的WOA算法进行优化改进。本文将PID控制与改进的鲸鱼算法(L-WOA)相结合, 设计了基于L-WOA的PID控制器, 以期提高控制系统的稳定性、计算速度和控制效果。

1 收卷张力控制

为了构造收卷端张力控制系统^[8], 首先绘制出收卷端在稳定运行时的运行受力图。收卷端受力图如图1所示。图1中, 速度 v 为收卷时的线速度, ω 为放卷辊的角速度。随着收卷过程的进行, 卷径会逐步增大, 为了使线速度能够维持稳定, 需要实时调整电机, 增大放卷辊的角速度 ω 。

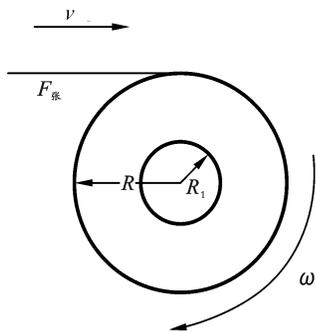


图1 收卷端受力图

Fig.1 Wind end force diagram

根据收卷过程的力学理论分析^[9]可知, 张力控制系统主要受线速度和卷径的影响, 随着收卷过程的进行, 卷径增大, 转动惯量也随之增大, 这种变化带来的影响是无法避免的。

为了使控制系统始终保持恒定, 需要不断降低电机转速。由力矩平衡方程可得:

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = M - FR_1 - M_f \quad (1)$$

式中: M 为输出动力矩, $N \cdot m$; M_f 为阻力矩, $N \cdot m$; R_1 为卷筒卷径, m ; ω 为角速度, rad/s ; J 为转动惯量, $kg \cdot m^2$ 。转动惯量 J 主要包括卷材及卷轴的转动惯量, 其表达式为:

$$J = J_{R_0} + J_{R_1} = \frac{1}{2} \rho_1 \pi b R_0^4 + \frac{1}{2} \rho \pi b (R_1^4 - R_0^4) \quad (2)$$

式中: J_{R_0} 和 J_{R_1} 分别为卷轴和卷材的转动惯量, $kg \cdot m^2$; ρ 和 ρ_1 分别为卷材和卷轴的密度, kg/m^3 ; R 、 R_1 分别为卷材和卷轴的半径, m ; b 为卷材的幅宽, m 。

为方便计算, 将收卷辊筒转动惯量简化为:

$$J = \frac{1}{2} \rho_1 \pi b R_0^4 + J_0 \quad (3)$$

$$J_0 = \frac{1}{2} \pi b (\rho_1 - \rho) R_0^4 \quad (4)$$

$$F = \frac{M}{R_1} - \frac{M_f}{R_1} - \left(\frac{3}{4} b \rho \delta - \frac{J_0 \delta}{2\pi R_1^3} \right) v^2 \quad (5)$$

式中: δ 为材料厚度, μm 。由此可知, 收卷张力控制系统是非线性时变系统。为了能够稳定地控制系统, 需要在控制过程中采用PID闭环张力速度控制。同时, 提出了利用L-WOA整定PID控制器的参数。

2 PID控制器的数学模型

PID控制器本质上是依赖于过去的误差、当前的误差以及对未来误差的预测从而对系统进行控制。事实上, 积分部分作用于过去误差的平均值, 比例部分作用于现在的误差, 推导部分作用于基于线性外推的未来误差预测。其输入信号 $e(t)$ 是给定信号与反馈信号的差值, 输出信号 $u(t)$ 是控制量, 两者之间的关系见式(6)。

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (6)$$

K_p 越大, 比例环节越明显, 系统响应越快, 同时系统越稳定。随着 K_p 的增加, 误差变大。 K_i 越小, 对积分环节的作用越明显, 可令系统稳态误差不断减小, 但是会在一定程度上影响系统的响应速度, 从而延长调节时间。 K_d 越大, 超调量抑制效果越明显, 可以使系统振荡的衰减作用越小, 但 K_d 过大会使系统的响应速度变慢。

本文的收卷系统设置张力设定值为输入, 伺服电机转速为输出。利用改进鲸鱼算法PID控制对系统的反馈进行调节, 同时将偏差变化率作为其输入, 最核心之处在于找出一组最合适的 K_p 、 K_i 和 K_d , 使该控制系统的误差性能指标最优。PID控制器框图如图2所示。图2中, d/dt 代表对时间 t 的导数运算, 表示变化率。

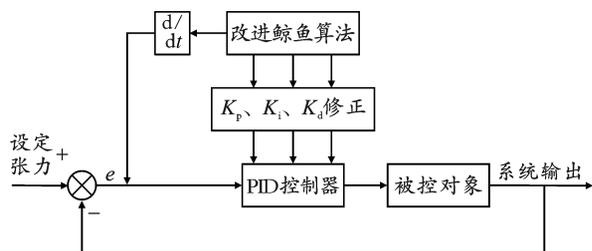


图2 PID控制器框图

Fig.2 Block diagram of PID controller

3 鲸鱼算法和改进鲸鱼算法

3.1 鲸鱼算法

鲸鱼算法是一种模拟座头鲸狩猎行为的智能优化算法^[7], 座头鲸独特的觅食方式被称为泡泡网觅食法。基础WOA算法模拟了该觅食方式, 并将其划分为包围猎物、气泡网捕食、搜索猎物三个阶段。

1) 包围猎物。鲸鱼的搜索范围是全局解空间。首先确定食物的位置, 再判断是否是最佳捕食位置, 因此需要不断对食物的位置进行更新。

2) 捕食猎物。鲸鱼捕食主要有两个机制, 即包围捕食和气泡网捕食, 因此WOA算法通过概率选择捕食方式。

3) 搜索猎物。为保证增强算法的全局寻优能力, WOA算法会不断计算鲸鱼之间的距离, 以此来对位置进行更新, 从而实现随机搜索。

3.2 改进鲸鱼算法

基础的WOA算法存在算法精度低、较难达到全局最优、收敛速度慢和容易陷入局部最优等弊端, 因此该算法在应用时有一定的局限性。针对这些缺点, 从提高算法搜索能力和局部开发能力, 以及防止陷入局部最优这三个方面着手, 对鲸鱼算法进行改进。

3.2.1 非线性收敛因子

收敛因子的变化对算法的开发能力有很大的影响, 为了提高算法的搜索能力和开发能力, 给出了一种非线性变化策略^[10]:

$$a = 2 - 2 \sin\left(\lambda \frac{t}{t_{\max}} \pi + \sigma\right) \quad (7)$$

式中: a 为收敛因子; t_{\max} 为最大迭代次数; t 为当前迭代次数; λ 和 σ 为相关参数, 本文选取 $\lambda=1/2$, $\sigma=0$ 。

3.2.2 自适应权重策略

为了避免算法陷入局部最优, 引入自适应权重策略^[11]。该改进策略可以使算法在前期保持较强的全局搜索能力, 在后期保持较强的局部搜索能力。具体改进方法定义如下:

$$\omega = \frac{1}{\lambda + \varphi} \cdot \left(\lambda \frac{t^\lambda}{t_{\max}^\lambda} + \varphi \frac{t^\varphi}{t_{\max}^\varphi} \right) \quad (8)$$

$$X_{t+1} = \omega X^*(t) - AD \quad (9)$$

$$X(t+1) = \omega X_{\text{rand}}(t) - AD \quad (10)$$

$$X(t+1) = D e^{bl} \cos(2\pi l) + (1 - \omega) X^*(t) \quad (11)$$

式中: $\lambda=2$, $\varphi=2$, $0 < \omega < 1$, l 为随机数, A 为调整因子, D 为差分向量, $X_{\text{rand}}(t)$ 为当前随机选择的个体的位置。

3.2.3 利维飞行

为了避免算法跳出局部最优解, 引入利维飞行策略^[12], 以保证算法的局部和全局搜索同时进行, 确保物体可以在不同的地方进行搜索。运动公式如下:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_{\text{worst}}^t - X_{i,j}^t}{i^2}\right) & i > \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + \frac{u}{|v|^{1/\lambda}} & i \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: X_p^{t+1} 为当前发现者占领的最优位置, X_{worst}^t 为当前第 t 代最差个体的位置; u 和 v 标准正态分布的随机变量, $u \sim N(0, \sigma_u^2)$, $v \sim N(0, \sigma_v^2)$, σ_u 和 σ_v 均为步长尺度因子。

3.2.4 算法改进流程

对基础的鲸鱼算法采用非线性因子、自适应权重和利维飞行三种改进策略进行改进。改进鲸鱼算法流程图如图3所示。

4 算法改进结果和仿真结果分析

综合上述的理论分析, 采用Matlab和Simulink对收卷张力控制系统整定PID控制器的参数进行仿真。

4.1 改进鲸鱼算法

采用3种改进策略对鲸鱼算法进行了改进。为测试改进鲸鱼算法(L-WOA)的有效性, 采用8种不同的测试函数, 对L-WOA算法与鲸鱼算法(WOA)、蝴蝶算法(BOA)^[13]、灰狼算法(GWO)^[14]、引力搜索算法(GSA)^[15]、粒子群算法(PSO)^[16]和人工蜂群算法(ABC)^[17]进行了对比, 结果如图4所示。实验设置迭代次数均为100, 所有算法的种群规模数设定为30。由图4可以看出, 相较于其他几种算

法, L-WOA 曲线的收敛速度最快; L-WOA 算法的适应度远小于另外几种算法, 适应度值越小越接近理论最优值。这一结果表明, L-WOA 算法的收敛精度和收敛速度优于其他几种算法, 有较好的优化性能。

4.2 仿真效果分析

由受力分析(见图 1)可知, 线速度对收卷张力起决定性的作用, 因此需要通过变频器控制电机的输出转矩, 进而控制收卷端的线速度。本文采用高性能矢量控制驱动器和三相异步变频调速电机。通过查电动机手册和计算得到控制系统中被控对象的传递函数:

$$G(s) = \frac{3.2}{s^2 + 2.36s + 1} \quad (13)$$

式中: s 为拉普拉斯变换中的复变量。

在 Simulink 中, 微分环节与一阶环节类似, Simulink 仿真如图 5 所示。

在仿真实验中, 改进鲸鱼算法参数设置为: 种群规模数量为 30, 维数为 3, 最大迭代次数为 100, K_p 、 K_i 、 K_d 的取值上界均为 10, 下界均为 0。经过算法整定之后, 得到的 K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 0.814 7、0.853 0、0.751 3。为了能够增强改进的效果, 用粒子群算法、鲸鱼算法和改进鲸鱼算法进行了多次实验。同时, 对三种算法整定的 PID 系统阶跃响应输出曲线进行了对比, 结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 相较于其他算法, 改进鲸鱼算法优化的 PID 在速度和精度上有极大的提升, 在超调量和调节时间上有明显的优势, 能够使控制系统始终处于稳定输出状态。

5 结 论

通过建立张力控制运动数学模型, 针对传统 PID 控制器采用经验法进行整定时费时费力的弊端, 采用改进的鲸鱼优化算法, 对 PID 参数进行整定, 同时采用 MATLAB 软件对其进行了仿真。仿真结果表明, 与其他智能算法相比, 经过改进鲸鱼算法整定 PID 参数, 精度更高, 速度更快, 同时可以使控制系统的超调量更小, 稳定性更高, 所取得的控制效果更好, 可以得到最合适的一组 PID 参数。综上可知, 经过改进鲸鱼算法优化的 PID 控制器在工业控制领域有良好的发展前景。

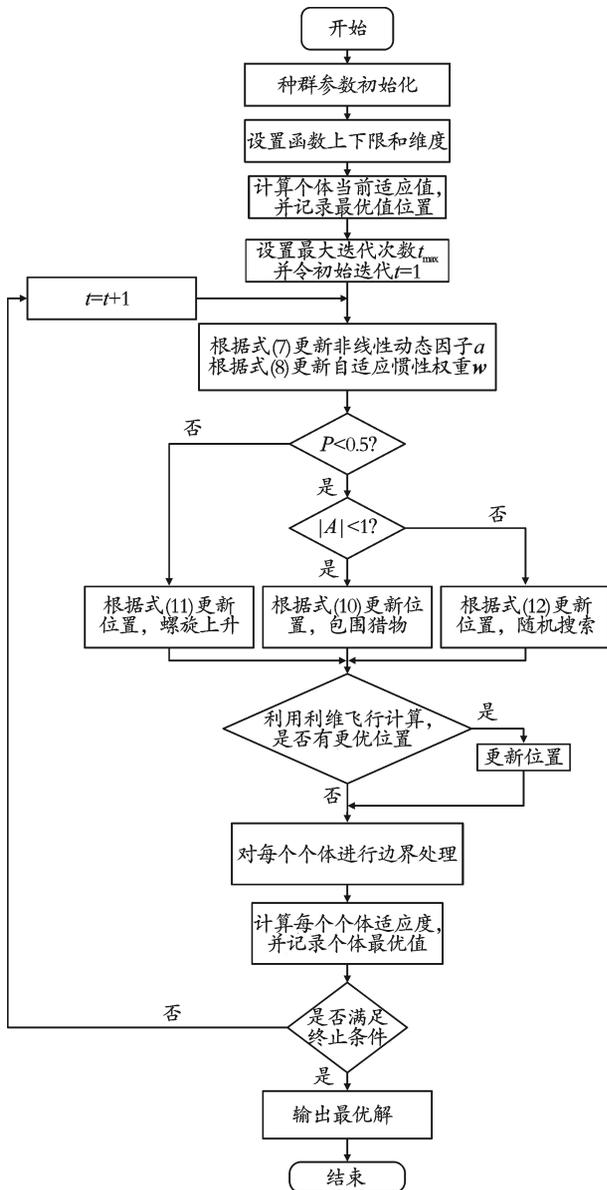
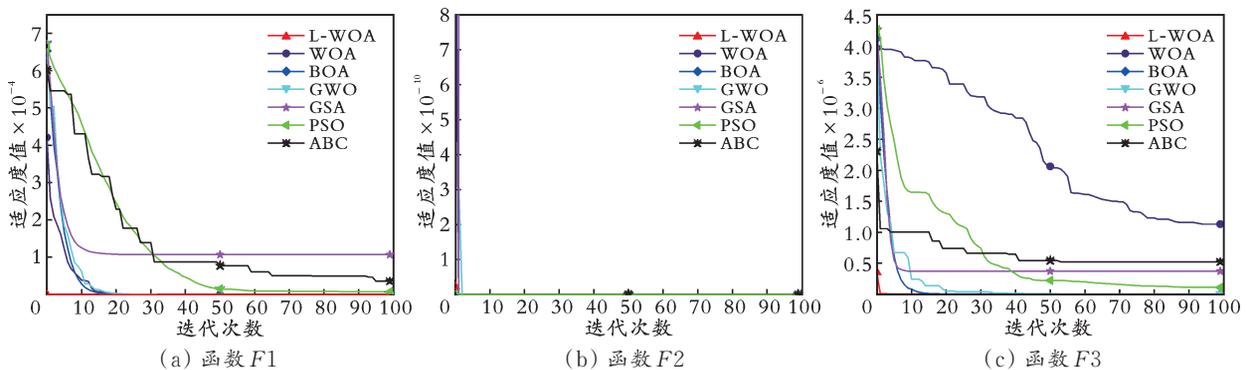


图 3 改进鲸鱼算法流程图

Fig.3 Flowchart of the improved whale algorithm



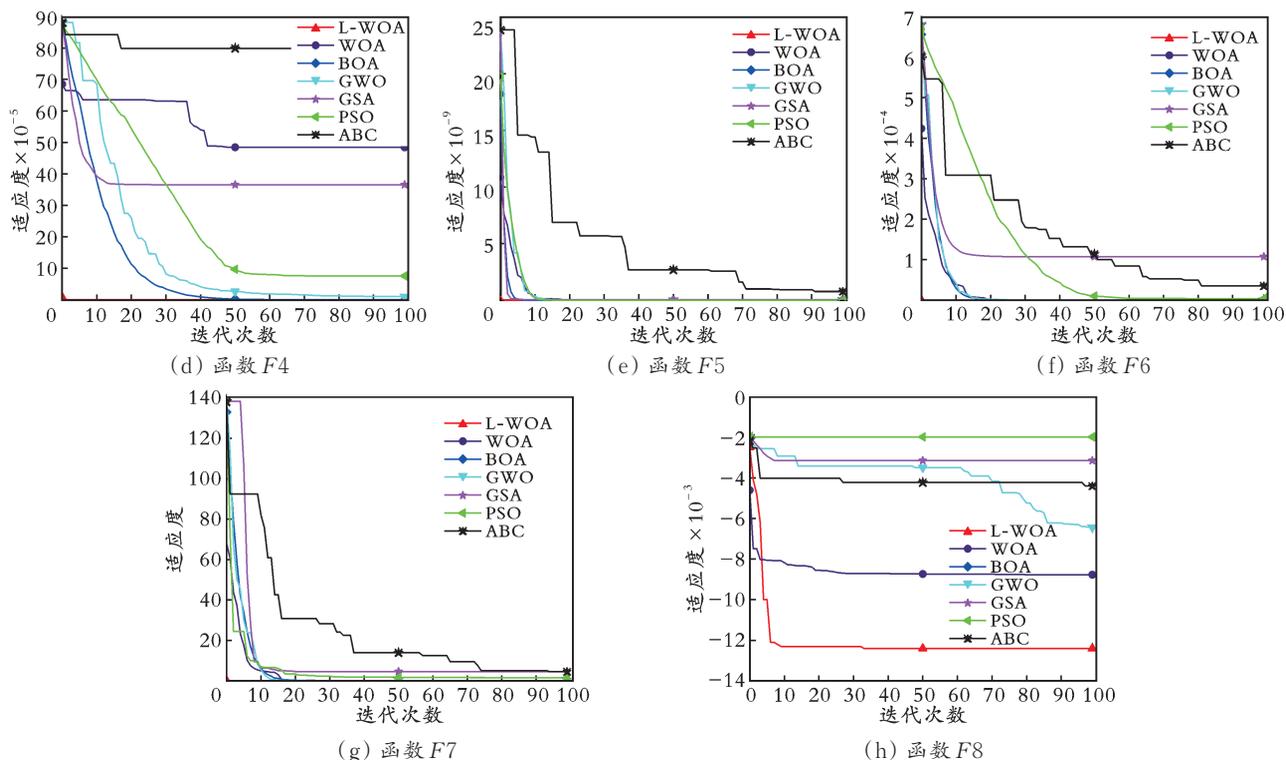


图 4 多种算法的适应度

Fig.4 The fitness of multiple algorithms

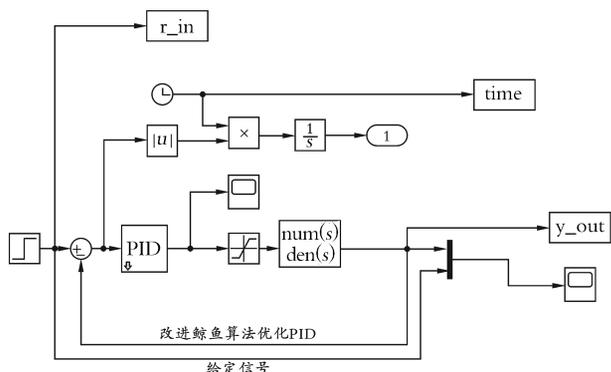


图 5 Simulink 仿真

Fig.5 Simulink simulation

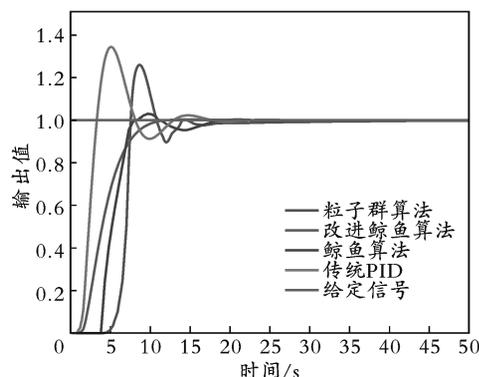


图 6 PID 系统阶跃响应输出曲线

Fig.6 PID system step response output curve

参 考 文 献

[1] 刘宁, 柴天佑. PID 控制器参数的优化整定方法[J]. 自动化学报, 2023, 49(11): 2272-2285.
 LIU N, CHAI T Y. An optimal tuning method of PID controller parameters[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(11): 2272-2285.

[2] 陈永庆. 基于 Z-N 算法的 PID 炉温控制[J]. 大连交通大学学报, 2008, 29(2): 50-53.
 CHEN Y Q. PID furnace temperature control based on Z-N algorithm[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2008, 29(2): 50-53.

[3] 梁入云, 郭金妹, 吴爱国, 等. 基于自适应神经网络模糊 PID 物料卷绕张力控制系统的研究与设计[J]. 科技与创新, 2023(2): 29-32.
 LIANG R Y, GUO J M, WU A G, et al. Research and design of material winding tension control system based on adaptive neural network fuzzy PID[J]. Science and Technology & Innovation, 2023(2): 29-32.

[4] CAO F L. PID controller optimized by genetic algorithm for direct-drive servo system [J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(1): 23-30.

[5] 郭鹏程, 张力平, 赵顿. 基于改进蚁群算法的 PID 参数优化[J]. 南方农机, 2021, 52(19): 158-160.

- GUO P C, ZHANG L P, ZHAO D. PID parameter optimization based on improved ant colony algorithm [J]. South Agricultural Machinery, 2021, 52(19): 158-160.
- [6] KOUASSI B A, ZHANG Y M, MBYAMM KIKI M J, et al. PID controller parameters enhanced founded on artificial fish swarm algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1457(1): 012003.
- [7] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [8] 左炳辉, 刘振武, 刘世同. 恒张力恒速度卷绕控制系统的设计及应用[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(6): 19-21.
- ZUO B H, LIU Z W, LIU S T. Design and application of constant tension and constant speed winding control system[J]. Techniques of Automation and Applications, 2021, 40(6): 19-21.
- [9] 朱万秋, 苑迪文, 曹承东, 等. 基于模糊自适应PID的恒张力卷绕系统设计[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(7): 25-27.
- ZHU W Q, YUAN D W, CAO C D, et al. Design of constant tension winding system based on fuzzy adaptive PID[J]. Industrial Control Computer, 2020, 33(7): 25-27.
- [10] NING G Y, CAO D Q. Improved whale optimization algorithm for solving constrained optimization problems[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2021, 2021(1): 1-13.
- [11] LIU L S, ZHANG R S. Multistrategy improved whale optimization algorithm and its application [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: 3418269.
- [12] LING Y, ZHOU Y Q, LUO Q F. Lévy flight trajectory-based whale optimization algorithm for global optimization [J]. IEEE Access, 2017, 5: 6168-6186.
- [13] ARORA S, SINGH S. Butterfly optimization algorithm: A novel approach for global optimization [J]. Soft Computing, 2019, 23(3): 715-734.
- [14] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [15] RASHEDI E, NEZAMABADI-POUR H, SARYAZDI S. GSA: A gravitational search algorithm [J]. Information Sciences, 2009, 179(13): 2232-2248.
- [16] WANG D S, TAN D P, LIU L. Particle swarm optimization algorithm: An overview [J]. Soft Computing, 2018, 22(2): 387-408.
- [17] KARABOGA D, BASTURK B. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 687-697.

(编辑 张 芳)