

电液伺服系统多PID控制器参数整定优化

冯浩^{1†}, 姜金叶², 宋倩玉¹, 马伟³, 殷晨波³, 曹东辉⁴

(1. 南京信息工程大学 人工智能学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 计算机学院, 江苏 南京 210044;
3. 南京工业大学 挖掘机关键技术联合研究所, 江苏 南京 211816; 4. 三一重机有限公司, 江苏 昆山 215300)

摘要: 为了解决挖掘机机器人动臂、斗杆和铲斗不同电液伺服系统中多个比例-积分-微分(PID)控制器参数优化的难题, 提高挖掘机机器人铲斗齿尖轨迹跟踪精度, 采用改进的粒子群算法(PSO)对多PID控制器参数进行整定优化。首先, 建立电液伺服系统的数学机理模型, 在理论模型的基础上, 采用递推最小二乘辨识法(RLS)得到实际的机理模型。其次, 提出一种改进的PSO算法, 采用非线性自适应惯性权重、引入异步变化策略、设计精英变异方法。接着, 搭建仿真验证平台, 跟踪正弦轨迹, 比较传统Z-N参数整定方法、基本PSO算法和改进PSO算法的差别。最后, 以挖掘机机器人最常见的整平为代表工况, 基于23 t挖掘机机器人实验平台进行实验验证。实验结果表明, 改进PSO算法的跟踪精度最高, 与基本PSO算法相比, 明显提高了轨迹跟踪精度。

关键词: 电液伺服系统; 机器人; 轨迹控制; 粒子群算法; 智能控制

引用格式: 冯浩, 姜金叶, 宋倩玉, 等. 电液伺服系统多PID控制器参数整定优化. 控制理论与应用, 2024, 41(4): 763–767

DOI: 10.7641/CTA.2023.20271

Multi-PID controller parameters optimization of electro hydraulic servo system

FENG Hao^{1†}, JIANG Jin-ye², SONG Qian-yu¹, MA Wei³, YIN Chen-bo³, CAO Dong-hui⁴

(1. School of Artificial Intelligence, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;
2. School of Computer Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;
3. United Institute of Excavator Key Technology, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China;
4. SANY Group Co., Ltd., Kunshan, Jiangsu 215300, China)

Abstract: In order to solve the problem of parameters optimization of multi-proportional-integral-derivative (PID) controllers in different electro-hydraulic servo systems of boom, stick and bucket for robotic excavator, and improve the tracking accuracy of bucket tooth tip, the parameters of PID controllers are optimized by an improved particle swarm optimization algorithm (PSO). Firstly, the mathematical mechanism model of electro-hydraulic servo system is established. Based on the theoretical model, the transfer function is obtained by recursive least square identification method (RLS). Secondly, an improved PSO algorithm is proposed, which adopts nonlinear adaptive inertia weight, introduces asynchronous change strategy, designs elite mutation method. Then, a simulation verification platform is build to track the step and sinusoidal trajectory, and compare the differences between the traditional Z-N method, the basic PSO algorithm and the improved PSO algorithm. Finally, taking the leveling and slope repair as the representative working condition, the experimental verification is carried out based on a 23 ton robotic excavator experimental platform. The experimental results show that the improved PSO algorithm has the highest tracking accuracy, and significantly improves the trajectory tracking accuracy compared with the basic PSO algorithm.

Key words: electro hydraulic servo system; robot; trajectory control; PSO; intelligent control

Citation: FENG Hao, JIANG Jin-ye, SONG Qian-yu, et al. Multi-PID controller parameters optimization of electro hydraulic servo system. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(4): 763–767

收稿日期: 2022-04-14; 录用日期: 2023-08-05.

†通信作者. E-mail: fenghao@nuist.edu.cn; Tel.: +86 15062286021.

本文责任编辑: 杨辰光.

国家自然科学基金项目(52105064), 江苏省自然科学基金项目(BK20221342), 国家重点研发计划项目(2021YFB2011904), 南京信息工程大学科研启动经费项目(2021R042)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (52105064), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20221342), the National Key Research and Development Program of China (2021YFB2011904) and the Research Start-up Fund of NUIST (2021R042).

1 引言

装配电液伺服系统的挖掘机器人在基础设施建设、采矿、能源等领域发挥着不可替代的作用^[1-2]。由于电液伺服系统的非线性、死区、时变等特性,只有经验丰富且技术娴熟的驾驶员才能完成高精度操作任务,如整平和修坡。近年来,学者们的研究重点集中于电液伺服系统的轨迹控制方面^[3-4]。虽然多种控制策略已经得以应用,但是工程结构复杂,需要研究一种结构简单、控制性能高的控制方法。

比例积分微分控制 (proportional integral derivative, PID) 已经成功应用于多种工程领域,最优PID参数的整定是研究的重点,然而,传统的参数优化方法存在计算繁杂、周期长等缺点。近年来,智能PID引起广泛关注。自粒子群 (particle swarm optimization, PSO) 算法于1995年提出^[5]以来,已经成功应用于多个领域,如PID参数整定优化^[6]、路径规划^[7]、参数优化^[8]和机器人^[9]。

基本PSO算法仍然存在一些缺点,如收敛速度慢、易解出局部最优解等。学者们试图从种群拓扑的角度提高PSO算法的性能^[10-12]。此外,一些研究基于不同算法的优缺点,将PSO算法与其他方法组合使用^[13-14]。学者们从不同角度对基本PSO算法进行了改进,以提高其性能,这可以分为3个方面:重置参数、拓扑结构以及与其他方法相结合。

为了提高挖掘机器人在不同工况下电液伺服系统多PID控制器(动臂、斗杆和铲斗三联电液伺服机构的3组PID参数)的控制性能,满足轨迹控制精度要求,本文提出一种改进PSO算法优化挖掘机机器人动臂、斗杆和铲斗不同电液伺服系统中多个PID控制器参数,以提高轨迹跟踪精度。

2 电液伺服系统概况

图1为挖掘机机器人电液伺服系统的示意图,为了清晰直观地描述系统,只给出了单联。单联包括油液控制回路、供油元件、辅助回路和执行机构。

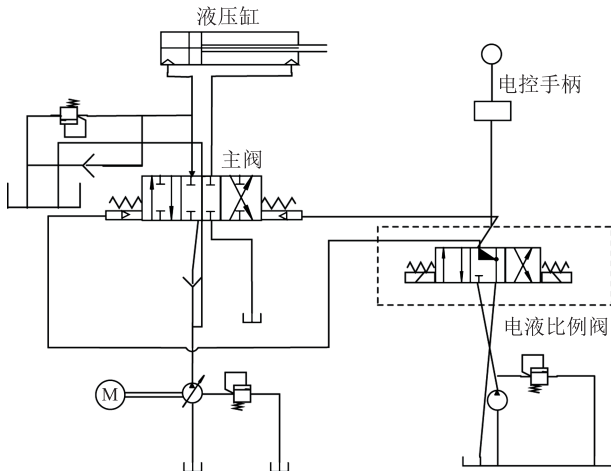


图1 电液伺服系统示意图(单联)

Fig. 1 Schematic diagram of the electro-hydraulic position servo system (single link)

3 PID控制策略设计

3.1 PID控制

PID控制是根据输入 $r(t)$ 与输出 $y(t)$ 的偏差 $e(t) = y(t) - r(t)$ 进行控制,将偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量 $u(t)$,控制规律为

$$u(t) = e(t)K_P + \int_0^t e(t)dtK_I + \frac{de(t)}{dt}K_D, \quad (1)$$

其中: K_P 为比例增益, K_I 为积分增益, K_D 为微分增益。

3.2 基本PSO算法

PSO算法最初的研究背景是鸟类捕食行为。在 D 维搜索空间中,粒子的总群为 M 。粒子 i 的位置 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, $i = 1, 2, \dots, M$,速度 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。为了避免无目标迭代,位置和速度范围为 $[X_{\min}, X_{\max}]$, $[V_{\min}, V_{\max}]$ 。粒子 i 的最佳位置称为个体最佳位置 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$,全局最佳位置为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 。粒子根据以下等式更新自己的位置和速度:

$$\begin{cases} v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t), \\ x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1}, \end{cases} \quad (2)$$

其中: $d = 1, 2, \dots, D$; t 为迭代次数; ω, c_1, c_2 为惯性权重; r_1, r_2 为学习系数。

3.3 改进PSO算法

基本PSO算法存在早熟或陷入局部最优解的可能,因此,在基本PSO算法中引入非线性自适应惯性权重、异步变化策略和精英变异操作,建立了一种改进的粒子群算法。具体改进如下:

设计 ω 非线性自适应方法,具体为

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})(f_i - f_{\text{avg}})}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f_i \geq f_{\text{avg}}, \\ \omega_{\max}, & f_i < f_{\text{avg}}, \end{cases} \quad (3)$$

其中: f_i 是粒子 i 的适应度值; $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ 是 ω 的最大值和最小值; f_{avg}, f_{\min} 分别是当前所有粒子的平均适应度和最小适应度。

异步变化策略为

$$\begin{cases} c_1 = c_{11} - \frac{t}{T_{\max}}(c_{11} - c_{12}), \\ c_2 = c_{21} + \frac{t}{T_{\max}}(c_{22} - c_{21}), \end{cases} \quad (4)$$

其中: $c_{11}, c_{21}, c_{21}, c_{22}$ 是 c_1 和 c_2 的初始值和最终值; T_{\max} 是最大迭代次数。

精英变异策略 P_g^* 为

$$\begin{cases} P_g^* = P_g + \frac{\sum_{i=1}^M v_{id}}{M} (\frac{1}{2} + \frac{b}{\pi}), \\ b = \arctan(\exp(\frac{-30t}{T_{max}})(1 - \frac{r}{r_{max}})), \\ r = |P_g - \frac{\sum_{i=1}^M P_i}{M}|. \end{cases} \quad (5)$$

利用适应度函数计算每个粒子的适应度值, 适应度函数 f 为

$$f = \frac{1}{J} = \int_0^\infty (w_1|e(t)| + w_2u^2(t) + w_4|y(t) - y(t-1)|)dt + w_3t_u, \quad (6)$$

其中 w_1-w_4 为系数.

改进 PSO 算法优化 PID 控制器参数的操作步骤为

- 步骤 1 设置优化参数范围;
- 步骤 2 基于式(3)-(4)计算惯性权重和学习系数, 然后基于式(2)计算位置和速度;
- 步骤 3 根据式(6)计算每个粒子的适应度;
- 步骤 4 判断粒子位置质量;
- 步骤 5 基于式(5)对最佳全局位置进行变异, 基于式(6)计算适应度;
- 步骤 6 循环步骤2-5, 满足收敛条件后结束.

4 实验平台

4.1 挖掘机机器人实验平台

实验平台如图2所示, 参数如表1所示.



图2 实验室三-SY235挖掘机机器人

Fig. 2 Laboratory SANY SY235 robotic excavator

4.2 系统模型

以铲斗举升为例, 采用递推最小二乘法(recursive least square, RLS)求解电液伺服系统的模型. 系统离散差分方程为

$$\begin{aligned} y(k) + a_1y(k-1) + a_2y(k-2) + \\ a_3y(k-3) + a_4y(k-4) = \\ b_1u(k-1) + b_2u(k-2) + \\ b_3u(k-3) + b_4u(k-4), \end{aligned} \quad (7)$$

其中: u 和 y 分别是系统在不同时间的输入和输出; $a_1,$

$a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4$ 为未知参数.

表1 传感器及其参数

Table 1 Sensors used in the experiment

传感器	型号	主要参数
挖掘机机器人	SY235	22900 kg, 34.3 MPa, 125/2100 kW/rpm
位移传感器	SH30-2500-V2	0~2500 mm
数据采集卡	NI USB-6215	16 AI, 2 AO
动臂油缸	JSY23-DB	1295 mm
斗杆油缸	JSY23-DG	1675 mm
铲斗油缸	JSY23-CD	1156 mm
USB-CAN卡	USBCAN-II	8000 fps
控制器硬件	283H	150 MHz
电子罗盘	SCM225	0~360°
压力传感器	625T4-16-Z23	0~400 bar

将阶跃信号作用于铲斗举升. 选择与位移数据拟合率为 96.9% 的作为最终结果, $a_1 = -1.702, a_2 = -0.234, a_3 = 1.654, a_4 = -0.715, b_1 = -2.703, b_2 = 8.062, b_3 = 11.14, b_4 = -15.04$. 实际测量和模型的位移输出如图3所示. 模拟结果与实测位移误差不超过 50 mm.

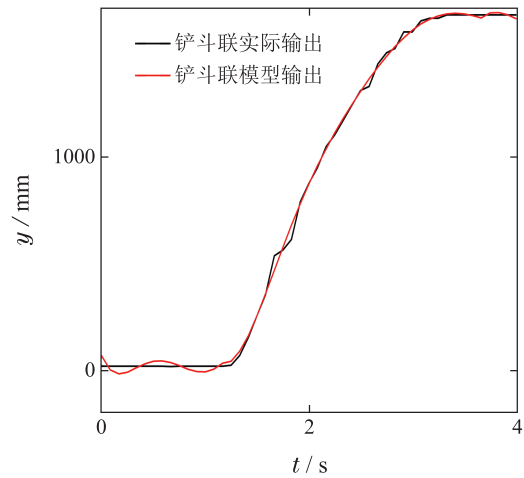


图3 实际测量和模型的位移输出

Fig. 3 Measured and simulated model output

5 仿真实验

对于同一个电液伺服系统, 比较传统 Z-N 参数整定方法(ZN)、基本 PSO 算法 (basic PSO, PSO) 和改进 PSO 算法 (improved PSO, IPSO) 的差别, 评估所提出控制器的性能. 为了方便起见, 对铲斗控制系统进行了仿真. 采用正弦波信号作为参考轨迹. 仿真参数如表2所示.

采用频率为 0.25 Hz、振幅为 0.4 m 的正弦波作为位置输入. 位置响应如图4所示. 最大误差均出现在正弦信号的峰值或谷值附近, 因为此时液压缸处于方向切换状态. ZN 控制器误差最大, 存在 0.37 s 滞后, 无法有效跟踪正弦信号. IPSO 和 BPSO 控制器的滞后时

间分别为 0.22 s 和 0.26 s, IPSO 的滞后时间减少了 0.04 s.

表 2 BPSO和IPSO控制器相关的参数值

Table 2 Parameters involved in BPSO and IPSO

符号	参数	BPSO	IPSO
M	种群数量	30	/
T_{max}	最大迭代次数	100	/
c_1	学习系数1	2	/
c_2	学习系数2	2	/
c_{11}	c_1 初始值	/	0.5
c_{12}	c_1 终止值	/	2
c_{21}	c_2 初始值	/	0.5
c_{22}	c_2 终止值	/	2
ω	惯性权重	0.6	/
ω_{max}	ω 最大值	/	0.9
ω_{min}	ω 最小值	/	0.4
w_1	系数1	0.999	
$[X_{1 min}, X_{1 max}]$	K_P 范围	[0,20]	
w_2	系数2	0.001	
$[X_{3 min}, X_{3 max}]$	K_I 范围	[0,10]	
w_3	系数3	2	
$[X_{2 min}, X_{2 max}]$	K_D 范围	[0,10]	
w_4	系数4	100	
$[V_{1 min}, V_{1 max}]$	速度范围1	[0,10]	
$[V_{2 min}, V_{2 max}]$	速度范围2	[0,5]	
$[V_{3 min}, V_{3 max}]$	速度范围3	[0,5]	

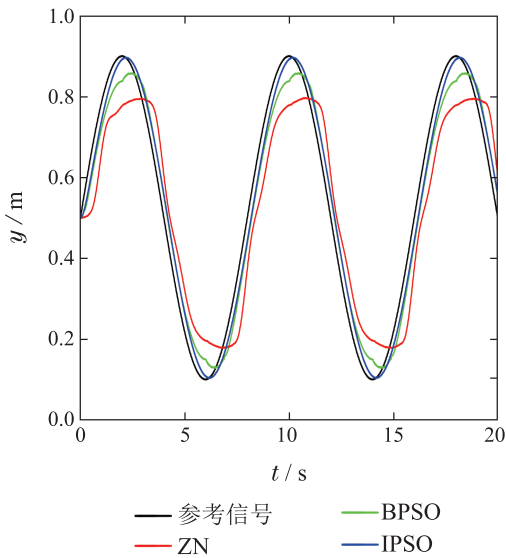


图 4 铲斗控制系统在跟踪正弦信号时的响应

Fig. 4 Comparisons of position responses with sinusoidal wave reference

6 实验验证

利用整平典型工况进行轨迹跟踪实验,如图5所示.两种工况的轨迹距离为2000 mm,操作时间为10 s.

对于每种控制方法,都进行3次实验,选择误差最小的一组轨迹.具体过程如下:首先,将铲斗调整至轨

迹起点;第二,在一种控制方法下,控制铲斗齿尖沿轨迹移动;第三,移动到起点,重复两次轨迹控制实验;第四,将3条轨迹中误差最小的一组作为最终结果;最后,更换另一种控制方法,重复上述步骤,直到3种控制方法都完成了轨迹跟踪实验.在比较3种控制器的性能之前,IPSO优化的多PID控制器结果见表3.



图 5 整平典型工况

Fig. 5 Diagrammatic sketch of the level condition

表 3 多PID控制器参数

Table 3 Parameter optimization results

方法	参数	动臂	斗杆	铲斗
ZN	KP	16.44	17.04	14.56
	KI	1.71	2.85	1.21
	KD	5.53	4.28	6.49
BPSO	KP	14.72	18.68	15.47
	KI	3.10	3.82	3.25
	KD	2.59	1.71	2.46
IPSO	KP	17.89	18.57	16.23
	KI	3.22	3.10	3.25
	KD	3.15	4.32	4.75

整平工况下,将3种控制器的铲斗跟踪结果绘制在图6中.表4列出了3种控制器的评判指标:最大跟踪误差和均方根误差(root mean square errors, RMSE).

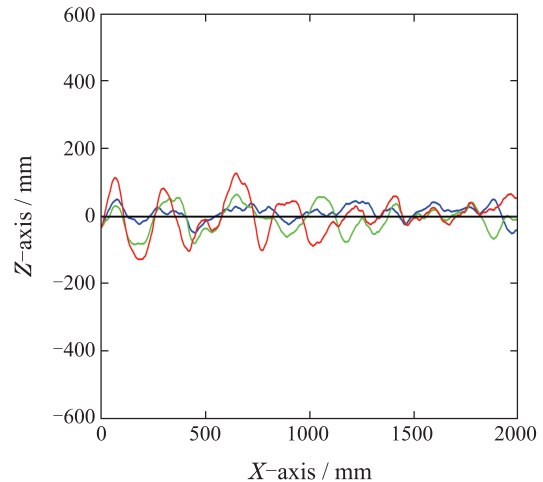


图 6 整平工况铲斗齿尖跟踪轨迹

Fig. 6 Real track trajectories of the bucket tip with leveling condition

表4 3种控制器的最大跟踪误差和均方根误差

Table 4 Tracking errors of the bucket tip using the three controllers

工况	指标	ZN	BPSO
整平最大误差		128.26	50.89
	RMSE	54.55	38.48

整平工况下, IPSO 控制器的跟踪性能最好, 跟踪误差曲线的峰值最低, 最大跟踪误差只有 50.89 mm, RSME 只有 24.19 mm. ZN 控制器的轨迹跟踪误差最大, 特别是在 0~5 s 时, 受惯性力的影响, 铲斗产生垂直位移, 跟踪轨迹有较大波动, 最大跟踪误差大于 100 mm, 达到 128.26 mm.

7 结论

为了提升电液伺服系统的性能, 尤其是轨迹精度, 改进基本 PSO 算法, 设计了基于改进 PSO 算法的 PID 控制器并用于优化动臂、斗杆和铲斗 3 个不同的电液伺服系统控制参数.

提出的非线性自适应惯性权重、学习系数异步变化和精英变异策略, 避免了基本 PSO 算法中的早熟现象. 通过正弦轨迹跟踪仿真, 验证了 IPSO 控制器的良好性能: 精度高、收敛速度快.

通过整平验证了 IPSO 控制器在实际 23 t 挖掘机机器人轨迹跟踪中的有效性. 传统 ZN、基本 PSO 和改进 PSO 控制器中, IPSO 控制器的跟踪精度最高.

基于改进 PSO 算法整定优化电液伺服系统多 PID 控制器参数可以推广应用于其他装备, 如起重机、泵车、推土机, 以及其他具有类似电液伺服系统的装备.

参考文献:

- [1] CHEN C, ZHU Z H, HAMMAD A. Automated excavators activity recognition and productivity analysis from construction site surveillance videos. *Automation in Construction*, 2020, 110: 103045.
- [2] RANJAN P, WRAT G, BHOLA M, et al. A novel approach for the energy recovery and position control of a hybrid hydraulic excavator. *ISA Transactions*, 2020, 99: 387 – 402.
- [3] KIM J, JIN M, CHOI W, et al. Discrete time delay control for hydraulic excavator motion control with terminal sliding mode control. *Mechatronics*, 2019, 60: 15 – 25.
- [4] ZHANG S Z, MINAV T, PIETOLA M, et al. The effects of control methods on energy efficiency and position tracking of an electro-hydraulic excavator equipped with zonal hydraulics. *Automation in Construction*, 2019, 100: 129 – 144.
- [5] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization. *International Conference on Neural Networks*. Perth, WA, Australia: IEEE, 1995: 1942 – 1948.
- [6] XIANG Z L, JI D M, ZHANG H, et al. A simple PID-based strategy for particle swarm optimization algorithm. *Information Sciences*, 2019, 502: 558 – 574.
- [7] LIN Xinyou, WANG Zhaorui. Adaptive multi-objective control strategy based on particle swarm optimization algorithm optimized fuzzy rules. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(6): 842 – 850. (林歆悠, 王召瑞. 应用粒子群算法优化模糊规则的自适应多目标控制策略. *控制理论与应用*, 2021, 38(6): 842 – 850.)
- [8] FENG Qian, LI Qing, WANG Yaozu, et al. Application of constrained multi-objective particle swarm optimization to sinter proportioning optimization. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(5): 923 – 932. (冯茜, 李擎, 王耀祖, 等. 约束多目标粒子群算法在烧结配矿优化中的应用. *控制理论与应用*, 2022, 39(5): 923 – 932.)
- [9] AJEIL F H, IBRAHEEM I K, SAHIB M A, et al. Multi-objective path planning of an autonomous mobile robot using hybrid PSO-MFB optimization algorithm. *Applied Soft Computing*, 2020, 89: 106076.
- [10] ZHANG W Z, LI G Q, ZHANG W W, et al. A cluster based PSO with leader updating mechanism and ring-topology for multimodal multi-objective optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019, 50: 100569.
- [11] AUGUSTO J P S C, NICOLAU A S, SCHIRRU R. PSO with dynamic topology and random keys method applied to nuclear reactor reload. *Progress in Nuclear Energy*, 2015, 83: 191 – 196.
- [12] WANG Y, LIN L. A PSO algorithm for constrained redundancy allocation in multi-state systems with bridge topology. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 68: 13 – 22.
- [13] PANT P, CHATTERJEE D. Prediction of clad characteristics using ANN and combined PSO-ANN algorithms in laser metal deposition process. *Surfaces and Interfaces*, 2020, 21: 100699.
- [14] BI K X, QIU T. An intelligent SVM modeling process for crude oil properties prediction based on a hybrid GA-PSO method. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2019, 27(8): 1888 – 1894.

作者简介:

冯浩 博士, 副教授, 目前研究方向为流体传动与控制、智能控制, E-mail: fenghao@nuist.edu.cn;

姜金叶 硕士研究生, 目前研究方向为智能控制及应用, E-mail: 202212490393@nuist.edu.cn;

宋倩玉 本科, 目前研究方向为智能控制及应用, E-mail: 202013090051@nuist.edu.cn;

马伟 硕士研究生, 目前研究方向为智能控制及应用, E-mail: mawei_iacm@163.com;

殷晨波 博士, 教授, 目前研究方向为工程机械智能化和绿色化, E-mail: yinchenbo@njtech.edu.cn;

曹东辉 博士, 高级工程师, 目前研究方向为挖掘机智能化和数字化, E-mail: caodonghui_iacm@163.com.